

# Utilização de Regiões de Segurança para Avaliação do Impacto de Geração Eólica em Sistemas Elétricos de Potência

Fábio M. Tavela\* Othon F. Avila\* João A. Passos Filho\*

\* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, (e-mails: fabio.tavela@engenharia.ufjf.br, othon.avila@engenharia.ufjf.br, jopass@ieee.org).

**Abstract:** The intermittent nature of wind generation makes it necessary to develop tools that assist in the security assessment of electrical power systems with this kind of alternative source. The static security region (SSR) is a powerful tool that allows assessing the security of a power system through visual inspections. Therefore, the purpose of this paper is to insert a new security limit in SSR, to complement the security assessment when intermittent generation sources, such as wind farms, are present in power systems. For that purpose, an algorithm for the automatic construction of SSR is presented, where this new security limit is a natureza intermitente da geração eólica faz com seja necessário o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na avaliação de segurança em sistemas elétricos de potência (SEPs) com este tipo de fonte alternativa. incorporated. The methodology is validated through a computational tool developed in Python 3 and applied to the test *New England* system, and its results are validated by ANAREDE.

**Resumo:** A natureza intermitente da geração eólica faz com seja necessário o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na avaliação de segurança em sistemas elétricos de potência (SEPs) com este tipo de fonte alternativa. A região de segurança estática (RSE) é uma poderosa ferramenta que permite avaliar a segurança de um SEP através de inspeções visuais. Portanto, a proposta deste artigo é a inserção de um novo limite de segurança na RSE, de maneira a complementar a avaliação de segurança quando fontes de geração intermitentes, como parques eólicos, estiverem presentes em SEPs. Com essa finalidade, é apresentado um algoritmo para construção automática de RSE, onde este novo limite de segurança é incorporado. A metodologia é validada através de uma ferramenta computacional desenvolvida em linguagem Python 3 e aplicada ao sistema teste *New England*, e seus resultados são validados pelo ANAREDE.

**Keywords:** wind generation; power flow; power system security; static security region; steady-state analysis.

**Palavras-chaves:** geração eólica; fluxo de potência; segurança em sistemas de potência; região de segurança estática; análise em regime permanente.

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas elétricos de potência (SEPs) possuem características altamente não-lineares, especialmente quando se leva em consideração o ambiente de constante mudança ao qual estão inseridos, onde carga, geração e parâmetros operacionais variam continuamente. Além disso, tais sistemas estão sujeitos a um amplo conjunto de perturbações, sejam pequenas ou grandes (Kundur et al., 2004). Com o aumento natural dos SEPs, tanto em dimensão quanto em complexidade, e a crescente penetração de fontes alternativas de energia, novas ferramentas precisarão ser desenvolvidas para auxiliar na operação segura destas redes. A geração eólica tem sido uma das fontes com maior crescimento nas últimas duas décadas, tanto por conta de sua redução de custo quanto por benefícios ambientais (IRENA, 2020).

Os parques eólicos são normalmente fontes de energia não despacháveis e apresentam um alto grau de intermitência,

e essa característica se deve a estocasticidade da velocidade do vento (Ackermann, 2005). A Figura 1 apresenta a variação da geração de um parque eólico conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN), onde ocorrem variações consideráveis na geração de potência ativa em curtos períodos de tempo. Logo, se faz necessário que a intermitência desse tipo de geração seja considerada quando seu grau de penetração se torna significativo em um SEP. Do ponto de vista do SIN, estima-se que até 2023, 9,8% da capacidade de geração instalada no Brasil será composta por geração eólica (ONS, 2020), o que é bastante significativo.

Diversos trabalhos nos últimos anos têm abordado tópicos relacionadas a geração eólica em diversas áreas do setor elétrico. Em (Castro et al., 2012) são propostos modelos de geradores eólicos em regime permanente integrados a um algoritmo de fluxo de potência com controle primário de frequência. Em (Londero et al., 2014) são apresentados os impactos causados pela integração de turbinas

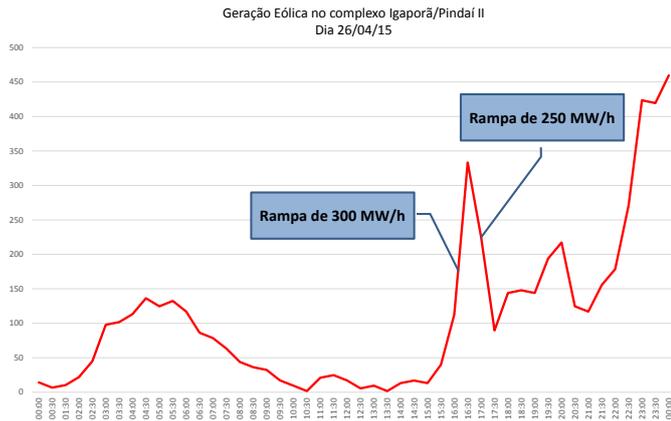


Figura 1. Exemplo da intermitência da geração eólica.  
Fonte: (ONS, 2017).

eólicas com velocidade variável na estabilidade de tensão a longo prazo. Em (Lins et al., 2018) se destacam os desafios da operação, em tempo real, enfrentados pelo SIN com a inserção de geração eólica, onde é evidenciado o problema da intermitência desta fonte alternativa. Em (da Costa et al., 2019) é proposta uma análise estática da sensibilidade da margem de carregamento para perturbações na velocidade do vento em parques eólicos.

Por outro lado, a utilização de ferramentas para avaliação de segurança de tensão tanto em ambiente *off-line*, para o planejamento da operação e expansão, quanto *on-line*, em centros de controle e operação, se mostra cada vez mais difundida ao redor do mundo e tem se tornado indispensável em SEPs modernos. Em relação a avaliação de segurança de SEPs em tempo quase real, observa-se que a utilização de *on-line dynamic security assessment* (*on-line DSA*) ganhou popularidade nos últimos anos por conta dos benefícios na performance da operação de SEPs (Morison et al., 2006). Um sistema *on-line DSA* conta com a utilização de diversos recursos para a avaliação de segurança, sendo a região de segurança estática (RSE) umas das principais ferramentas nesse quesito.

Este trabalho tem como proposta a inserção de um novo limite de geração intermitente em RSEs, de maneira a representar o impacto das perturbações do vento em parques eólicos, e assim, possibilitar uma ferramenta complementar para avaliação de segurança de tensão em SEPs com um alto grau de penetração de geração eólica.

## 2. REGIÕES DE SEGURANÇA ESTÁTICA

A Região de Segurança Estática é uma poderosa ferramenta utilizada para avaliação de segurança de tensão em regime permanente. Basicamente, uma RSE é composta por um gráfico de três dimensões onde é possível visualizar toda a região de operação segura, para determinado ponto de operação, de um sistema dividido em três grupos de geração. Através da RSE é possível avaliar os perfis seguros de despacho de potência para os três grupos de geração, o que enfatiza sua importância em centros de operação. Em (Jardim et al., 2004) e (Neto et al., 2010) destaca-se que a visualização dos resultados de uma RSE permite que violações de segurança sejam removidas através do redespacho da geração do ponto de operação.

Uma RSE é construída a partir da execução de sucessivos casos de fluxos de potências sob diferentes cenários de despacho entre os grupos de geração e considerando uma lista de contingências. O processo de construção da RSE adotado neste trabalho é baseado na metodologia apresentada em (Almeida et al., 2013), em que os grupos de geração  $G2$  e  $G3$  têm suas gerações modificadas enquanto o grupo  $G1$ , chamado de grupo de referência, é responsável por fechar o balanço de potência do sistema.

A Figura 2 apresenta uma RSE meramente ilustrativa, onde pode-se verificar as regiões de operação segura e insegura. Destaca-se que cada eixo do gráfico é referente a potência ativa de um grupo de geração. Diferentes limites de segurança podem ser incluídos na RSE a fim de avaliar a segurança do SEP. Para facilitar a análise gráfica, a RSE é usualmente representada através de nomogramas, também ilustrados na Figura 2. Cada nomograma mostra a combinação da geração de potência ativa de dois grupos de geração, logo, são definidos três nomogramas, sendo cada um deles correspondente a projeção da RSE em cada um dos três planos que a compõem.

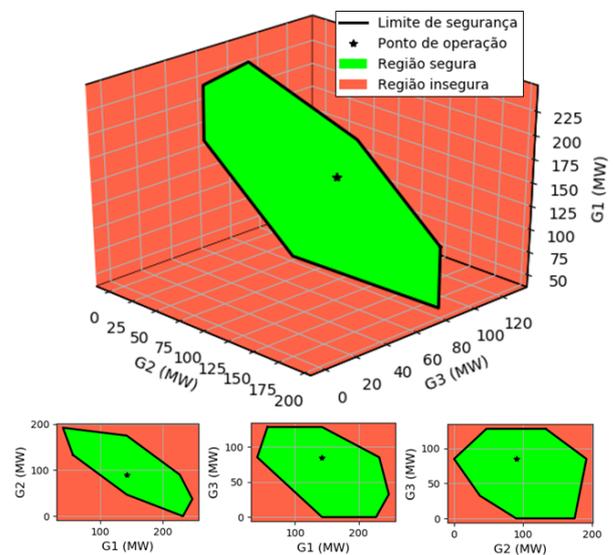


Figura 2. Exemplo de RSE.

Durante a construção da RSE é possível monitorar diversas grandezas de interesse, de forma a se estabelecer limites de segurança, como:

- Limite de tensão: pelo menos uma das barras do sistema viola seu limite mínimo ou máximo de tensão no caso base ou durante uma contingência;
- Limite térmico: pelo menos um dos circuitos do sistema viola seu limite de carregamento no caso base ou durante uma contingência;
- Limite de Mvar: pelo menos um dos geradores do sistema atingiu ou limite mínimo ou máximo de geração de reativo no caso base ou durante uma contingência;
- Limite de contingências  $N - 1$ : pelo menos um das contingências de abertura de circuitos não possui solução no fluxo de potência;
- Limite de MW: o próprio ponto de operação já não possui solução ou os grupos atingiram o limite de transferência de potência entre as regiões do sistema.

### 3. LIMITE DE GERAÇÃO INTERMITENTE

#### 3.1 Modelagem de parques eólicos

O objetivo deste artigo é apresentar o impacto da intermitência da geração de parques eólicos através da representação de um limite de segurança em uma RSE. Portanto, optou-se por uma modelagem simplificada de parques eólicos nos problemas de fluxo de potência necessários para a construção da RSE. O parque eólico foi modelado como uma barra do tipo PQ, sendo a potência ativa especificada como a geração do parque e fator de potência unitário. Em (Sardinha et al., 2017) são apresentados aperfeiçoamentos nos requisitos técnicos mínimos para a conexão de parques eólicos ao SIN, onde é apresentada uma curva de capacidade de geração de potência reativa para o ponto de conexão, indicando que parques eólicos devem possuir a capacidade de operar com fator de potência unitário. Destaca-se que por conta da modelagem como barra PQ, o parque eólico não possui nenhuma capacidade de controle de geração de potência reativa.

De maneira a reproduzir a variação da velocidade do vento e consequentemente o impacto na geração de potência ativa do parque eólico, são introduzidas no sistema duas contingências de geração. O objetivo é aumentar e reduzir a geração de potência ativa do parque eólico através de tais contingências, de acordo com as equações (1) e (2), respectivamente.

$$P_{G,k}^{aum} = P_{G,k} + P_{ctg,k} \quad (1)$$

$$P_{G,k}^{red} = P_{G,k} - P_{ctg,k} \quad (2)$$

Onde,  $P_{G,k}^{aum}$  é a geração aumentada de potência ativa da barra  $k$  referente ao parque eólico e  $P_{G,k}$  é sua geração inicial; já  $P_{ctg,k}$  é a potência ativa incremental devido a contingência de geração aplicada a barra  $k$ . Seguindo o mesmo padrão,  $P_{G,k}^{red}$  é a geração reduzida de potência ativa da barra  $k$ . É importante enfatizar que a geração do parque eólico retorna para o seu valor inicial após a análise de cada contingência de geração.

Considerando que  $P_{G,k}^{aum}$  e  $P_{G,k}^{red}$  podem ser chamados de  $P_{G,k}^{WG}$  em referência a geração eólica, do inglês *wind generation* (WG), define-se os resíduos de potência da barra  $k$  durante uma contingência de geração do parque eólico conforme as equações (3) e (4)

$$\Delta P_k = P_{G,k}^{WG} - P_{L,k} - P_k^{inj}(V, \Theta) \quad (3)$$

$$\Delta Q_k = -Q_{L,k} - Q_k^{inj}(V, \Theta) \quad (4)$$

Onde  $P_k^{inj}$  e  $Q_k^{inj}$  são, respectivamente, as potências ativa e reativa injetadas na barra  $k$  e seu equacionamento pode ser encontrado em (Monticelli, 1983);  $P_{L,k}$  e  $Q_{L,k}$  são as potências ativa e reativa demandadas pela barra  $k$ .

#### 3.2 Inserção do limite de geração intermitente na RSE

A inserção de um novo limite de segurança em uma RSE depende da monitoração das grandezas de interesse

durante seu processo de construção. Portanto, a inserção do novo limite de geração intermitente na RSE é feita considerando as contingências de geração descritas nas equações (1) e (2) e monitorando o estado de operação do SEP.

A proposta deste artigo é apresentar uma metodologia para avaliar a segurança de um ponto operativo considerando possíveis violações de seus limites de segurança quando a geração de um parque eólico variar bruscamente. Como o objetivo deste limite é avaliar o impacto da variação abrupta da geração eólica, após cada execução destas contingências deve-se verificar se outros limites de segurança foram violados. Destaca-se que existe uma diferença entre o limite de contingências  $N - 1$  e o limite de geração intermitente. Enquanto o limite de contingência  $N - 1$  é contabilizado apenas quando o caso de fluxo de potência é divergente ou não convergente, e outros limites, como por exemplo o limite de tensão, são contabilizados individualmente, o limite de geração intermitente é contabilizado quando houver qualquer violação durante as contingências de geração do parque eólico. Ou seja, se durante a variação abrupta da geração de um parque eólico o caso divergir ou não convergir, ou se os limites de tensão, térmico ou de geração reativa forem violados, considera-se que houve uma violação do limite de geração intermitente.

De acordo com a proposta deste artigo, um SEP com parque eólico estará sujeito a uma série de limites durante as contingências de geração do parque eólico que, caso violados, indicam a violação do limite de geração intermitente. Logo, as equações (5), (6) e (7) definem estas restrições.

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max}, \forall i \in N_{bus} \quad (5)$$

$$Q_{g,min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,max}, \forall i \in N_{gen} \quad (6)$$

$$S_{km} \leq S_{max}, \forall i \in N_{lin} \quad (7)$$

Onde a equação (5) representa que o módulo da tensão de cada barra do conjunto  $N_{bus}$  deve estar dentro dos limites mínimo e máximo, sendo  $N_{bus}$  o conjunto de todas as barras do sistema. A expressão (6) indica que a geração de potência reativa de todas as barras geradores do conjunto  $N_{gen}$  deve estar dentro dos limites mínimo e máximo, sendo  $N_{gen}$  o conjunto de todas as barras PV do sistema. Finalmente, a expressão (7) indica que o fluxo de potência aparente para todos os circuitos do conjunto  $N_{lin}$  deve ser menor ou igual ao limite térmico, sendo  $N_{lin}$  o conjunto de circuitos do sistema. É importante ressaltar que os limites de tensão podem ser diferentes para cada barra ou área do sistema, assim como os limites de geração de potência reativa diferem de acordo com o gerador, e os limites térmicos dependem de cada circuito.

Com base na metodologia para construção de uma RSE apresentada em (Almeida et al., 2013), o fluxograma da Figura 3 resume o processo e indica como deve ser realizada a inserção do limite de geração intermitente. NDIR é o número de direções para a construção da RSE e NCTG é o total de contingências que o sistema será submetido, correspondendo a soma das contingências de abertura de circuito com as contingências de geração do parque eólico.

De acordo com o fluxograma da Figura 3, após a leitura dos dados do sistema, deve-se selecionar uma direção e calcular os fatores de participação, que irão indicar a proporção que cada unidade de geração de cada grupo deve contribuir. Após o cálculo dos fatores de participação, deve-se modificar o perfil de geração do sistema, incrementando ou reduzindo a potência ativa das unidades dos grupos de geração conforme a definição dos fatores de participação. Em seguida, deve-se solucionar o problema de fluxo de potência para o caso base e verificar se os limites de tensão, potência reativa e/ou térmico são violados. Para uma contingência  $N - 1$ , o processo é semelhante, aplica-se a contingência ao sistema e soluciona-se o fluxo de potência, porém deve-se contabilizar cada um dos limites de segurança individualmente. Após a análise de todas as contingências, deve-se verificar se o limite de MW foi atingido. Caso contrário deve-se voltar a modificar o perfil de geração do sistema e todo o processo é repetido. O processo irá finalizar quando o limite de MW for identificado para todas as direções, e assim, todos os dados para a construção da RSE estarão disponíveis.

A análise de contingências ocorre logo depois, onde deve-se verificar se a contingência em questão é de geração de parque eólico ou se é uma contingência de abertura de circuito. Se for uma contingência de geração, deve-se aplicar a redução ou aumento da geração do parque eólico, e em seguida solucionar o fluxo de potência, para logo depois verificar se o limite de geração intermitente é violado. Para uma contingência  $N - 1$ , o processo é semelhante, aplica-se a contingência ao sistema e soluciona-se o fluxo de potência, porém deve-se contabilizar cada um dos limites de segurança individualmente. Após a análise de todas as contingências, deve-se verificar se o limite de MW foi atingido. Caso contrário deve-se voltar a modificar o perfil de geração do sistema e todo o processo é repetido. O processo irá finalizar quando o limite de MW for identificado para todas as direções, e assim, todos os dados para a construção da RSE estarão disponíveis.

Esta metodologia não fica limitada a um único parque eólico, podendo ser estendida conforme a necessidade do estudo. O limite de geração intermitente para vários parques eólicos pode ser utilizado através da variação em conjunto da geração de todos os parques eólicos ou através da variação de cada parque individualmente, aplicando uma série de contingências de geração, dependendo da topologia do sistema em questão.

#### 4. RESULTADOS

A metodologia proposta é validada através do sistema *New England*, cujo diagrama unifilar pode ser visto na Figura 4. Este sistema de médio porte é bem estabelecido na literatura e foi inicialmente proposto por (Mili et al., 1990). Originalmente, este sistema possui um total de 39 barras e 10 unidades de geração. Um gerador adicional (barra 40) é conectado à barra 14 através de um *link* de baixa impedância, totalizando 11 unidades de geração. Tal gerador é incorporado ao sistema para representar um parque eólico, e a barra 14 é escolhida como ponto de conexão por se encontrar na região mais central do sistema. A ferramenta desenvolvida para construção da RSE foi implementada em Python 3 e teve os resultados do fluxo de potência e da RSE validados pelo ANAREDE. O processo de solução do problema de fluxo de potência foi modelado pelo método de Newton-Raphson em coordenadas polares de acordo com (Monticelli, 1983).

A Tabela 1 contém os dados dos geradores utilizados durante a simulação. A geração e carga ativa total do sistema são iguais a 8059,2 e 7995,5 MW, respectivamente. Destaca-se que a carga é modelada como potência constante e não sofre alteração durante o processo de cons-

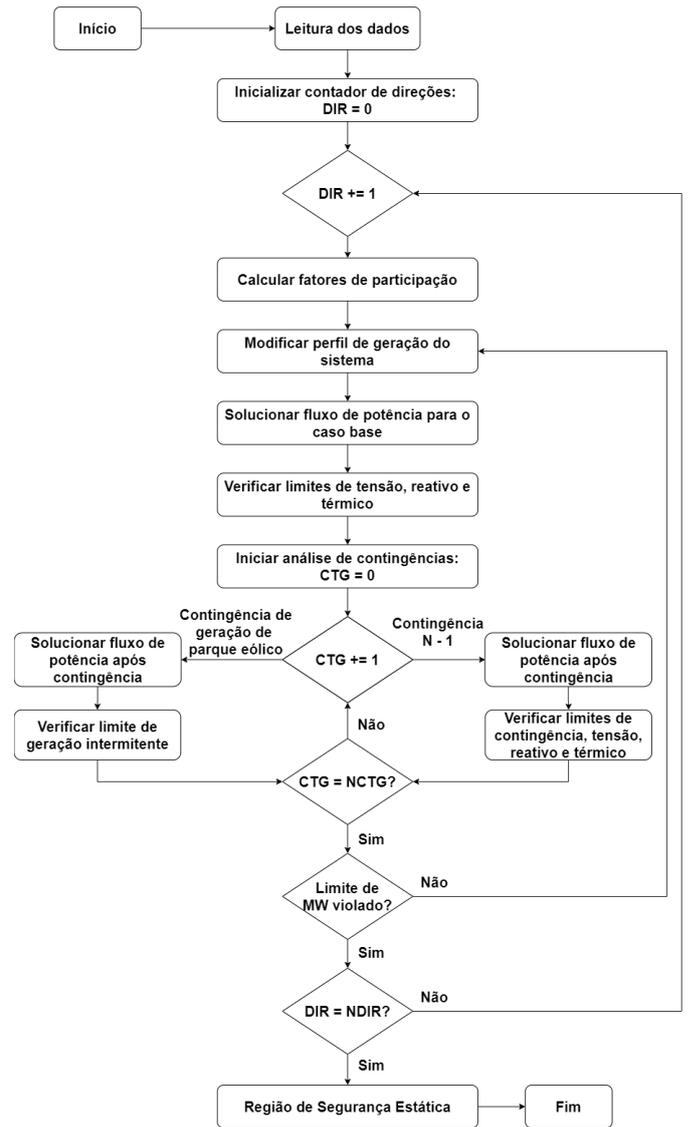


Figura 3. Processo de construção da RSE.

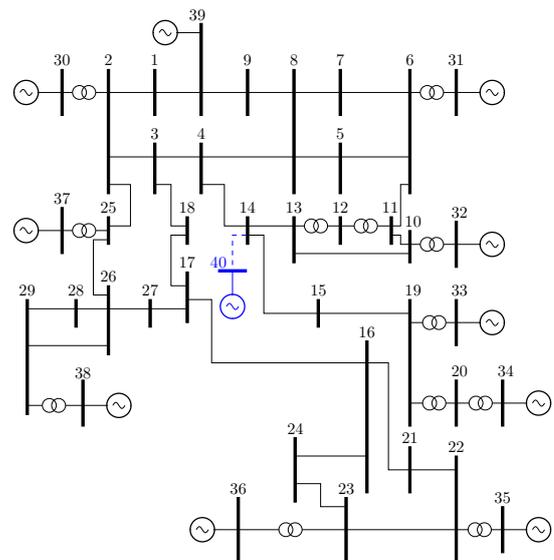


Figura 4. Diagrama Unifilar do Sistema *New England*.

trução da RSE. Os valores de carga demandados em cada barra podem ser encontrados em (Almeida, 2011).

De acordo com a Tabela 1, a geração de potência ativa do parque eólico é definida como 1200,0 MW, logo, a fim de se manter o balanço de potência no sistema, reduziu-se a geração das demais barras de forma a se manter a geração total do sistema igual a 8059,2 MW. A geração do parque eólico garante uma penetração de aproximadamente 15%.

Tabela 1. Geradores do Sistema *New England*.

Barra	$P_{g,casobase}$ (MW)	$P_{g,max}$ (MW)	$Q_{g,min}$ (Mvar)	$Q_{g,max}$ (Mvar)
30	250,0	1000,0	-900,0	900,0
31	473,2	1000,0	-900,0	900,0
32	450,0	1000,0	-900,0	900,0
33	532,0	1000,0	-900,0	900,0
34	508,0	1000,0	-900,0	900,0
35	550,0	1000,0	-900,0	900,0
36	460,0	1000,0	-900,0	900,0
37	440,0	1000,0	-900,0	900,0
38	600,0	1000,0	-900,0	900,0
39	2596,0	3000,0	-900,0	900,0
40	1200,0	1800,0	0,0	0,0

Neste trabalho adotou-se como critério de divisão dos grupos de geração  $G1$ ,  $G2$  e  $G3$  a proximidade elétrica das unidades de geração. Tal divisão pode ser vista na Tabela 2. É importante salientar que a barra 40, representando o parque eólico, não é incluída em nenhum grupo de geração por ser uma fonte de natureza não despachável e, portanto, tem sua geração mantida constante durante todo o processo de construção da RSE, salvo durante as contingências de geração do parque eólico.

Tabela 2. Grupos de Geração.

Grupo de Geração	Barras
G1	30, 37, 38 e 39
G2	31, 32, 33 e 34
G3	35 e 36

A geração de potência reativa das barras do tipo PV foi monitorada durante a construção da RSE e mantida dentro dos limites apresentados na Tabela 1. O módulo da tensão de todas as barras também foi monitorado, sendo o limite de tensão mínimo definido em 0,90 p.u. e o máximo em 1,10 p.u.. A capacidade térmica de todos os circuitos do sistema foi definida como 1800 MVA.

A abertura dos circuitos 26-27 e 26-29 foram adotadas como contingências simples e as duas contingências de geração foram incluídas para simular a intermitência do vento. A potência ativa incremental é definida como  $P_{ctg,k} = 600,0$  MW, e portanto, a geração ativa da barra 40 pode ser definida, durante as contingências de geração do parque eólico, como  $P_{G,40} = 1200,0 \pm 600,0$  MW.

Os nomogramas da RSE do sistema *New England* podem ser vistos na Figura 5. De maneira a proporcionar uma boa visualização dos limites de segurança, esta RSE foi construída com 60 direções. É importante observar na Figura 5 que a área em verde representa a região em que o limite de geração intermitente não está violado. A região em amarelo contém a área da RSE em que todos os limites,

com exceção do limite de contingência  $N - 1$  e o limite de MW, são violados. Por fim, a região em laranja indica que apenas o limite de MW não está violado, enquanto a área avermelhada indica a região insegura de operação.

Nota-se que o ponto de operação estudado se encontra muito próximo do limite de geração intermitente. Uma pequena redução nas gerações de potência ativa dos grupos  $G2$  e  $G3$ , e conseqüentemente, um aumento da geração do grupo  $G1$ , levaria o sistema para um ponto de operação no qual o limite de geração intermitente seria violado. Isso indica que caso a geração do parque eólico se altere bruscamente devido a intermitência desse tipo de fonte, pelo menos um dos limites de segurança dentre tensão, potência reativa e térmico, seriam violados.

Vale ressaltar que os limites de tensão, potência reativa e térmico se encontram bem distantes do ponto de operação, indicando que o sistema só irá violá-los se o perfil de geração do sistema for consideravelmente alterado. O limite de MW mostra que o ponto de operação estudado possui grande margem para alteração de perfil de geração dos grupos de geração. É importante destacar que se a carga  $e/$ ou o perfil de geração do caso base sejam alterados, colocando o sistema em um novo ponto de operação, será necessária a construção de uma nova RSE. Ou seja, cada ponto de operação possui uma RSE associada. Porém, como a carga e geração se alteram em uma velocidade razoavelmente lenta, e como consequência a RSE também, torna-se possível que a RSE seja atualizada em intervalos de tempo mais longos. Em (Morison et al., 2006), é citado que em um sistema *on-line* DSA é possível que o a monitoração seja realizada periodicamente, em intervalos típicos de 10 à 30 minutos.

O tempo de construção da RSE é afetado pela inclusão de novas contingências. A Tabela 3 apresenta uma comparação entre o tempo computacional gasto para a construção da RSE com e sem o limite de geração intermitente. O número de direções foi alterado a fim de demonstrar que quanto maior ele for, maior será o esforço computacional necessário para gerar a RSE. Nenhum outro parâmetro foi alterado além do número de direções. Os tempos gastos foram obtidos utilizando um computador com processador Intel Core i5 1,7 GHz, 4 GB de RAM e sistema operacional Windows 10 64-bit, e não foi utilizado processamento paralelo. Em cada teste foram realizadas três medições de tempo e o resultado mostrado na Tabela 3 corresponde a média aritmética.

O aumento no tempo de construção da RSE devido a inserção do limite de geração intermitente é evidenciado na Tabela 3. Entretanto, é importante que fique claro que no sistema estudado, apenas duas contingências de geração e duas contingências  $N - 1$  foram utilizadas. Se um número maior de contingências  $N - 1$  fosse adotado, essa proporção de tempo seria certamente alterada.

## 5. CONCLUSÕES

O limite de geração intermitente proposto neste trabalho traz informações a respeito da segurança do sistema através de simples inspeções visuais, permitindo a identificação de pontos de operação que estejam suscetíveis a violações dos limites de segurança caso ocorram variações considerá-

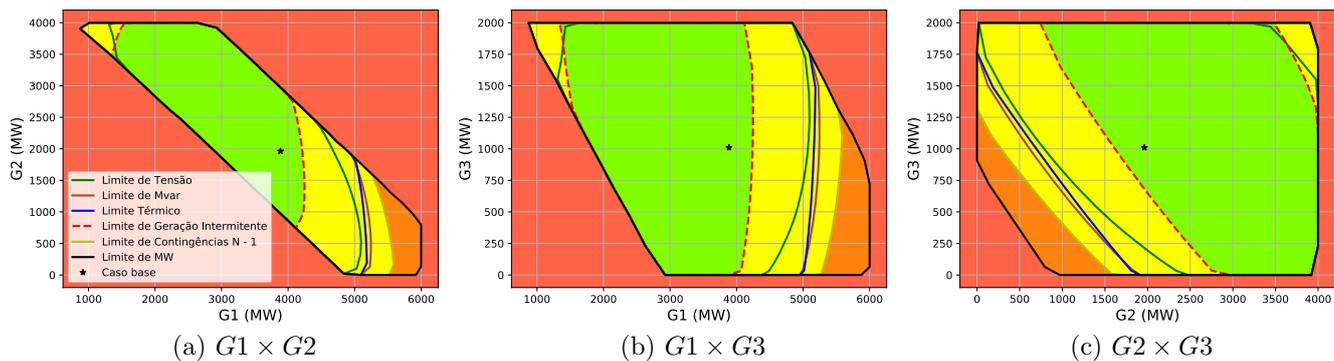


Figura 5. RSE do Sistema *New England*.

Tabela 3. Tempo de construção da RSE com inserção do limite de geração intermitente.

Nº de direções	Tempo de processamento (s)		Aumento %
	Sem limite	Com limite	
20	103,7	148,2	42,9
60	300,5	438,6	46,0
100	494,0	724,0	46,6

veis na geração de um parque eólico conectado ao sistema. Tal metodologia foi aplicada a um sistema de médio porte em que um único parque eólico foi conectado, entretanto, nada impede que esta ferramenta seja aplicada a sistemas com vários parques eólicos.

Uma desvantagem da inclusão do limite de geração intermitente em uma RSE é que o processo de construção se tornará mais custoso computacionalmente devido a necessidade de análise de novas contingências. Portanto, é importante que seja avaliado o porte do sistema em estudo e o número de contingências aplicadas.

Finalmente, destaca-se que o limite de segurança apresentado pode ser aplicado a estudos em sistemas com a presença de outras fontes intermitentes, como por exemplo a geração solar fotovoltaica. É ainda possível que a metodologia seja estendida de forma a incluir modelagens mais completas de fontes intermitentes, a fim de garantir resultados ainda mais precisos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES, do CNPq, do INERGE, da FAPEMIG e da UFJF/PPEE.

#### REFERÊNCIAS

- Ackermann, T. (2005). *Wind power in power systems*. John Wiley & Sons.
- Almeida, F.C., Passos Filho, J.A., Pereira, J.L., Henriques, R.M., and Marcato, A.L. (2013). Assessment of load modeling in power system security analysis based on static security regions. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 24(1-2), 148–161.
- Almeida, F.d.C.B. (2011). Avaliação do desempenho dos dispositivos de controle e modelagem de carga a partir de regiões de segurança estática.
- Castro, L.M., Forte-Esquivel, C.R., and Tovar-Hernandez, J.H. (2012). Solution of power flow with automatic load-frequency control devices including wind farms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 2186–2195.
- da Costa, J.N., Passos Filho, J.A., and Henriques, R.M. (2019). Loading margin sensitivity analysis in systems with significant wind power generation penetration. *Electric Power Systems Research*, 175, 105900.
- IRENA (2020). [www.irena.org/wind](http://www.irena.org/wind). Acessado em 30 de janeiro de 2020.
- Jardim, J.L., Neto, C.S., and Kwasnicki, W.T. (2004). Design features of a dynamic security assessment system. In *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.*, 446–452. IEEE.
- Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., et al. (2004). Definition and classification of power system stability. *IEEE transactions on Power Systems*, 19(2), 1387–1401.
- Lins, F.G., Lima, F., Vieira, R., Oliveira, G.L.C.P., Freitas, Y., and Tenório, R. (2018). Desafios da operação, em tempo real, do sistema elétrico brasileiro com a inserção da geração eólica. *XIV Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*.
- Londero, R.R., de Mattos Affonso, C., and Vieira, J.P.A. (2014). Long-term voltage stability analysis of variable speed wind generators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(1), 439–447.
- Mili, L., Baldwin, T., and Adapa, R. (1990). Phasor measurement placement for voltage stability analysis of power systems. In *29th IEEE conference on decision and control*, 3033–3038. IEEE.
- Monticelli, A.J. (1983). *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. E. Blucher.
- Morison, K., Wang, L., and Hamadani, H. (2006). New tools for blackout prevention. In *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, 319–324. IEEE.
- Neto, C.S., Quadros, M.A., Santos, M.G., and Jardim, J. (2010). Brazilian system operator online security assessment system. In *IEEE PES General Meeting*, 1–7. IEEE.
- ONS (2017). Desafios da operação de energia eólica pelo ons: Impactos na programação diária e no tempo real.
- ONS (2020). <http://www.ons.org.br/>. Acessado em 30 de janeiro de 2020.
- Sardinha, S.L., Cisneiros, S.J., Botelho, M.J., Gomes, P., Brasil, D.O., Medeiros, F.C., Bianco, A., Medeiros, A.D., Quintão, P.E., Barbosa, A.A., et al. (2017). Improvement of technical requirements for connecting wind plants in the brazilian interconnected power system. *EletroEvolução-Sistemas de Potência*, 87, 59–66.