

# Efeito de malhas de controle de velocidade de geradores síncronos distribuídos em curvas de desempenho de funções de proteção anti-ilhamento\*

Liciane Otremba & Daniel Motter

*Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, PR (e-mail: liciane.otremba@unioeste.br, daniel.motter@unioeste.br)*

**Abstract:** The accuracy of anti-islanding protection performance is essential to operational safety into distributed generation systems (DG). Among the factors that can interfere effectiveness of such protection functions, the governor related to the synchronous generator is the focus on this paper. Islanding simulations have performed using different governor controls, and frequency-based relays performances have evaluated by the performance curves tool. The results have shown that the characteristic of the system load is a significant factor in the frequency function performance when droop control has implemented in a synchronous diesel generator.

**Resumo:** O desempenho adequado de funções de proteção anti-ilhamento é fundamental à segurança operacional de sistemas com geração distribuída (GD). Dentre os fatores que podem interferir na eficácia de tais funções, o sistema de regulação de velocidade associado ao gerador síncrono é objeto de estudo deste trabalho. Simulações de ilhamento são realizadas diante da implementação de distintas estruturas de controle de velocidade, e o comportamento de funções de proteção baseadas em medidas de frequência é avaliado pela ferramenta de curvas de desempenho. Os resultados indicaram que a característica da carga do sistema é fator preponderante no desempenho de funções de frequência quando implementado o regulador de velocidade do tipo *droop* em um gerador síncrono a diesel.

**Keywords:** Anti-islanding protection; distributed generation; governor control; frequency-based relays; performance curves.

**Palavras-chaves:** Funções de proteção anti-ilhamento; geração distribuída; regulador de velocidade; funções de proteção baseadas em medidas de frequência; curvas de desempenho.

## 1. INTRODUÇÃO

O contexto atual dos sistemas de energia elétrica contempla a presença significativa de GD, cujas contribuições estão relacionadas tanto ao modo de operação conectado à rede quanto à operação ilhada. No entanto, diante das ocorrências de ilhamento na rede de distribuição, recomenda-se a desconexão dos geradores distribuídos, medida que visa evitar danos aos equipamentos elétricos e garantir a segurança pessoal dos operadores e acessantes das concessionárias (Copel, 2016; IEEE, 2018). Nesse sentido, a sensibilização adequada dos esquemas anti-ilhamento, em tempo hábil, é fundamental para prover a desenergização completa da ilha.

A formação de ilhas pode ser detectada por esquemas de proteção distintos, localizados próximos ou distantes do gerador distribuído. Como consequência da conveniên-

cia operacional e baixo custo de implementação, técnicas passivas, a exemplo das funções de proteção baseadas em medidas de frequência e tensão, são amplamente empregadas nos sistemas de distribuição. Não obstante, os métodos passivos de detecção de ilhamento são suscetíveis às condições operacionais do sistema, que incluem número de geradores distribuídos, constante de inércia, sistema de controle de excitação, tipo de carga e ajustes das funções (Vieira et al., 2008, 2006; Affonso et al., 2005). Dentre os aspectos que podem interferir o desempenho das funções de proteção, uma abordagem quanto aos sistemas de controle associados ao gerador síncrono distribuído (GSD) não constitui foco de análise na literatura de modo geral.

Em razão do princípio de operação das técnicas passivas basear-se no monitoramento dos parâmetros de saída do gerador distribuído e posterior identificação da ocorrência de ilhamento (Mahat et al., 2008), a percepção adequada nas alterações de parâmetros pode contribuir à detecção efetiva. Deste modo, a operação adequada dos sistemas de controle de velocidade e excitação de geradores síncronos em estudos de ilhamento é fundamental ao desempenho das funções proteção. No que se refere aos sistemas de controle associados à operação do GSD, a influência do

\* Os autores agradecem o apoio fornecido pela Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil à realização deste estudo. O trabalho desenvolvido faz parte do grupo de pesquisa em "Microrredes e Sistemas com Geração Distribuída por Simulação em Tempo Real"(CNPQ) no Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE).

sistema de controle de velocidade nos estudos de ilhamento costuma não ser considerada em razão da dinâmica mais lenta em comparação ao sistema de excitação, por exemplo. No entanto, o assunto foi brevemente discutido por Mourinho & Motter (2018) e os resultados obtidos mostraram que, a depender da abordagem do controle do regulador de velocidade, os desvios de frequência resultantes diferem significativamente. Neste sentido, o trabalho destina-se a verificar, a partir do método de curvas de desempenho, como as funções de proteção baseadas em medidas de frequência são influenciadas pela representação do sistema de controle de velocidade em um GSD. Correspondem às funções abordadas neste estudo: função de sub/sobrefreqüência (ANSI 81U/O) e função de taxa de variação da freqüência - também conhecida por ROCOF, do inglês *rate of change of frequency* - (ANSI 81R).

A estrutura do trabalho está organizada da seguinte forma: na Seção II é abordada a contextualização acerca do método de avaliação das funções de proteção - as curvas de desempenho; A Seção III apresenta o sistema teste empregado nas análises e elementos constituintes, que incluem os sistemas de controle do GSD e as funções de proteção modeladas; A seção IV contém as análises resultantes da aplicação do método de curvas de desempenho; e as conclusões são apresentadas na Seção V.

## 2. CURVAS DE DESEMPENHOS

As curvas de desempenho correspondem a uma ferramenta de avaliação do desempenho de funções de proteção anti-ilhamento baseadas em medidas de tensão e freqüência, e representam o tempo de atuação das proteções em função da variação de determinada grandeza (Vieira et al., 2006). Ao tratar de funções baseadas em medidas de freqüência, as curvas correlacionam o tempo de atuação ao desbalanço de potência ativa, a exemplo da curva ilustrada na Figura 1 para uma função ANSI 81U hipotética. Caso especificado determinado tempo limite para identificação do ilhamento, a exemplo da reta de 500 ms traçada na Figura 1, é possível obter o valor mínimo de desbalanço de potência (desbalanço crítico -  $\Delta P_{cr}$ ) necessário à identificação do ilhamento. A eficiência da função de proteção está associada a valores menos expressivos de  $\Delta P_{cr}$ . No presente trabalho, as curvas de desempenho são empregadas em análise comparativa entre estruturas de controle de velocidade e indicam a topologia que conduz a resultados mais conservadores quanto à atuação das funções de proteção.

## 3. COMPONENTES DO SISTEMA DE POTÊNCIA

O sistema de potência empregado nas simulações é baseado em Motter & Vieira (2018), que consiste em uma versão modificada do sistema IEEE 34 Barras (IEEE, 2010). O sistema, modelado no software de simulação *Alternative Transients Program* (ATP), apresenta um gerador síncrono distribuído a diesel localizado no barra 848. O gerador distribuído e o esquema de proteção anti-ilhamento foram implementados em ATP por meio da linguagem MODELS (Dubé, 1996). Na Figura 2 é ilustrado o sistema de teste empregado neste artigo.

O gerador síncrono a diesel é conectado ao sistema no ponto de acoplamento comum (PAC) através de um trans-

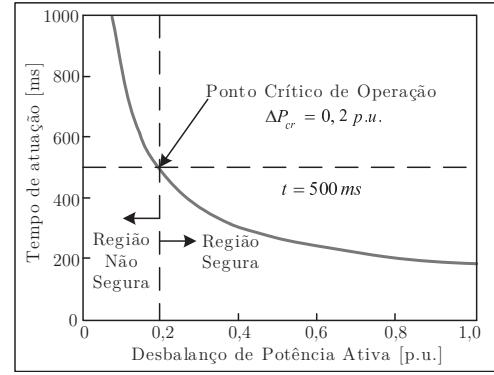


Figura 1. Curva de desempenho para função de freqüência hipotética - adaptado de Vieira et al. (2006).

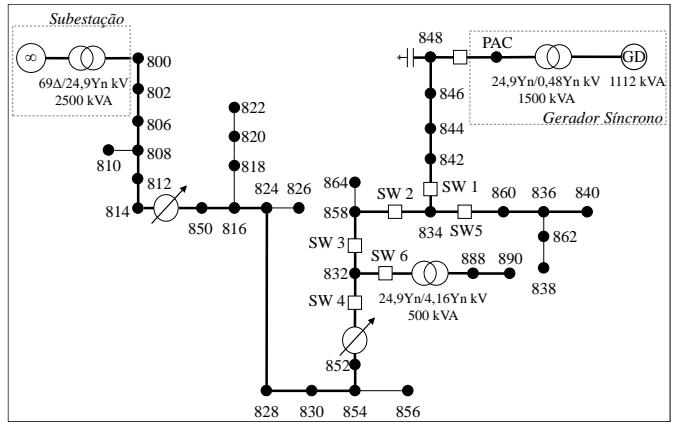


Figura 2. Sistema Teste IEEE 34 Barras modificado - adaptado de Motter & Vieira (2018) e IEEE (2010).

formador de 24,9/0,48 kV 1500 kVA. O sistema de controle de excitação foi modelado de acordo com o esquema DC1A (IEEE, 2006). As subseções posteriores destinam-se a apresentação das abordagens de sistemas de controle de velocidade do GSD a diesel, bem como à modelagem das funções de proteção alocadas junto ao PAC.

### 3.1 Sistemas de regulação de velocidade

A principal função associada ao sistema de regulação de velocidade em geradores síncronos é controlar o torque mecânico aplicado ao eixo do rotor através da entrada de combustível (Fadaeinedjad et al., 2008). Durante uma operação conectada à rede, o regulador de velocidade é responsável por fornecer potência ativa às cargas. Tipicamente, o gerador síncrono opera sob o controle com estatismo (*droop*), estrutura que apresenta referência de velocidade síncrona e que possibilita a distribuição de carga entre as unidades de geração (Tomilson, 1998). No entanto, a prática adotada pela indústria consiste em considerar puramente o controle de potência ativa na operação paralela do gerador à rede. Nesta configuração é comumente aplicado um controlador do tipo PID (Reis et al., 2014). Os diagramas de blocos referidos às estratégias de controle *droop* e controle PID dos sistemas de regulação de velocidade são apresentados na Figuras 3 e 4, respectivamente.

No desenvolvimento do trabalho, as estruturas de controle para GSD a diesel são citadas como "EC 1", no caso do regulador de velocidade com referência de velocidade - *droop*

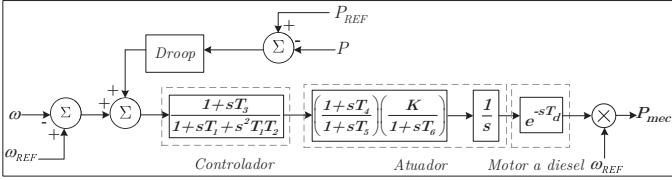


Figura 3. Estrutura de controle com referência de velocidade - adaptado de Fadaeinedjad et al. (2008) e Tomilson (1998).

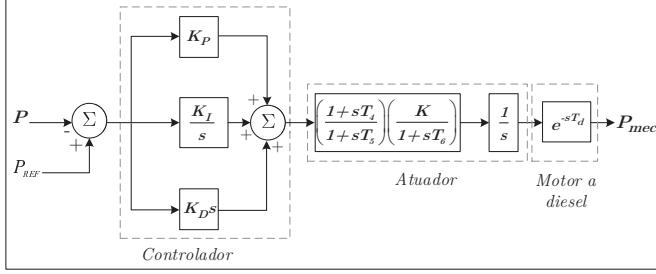


Figura 4. Estrutura de controle com referência de potência ativa - adaptado de Reis et al. (2014).

- apresentado na Figura 3, e "EC 2" para o regulador com referência de potência ativa da Figura 4. Os parâmetros de ambas as estruturas de controle foram determinados empiricamente e são apresentados no Apêndice A.

### 3.2 Modelagem das funções de proteção

A filosofia básica de detecção das funções de proteção baseadas em medidas de frequência baseia-se na estreita relação entre frequência e potência ativa. Durante a ocorrência do ilhamento, o desbalanço de potência ativa, devido à incompatibilidade de geração e carga, causa variações de frequência (Vieira et al., 2008), de modo que o ilhamento pode então ser detectado através da variação de frequência.

O diagrama de blocos da Figura 5 apresenta o princípio de funcionamento das funções de sub/sobrefreqüência. A frequência é estimada com base no método de cruzamento de zero, apresentado em (Motter et al., 2015) e, sequencialmente, filtros Butterworth passa-baixa são aplicados na entrada do sinal de tensão para reduzir transitórios (frequência de corte de 200 Hz) e na frequência de saída para atenuar oscilações (frequência de corte de 30 Hz) (Motter et al., 2015). Caso a frequência de saída exceda os ajustes definidos para as funções de proteção um sinal de *trip* causa a abertura do disjuntor do gerador (Vieira et al., 2006). O tempo de atuação está associado ainda à temporização ( $T_{set}$ ).

Analogamente ao esquema de funcionamento das funções de sub/sobrefreqüência, na Figura 6 é ilustrado o diagrama operativo da função ANSI 81R, no qual o princípio de estimativa de frequência é igualmente aplicado (Motter et al., 2015). O cálculo da taxa de variação de frequência é realizado através da média dos valores estimados em um intervalo de 100 ms (IEEE, 2018).

Os ajustes definidos para as funções de proteção foram baseados em IEEE (2018) e correspondem a: *pickup* de 57 Hz e temporização de 160 ms para função ANSI 81U; *pickup* de 62 Hz e temporização de 160 ms para função

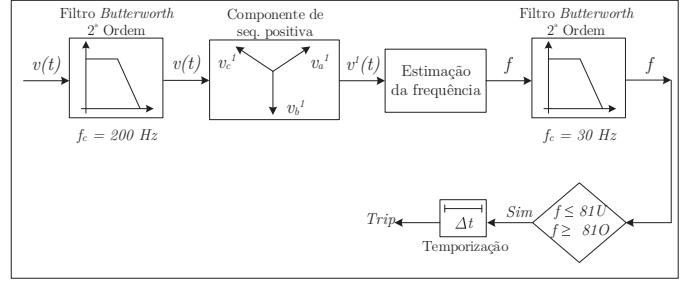


Figura 5. Diagrama dos esquemas ANSI 81U/O - baseado em Piardi et al. (2019) e Motter et al. (2015).

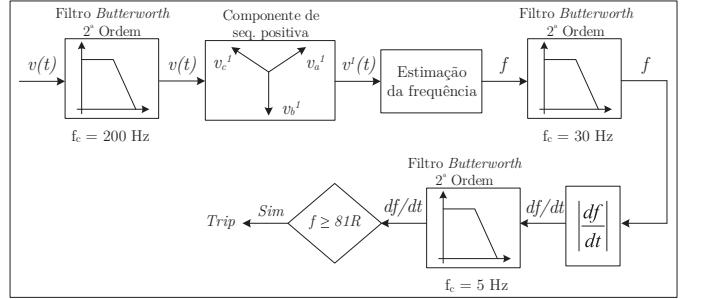


Figura 6. Diagrama do esquema ANSI 81R - adaptado de Piardi et al. (2019) e Motter et al. (2015).

ANSI 81O; e *pickup* de 3 Hz/s com atuação instantânea no caso da função ANSI 81R.

## 4. DESEMPENHO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

Inicialmente, as condições operativas foram definidas de modo a estabelecer casos de desbalanço de potências ativa ( $\Delta P$ ) e reativa ( $\Delta Q$ ) no instante do ilhamento, determinado pela abertura da chave *SW1* do sistema apresentado na Figura 2 aos 12 s de simulação. Para tanto, a potência ativa fornecida pelo GSD foi variada de 0,98 p.u. a 0,5 p.u., enquanto a demanda de potência reativa das cargas foi reduzida a 73 % do valor nominal e o banco de capacitores da barra 848 desconectado. Tais considerações permitiram obter um conjunto de casos de desbalanço de potência ativa para o mesmo patamar de desbalanço de potência reativa. Cabe ressaltar que o cenário de déficit de potência ativa e reativa corresponde a uma perspectiva de análise conservativa do ponto de vista de atuação das funções de proteção segundo Vieira (2006).

Em razão das condições operativas estabelecidas configurarem casos de déficits de potência ativa e reativa na ilha - ou seja, necessidade de importação de potência em vista da demanda por parte das cargas exceder o fornecimento de potência pelo GSD - a função ANSI 81O não é adequadamente sensibilizada observado que os casos simulados correspondem majoritariamente a condições de subfreqüência. As curvas de desempenho são obtidas para as funções ANSI 81U/R sob considerações de distintos modelos de carga e máquina primária, ao implementar os modelos de reguladores de velocidade apresentados nas Figuras 3 e 4. Os resultados são ainda confrontados aos casos em que o sistema de regulação de velocidade não é representado (EC 0), de modo que a potência mecânica fornecida pela máquina primária é mantida constante.

Ressalta-se que os casos simulados são analisados em um intervalo de 1 s após a ocorrência do ilhamento.

#### 4.1 Variação do modelo de carga

Em análise inicial, as simulações de ilhamento foram submetidas às condições operativas descritas e resultaram em onze cenários de desbalanço com variação de  $\Delta P$  entre 0,03 e 0,5 p.u. As cargas a jusante da chave SW1 foram mantidas segundo modelo de impedância constante ( $Z_{cte}$ ). O desempenho das funções ANSI 81U/R foi avaliado pelas curvas de desempenho, como ilustrado nas Figuras 7 e 8.

No caso da função ANSI 81U, se estabelecido tempo limite para a detecção do evento, cerca de 500 ms em conformidade com o tempo para atuação dos religadores automáticos, um desbalanço mínimo de 0,34 p.u. seria necessário para que a função de subfrequência atuasse, caso o GSD estivesse equipado com a EC 1. No caso da EC 2, um desbalanço de 0,26 p.u. é suficiente para levar a atuação da ANSI 81U em 500 ms. A atuação da função de subfrequência é observada apenas para desbalanços superiores a 0,21 p.u., diferentemente da função ROCOF para a qual casos de ilhamento foram detectados em desbalanços inferiores.

A atuação da função ROCOF é condicionada ao ajuste definido em 3 Hz/s de forma que a detecção do ilhamento ocorre antes de 300 ms para ambas as estruturas de controle. A máxima diferença no tempo de detecção entre

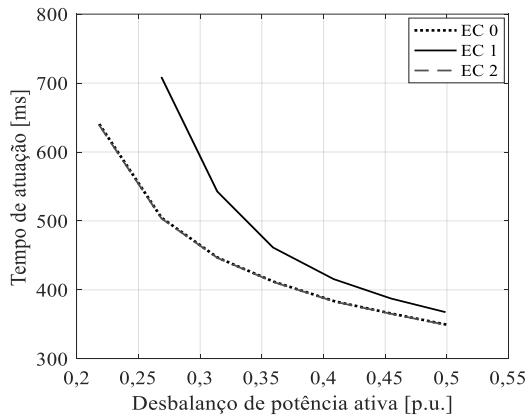


Figura 7. Curvas de desempenho ANSI 81U - Carga  $Z_{cte}$ .

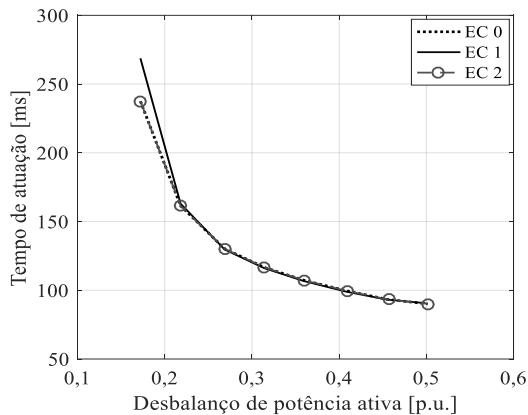


Figura 8. Curvas de desempenho ANSI 81R - Carga  $Z_{cte}$ .

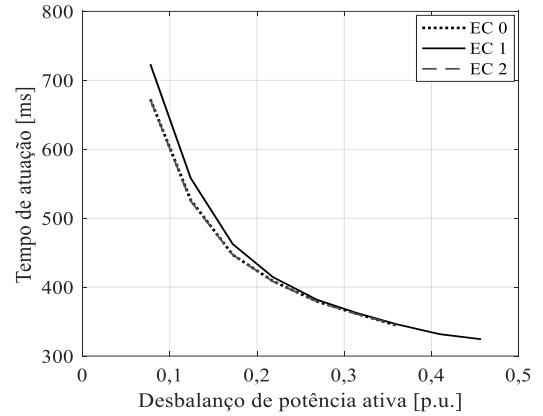


Figura 9. Curvas de desempenho ANSI 81U - Carga  $P_{cte}$ .

as estruturas EC 1 e EC 2 restringe-se a 11,6 %, em  $\Delta P=0,1721$  p.u. Na consideração do modelo de carga de  $Z_{cte}$ , a não representatividade do sistema de regulação de velocidade resulta em comportamentos das funções ANSI 81U/R coincidentes aos casos com a EC 2 implementada.

Sequencialmente às simulações com modelo de carga  $Z_{cte}$ , propôs-se a implementação do modelo de potência constante ( $P_{cte}$ ), no qual foram estabelecidas os valores de potência efetivamente demandados pelas cargas de  $Z_{cte}$ . A estratégia permitiu manter níveis de desbalanços de potência semelhantes entre ambos os modelos de carga e, assim, possibilitar uma comparação coerente para os casos simulados. O modelo de carga  $P_{cte}$  foi implementado através da linguagem MODELS no software de simulação.

O comportamento da função de subfrequência é ilustrado na Figura 9, em que é indicada máxima diferença percentual entre as estruturas de controle de 9,13 % no desbalanço de potência necessário à detecção do ilhamento em 500 ms. As curvas de desempenho resultantes indicam que frente a implementação da carga  $P_{cte}$  a função ANSI 81U é capaz de identificar o ilhamento em condições de desbalanço inferiores a 0,1 p.u., caso em que a diferença no tempo de atuação entre as estruturas de controle limita-se a 51,6 ms. A detecção do ilhamento em condições de  $\Delta P$  inferiores se comparados aos casos com modelo de carga  $Z_{cte}$  justificam-se pelas excursões de frequência, independentemente do tipo de estrutura de controle implementada, serem mais significativas para o modelo de carga  $P_{cte}$ .

A diferença inerente ao comportamento da frequência entre as estruturas de controle tende a apresentar taxas de variação semelhantes, de modo que o comportamento da função 81R não é impactado, observada a coincidência das curvas de desempenho apresentadas na Figura 10, referentes às estruturas de controle 1 e 2. Similarmente ao caso do modelo de carga  $Z_{cte}$ , a atuação das funções ANSI 81U/R frente a ausência do sistema de controle de velocidade coincide ao caso da EC 2.

#### 4.2 Variação do tipo de máquina primária

As análises comparativas entre estruturas de controle são estendidas à variação do tipo de máquina primária associada ao GSD. Os resultados referentes à EC 1, representada nas Figuras 12 e 13 como EC D para geradores a diesel, são apresentados de forma comparativa à estrutura de controle

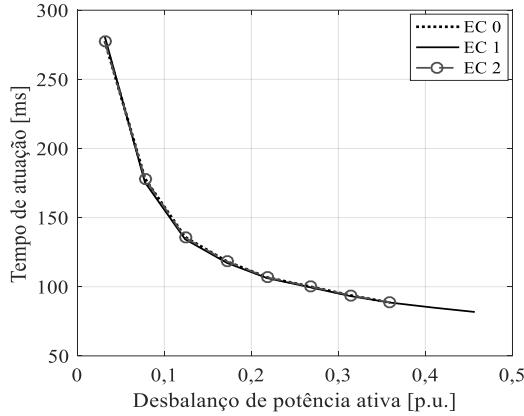


Figura 10. Curvas de desempenho ANSI 81R - Carga  $P_{cte}$ .

para turbinas hidráulicas lineares (EC H) apresentada na Figura 11, conjuntamente ao casos que contemplam a ausência da estrutura de controle. O sistema de regulação de velocidade da Figura 11 apresenta como parâmetros de entrada referências de velocidade e potência ativa, semelhantemente a EC 1. As simulações são realizadas sob o cenário de carga  $Z_{cte}$ , para o qual os resultados tendem a ser mais conservativos comparados ao caso de carga  $P_{cte}$ , e resultaram em cenários de desbalanço de  $\Delta P$  entre 0,04 e 0,51 p.u. Os valores dos parâmetros associados a EC H são descritos no Apêndice A.

Dos resultados obtidos, observa-se que o tempo demandado para a atuação da função de subfrequência no caso da implementação da turbina hidráulica é inferior comparado às simulações com GSD a diesel, conforme a Figura 12, em razão de excursões de frequência superiores para o mesmo  $\Delta P$ . O tempo de resposta associado à ação de controle da turbina hidráulica, intrinsecamente mais lento em comparação à máquina a diesel, conduz às variações de frequência que se assemelham ao caso sem estrutura de controle (EC 0).

No que se refere ao comportamento da função ROCOF, a influência do emprego da turbina hidráulica limita-se à redução em 30 ms no tempo de atuação em comparação ao GSD a diesel, resultado do desbalanço de potência ativa de 0,1845 p.u. Tal como nos casos de variação associada ao modelo de carga, o desempenho da função ANSI 81R é minimamente influenciado pelo tipo de estrutura de controle implementada no cenário de variação do tipo de máquina primária, segundo ilustrado pela Figura 13.

Na Tabela 1 são indicados os casos simulados não detectados pelas funções ANSI 81U/R. Verifica-se o número de casos de ilhamento não detectados pela função de subfrequência é superior com relação à função ROCOF,

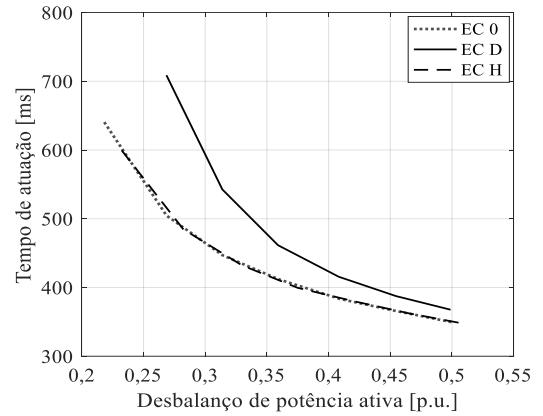


Figura 12. Curvas de desempenho ANSI 81U - Turbina a diesel x hidráulica.

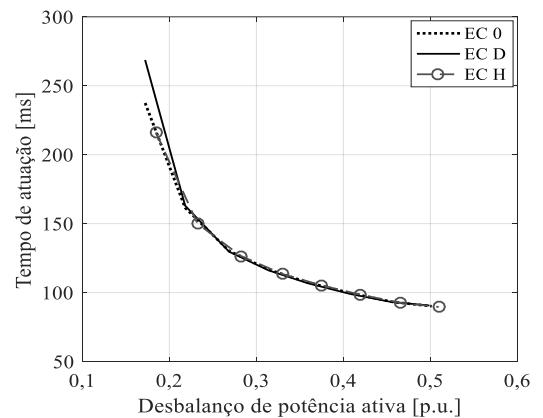


Figura 13. Curvas de desempenho ANSI 81R - Turbina a diesel x hidráulica.

Tabela 1. Casos de não detecção.

	$Z_{cte}$		$P_{cte}$	
	81U	81R	81U	81R
EC 0	4	1	1	0
EC 1	5	2	1	0
EC 2	4	1	1	0
EC H	4	2	-	-

sobretudo no cenário que contempla o modelo de carga de impedância constante. Observa-se ainda que, dente as estruturas de controle implementadas, a malha de controle com referência de velocidade para GSD a diesel conduz a um número maior de casos não detectados pela função ANSI 81U. Ressalta-se que as simulações com a estrutura de controle para turbinas hidráulicas não foram realizadas sob consideração do modelo de carga  $P_{cte}$ .

## 5. CONCLUSÃO

No presente trabalho as estratégias de controle de velocidade em geradores síncronos distribuídos foram avaliadas sob a perspectiva da atuação de funções de proteção anti-ilhamento, a saber a função de subfrequência (ANSI 81U) e de taxa de variação da frequência (ANSI 81R). As simulações de ilhamento realizadas contemplaram casos de desbalanço de potência e cenários comparativos entre distintos modelos de carga implementados e tipos de máquinas primárias associadas ao gerador síncrono.

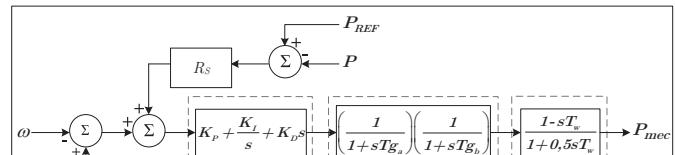


Figura 11. Sistema de regulação de velocidade para turbinas hidráulicas - Adaptado de Zuo et al. (2018).

A partir dos casos simulados, observou-se que a diferença de abordagem na representação do sistema de regulação de velocidade tende a não influenciar o comportamento das funções ANSI 81U/R sob consideração do modelo de carga de potência constante. Adicionalmente, a não representatividade do sistema de regulação de velocidade - adoção da estratégia de manutenção da potência mecânica constante - resulta em efeitos na atuação das funções ANSI 81U/R que coincidem à estratégia de controle com referência de potência ativa em todos os cenários simulados.

No que se refere aos cenários de carga  $Z_{cte}$ , a implementação da estrutura *droop* conduz a casos conservativos de atuação das funções de frequência. Sob a consideração de tal modelo de carga, os casos simulados indicaram ainda que o tipo de máquina primária, em função da respectiva dinâmica de operação, pode influenciar na operação das funções de proteção anti-ilhamento. Em linhas gerais, a depender da característica da carga, a estrutura de controle *droop* em GSD a diesel interfere no desempenho da função de frequência quanto à detecção de ilhamento. A desconsideração do regulador de velocidade, nestes casos, pode conduzir a desbalanços críticos de potência que não condizem à operação real do gerador distribuído e, portanto, interferir na confiabilidade do sistema de proteção.

As análises indicadas neste trabalho possuem caráter comparativo, de modo que se propõe a extensão do estudo ao considerar distintas abordagens de ajustes para as estruturas de controle apresentadas.

## REFERÊNCIAS

- Affonso, C. M., Freitas, W., Xu, W. e da Silva, L. C. P. (2005). Performance of rocof relays for embedded generation applications. *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 152(1), 109-114. doi:10.1049/ip-gtd:20041079.
- Copel (2016). NTC 905200 - Acesso de Miro e Minigeração Distribuída ao Sistema da Copel. Copel. Curitiba.
- Dubé, L. (1996). *User Guide to Models in ATP*. Nesknowin.
- Fadaeinedjad, R., Moschopoulos, G. e Moallem, M. (2008). Flicker contribution of a wind turbine in a stand-alone wind diesel system. In *2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, p. 233-238. doi:10.1109/CCECE.2008.4564531.
- IEEE (2006). IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992)*.
- IEEE (2018). IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)*, p. 1-138. doi:10.1109/IEEESTD.2018.8332112.
- IEEE, D.S.A.S (2010). IEEE 34 Node Test Feeder. IEEE. URL: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>.
- Mahat, P., Chen, Z. e Bak-Jensen, B. (2008). Review of islanding detection methods for distributed generation. In *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, p. 2743-2748. doi: 10.1109/DRPT.2008.4523877.
- Motter, D. e Vieira, J. C. M. (2018). The Setting Map Methodology for Adjusting the DG Anti-Islanding Protection Considering Multiple Events. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(6), p. 2755-2764. doi: 10.1109/TPWRD.2018.2816400.
- Motter, D., Vieira, J. C. M. e Coury, D. V. (2015). Development of frequency-based anti-islanding protection models for synchronous distributed generators suitable for real-time simulations. *IET Generation, Transmission Distribution*, 9(8), p. 708-718. doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0390.
- Mourinho, F. A. e Motter, D. (2018). Avaliação do desempenho das proteções anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos durante perdas de grandes blocos de geração no sistema interligado nacional. In *XIV STPC Seminário Técnico de Proteção e Controle*.
- Piardi, A. B., Otto, R. B., Otrema, L., Motter, D., Pavani, A. P. G. e Ramos, R. A. (2019). Impact of ROCOF-based Islanding Detection on the Stand-Alone Operation of a Distributed Synchronous Generator. In *2019 IEEE Milan PowerTech*, p.1-6. doi: 10.1109/PTC.2019.8810844.
- Reis, G. B., Neves, R. V. A., Aguiar, C. R., Machado, R. Q. e Oliveira, V. A. (2014). A fuzzy control strategy for a diesel generating set under stand-alone and grid-connected operations. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 25(2), p. 174-183. doi: 10.1007/s40313-013-0094-2.
- Tomilson, A. G. (1998). *Frequency and voltage control of a high-penetration, no-storage wind-diesel system*. Thesis (Masters), Memorial University of Newfoundland, Newfoundland, Canada.
- Vieira, J. C. M. (2006). *Metodologias para Ajuste e Avaliação do Desempenho de Relés de Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos*. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Vieira, J. C. M., Freitas, W., Xu, W. e Morelato, A. (2006). Performance of frequency relays for distributed generation protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(3), p. 1120-1127. doi: 10.1109/TPWRD.2005.858751.
- Vieira, J. C. M., Freitas, W., Xu, W. e Morelato, A. (2008). An Investigation on the Nondetection Zones of Synchronous Distributed Generation Anti-Islanding Protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2), p. 593-600. doi: 10.1109/TPWRD.2007.915831.
- Zuo, Y., Sossan, F., Bozorg, M. e Paolone, M. (2018). Dispatch and Primary Frequency Control With Electrochemical Storage: A System-wise Verification. In *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, p. 1-6. doi: 10.1109/ISGTEurope.2018.8571832.

## Apêndice A. PARÂMETROS DO SISTEMA

- Gerador síncrono a diesel:  $S=1112 \text{ kVA}$ ;  $V=0,48 \text{ kV}$ ;  $f=60 \text{ Hz}$ ;  $n=1200 \text{ rpm}$ ;  $H=0,4182 \text{ s}$ .
- Reguladores de velocidade - gerador a diesel:  
 $Droop=5\%$ ;  $T_1=0,001 \text{ s}$ ;  $T_2=0,2 \text{ s}$ ;  $T_3=2 \text{ s}$ ;  $K_P=0,001$ ;  $K_I=0,008$ ;  $K_D=0,002$ ;  $K=40$ ;  $T_4=0,25 \text{ s}$ ;  $T_5=0,009 \text{ s}$ ;  $T_6=0,0384 \text{ s}$ ;  $T_d=0,024 \text{ s}$ ;
- Regulador de velocidade - turbina hidráulica:  $R_S=0,06$ ;  $K_P=20$ ;  $K_I=10$ ;  $K_D=5$ ;  $T_{ga}=0,1 \text{ s}$ ;  $T_{gb}=0,15 \text{ s}$ ;  $T_w=0,1 \text{ s}$ .