

# Conexão Ótima de Parques Eólicos *Offshore* com Maximização da Capacidade Eólica Considerando *Transmission Switching*

Mariana B. Altomar\* João A. Passos Filho\*  
Leandro A. Vasconcelos\* Leonardo W. de Oliveira\*  
José Luiz R. Pereira\*

\* Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de  
Fora, MG, (e-mail: mariana.altomar@engenharia.ufjf.br).

**Abstract:** The continuous growth of wind energy in recent years has made Brazil stand out in the world ranking that measures the installed capacity of generation. Recent studies are being focused on offshore wind farms (OWFs). The determination of the best connection points for new OWFs to the grid requires a comprehensive analysis, which takes into account technical, economic and environmental constraints. This paper proposes a methodology based on a transmission switching approach to determine the optimal point of OWF connection in a power system in order to accommodate higher utilization of firm wind power considering the electrical losses of the existing transmission system. The methodology also considers transmission line limits. The algorithm is evaluated in the IEEE 24-bus system.

**Resumo:** O crescimento contínuo da energia eólica nos últimos anos fez o Brasil se destacar no ranking mundial que mede a capacidade instalada deste tipo de geração. Estudos recentes estão sendo focados em parques eólicos *offshore* (PEOs). A determinação dos melhores pontos de conexão para novos PEOs na rede requer uma análise abrangente, que leva em consideração as restrições técnicas, econômicas e ambientais. Este artigo propõe uma metodologia baseada na técnica *Transmission Switching* para determinar o ponto ideal da conexão do PEO em um sistema de energia, a fim de acomodar uma maior utilização da energia eólica firme considerando as perdas elétricas do sistema de transmissão existente. A metodologia também considera limites de linhas de transmissão. O algoritmo proposto é avaliado considerando o Sistema 24-barras do IEEE.

**Keywords:** Electrical Losses; Maximum Penetration of Wind Energy; Optimal Power Flow; Transmission Switching; Wind Energy.

**Palavras-chaves:** Energia Eólica; Fluxo de Potência Ótimo; Máxima Penetração de Energia Eólica; Perdas Elétricas; *Transmission Switching*; .

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos as energias renováveis receberam muito investimento devido a crescentes preocupações ambientais. Formas de energia limpa, como solar e eólica, vêm substituindo antigas formas de energia baseadas em combustíveis fósseis.

A energia eólica tem se evidenciado no cenário mundial e também de forma considerável no Brasil. De acordo com Council (2016) o Brasil se destaca entre os 10 primeiros no mundo em níveis de capacidade instalada acumulada e nova. Devido a esse crescimento muitos estudos estão sendo desenvolvidos para analisar os impactos da geração eólica conectada ao sistema interligado brasileiro (EPE (2020) e IEA (2018)).

Atualmente, toda a geração eólica no Brasil é produzida por parques *onshore*, mas estudos estão sendo desenvolvidos para a primeira usina *offshore* na região nordeste do país. Esse tipo de produção pode se situar longe dos centros

de carga, mas muitas vezes o potencial de geração justifica a instalação quando se considera o cenário brasileiro.

No entanto, uma usina *offshore* precisa de um sistema de transmissão capaz de conectá-la à rede existente. Frequentemente, os limites físicos e operacionais do sistema de transmissão podem reduzir a quantidade de energia utilizável do total oferecido em um sistema interconectado. Portanto, os principais assuntos deste estudo são a capacidade dos parques eólicos *offshore* (PEO) e o ponto de conexão com a rede principal. De acordo com Vasconcelos et al. (2019), uma análise abrangente desses assuntos requer a consideração de um período prolongado de estudo, os perfis de carga, das fontes de energia existentes, da infraestrutura das linhas de transmissão e das principais características associadas ao comportamento do vento da região em estudo.

Portanto, o presente artigo propõe uma metodologia baseada em uma abordagem da técnica de *Transmission Switching* (TS), apresentada por Fisher et al. (2008), para determinar o ponto ideal de conexão de um PEO em um

sistema elétrico, a fim de acomodar maior utilização da energia eólica firme considerando as perdas ativas do sistema de transmissão. O *TS* é formulado como um problema de otimização para determinar o barramento mais apropriado entre uma lista de candidatos para a conexão de um PEO. A metodologia também considera os limites das linhas de transmissão. O algoritmo é avaliado considerando o Sistema 24-Barras do IEEE, normalmente utilizado para testes de confiabilidade, apresentado na referência Subcommittee (1979).

Este artigo está estruturado da seguinte forma. A Seção 2 mostra uma revisão da literatura sobre os temas associados a este trabalho. A Seção 3 apresenta a metodologia proposta, explicando detalhadamente as estratégias utilizadas em cada etapa do processo de otimização. A Seção 4 mostra os resultados para o sistema teste. Finalmente, a Seção 5 apresenta as principais conclusões.

## 2. CONTEXTO E TRABALHOS RELACIONADOS

Uma visão geral é apresentada nesta seção, com foco no estudo da alocação ótima e máxima penetração da energia eólica em sistemas de energia elétrica (SEE) (Seção A) e a aplicação de *Transmission Switching* em sistemas elétricos com energia eólica (Seção B). Além disso, destaca-se a conexão deste trabalho a esses assuntos.

### 2.1 Alocação ótima e máxima penetração de energia eólica em sistemas elétricos

Uma análise probabilística da operação do sistema é proposta em Burke and O'Malley (2009b) para definir um modelo de programação linear para alocar de maneira ótima a capacidade eólica com base na qualidade dos recursos eólicos e na capacidade do sistema de transmissão. Este artigo apresenta um fluxo de carga sequencial em conjunto com uma abordagem de redundância de restrição de geometria computacional de programação linear para alocar de maneira ideal as capacidades de vento. Um valor específico de penetração de energia eólica é inicialmente considerado viável. De forma a aperfeiçoar e estender a metodologia de Burke and O'Malley (2009b), Burke and O'Malley (2009a) propõe uma análise de metas incrementais de penetração de energia eólica aplicadas a partir de um nível inicial baixo até um limite, quando o problema de otimização se torna inviável. Diferentemente dos artigos Burke and O'Malley (2009b) e Burke and O'Malley (2009a), a referência Burke and O'Malley (2010) descreve a pesquisa de um modelo ideal de alocação de capacidade eólica não firme, usando dados históricos do vento para modelar variações na geração eólica. O problema é modelado como programação linear em larga escala combinada com a decomposição de Benders. Uma análise de sensibilidade é realizada para diferentes perfis de vento, considerando diferentes preços de combustível e níveis de carga do cliente.

Os artigos citados serviram de referência para Vasconcelos et al. (2019). Neste artigo os autores apresentam uma metodologia para determinar o ponto de conexão de PEO ideal em um sistema baseada em Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM). O algoritmo visa penetração máxima de energia eólica firme e perda mínima, considerando restrições de segurança relacionadas ao critério de contin-

gência “*N-1*”, limites de intercâmbio e uma estratégia para reduzir o número de restrições no problema de otimização.

Este trabalho é baseado na metodologia apresentada por Vasconcelos et al. (2019) e tem por objetivo utilizar a técnica *TS* para eliminar a não-linearidade do algoritmo. Essa técnica apresenta o despacho do sistema de transmissão, ou seja, o problema de otimização determina quais linhas de transmissão estarão em funcionamento ou não para dado cenário de operação do sistema.

### 2.2 *Transmission Switching* em sistemas elétricos com energia eólica

Desde que a metodologia de *Optimal Transmission Switching (OTS)* foi apresentada em Fisher et al. (2008), ela foi adotada na literatura para resolver diferentes tipos de problemas. Estudos recentes vêm aplicando o *TS* para ajudar a encontrar uma melhor utilização das redes de transmissão com energia eólica em larga escala e aumentar a penetração da energia eólica. A referência Villumsen et al. (2012) examina a expansão de uma rede elétrica existente com *TS*. Os autores investigam a expansão ideal para integrar a energia eólica ao sistema, minimizando o custo total do investimento e o custo esperado de geração de energia. O problema é modelado como um programa estocástico de número inteiro de dois estágios, com capacidade de geração e demanda futura incertas. Considera-se uma aproximação linearizada do fluxo de potência ótimo com custos de geração linear e sem perdas nas linhas de transmissão. A referência Dehghan and Amjady (2015) apresenta um modelo não determinístico de planejamento de expansão de transmissão e armazenamento, juntamente com *OTS* em sistemas elétricos com energia eólica. Ele apresenta uma formulação robusta, adaptável de *min – max – min*, resolvida por um algoritmo de decomposição para a solução ótima. Este artigo apresenta um modelo de planejamento estático para uma troca entre precisão e tratabilidade. Em Qiu and Wang (2014), *transmission switching* é usada para modificar a rede para minimizar os custos de geração térmica do sistema e reduzir o corte de geração eólica. A metodologia *TS* é aplicada ao problema de programação do dia seguinte, e o fluxo de energia na rede de transmissão é modelado por uma formulação CC sem perdas. As referências citadas consideram a análise de *transmission switching* para aumentar a eficiência da transmissão e a penetração do vento em sistemas nos quais os parques eólicos já estão integrados. As metodologias são lineares e não levam em consideração as perdas de linha. Este artigo tem como objetivo usar a metodologia *TS* para descobrir o ponto de conexão ótimo e a capacidade de um novo parque eólico, considerando a perda ativa na transmissão.

## 3. METODOLOGIA PROPOSTA

Conforme especificado anteriormente, este trabalho considera uma conexão de geração eólica firme, o que significa que não observa cortes devido a violações operacionais do sistema. Portanto, é necessário um estudo de viabilidade para verificar se a conexão de energia eólica causará algum congestionamento na rede de transmissão.

Para isso, considere o sistema inicialmente sem violações e que a conexão da energia eólica deve preservar essa

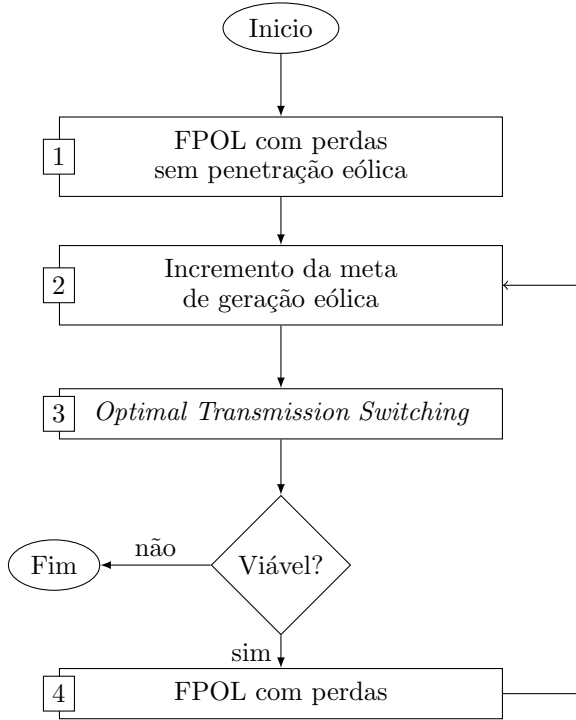


Figura 1. Fluxograma do algoritmo proposto.

condição. A penetração de energia eólica é então iniciada com uma meta baixa, e o problema de otimização avaliará a viabilidade. Enquanto o problema for viável, a penetração eólica será aumentada em pequenos passos discretos até o sistema atingir uma violação.

O fluxograma da Figura 1 mostra a metodologia proposta. O algoritmo foi desenvolvido em Python 3, usando a plataforma Anaconda e a IDE Spyder. Também foi utilizado pacote de software gratuito para otimização convexa CVXOPT.

Na Etapa 1, um fluxo de potência ótimo linearizado (FPOL), apresentado por Stott et al. (2009), testa a viabilidade do sistema para o caso base, sem penetração de geração eólica. O FPOL determina o despacho de geração convencional e despachável no sistema, visando minimizar a geração de potência ativa do sistema. Em seguida, uma meta de penetração eólica é definida inicialmente na Etapa 2.

Os resultados de geração e perdas da Etapa 1 são usados como dados de entrada para o modelo *OTS* na Etapa 3, exceto a geração da Barra 13 (barra de referência), que é considerada uma variável. Esta etapa tem como objetivo determinar o ponto de conexão ideal para o PEO para máxima utilização da energia eólica considerando o nível atual de penetração.

Se a solução for viável, é feita uma avaliação na Etapa 4 para verificar o novo ponto de operação do sistema, dada a linha de transmissão selecionada pelo *OTS*. O FPOL avaliará o novo despacho de geradores convencionais com base na topologia do novo sistema.

A meta de penetração eólica é acrescida de um pequeno passo e o processo é repetido até a Etapa 3 se tornar inviável. Nesse ponto, o último valor de penetração eólica

é considerado o máximo admissível pelo sistema, e o ponto de conexão é ideal para o PEO.

A seguir, cada etapa da metodologia será discutida em detalhes.

### 3.1 Fluxo de Potência Ótimo com Perdas e sem Penetração Eólica (Etapa 1)

Para realizar as análises de *Transmission Switching*, é necessário ter informações sobre o despacho dos geradores convencionais e as perdas de linha. Portanto, esta primeira etapa visa garantir a viabilidade da operação do sistema no caso base e fornecer dados de inicialização para a etapa seguinte.

O FPOL é modelado como um programa linear, e as variáveis de decisão são o despacho de geração e os ângulos dos barramentos. A formulação é dada por:

$$\min \sum_G C_{gk} P_{gk} \quad (1)$$

$$s.t. \quad (2)$$

$$\sum_{G_k} P_{gk} + \sum_{L_k} B_{km} \theta_{km} = \sum_{D_k} P_{dk} \quad , k \in K \quad (3)$$

$$B_{km} \theta_{km} \leq P_{km}^{max} \quad , m \in L \quad (4)$$

$$- B_{km} \theta_{km} \leq P_{km}^{max} \quad , m \in L \quad (5)$$

$$\theta_k^{min} \leq \theta_k \leq \theta_k^{max} \quad , k \in K \quad (6)$$

$$P_{gk}^{min} \leq P_{gk} \leq P_{gk}^{max} \quad , g \in G \quad (7)$$

onde  $K$  representa o conjunto das barras,  $L$  das linhas,  $G$  dos geradores e  $D$  das cargas.  $G_k$ ,  $L_k$  e  $D_k$  representam os geradores, as linhas e as cargas conectadas à barra  $k$ , respectivamente.  $C_{gk}$  representa o custo de geração do gerador na barra  $k$ ;  $P_{gk}$  a energia ativa gerada na barra  $k$ ;  $B_{km}$  a susceptância das linhas que conectam as barras  $k$  e  $m$ ;  $\theta_{km}$  a diferença angular entre as barras  $k$  e  $m$ ;  $P_{dk}$  a carga conectada à barra  $k$ ;  $P_{km}^{max}$  o fluxo de potência máximo através da linha entre as barras  $k$  e  $m$ ;  $\theta_k^{min}$  e  $\theta_k^{max}$  o ângulo mínimo e máximo de tensão da barra  $k$ ;  $P_{gk}^{min}$  e  $P_{gk}^{max}$  a geração mínima e máxima de energia na barra  $k$ .

As perdas ativas no sistema de transmissão são incluídas no FPOL de acordo com a metodologia introduzida por Dos Santos and Diniz (2010). Uma abordagem iterativa é usada onde linearizações sucessivas são feitas para aproximar as perdas quadráticas. A cada iteração, uma nova aproximação tangente à curva de perdas quadráticas é calculada para as linhas do sistema, e os cortes adicionados ao problema FPOL são formulados como:

$$P_{perdas_{km}} - 2g_{km}(\theta_{km}^{h-1})(\theta_{km}^h) \geq -g_{km}(\theta_{km}^{h-1})^2, m \in L \quad (8)$$

onde  $P_{perdas_{km}}$  é a perda do ramo  $k - m$  e  $g_{km}$  é a condutância do ramo  $k - m$ .  $\theta_{km}^{h-1}$  indica o valor de  $\theta_{km}$  obtido na iteração anterior. As perdas agora são consideradas variáveis do problema e também precisam ser incluídas no balanço de energia do sistema (3). Portanto, a nova formulação é dada por:

$$\sum_G P_{gk} + \sum_L B_{km} \theta_{km} = \sum_D P_{dk} + \sum_L P_{perdas_{km}}/2 \quad (9)$$

### 3.2 Incremento da meta de penetração eólica (Etapa 2)

Após a verificação da viabilidade na Etapa 1, a meta de penetração da energia eólica,  $\delta$ , é definida como 1%. É um valor pequeno para introduzir a geração eólica no sistema. A meta é acrescida em pequenos passos discretos de  $\Delta\delta = 1\%$  até que o processo seja inviável. Em seguida, o passo é reduzido para  $\Delta\delta = 0,1\%$  para encontrar o nível máximo de penetração. Portanto, a conexão ideal do PEO e a capacidade máxima de energia eólica firme são os resultados do último nível de penetração possível.

### 3.3 Optimal Transmission Switching (Etapa 3)

Na abordagem proposta, o *OTS* é modelado como programação linear inteira mista (PLIM) e é usado para determinar o ponto de conexão do parque eólico *offshore* que torna possível o nível de penetração da energia eólica com a maior utilização. Para isso, algumas modificações são feitas no método *OTS* apresentado em Fisher et al. (2008).

Neste estudo, apenas as linhas que poderiam conectar o parque eólico ao sistema são consideradas variáveis e o sistema original permanece intacto. A Figura 2 ilustra essa situação. O *OTS* visa escolher entre algumas linhas candidatas geograficamente próximas umas das outras dentro de uma determinada região, conectadas ou não por uma possibilidade  $n$  de chaves  $z_{km}$ . A nova formulação é dada por:

$$\max C_k \quad (10)$$

$$s.a \quad (11)$$

$$\theta_k^{min} \leq \theta_k \leq \theta_k^{max} \quad (12)$$

$$P_{gk}^{min} \leq P_{gk} \leq P_{gk}^{max} \quad (13)$$

$$0 \leq C_k \lambda_k \leq P_{PEO}^{max} \quad (14)$$

$$P_{km}^{min} \leq P_{km} \leq P_{km}^{max} \quad (15)$$

$$P_{km}^{min} z_{km} \leq P_{km} \leq P_{km}^{max} z_{km} \quad (16)$$

$$-C_k \lambda_k + \sum_{L_k} P_{km} = -\sum_{D_k} P_{dk} - \sum_{L_k} P_{perdas_{km}/2} \quad (17)$$

$$-\sum_{G_k} P_{gk} + \sum_{L_k} P_{km} = -\sum_{D_k} P_{dk} - \sum_{L_k} P_{perdas_{km}/2} \quad (18)$$

$$\sum_{L_k} P_{km} = \sum_{G_k} P_{gk} - \sum_{D_k} P_{dk} - \sum_{L_k} P_{perdas_{km}/2} \quad (19)$$

$$B_{km} \theta_{km} - P_{km} = 0 \quad (20)$$

$$B_{km} \theta_{km} - P_{km} + (1 - z_{km})M \geq 0 \quad (21)$$

$$B_{km} \theta_{km} - P_{km} + (1 - z_{km})M \leq 0 \quad (22)$$

$$\sum_m (1 - z_{km}) = j \quad (23)$$

$$C_k \lambda_k = D_{tot} \delta \quad (24)$$

onde  $C_k$  e  $\lambda_k$  representam a capacidade e o fator de capacidade do PEO, respectivamente;  $P_{PEO}^{max}$  o máximo de energia eólica gerada pelo PEO;  $j$  é o número de linhas candidatas abertas;  $D_{tot}$  é a demanda total do sistema.

A capacidade de energia eólica é maximizada, sujeita às restrições operacionais do sistema e às leis de Kirchhoff. Os

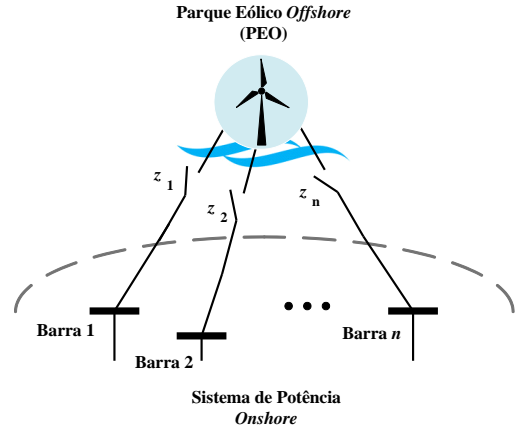


Figura 2. Esquema da metodologia proposta.

limites para as restrições de ângulo de tensão nas barras (12) são  $\pm\pi$ . As equações (13) e (14) representam os limites inferior e superior de geração para geradores e parques eólicos convencionais, respectivamente.

Os limites para os elementos de transmissão são apresentados nas equações (15) e (16), em que a última está associado às linhas candidatas para conectar o PEO ao sistema.  $z_{km}$  é a variável binária que representa se a linha  $k-m$  está incluída no sistema ( $z_{km} = 1$ , a chave nessa linha está fechada) ou não ( $z_{km} = 0$ , a chave está aberta). As capacidades da linha em (16) são multiplicadas por  $z_{km}$ , portanto, sua  $P_{km}$  é zero quando a linha não é escolhida para conectar o PEO ao sistema.

As equações (17), (18) e (19) descrevem a restrição de balanço de potência para cada barra; (17) está associada à barra de conexão do PEO, (18) à barra de referência e (19) às outras barras. As leis de Kirchhoff são incorporadas nas restrições (20), (21) e (22). Quando uma linha está aberta, não há energia fluindo através dela, mas a formulação (20) pode limitar o fluxo de energia a zero em todas as linhas que compartilham o terminal com ela. As equações (21) e (22) são uma modificação de (20) para contornar essa situação e são aplicadas apenas às linhas candidatas.  $M$  é um número grande, maior ou igual a  $B_{km} \theta_{km}$ . Quando  $z_{km} = 1$ , o valor de  $M$  não importa e as equações (21) e (22) se tornam a original (20). Quando  $z_{km} = 0$ , o valor de  $M$  garante que ambas as equações sejam satisfeitas, independentemente da diferença de ângulo.

A saída do modelo *OTS* (10) - (24) é a linha que conecta melhor o PEO ao sistema, considerando a meta de geração da energia eólica. O resultado garante que essa meta seja alcançada e nenhuma linha seja sobrecarregada.

### 3.4 Fluxo de Potência Ótimo com Perdas (Etapa 4)

Esta etapa segue a mesma formulação do FPOL descrita na Etapa 1. A única diferença é que agora a penetração eólica é considerada como resultado da Etapa 3. Para considerar a energia eólica no sistema, a equação do balanço de potência (3) é modificada na barra à qual o parque eólico está conectado. A nova formulação é dada por:

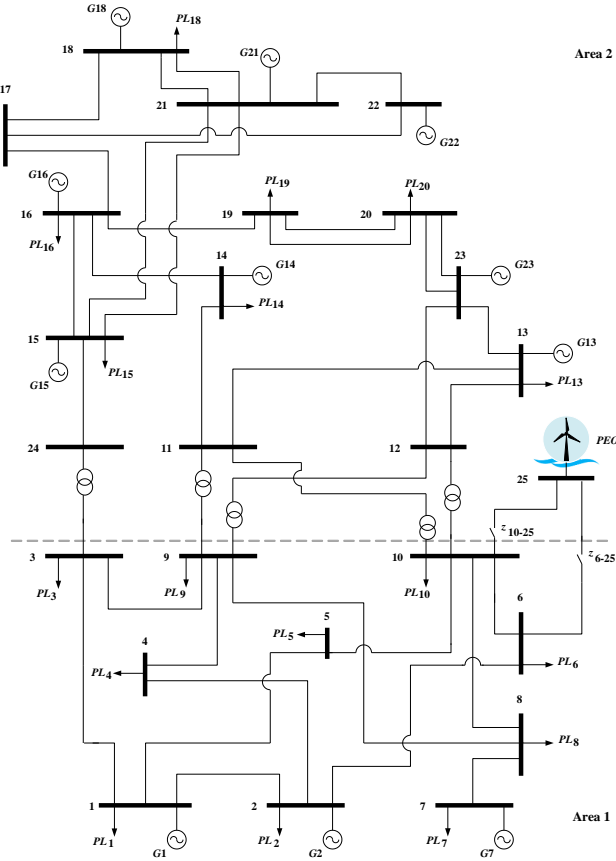


Figura 3. Diagrama Unifilar do Sistema 24-Barras (Teste de Confiabilidade do IEEE).

$$\sum_{G_k} P_{gk} + \sum_{L_k} B_{km} \theta_{km} = \sum_{D_k} P_{dk} + \sum_{L_k} P_{perdas_{km}}/2 + C_k \lambda_k \quad (25)$$

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos aplicando a metodologia proposta para a conexão ótima de um PEO com penetração máxima da energia eólica no Sistema de Teste de Confiabilidade do IEEE, mostrado na Figura 3. A carga total demandada pelo sistema é de 2850 MW.

Para representar o PEO, a barra 25 é adicionada ao sistema. A análise da conexão ideal com a penetração máxima da energia eólica é realizada considerando duas linhas candidatas: 6-25 e 10-25, com reatância e resistência iguais a 0,0023 p.u. e 0,0839 p.u., respectivamente. Os limites dessas linhas de transmissão não foram considerados, de forma a garantir a máxima penetração eólica. O fator de capacidade  $\lambda_k$  do parque eólico *offshore* adotado foi de 30%.

Como mencionado anteriormente, a meta inicial de penetração da energia eólica é baixa e é considerada como 1% da carga total. A penetração é aumentada em pequenos passos de 1% até que a meta de 41% torna o problema inviável. Os incrementos de penetração de 0,1% são realizados a partir do nível 40% para encontrar a penetração máxima da energia eólica que respeita a capacidade de transmissão do sistema (40,8%). Uma penetração de energia eólica superior a 40,8% da carga total causa uma

Tabela 1. Capacidade alocada (MW) e perdas ativas do sistema (MW) para cada nível de penetração e barra candidata, Sistema de Teste de Confiabilidade do IEEE.

$\delta$ (%)	Capacidade Alocada (MW)		Perdas do Sistema (MW)
	$C_{10-25}$	$C_{6-25}$	
0,00	0,00	0,00	64,78
1,00	0,00	95,00	63,28
2,00	0,00	190,00	60,12
...	...	...	...
11,00	0,00	1045,00	44,18
12,00	0,00	1140,00	42,75
13,00	1235,00	0,00	42,75
14,00	1330,00	0,00	43,32
...	...	...	...
40,60	3857,00	0,00	75,42
40,70	3866,50	0,00	75,75
40,80	3876,00	0,00	76,13

violação do limite da linha de transmissão 6-10. Nesse ponto, a linha candidata selecionada para conectar o PEO ao sistema é a linha 10-25.

A Tabela 1 mostra os valores da capacidade alocada de energia eólica  $C_k$  para alguns níveis de penetração, cada ponto de conexão candidato e as perdas correspondentes do sistema. Para confirmar os resultados, o sistema foi testado para cada conexão individualmente, ou seja, apenas a conexão 6-25 ou a 10-25 foi considerada. A máxima penetração suportada pela linha 6-25 foi de 12% e pela linha 10-25 foi a mesma obtida anteriormente.

Através da Tabela 1 é perceptível que para penetrações eólicas de até 12% a barra ótima de conexão determinada é a Barra 6, coerentemente com os resultados mostrados. Maiores níveis de penetração só são suportados pela Barra 10.

A Figura 4 mostra o comportamento dos geradores de acordo com a penetração eólica. A cada nível de penetração eólica um redespacho é feito pelo FPOL da Etapa 4, o que causa uma grande diversidade na resposta dos geradores. Percebe-se que a barra de referência 13 é a que apresenta maior redução de geração e que os geradores da área 1 foram os que sofreram menor alteração. Esta área apresenta quase metade da carga total do sistema e menos de 20% da capacidade de geração ativa.

Para validar a metodologia, os resultados foram comparados aos obtidos pela Metodologia *Affine* apresentada em Altomar et al. (2015). Os resultados podem ser comparados apenas qualitativamente, dado que na referência citada o fluxo de potência considerado é não linear e o PEO é conectado ao sistema através de um link de baixa impedância, ou seja, não considera uma linha de transmissão entre o sistema original e o PEO.

A metodologia *Affine* indica que até 10% de penetração eólica, a conexão na Barra 6 é ótima. A partir deste ponto a Barra 10 passa a ser a melhor opção. Esses resultados são compatíveis com os obtidos por este trabalho, validando assim a metodologia.

#### 5. CONCLUSÃO

Este artigo propôs uma abordagem baseada em *Transmission Switching* para determinar o ponto ideal para conexão

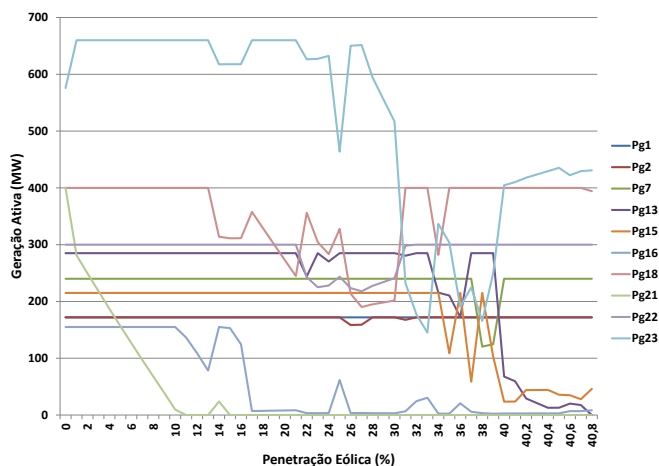


Figura 4. Evolução dos níveis de geração ativa do sistema de acordo com a penetração eólica.

de um PEO em um sistema de energia, para acomodar maior utilização da energia eólica firme, considerando as perdas ativas do sistema de transmissão existente. Além disso, o método considera os limites de transmissão da rede, sendo assim possível analisar o impacto da geração eólica na operação do sistema. Os resultados são apresentados para o Sistema de Teste de Confiabilidade do IEEE, com duas linhas candidatas à conexão do PEO em potencial.

A metodologia é aplicada ao sistema sem considerar limitações de transmissão na linha de conexão do PEO, de forma a determinar o máximo de geração eólica que pode ser inserida no sistema. Observou-se que a conexão pela linha 10-25 proporciona a máxima penetração da energia eólica no sistema. Penetrações superiores não são possíveis devido a limitações na rede de transmissão original do sistema. Os valores obtidos são validados qualitativamente pelos resultados da metodologia *Affine*.

Devido à penetração eólica, a geração dos geradores convencionais do sistema é reduzida. Devido ao redespacho feito na etapa 4 do algoritmo, essa redução ocorre em geradores diferentes para cada nível de penetração eólica. Porém os geradores com menores variações são aqueles conectados à área 1, área de menor capacidade de geração do sistema. Além disso, a barra de referência é responsável pela maior absorção da redução de geração.

Apesar das perdas estarem envolvidas na metodologia, a sua minimização não é o objetivo principal. Os resultados indicam que nem sempre uma maior penetração de geração eólica no sistema acarreta em uma redução nas perdas ativas totais. Por isso, é importante analisar cuidadosamente cada sistema.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro. Os autores também agradecem ao INERGE (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energia Elétrica).

## REFERÊNCIAS

- Altomar, M.B., Passos Filho, J.A., and Carvalho, E.D.M. (2015). Assessment of solar generation power plants through sequential newton power flow solutions along the weekly load curve. *The XI Latin-American Congress of Electricity Generation and Transmission*.
- Burke, D.J. and O'Malley, M.J. (2009a). Maximizing firm wind connection to security constrained transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(2), 749–759.
- Burke, D.J. and O'Malley, M.J. (2010). A study of optimal nonfirm wind capacity connection to congested transmission systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(2), 167–176.
- Burke, D.J. and O'Malley, M. (2009b). Optimal firm wind capacity allocation to power systems with security constraints. In *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 1–9. IEEE.
- Council, G.W.E. (2016). Global wind report 2016—annual market update. *Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium*.
- Dehghan, S. and Amjady, N. (2015). Robust transmission and energy storage expansion planning in wind farm-integrated power systems considering transmission switching. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(2), 765–774.
- Dos Santos, T.N. and Diniz, A.L. (2010). A dynamic piecewise linear model for dc transmission losses in optimal scheduling problems. *IEEE Transactions on Power systems*, 26(2), 508–519.
- EPE (2020). Roadmap eólica offshore brasil. Technical report, Empresa de Pesquisa Energética.
- Fisher, E.B., O'Neill, R.P., and Ferris, M.C. (2008). Optimal transmission switching. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(3), 1346–1355.
- IEA, O.W. (2018). World energy outlook series. Paris, France: *International Energy Agency*.
- Qiu, F. and Wang, J. (2014). Chance-constrained transmission switching with guaranteed wind power utilization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(3), 1270–1278.
- Stott, B., Jardim, J., and Alsac, O. (2009). Dc power flow revisited. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(3), 1290–1300.
- Subcommittee, P.M. (1979). Ieee reliability test system. *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, (6), 2047–2054.
- Vasconcelos, L.A., Passos Filho, J.A., de Oliveira, L.W., and Avila, O.F. (2019). Optimal connection of offshore wind farm with maximization of wind capacity to power systems considering losses and security constraints. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019.
- Villumsen, J.C., Brønmo, G., and Philpott, A.B. (2012). Line capacity expansion and transmission switching in power systems with large-scale wind power. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2), 731–739.