

Análise do Desempenho Dinâmico e de Transitórios Eletromagnéticos em Microrredes

Pedro H. Eisenkraemer* Mauro S. Ortiz*
Émerson R. da Silva* Fabrício A. M. Moura**
Daniel P. Bernardon*

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE),
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS.

E-mail: pedro.eisenkraemer@ieee.org

** Núcleo de Pesquisa em Sistemas Elétricos de Potência, Universidade
Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), MG.

Abstract: Due to the significant increase in energy consumption in recent years, the interest in installing distributed generation units has become increasingly greater, mainly because they have less environmental impacts and constitute a good alternative to improve the supply of electricity to consumers. In this sense, with the growth in the number of independent producers operating in the electricity sector, studies are needed to analyze its effects on the system. Thus, the objective of this work is to analyze different situations of intentional islanding in the presence of a disturbance situation in an energy distribution system. The focus of the analysis will be on the dynamic performance of the control systems of a distributed generator, as well as the impacts related to the electromagnetic transients resulting from contingencies, to which the distribution systems are susceptible. With this, it is intended to investigate the importance of the control philosophy used to mitigate the effects of changes in the configuration of the system.

Resumo: Em virtude do significativo aumento do consumo de energia nos últimos anos, o interesse pela instalação de unidades de geração distribuída tem se tornado cada vez maior, sobretudo por apresentarem menores impactos ambientais e se configurarem como uma boa alternativa para aprimorar o fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Nesse sentido, com o crescimento da quantidade de produtores independentes atuando no setor elétrico, são necessários estudos para analisar seus efeitos no sistema. Dessa forma, o objetivo deste trabalho consiste em analisar diferentes situações de ilhamento intencional frente a uma situação de perturbação em um sistema de distribuição de energia. O foco das análises será em torno da atuação dinâmica dos sistemas de controle de um gerador distribuído, bem como os impactos relacionados aos transitórios eletromagnéticos decorrentes de contingências, as quais os sistemas de distribuição estão suscetíveis. Com isso, pretende-se investigar a importância da filosofia de controle empregada para amenizar ou mitigar os efeitos da mudança de configuração do sistema.

Keywords: Microgrids; Distributed Generation; Electromagnetic Analyses; Stability; Control Systems; Speed Governor.

Palavras-chaves: Microrredes; Geração Distribuída; Análise Eletromagnética; Estabilidade; Sistemas de Controle; Regulador de velocidade.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da demanda de energia elétrica, a geração distribuída (GD), caracterizada pela geração de energia, em baixas e médias potências, próxima às cargas, apresenta-se como uma alternativa para garantir o fornecimento de energia aos consumidores (Roy and Pota, 2015). As unidades de GD podem ou não proceder de fontes renováveis. No entanto, visto os benefícios proporcionados pelo aumento do consumo de energia limpa, o governo e os órgãos competentes têm incentivado a difusão da GD com emprego de recursos renováveis (Parhizi et al., 2015). Nesse sentido, a aprovação da Resolução Normativa (RN) nº 482 de 2012, atualizada pela RN nº 687 de 2015, pela

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) representa um avanço da micro e minigeração distribuída no Brasil.

Além da redução dos impactos ambientais, a GD pode proporcionar outras vantagens para o sistema elétrico, destacando-se a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão, menor tempo de implantação, redução do carregamento e das perdas nas redes, melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada, e o provimento de serviços ancilares, como a geração de energia reativa (ANEEL, 2011). Em contrapartida, entre as desvantagens associadas aos sistemas de GD, destacam-se o fluxo de energia bidirecional, problemas de sincronismo com a rede de distribuição (RD), distorções

harmônicas, intermitência e variações na geração de energia para fontes alternativas (ANEEL, 2011; Vasquez-Arnez et al., 2014). Tais fatores dificultam a operação e o controle da rede, tornando-os ainda mais complexos.

Os sistemas de distribuição estão constantemente suscetíveis a defeitos, que provocam a interrupção no fornecimento de energia. Essas intervenções não programadas causam prejuízos para a concessionária, tanto pelas perdas de faturamento em função da interrupção no fornecimento de energia, quanto pelas multas definidas pelo órgão regulador. Além disso, equipamentos podem ser danificados, comprometendo atividades essenciais e causando transtornos, o que gera muito desconforto e insatisfação aos clientes (Ortiz et al., 2018). Nessas circunstâncias, quando unidades de GD instaladas no sistema e com capacidade para suprir a demanda de energia de determinados consumidores, operam desconectadas da concessionária, diz-se que este está operando em modo ilhado. No contexto das *smart grids*, a integração dos conceitos de GD e de ilhamento, bem como suas tecnologias associadas, constitui as chamadas microrredes ou, do inglês, *microgrids*. Gao (2015) ressalta que não há uma definição única de microrredes, por isso, esse conceito varia em diferentes regiões e países.

A continuidade do fornecimento de energia aos consumidores quando o sistema de distribuição sofre alguma contingência apresenta benefícios. Para a concessionária, destaca-se a melhoria dos indicadores de qualidade, o que reduz as multas por compensação e aumenta a satisfação dos clientes. Para os produtores independentes¹ de energia elétrica, verifica-se os lucros decorrentes da venda da energia gerada e injetada na rede (Parhizi et al., 2015; Ferreira et al., 2013). No entanto, para que a operação da rede pós-contingência no modo ilhado, onde parte da rede é suprida por uma fonte de GD, possa ser aproveitada, são necessários estudos mais aprofundados, que envolvem diversas questões técnicas.

O ilhamento do sistema de distribuição pode ser intencional ou não. O ilhamento involuntário da GD acontece quando os equipamentos de proteção da rede não detectam sua ocorrência. Esta situação pode provocar graves mudanças na qualidade da energia, além do risco de acidentes sérios aos eletricitas, que podem desinformadamente estar realizando alguma manutenção ou operação da rede energizada. Por outro lado, o ilhamento intencional pressupõe que parte da rede continue energizada, visando principalmente a continuidade do serviço (Jouybari-Moghaddam et al., 2012; Vasquez-Arnez et al., 2014). Por isso, para sua realização é fundamental que equipamentos e metodologias de proteção e controle estejam disponíveis na rede e sejam capazes de identificar e controlar o ilhamento. Desta forma, garante-se a operação da ilha com qualidade e estabilidade.

Cada país possui regulamentações específicas que estabelecem os indicadores de qualidade do serviço prestado

¹ *Produtor independente de energia elétrica*: criado pela Lei 9.074, de 1996 (Art. 11 e 12), que prevê condições especiais para os produtores independentes baseados em unidades de cogeração. É a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização do poder concedente para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco (ANEEL, [s.d.]a).

pelos agentes do seu setor elétrico. No Brasil, as concessionárias de energia elétrica desempenham suas atividades atendendo todas as exigências do órgão regulador, a ANEEL, cumprindo as suas resoluções normativas e os procedimentos de distribuição de energia (PRODIST). O módulo 8 do PRODIST (ANEEL, [s.d.]b) estabelece, entre outros, os parâmetros de qualidade para tensão e frequência da rede. Assim, quando um sistema está conectado à rede principal da distribuidora, a frequência é estabelecida pela rede básica e o controle da tensão pelos dispositivos de posse da distribuidora. Todavia, quando parte da rede opera de forma ilhada, o controle dessas grandezas é feito pela GD, a qual nem sempre apresenta sistemas de controle apropriados para a mudança de modo conectado à RD para o modo ilhado. Em função disso, sem a realização de estudos para verificar a viabilidade da formação da microrrede, a concessionária não tem como garantir a qualidade do produto proveniente da GD, o que acarreta na proibição da operação ilhada por parte das distribuidoras (Jouybari-Moghaddam et al., 2012). Além disso, durante essa transição, transitórios eletromagnéticos indesejáveis podem resultar em danos tanto para a distribuidora quanto para o cliente com GD, especialmente aquelas baseadas em máquina síncrona.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para análise da viabilidade técnica da implementação de um ajuste automático dos parâmetros dos sistemas de controle de um gerador síncrono distribuído, operando em regime de ilhamento intencional após uma contingência na RD. Assim, busca-se promover uma transição segura da GD para o modo de operação ilhada após a falta no sistema. Adicionalmente, este estudo apresenta uma análise dos transitórios eletromagnéticos decorrentes da formação da microrrede. Desta forma, no que se refere às metodologias de proteção e controle para o ilhamento intencional, evidencia-se a importância da identificação do ilhamento e do ajuste adequado dos sistemas de excitação e velocidade para regulação do gerador. Com isso, procura-se garantir um bom planejamento na transição dos modos de operação, manutenção da estabilidade do sistema e qualidade de energia da microrrede.

2. CONTROLE DE MICRORREDES

Uma microrrede é uma plataforma que facilita a integração de geradores distribuídos e cargas, assim como sistemas de armazenamento de energia, para garantir que a rede elétrica possa fornecer energia com confiabilidade, com preços competitivos e preferencialmente sustentável (Gao, 2015). As principais características das microrredes são alta potência de GD comparável a carga; geração de energia normalmente de fontes renováveis; intensa utilização de tecnologias de informação, comunicação e monitoramento, como nas *smart grids*; além da possibilidade de ilhamento intencional, se necessário (Liu et al., 2016; Vasquez-Arnez et al., 2014; Gao, 2015; Parhizi et al., 2015). Nota-se, com isso, que os conceitos de GD, ilhamento, *smart grids* e microrredes são complementares entre si, ou seja, com o aumento da penetração da GD em uma região que dispõe dos recursos tecnológicos pressupostos pelas *smart grids*, o ilhamento intencional, seguindo critérios de proteção e controle, facilita a formação de microrredes.

Os componentes de controle em uma microrrede incluem fontes renováveis, recursos despacháveis e sistemas de armazenamento de energia, sendo que estes equipamentos podem atuar em conjunto para maximizar a lucratividade da microrrede. Ainda, diferentes estratégias de controle podem ser aplicadas para garantir a confiabilidade de funcionamento, tanto em modo ilhado como em operação conectada à RD. Elas podem ser resumidas em três tipos principais: controle de fator de potência (PQ), regulação de tensão (V/f) e controle de *droop*, que se trata da característica de inclinação da curva de queda de velocidade do eixo do gerador (Gao, 2015).

O controle PQ baseia-se na premissa de manter a potência ativa e reativa do gerador em valores constantes, porém conservando os valores de tensão e frequência do sistema dentro de limites adequados. Nesta estratégia de controle, a potência ativa e reativa são controladas de maneira independente uma da outra, sendo que cada sinal possui um controlador próprio para a regulação da geração. A desvantagem que este método de controle apresenta é a baixa capacidade de amenizar, até certo ponto, as variações de frequência e tensão da rede. Tal fato representa um risco para a operação de geradores distribuídos em modo ilhado, pois nessa condição o produtor independente deve manter a estabilidade do sistema sem o auxílio da rede principal (Resener et al., 2012).

Em outra perspectiva de funcionamento, a estratégia do controle V/f objetiva manter constantes as magnitudes dos valores de tensão e frequência nos terminais do gerador, independentemente da condição de potência ativa e reativa necessária. Este método de controle é comumente aplicado em operações de microrredes em modo ilhado (Gao, 2015).

Por fim, apresenta-se a estratégia de controle do *droop* do gerador. Ao operar de forma ilhada, o regulador de velocidade realiza uma modificação na inclinação da reta de velocidade do eixo do gerador, possibilitando assim que a potência mecânica fornecida seja ajustada adequadamente para a nova condição de demanda (Liu et al., 2016; Kundur, 1994).

Neste trabalho em específico, as estratégias de controle utilizadas para estabilização da operação da microrrede são o controle V/f, por meio do sistema de excitação IEEE AC1A, e, principalmente, a regulação de *droop* por meio do regulador de velocidade do gerador, cujos dados foram obtidos de Moura (2011). Nas figuras A.1 e A.2 são ilustradas as malhas de controle dos reguladores utilizados nos estudos de caso desenvolvidos na Seção 4.

3. METODOLOGIA

A Figura 1 apresenta a metodologia proposta neste trabalho. O estudo baseia-se na análise do desempenho dinâmico dos controles dos reguladores mediante a ocorrência de uma falta, que coloca a RD em situação de contingência, ocasionando o ilhamento intencional de parte do sistema, que passa a ser alimentado por um gerador síncrono distribuído, formando assim uma microrrede. Além disso, são investigados os impactos dos transitórios eletromagnéticos na microrrede após o período de transição para a operação da GD em modo ilhado.

Caso os resultados das simulações violem as restrições técnicas estabelecidas pelas regulamentações, buscam-se, por meio de ajuste fino, parâmetros de controle adequados para a operação do produtor independente em situação de ilhamento. Quando esses parâmetros são encontrados, reajustam-se os controles dos reguladores durante a transição para o modo de operação ilhado, visando garantir uma operação segura da GD. Deve-se enfatizar, entretanto, a necessidade do desenvolvimento de um algoritmo auxiliar para garantir um ajuste ótimo dos parâmetros dos sistemas de excitação, assunto que vai além dos objetivos definidos para este trabalho.

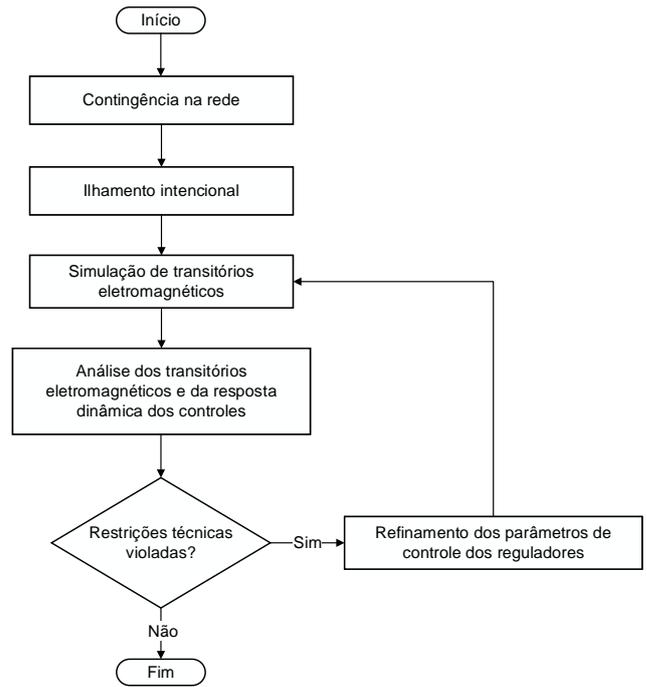


Figura 1. Diagrama de etapas da metodologia.

4. ESTUDOS DE CASO

A RD em estudo consiste em uma adaptação da rede de média tensão do sistema CIGRE 14 barras, descrita em Strunz et al. (2014), contendo uma carga total de 7,75 MW e 2,87 MVar. A representação do sistema do produtor independente consiste em um gerador síncrono cuja máquina principal é composta por uma turbina térmica. Os parâmetros usados para o gerador estão disponíveis em Moura (2011). O diagrama unifilar do sistema é apresentado na Fig. 2. Uma fonte de tensão ideal de 115 kV, representando a subestação, é conectada a dois transformadores, TR1 e TR2, conectados a linhas de distribuição de 12,47 kV. O gerador distribuído foi conectado no barramento 5 através de um transformador de 6,6/12,47 kV, representando TR3.

As análises computacionais foram realizadas no *software* ATPDraw (*Alternative Transient Program*) sob duas condições de operação do gerador no sistema, considerando duas demandas de potência distintas. Na condição 1 (C1) é considerado que o produtor independente fornece 2,5 MW de potência ativa e 0,5 MVar de potência reativa à rede. Já na condição 2 (C2), o gerador foi ajustado para entregar uma potência ativa de 4,5 MW e uma potência reativa de 0,6 MVar.

Adicionalmente, foram consideradas duas configurações de microrredes. A primeira, representando a Ilha 1, trata-se de uma microrrede contendo apenas os barramentos 4, 5 e 6, totalizando uma demanda de 1,7 MW e 0,4 MVar. Na segunda configuração, considera-se que a chave CH4 (normalmente aberta) é fechada após a ocorrência do defeito, com o objetivo de reduzir os consumidores afetados pela falta, formando, assim, a Ilha 2, cuja demanda de energia é 3,8 MW e 1,2 MVar.

Nos primeiros 15 segundos da simulação, nenhuma contingência foi apresentada, a fim de verificar a operação dinâmica dos sistemas de controle durante o arranque da máquina. Em $t = 15$ segundos, considera-se uma falta monofásica no barramento 3, forçando a atuação dos dispositivos de proteção representado pelas chaves CH1, CH2 e CH3, resultando, portanto, na formação da ilha. Assim, nos 30 segundos subsequentes analisa-se se o gerador foi capaz de ajustar-se para manter os níveis de tensão e frequência dentro dos limites estabelecidos pelas regulamentações técnicas vigentes, agrupadas na Tabela 1.

Inicialmente, foi adotado um parâmetro de ajuste do regulador de velocidade de 5% no *droop* do gerador, e, a partir desta referência, os parâmetros foram sendo refinados até o momento em que as restrições de tensão e frequência da rede não fossem mais violadas. Os dados dos parâmetros de referência dos sistemas de controle de velocidade e de excitação utilizados nas simulações são apresentados na Tabela A.1.

Tabela 1. Limites de operação do PRODIST.

Indicador	Limite
Faixa de frequência (Hz)	$59,5 \leq f \leq 60,5$
Tempo máx. fora da faixa de frequência (s)	30
Faixa de tensão (p.u.)	$0,93 \leq V \leq 1,05$

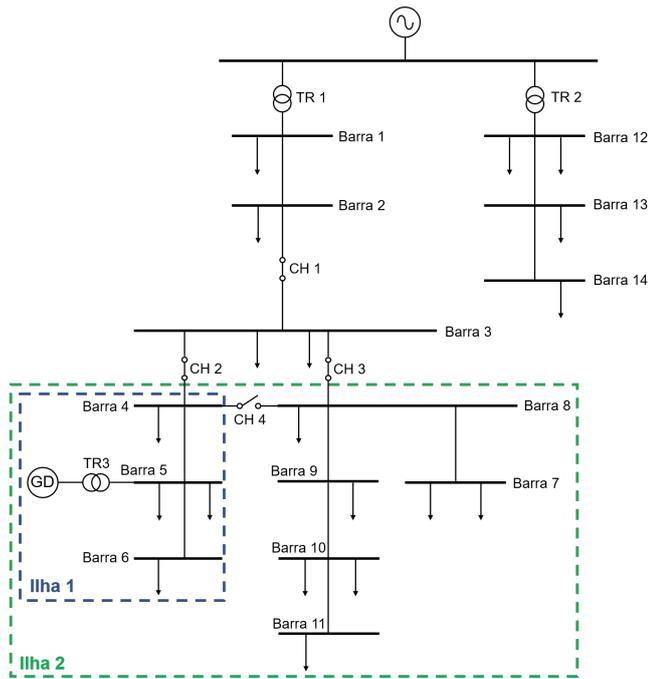


Figura 2. Rede de distribuição em estudo.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme já evidenciado neste trabalho, o objetivo do ilha-mento intencional é permitir que parte da rede permaneça energizada propositalmente, promovendo uma melhora nos índices de continuidade de serviço. Isso implica que, para a realização desta tarefa, é preciso que os dispositivos de controle sejam capazes de identificar a formação da ilha e controlá-la, mantendo assim a estabilidade dentro da microrrede em conformidade com os índices de qualidade de energia (Gao, 2015; Liu et al., 2016; Parhizi et al., 2015; Vasquez-Arnez et al., 2014). Nesse sentido, a atuação do regulador de velocidade é de suma importância para o sistema, já que ele é responsável por manter a frequência da rede dentro da faixa de operação imposta pela regulamentação.

Na Tabela B.1, apresentam-se os resultados de tensão e frequência para o caso em que as variáveis de controle do regulador de velocidade não foram ajustadas após a transição para a operação em ilha. Devido à não alteração de alguns parâmetros importantes de controle, entre eles as constantes de tempo T_3 e T_5 , que estão relacionadas ao tempo de estabilização da máquina, percebe-se que a excitação do gerador irá estabilizar após um longo período de tempo, resultando, portanto, em oscilações nas tensões das barras ao final da simulação.

Na Figura 3 apresenta-se a velocidade do eixo do gerador durante a simulação de cada caso estudado. Para Ilha1-C1, Ilha1-C2 e Ilha2-C2, com a diminuição da potência ativa demandada, nota-se que o eixo do gerador tende a acelerar, e, assim, o regulador atua buscando diminuir a potência mecânica entregue em uma tentativa de estabilizar o

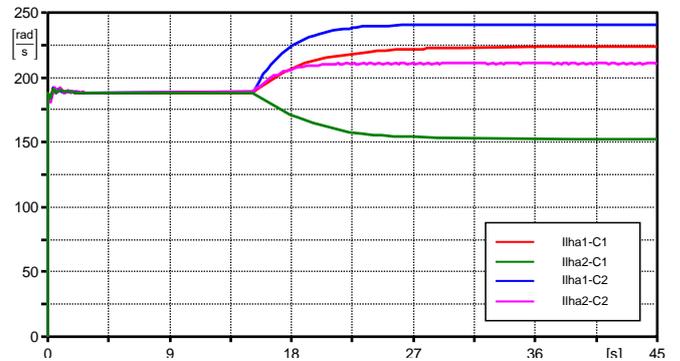


Figura 3. Velocidade do gerador sem modificação no *droop*.

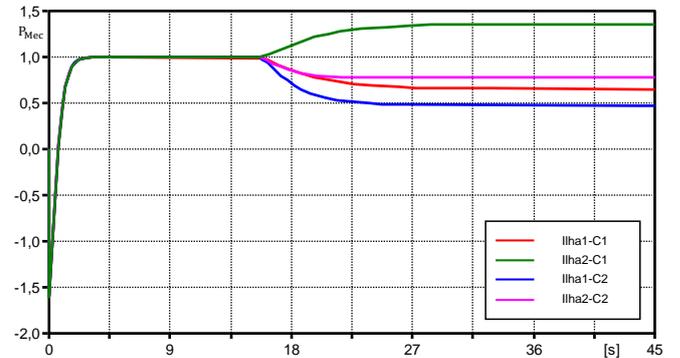


Figura 4. Potência mecânica sem alteração no *droop*.

sistema, como pode ser visualizado na Figura 4. Como o parâmetro de regulação do *droop* do gerador não foi alterado, a frequência da rede tende a se estabilizar em um valor muito acima de 60 Hz, como apresentado na Tabela B.1. O único caso em que notou-se uma diminuição na velocidade de rotação do eixo foi para a ilha 2 sob a condição de operação C1 (Ilha2-C1). Isso pode ser explicado pelo fato de o gerador estar fornecendo um valor menor de potência ativa solicitada pela microrrede no período predecessor ao ilhamento. Em seguida, o gerador precisou de uma quantidade maior de energia mecânica para suprir a demanda da microrrede, resultando na queda de velocidade visualizada (Figura 3).

Na ocorrência de violações técnicas, novos valores de ganho e de constantes de tempo para serem utilizados após a ocorrência do ilhamento foram obtidos através do ajuste fino dos parâmetros de controle do regulador de velocidade. O valor do parâmetro de regulação (R) foi reduzido de 5,0% para 0,5%, tornando a característica da curva de velocidade do gerador mais próxima da condição isócrona, ou seja, com velocidade constante independente da potência demandada. A constante de tempo T_3 foi atualizada de 0,3 para 0,01, e T_5 de 0,3 para 0,001, reduzindo, assim, o tempo de estabilização do controle. Desta forma, as simulações foram modificadas para que, no momento em que a falta ocorresse no sistema de distribuição, a filosofia de controle do regulador de velocidade fosse alterada com os valores adequados de maneira automática.

A verificação dos gráficos ilustrados nas figuras 5 e 6, destaca uma melhor performance dos sistemas controle quando seus parâmetros são atualizados. Com a nova característica de *droop*, o regulador de velocidade tende a diminuir a oscilação do eixo da máquina, promovendo assim um ajuste mais rápido da potência mecânica e anulando em um período mais curto o efeito da potência acelerante.

Na Tabela B.2 apresentam-se os resultados de tensão e frequência para o caso em que as características do regulador de velocidade foram ajustadas após a formação da ilha. Percebe-se que, devido aos novos valores das constantes de tempo, a geração da máquina e o perfil de tensão ao longo da microrrede apresentam uma melhora considerável em todos os casos analisados. Devido a menor oscilação do eixo mecânico do gerador, o sistema de excitação conseguiu estabilizar mais rapidamente, refletindo em valores de tensão mais adequados nas barras. No entanto, para a configuração de ilha 2 (Ilha2-C1 e Ilha2-C2), as tensões de regime permanente violaram os limites técnicos estabelecidos pelo PRODIST. A alternativa utilizada para mitigar este problema foi reduzir o ganho do sistema de excitação, K_a , promovendo assim uma redução na potência reativa gerada e resultando em níveis de tensão menores. Para a Ilha2-C1, o valor de K_a passou de 80 para 60, enquanto que para a Ilha2-C2 foi necessário atualizar este parâmetro para 70. Com isso, as restrições técnicas para a tensão não foram violadas.

A análise dos transitórios eletromagnéticos da rede foi realizada com o objetivo de averiguar se houveram oscilações de frequência ou de tensão que pudessem causar outras avarias no sistema. Também foi verificada a duração dos afundamentos de tensão durante o regime transitório

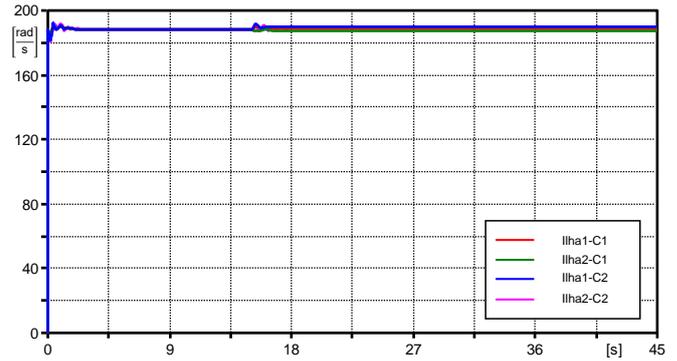


Figura 5. Velocidade do gerador com modificação no *droop*.

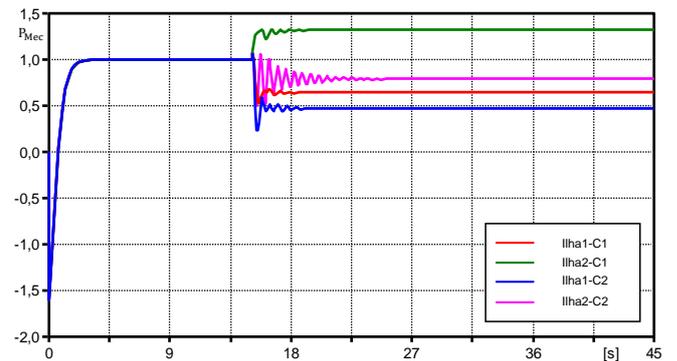


Figura 6. Potência mecânica com alteração no *droop*.

nas barras da microrrede e dos picos de frequência, que dependendo da sua duração podem causar danos irreversíveis às pás da turbina do gerador. Esses dados foram agrupados na Tabela 2. Como pode ser observado, os transitórios de tensão relacionados com a formação da ilha não apresentaram durações de afundamento significativas a ponto de comprometerem a operação do sistema. Este fenômeno também pode ser observado na Figura 7, que ilustra a tensão da barra 4 da microrrede para todos os casos considerados. Além disso, as durações dos picos de frequência também não apresentaram risco à operação da turbina do gerador, visto que para ter algum efeito negativo teriam que ser de ao menos 1 segundo Kundur (1994).

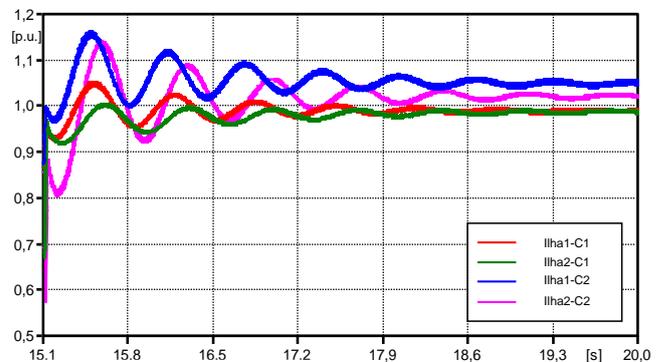


Figura 7. Tensão na barra 4 das microrredes.

Desse modo, observa-se que a mudança na filosofia dos controles após a contingência permitiu com sucesso que as configurações de microrrede se tornassem estáveis, aten-

Tabela 2. Tempo de duração dos transitórios.

Ilha	Tempo de duração (em segundos):	
	<i>Afundamento de tensão</i>	<i>Pico de frequência</i>
Ilha1-C1	0,10	0,008
Ilha1-C2	0,10	0,008
Ilha2-C1	0,12	0,009
Ilha2-C2	0,12	0,009

dendo aos limites estabelecidos pela ANEEL no módulo 8 do PRODIST.

6. CONCLUSÕES

O aumento da penetração da geração distribuída nos sistemas elétricos tem sido impulsionado por uma série de vantagens que tornam atrativa sua operação, entre elas a melhoria dos índices de continuidade de serviço. Conforme os resultados obtidos nesse trabalho, verifica-se, portanto, a importância do desenvolvimento de sistemas de controle e excitação mais avançados, visto que as unidades de GD podem atuar nos sistemas de distribuição com diferentes configurações de ilhamento. Por isso, os estudos de desempenho dinâmico de sistemas de controle são fundamentais para garantir a operação segura e confiável das microrredes no contexto das *smart grids*.

Conforme apresentado, o ilhamento intencional, quando esperado e devidamente planejado em um sistema munido de equipamentos e metodologias de controle adequadas, promove benefícios tanto para a concessionária, tendo em vista que seus consumidores não ficarão desatendidos durante o contingenciamento da rede, quanto para os autoprodutores ou produtores independentes, que podem permanecer em operação, comercializando sua energia gerada e suprindo a demanda do sistema ilhado.

Além disso, as mudanças nas filosofias de controle dos reguladores, implementadas de acordo com a metodologia proposta, foram capazes de melhorar a confiabilidade do sistema, diminuindo o efeito dos transitórios eletromagnéticos relacionados com o processo de ilhamento, e melhorando o desempenho dinâmico do gerador distribuído. Tal fato contribuiu para que as configurações de microrredes estudadas permanecessem estáveis e dentro dos limites operacionais estabelecidos pela ANEEL.

AGRADECIMENTOS

O presente artigo foi realizado com o apoio técnico e financeiro do CNPq (Doutorado Acadêmico em Inovação GD/DAI), CAPES/PROEX (cód. de finan. 001) e das Instituições de Ensino Superior: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM).

REFERÊNCIAS

ANEEL (2011). Nota Técnica n° 0025/2011. Disponível em: <<https://bit.ly/3hOEdIQ>>. Acesso em: 15 de maio de 2020.

ANEEL ([s.d.]a). Glossário da ANEEL. Disponível em: <www.aneel.gov.br/glossario>. Acesso em: 15 de maio de 2020.

ANEEL ([s.d.]b). PRODIST Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: <www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 10 de maio de 2020.

Ferreira, P.M.B., Pontes, C.E.V., Abdalla, B.S., Espíndola, L.P., Rosa, C.C.D.D., Medeiros, J.C., Rosa, R.S.D., Santos, L.F.D., Costa, J.V.H.P., Souza, M.P.D., Honório, L.D.V., and Duque, A.S.G. (2013). Ilhamento voluntário de pch para melhorar os indicadores de qualidade dec e fec do sistema elétrico de sua região de influência. In *VIII CIERTEC*, 1–10.

Gao, D.W. (2015). *Energy Storage for Sustainable Microgrid* -. Academic Press, Amsterdam, Boston.

Jouybari-Moghaddam, H., Hosseini, S.H., and Vahidi, B. (2012). An introduction to active distribution networks islanding issues. In *2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution*, 1–6.

Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control* -. McGraw-Hill Education, New York.

Liu, J., Miura, Y., and Ise, T. (2016). Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(5), 3600–3611.

Moura, F.A.M. (2011). Geração distribuída - impactos e contribuições para a qualidade da energia elétrica e dinâmica dos sistemas elétricos - uma análise através do ATP-EMTP. In *Tese de Doutorado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.

Ortiz, M.S., Bernardon, D.P., Wolter, M., da Silva, E.R., Pfitscher, L.L., and Hokama, W.S. (2018). Analysis of the technical feasibility of network parallelism for load transfers in contingency situations. In *2018 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T D-LA)*, 1–5.

Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., and Bahramirad, S. (2015). State of the art in research on microgrids: A review. *IEEE Access*, 3, 890–925.

Resener, M., Salim, R.H., and Bretas, A.S. (2012). Impacts of excitation control modes of distributed generators on distribution systems transient stability: A case study. In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–7.

Roy, N.K. and Pota, H.R. (2015). Current status and issues of concern for the integration of distributed generation into electricity networks. *IEEE Systems Journal*, 9(3), 933–944.

Strunz, K., Abbasi, E., Abbey, C., and Joos, G. (2014). Tfc6.04.02 : Tb 575 - benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources. *ELECTRA*, 3.

Vasquez-Arnez, R.L., Ramos, D.S., and Del Carpio-Huayllas, T.E. (2014). Microgrid dynamic response during the pre-planned and forced islanding processes involving dfig and synchronous generators. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 62, 175 – 182. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.044>.

Apêndice A. REGULADOR DE VELOCIDADE E SISTEMA DE EXCITAÇÃO

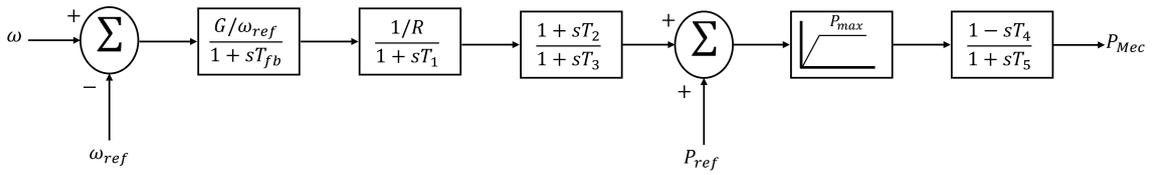


Figura A.1. Regulador de velocidade.

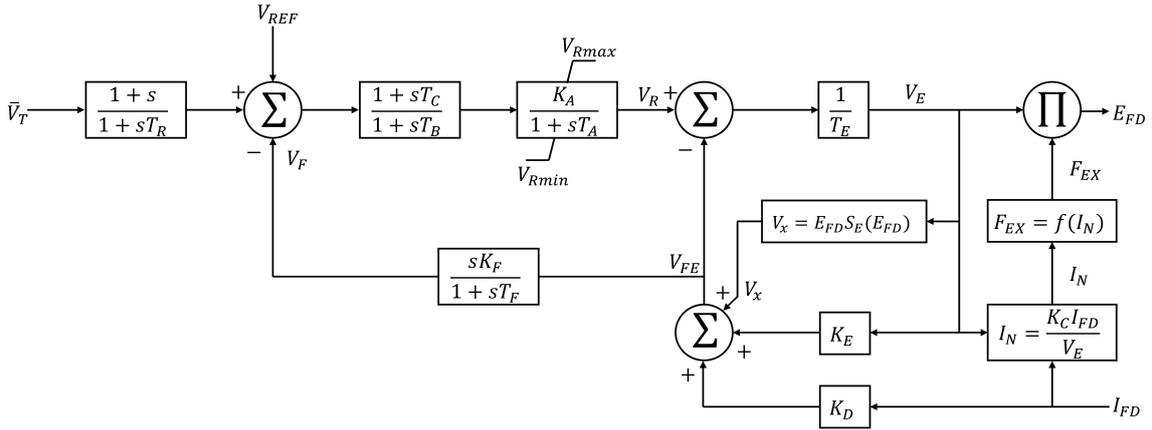


Figura A.2. Sistema de excitação IEEE AC1A.

Tabela A.1. Parâmetros de controle.

Tipo de sistemas	Controles			
Velocidade	$P_{ref} = 1,00$	$T_{fb} = 0,20$	$T_3 = 0,30$	$P_{min} = -1,60$
	$G = 1,00\%$	$T_1 = 0,00$	$T_4 = 0,00$	$P_{max} = 1,60$
	$R = 5,00\%$	$T_2 = 0,00$	$T_5 = 0,30$	$f = 60$
Excitação	$T_R = 0,02$	$T_C = 0,20$	$T_F = 1,50$	$K_D = 0,60$
	$K_A = 80,00$	$T_B = 0,10$	$T_E = 0,20$	$K_C = 0,01$
	$T_A = 0,20$	$K_F = 0,30$	$K_E = 1,00$	

Apêndice B. RESULTADOS DE TENSÃO E FREQUÊNCIA NAS ILHAS

Tabela B.1. Resultados de tensão e frequência da rede sem a alteração dos controles.

Ilha	Frequência (Hz)	Tensão nas barras (p.u.)							
		B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
Ilha1-C1	71,12	0,93-1,05	0,92-1,04	0,92-1,05	—	—	—	—	—
Ilha1-C2	76,06	0,92-1,20	0,92-1,20	0,91-1,19	—	—	—	—	—
Ilha2-C1	48,68	1,00-1,15	1,00-1,14	0,98-1,13	1,00-1,15	1,00-1,15	1,00-1,14	0,99-1,13	0,99-1,13
Ilha2-C2	67,30	0,99-1,22	0,97-1,20	0,96-1,19	0,99-1,22	0,99-1,22	0,98-1,21	0,97-1,20	0,97-1,20

Tabela B.2. Resultados de tensão e frequência da rede com a alteração dos controles.

Ilha	Frequência (Hz)	Tensão nas barras (p.u.)							
		B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
Ilha1-C1	60,30	0,99	0,98	0,98	—	—	—	—	—
Ilha1-C2	60,45	1,05	1,04	1,04	—	—	—	—	—
Ilha2-C1	59,70	1,09	1,08	1,07	1,09	1,09	1,09	1,08	1,08
Ilha2-C2	60,17	1,12	1,11	1,10	1,12	1,12	1,11	1,10	1,10