



## ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS PASSIVOS E ATIVOS PARA DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Gilson Coelho Machado Filho<sup>1</sup>, Hélio Marcos André Antunes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

**Resumo** – Este trabalho analisa o desempenho de diferentes técnicas passivas e ativas utilizadas na detecção de ilhamento em uma rede elétrica trifásica, considerando a condição onde a carga é alimentada por um sistema fotovoltaico. São apresentados o modelo computacional da rede, carga e sistema fotovoltaico desenvolvidos no software Matlab/Simulink®. Os resultados obtidos apontam para um melhor desempenho dos métodos ativos sobre os métodos passivos, com destaque para a técnica Deslocamento de Frequência e Deslocamento de Tensão.

**Palavras-Chave** – Detecção de Ilhamento, Ilhamento, Inversor, Sistema Fotovoltaico, Técnica Ativa, Técnica Passiva

### COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN PASSIVE AND ACTIVE METHODS FOR ISLAND DETECTION IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

**Abstract** - In this work the performance of different passive and active techniques applied to islanding detection of a three-phase electrical grid are evaluated, considering the condition where the load is supplied by a photovoltaic system. The computational model of the grid, load and photovoltaic system are developed using Matlab/Simulink® software. The obtained results point to a better performance of active methods over passive methods, highlighting the Frequency Displacement and Voltage Displacement techniques.

**Keywords** - Active Technique, Islanding Detection, Inverter, Islanding, Passive Technique, Photovoltaic System

#### I. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da demanda de energia elétrica e a preocupação ambiental as fontes alternativas de energia passaram a ganhar mais espaço no mercado. Dentre essas fontes destaca-se a geração fotovoltaica (FV), que devido a incentivos governamentais e a sua maior facilidade de instalação fizeram com que entre os anos de 2017 e 2019

houvesse um crescimento de quase 700% na geração de energia elétrica [1-4].

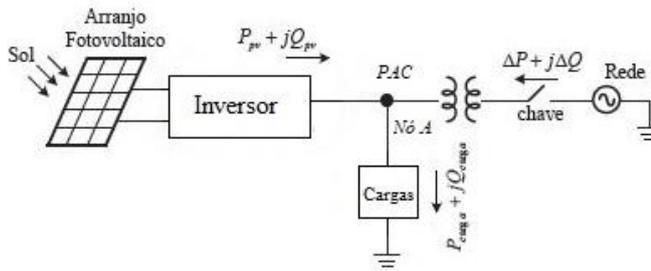
Com o crescimento da presença de geradores distribuídos (GDs) ao longo do sistema elétrico os órgãos reguladores determinaram pré-requisitos para que seja realizada a conexão à rede elétrica. Dentre esses requisitos têm-se a proteção anti-ilhamento que deverá agir no momento em que a rede elétrica principal falhar, desconectando os GDs da rede [5-8] Caso essa proteção não atue os GDs continuariam a alimentar as cargas ao seu redor, formando uma ilha energizada [9]. O ilhamento pode acontecer de forma intencional ou não-intencional, e neste artigo será considerada a condição de ilhamento não-intencional [10].

A detecção do ilhamento é importante, pois previne possíveis danos econômicos e operacionais que o funcionamento dos GDs na forma ilhada pode ocasionar. Durante a operação ilhada as concessionárias de energia não conseguem garantir a segurança e a qualidade da operação do sistema elétrico, criando uma situação de perigo para os operários que trabalham na manutenção da rede elétrica. Tal condição também poderia acarretar em possíveis danos as cargas e aos geradores conectados à rede, além de interferir em outras partes do sistema como a proteção contra curtos-circuitos [11].

Logo, visando prevenir os possíveis danos provenientes da operação ilhada, algumas normas técnicas foram desenvolvidas para avaliar a qualidade dos sistemas de proteção anti-ilhamento, como por exemplo podem ser destacadas: IEEE 929-2000, IEEE 1547-2018 e ABNT NBR IEC 62116 de 2012 [6-8].

A proteção anti-ilhamento pode ser realizada utilizando diferentes técnicas, que podem ser classificadas entre remotas e locais. As técnicas remotas possuem um custo muito maior de implementação não sendo muito utilizadas. Já as técnicas locais, mais comumente aplicadas, são divididas em técnicas passivas e técnicas ativas [11]. As técnicas passivas são baseadas no monitoramento dos parâmetros elétricos no ponto de acoplamento comum (PAC). Por sua vez, as técnicas ativas se baseiam em criar perturbações no PAC por meio do inversor do sistema FV, de modo a monitorar o efeito causado aos parâmetros elétricos do PAC [9]. Uma representação típica de um sistema FV conectado à rede (*grid-tie*) é ilustrada na Figura 1 [12].

Figura 1: Diagrama de sistema FV conectado à rede.

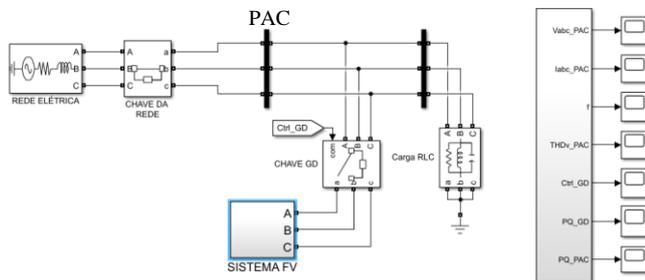


Este artigo tem como objetivo analisar por meio de simulação computacional o desempenho de técnicas de detecção de ilhamento do tipo passiva e ativa em um sistema fotovoltaico. Todo o modelo é desenvolvido no Matlab/Simulink®, sendo formado por rede elétrica trifásica de baixa tensão, carga elétrica e sistema FV.

## II. MODELO DO SISTEMA

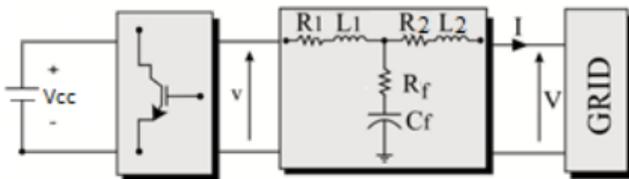
O modelo computacional utilizado para representar o sistema elétrico é apresentado na Figura 2. O diagrama é formado pela rede elétrica trifásica com tensão de linha de 220V/60 Hz, potência de curto-circuito de 1,5 MVA e relação X/R igual a 1. Já o sistema FV é formado por um inversor controlado em corrente em paralelo com a carga RLC.

Figura 2: Representação do modelo do sistema elétrico.



O sistema FV é apresentado na Figura 3, e é desenvolvido para operar como uma fonte de corrente controlada utilizando um VSI (*Voltage Source Inverter*) com modulação PWM. Na saída do conversor é utilizado um filtro LCL para filtrar os harmônicos da corrente provenientes do chaveamento [13].

Figura 3: Sistema FV operando como fonte de corrente controlada.



O sistema de controle do inversor de frequência do sistema FV é ilustrado na Figura 4. As referências do inversor são a potências ativa ( $P^*$ ) e a reativa ( $Q^*$ ). O sistema de controle possui duas malhas de corrente que operam em malha aberta,

sendo uma de eixo direto (d) e uma de quadratura (q). O sincronismo do inversor fica à cargo de um *phase-locked loop* (PLL) e o filtro LCL realiza a conexão com o PAC [13-15].

A carga RLC utilizada nas simulações é calculada conforme as prescrições da norma *IEEE Std 929-2000*. A potência média da carga é de 15 kW, e por norma a potência reativa deve ser duas vezes e meia a potência média [7].

Logo, os elementos da carga são dados por:

$$R = \frac{V^2}{P_L} = 3,22 \Omega \quad (1)$$

$$L = \frac{V^2}{2,5 * P_L * 2\pi f} = 3,42 \text{ mH} \quad (2)$$

$$C = \frac{2,5 * P_L}{V^2 * 2\pi f} = 2055,20 \mu\text{F} \quad (3)$$

Onde:

- R - Resistência da carga.
- L - Indutância da carga.
- C - Capacitância da carga.
- V - Tensão de linha da carga.
- f - Frequência da carga.
- $P_L$  - Potência média da carga.

Figura 4: Sistema de controle do inversor FV.

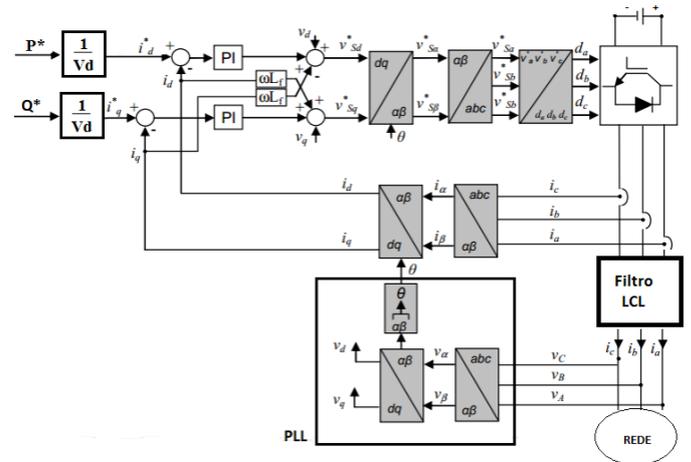


Tabela 1: Dados do inversor FV e filtro LCL.

Tensão de saída	220 V
Frequência	60 Hz
Potência nominal	20 kVA
Frequência de chaveamento	6 kHz
Filtro LCL	$L_1=2,2 \text{ mH}; R_1=25 \text{ m}\Omega$ $L_2=110,89 \mu\text{H}; R_2=25 \text{ m}\Omega$ $C_f=54,82 \mu\text{F}; R_f=0,463 \Omega$
Ganho das malhas de corrente com controlador PI	$K_I=7,4 \Omega/\text{s}$ $K_p=157,08 \Omega$

## III. TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO

Nesta seção são apresentadas algumas das técnicas comumente utilizadas na detecção de ilhamento em sistemas FV.

### A. Sub e Sobretensão (UVP/OVP) e Sub e Sobre frequência (UFP/OFP)

Esta técnica é do tipo passiva e consiste no monitoramento das variações de tensão ou frequência, comparando com valores mínimos e máximos preestabelecidos por norma. Os inversores de sistemas FV já possuem um sistema para a detecção de sub e sobretensão e sub e sobre frequência que são utilizados na proteção em momentos de flutuação da tensão e da frequência. Tais grandezas elétricas também podem ser utilizadas na detecção do ilhamento, o que diminui o custo de implementação desta técnica [16].

Da Figura 2 pode-se concluir que a soma das potências ativas e reativas no PAC (ponto de acoplamento comum) é dado por:

$$\Delta P = P_{Carga} - P_{FV} \quad (4)$$

$$\Delta Q = Q_{Carga} - Q_{FV} \quad (5)$$

Onde:

- $\Delta P$  - Variação da potência ativa no PAC.
- $\Delta Q$  - Variação da potência reativa no PAC.
- $P_{Carga}$  - Potência ativa consumida pela carga.
- $Q_{Carga}$  - Potência reativa consumida pela carga.
- $P_{FV}$  - Potência ativa injetada pelo inversor.
- $Q_{FV}$  - Potência reativa injetada pelo inversor.

Levando em consideração que o inversor FV opera com fator de potência unitário, então a potência reativa injetada pelo mesmo é nula, logo:

$$\Delta Q = Q_{Carga}$$

Sendo assim, o sistema de detecção de ilhamento irá responder conforme os valores de  $\Delta P$  e  $\Delta Q$  instantes antes da desconexão. Se  $\Delta P \neq 0$  ocorrerá uma variação no módulo da tensão no PAC, e se  $\Delta Q \neq 0$  acarretará em variações na frequência, para uma rede de baixa tensão [16].

A implementação do método consiste em um algoritmo que irá monitorar os valores de tensão eficaz e frequência no PAC, comparando-os com valores pré-estabelecidos para ambas as grandezas conforme a norma *IEE Std 929-2000*. Os valores limites utilizados nas simulações são:

- Frequência:  $59,5 \text{ Hz} < f_{pac} < 60,5 \text{ Hz}$
- Tensão:  $0,9 \text{ pu} < V_{pac} < 1,1 \text{ pu}$

### B. Detecção de harmônicos

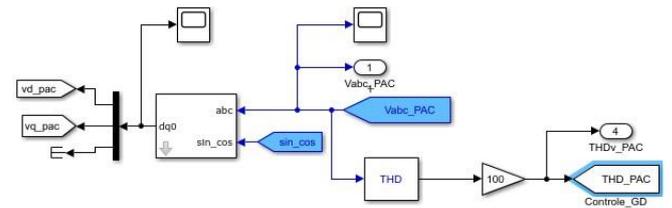
A técnica de detecção de harmônicos é do tipo passiva e baseia-se no monitoramento da taxa de distorção harmônica (TDH) da tensão no caso de inversores que operam como uma fonte de corrente controlada [16-17]. A distorção harmônica total na corrente não deve ultrapassar 5% do valor da frequência fundamental na corrente de saída do inversor [7].

Enquanto o GD está conectado à rede elétrica, os harmônicos tendem a escoar para o sistema elétrico de potência (SEP), pois o mesmo possui uma impedância equivalente muito menor do que a da carga, fazendo com que

o TDH no PAC seja pequeno. No momento em que ocorre a desconexão do SEP, os harmônicos passam a fluir em direção carga fazendo com que o TDH aumente e o ilhamento seja detectado [16-17].

Para implementar essa técnica é considerado o fato de o inversor do sistema FV é um inversor de corrente, logo o TDH da tensão é monitorado. O valor do TDH em cada fase é obtido utilizando o bloco “THD” no *Matlab/Simulink*, conforme apresentado na Figura 5. Os valores obtidos são comparados por um algoritmo a valores pré-estabelecidos. O limite máximo do TDH entre fases é de 1%.

Figura 5: Monitoramento do TDH da tensão.



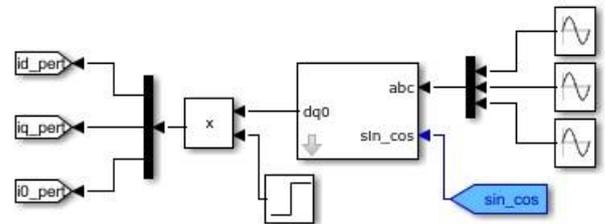
### C. Detecção de Impedância

A técnica de detecção de impedância é uma técnica ativa e se baseia na injeção de uma perturbação de corrente a partir do inversor FV sendo possível medir a taxa de variação da tensão em relação a corrente na saída do inversor, e consequentemente medir a impedância que o mesmo enxerga [16-17].

Enquanto o sistema opera normalmente conectado ao SEP as perturbações ocasionadas pelo inversor FV não afetam a impedância da rede. No entanto, a partir do momento em que a rede fica ilhada, as perturbações presentes na corrente de saída do inversor provocam uma alteração no tensão no PAC, fazendo com que seja detectado o ilhamento [16-17].

A implementação da técnica de detecção por impedância consiste na injeção de um sinal de corrente com frequência de 120 Hz, e 5 A de amplitude no PAC a partir do inversor FV conforme diagrama apresentado na Figura 6.

Figura 6: Representação da injeção da corrente como perturbação no sistema.



O ilhamento é detectado por meio do bloco apresentado nas Figuras 7 e 8, que realiza a medição da impedância visto pelo inversor FV em relação a segunda harmônica.

Enquanto o SEP está conectado ao PAC a impedância vista pelo inversor em cada fase é muito pequena, cerca de 95 m  $\Omega$ , devido à baixa impedância da rede. Porém, no momento da formação da ilha a impedância cresce abruptamente até o valor de 0,83  $\Omega$ , e esse valor é igual a impedância da carga,

conforme ilustrado na Figura 9. Sendo assim, qualquer valor de impedância acima do valor de  $0,83 \Omega$  deve fazer com que a proteção anti-ilhamento atue.

Figura 7: Obtenção da tensão e da impedância para o método de detecção por impedância.

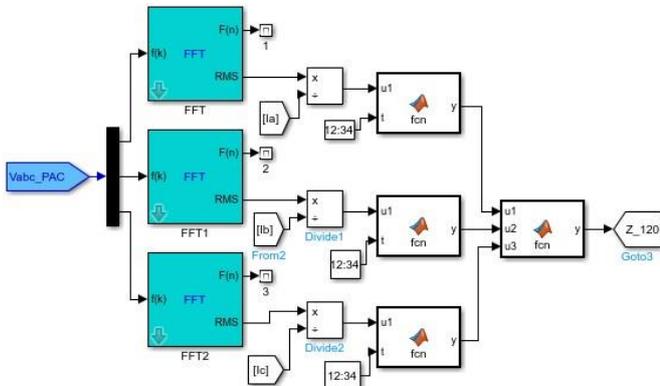


Figura 8: Obtenção da corrente para o método de detecção por impedância.

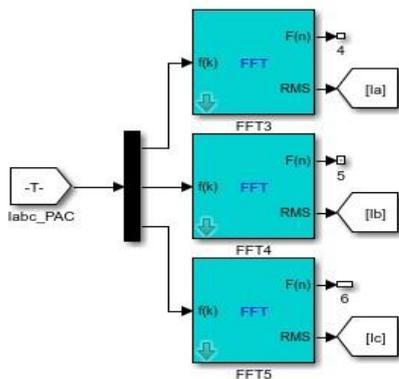
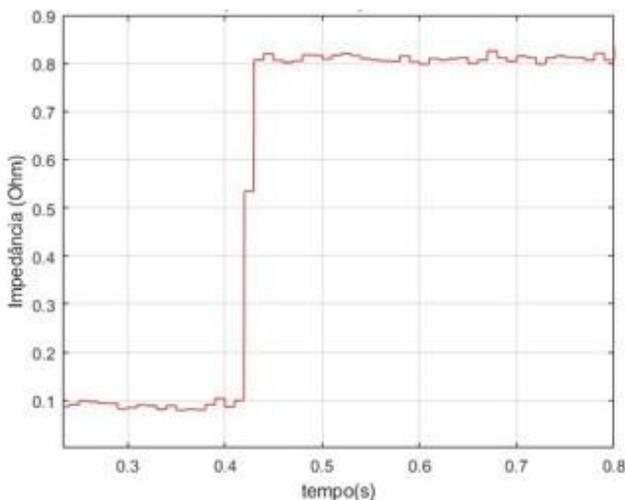


Figura 9: Impedância vista na saída do filtro LCL do inversor.



#### D. Deslocamento de Frequência (GESF) e Deslocamento de Tensão (GESV)

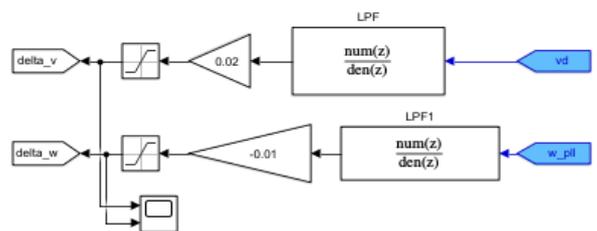
Estes métodos se baseiam em causar perturbações através de uma realimentação positiva afim de provocar alterações na frequência ou tensão durante o ilhamento [16-17]. O GESF consiste em uma realimentação positiva de potência reativa

que irá gerar uma corrente que por sua vez produzirá uma potência reativa na saída do inversor FV. Logo, no momento do ilhamento ocorrerá um deslocamento na frequência, fazendo com que a proteção de frequência atue. Já o GESV se baseia em uma realimentação positiva de potência ativa que irá gerar uma corrente que produzirá um aumento ou redução da potência ativa na saída do inversor fazendo com que no momento do ilhamento a tensão no PAC aumente ou diminua e consequentemente a proteção de tensão atue [16-17].

Diferentemente do que ocorre na técnica de detecção de impedância, a técnica GESF/GESV não tem sua eficiência prejudicada pela multiplicidade de GDs [16-17].

A estratégia para realizar as realimentações positivas de potência ativa e reativa é apresentada na Figura 10.

Figura 10: Realimentação positiva de potência ativa e reativa.



A realimentação positiva de potência ativa se dá por meio do produto da tensão de eixo direto, obtido através do PLL, pelo ganho  $\Delta P=0,02$ , produzindo uma corrente de referência “delta\_v” que irá ocasionar alterações na tensão do PAC no momento do ilhamento. A realimentação positiva de potência reativa se baseia no produto da frequência angular pelo ganho  $\Delta w=-0,01$  para produzir uma corrente de referência “delta\_w” que irá ocasionar alterações na frequência do PAC quando a ilha energizada estiver formada.

## IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Todas as simulações são realizadas considerando o inversor FV com fator de potência unitário e a carga consumindo a mesma potência que é gerada pelo sistema FV, pois essa condição é a mais crítica para a detecção do ilhamento. O inversor FV é conectado à rede em 90ms, e a abertura dos disjuntores da rede elétrica é programada para ocorrer em 0,4s para simular o ilhamento da rede. O sinal de controle do disjuntor do inversor FV nas simulações é igual a 1 quando ele está conectado ao PAC, e 0 quando ele está desconectado.

### A. Sub e Sobretensão (UVP/OVP) e Sub e Sobre frequência (UFP/OFP)

Para este caso é possível observar a partir da Figura 11 que a técnica não obteve sucesso em detectar o ilhamento. Após o ilhamento da rede elétrica em 0,4s o sinal de controle do disjuntor do inversor FV permanece igual a 1.

### B. Detecção de Harmônicos

Assim como na técnica anterior é possível avaliar por meio da Figura 12 que o método de detecção de harmônicos também não se mostrou efetivo para detectar o ilhamento da rede. Em 0,4s o  $TDH_v$  ficou menor que 1%, fazendo com que o inversor

FV ficasse conectado à rede elétrica. A maior variação de  $THD_V$  ocorre no momento da conexão do inversor ao PAC por volta de 90ms.

Figura 11: Sinal de controle do disjuntor FV: técnica OFP/UFP e OVP/UVF.

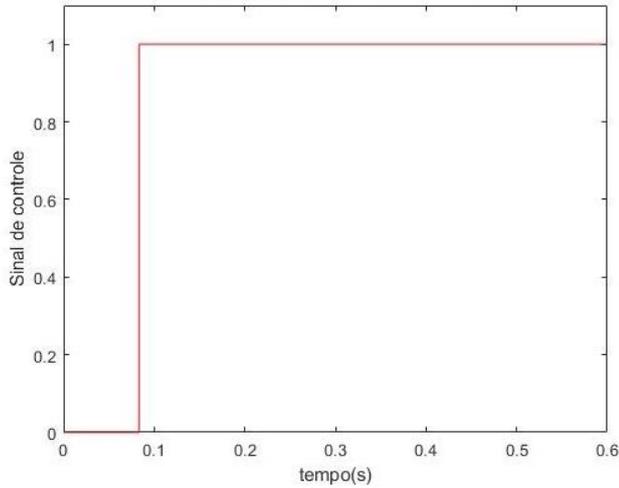
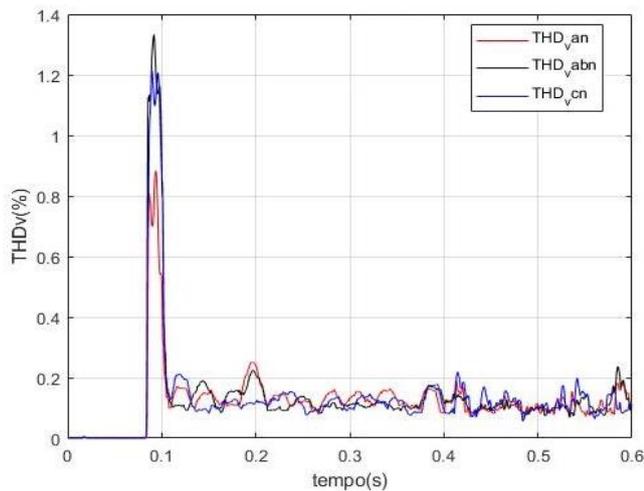


Figura 12: THD no PAC com a técnica detecção de harmônicos.



### C. Detecção de Impedância

Diferente do que ocorreu nas técnicas passivas, a técnica de detecção de impedância obteve sucesso ao detectar a ocorrência do ilhamento. Conforme resultado apresentado na Figura 13 é possível observar que o sinal de controle vai a zero no instante 0,471 s.

### D. Deslocamento de Frequência (GESF) e Deslocamento de Tensão (GESV)

A Figura 14 apresenta o comportamento da frequência durante a ocorrência do ilhamento. É possível observar que em 0,4 s começa a decair até ultrapassar o limite de 59,5 Hz por volta do instante 0,453 s, fazendo com que o disjuntor do inversor FV seja acionado conforme ilustrado a Figura 15, e desconectando o sistema FV do PAC.

Figura 13: Sinal de controle do disjuntor FV: técnica detecção de impedância.

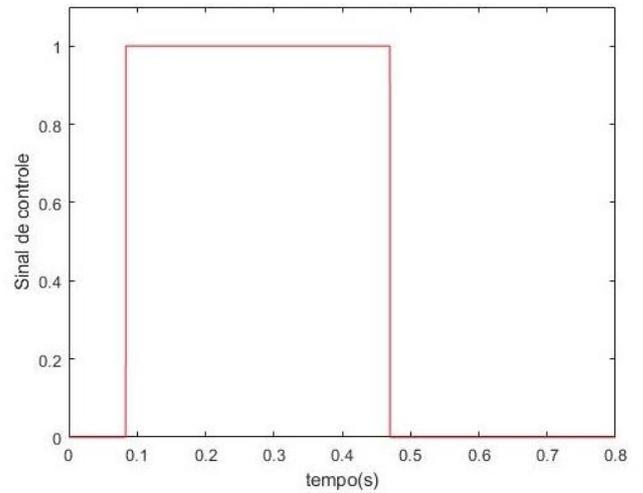


Figura 14: Frequência no PAC: técnica GESF/GESV.

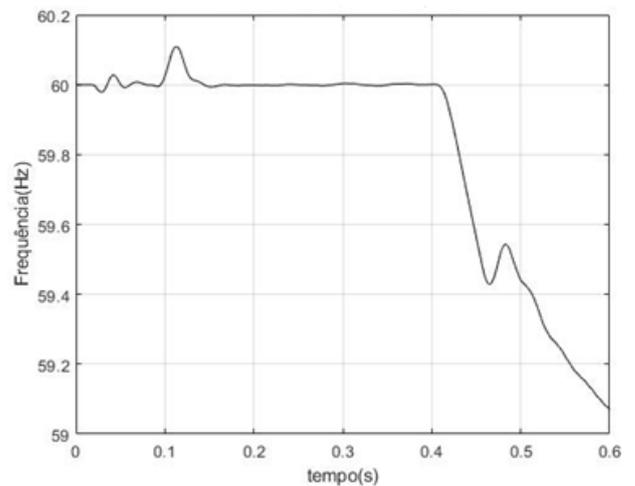
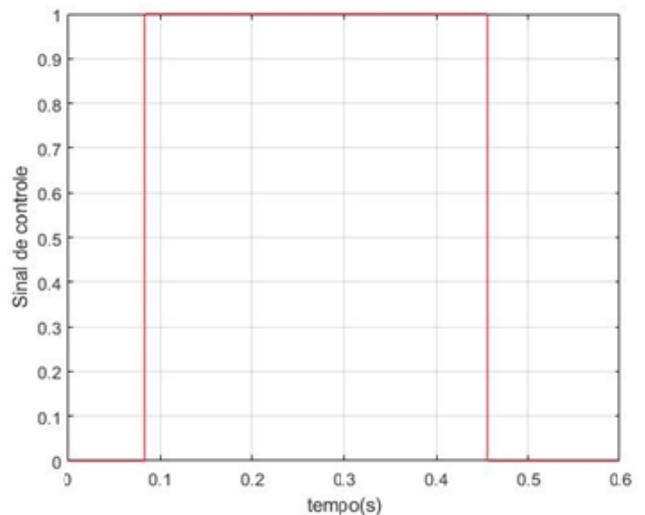


Figura 15: Sinal de controle do disjuntor FV: técnica GEFS/GEVS.



## E. Análise Comparativa

Tabela 2: Comparação entre os métodos de detecção de ilhamento.

Técnicas de detecção	Tempo de Detecção	Implementação
OFP/UFP e OVP/UVF	Não detectou	Simple
Detecção de harmônicos	Não detectou	Moderada
Detecção de impedância	71 ms	Complexo
GEFS/GEVS	53 ms	Complexo

A partir da Tabela 2 é possível observar que apenas as técnicas ativas foram capazes de detectar o ilhamento na condição propostas, tendo essas técnicas uma maior complexibilidade de implementação. A técnica que obteve o melhor resultado foi a GEFS/GEVS com um tempo de detecção de 53ms, sendo 18ms mais rápida do que a técnica de detecção de impedância.

## V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou algumas técnicas de detecção de ilhamento, classificando-as em técnicas passivas e técnicas ativas. Foram realizadas simulações para avaliar e comparar a eficiência das técnicas apresentadas.

Durante as simulações foi possível notar que as técnicas passivas possuem baixa confiabilidade, pois não conseguiram detectar a condição de ilhamento quando a carga consome toda a potência gerada pelo sistema FV, não sendo enquadrados nos requisitos mínimos para realizar a proteção anti-ilhamento de maneira adequada.

As técnicas ativas por sua vez obtiveram sucesso nas simulações realizadas. Apesar de ter detectado o ilhamento durante a simulação, a técnica de detecção de impedância tem sua confiabilidade prejudicada devido ao fato de não operar com qualidade com multiplicidade de GDs, fazendo com que essa técnica tenha maior valor teórico do que prático.

O principal destaque é a técnica de deslocamento de frequência (GEFS) e deslocamento de tensão (GEVS) que obteve o melhor resultado entre as técnicas analisadas, onde apesar de possuir uma maior complexibilidade de implementação conseguiu detectar o ilhamento com extrema rapidez.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFES e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFES pelo suporte à pesquisa.

## REFERÊNCIAS

[1] BAJAY, S. et al. *Geração distribuída e eficiência energética: Reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro*. IEI Brasil, 1ª Edição, Campinas, 2018.

[2] Empresa de Pesquisa Energética. *Anuário Estatístico De Energia Elétrica 2020: Ano Base 2019*. Acesso em: 20 de Agosto de 2021, em: <https://www.epe.gov.br/pt>.

[3] Empresa De Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2020: Ano Base 2019*. Acesso em: 20 de Agosto de 2021, em: <https://www.epe.gov.br/pt>.

[4] NARUTO, D.T. *Vantagens e Desvantagens da Geração Distribuída e Estudo de Caso de um Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

[5] VALENTE, V.O. *Análise de Problemas de Qualidade da Energia Elétrica Causados pela Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Distribuídos*. Universidade de São Carlos, São Carlos, 2013.

[6] IEEE. *Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces Systems*. IEEE Std 1547, 2018.

[7] IEEE. *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*. IEEE Std 929, 2000.

[8] ABNT. *Procedimento de Ensaio de Anti-ilhamento para Inversores de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica*. ABNT NBR IEC 62116, 2012.

[9] TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. WILEY, 1ª Edição, New Delhi, 2011.

[10] SILVA, H. T. *Estudo sobre a interação de métodos anti-ilhamento para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão com múltiplos inversores*. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

[11] VIEIRA, J. C. M. Jr. *Detecção de Ilhamento de Geradores Distribuídos: Uma Revisão Bibliográfica*. Revista Eletrônica de Energia, Salvador, 2011.

[12] BRITO, M. A. G.; ALVES, M. G.; SAMPAIO, L. P. *Estratégias de Anti-Ilhamento Aplicadas a Sistemas de Geração Distribuída Fotovoltaica*. *Eletrônica de Potência, Joinville*, v. 23, p. 226-234, junho, 2018.

[13] ANTUNES, H. M. A. *Conversor Multifuncional Reconfigurável e Tolerante a Falhas para Microrredes de Energia Elétrica*. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

[14] RODRIGUEZ, P. et al. *New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions*. IEEE. Power Electronics Specialists Conference, Vol. 1, p. 1-7, 2006.

[15] REZNIK, A. et al. *Lcl filter design and performance analysis for small wind turbine systems*. IEEE. Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA), Vol. 1, p. 1-7, 2012.

[16] BOWER, W.; ROPP, M. *Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems*. Sandia National Laboratories, 1ª Edição, Albuquerque, 2002.

[17] SEVERO, L. *Estudo e implementação de métodos de proteção de anti-ilhamento aplicados a sistemas fotovoltaicos*. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2011.