Planejamento Multiobjetivo de Expansão da Transmissão baseado em Dominância de Pareto Considerando Geração Eólica

Felipe L. Miranda *, Leonardo W. de Oliveira **, Edimar J. de Oliveira **

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM), Campus Paracatu, MG-188, s/n - km 167, Paracatu, MG, 38609-899*
***Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) - Departamento de Energia Elétrica, Campus UFJF, Rua José Lourenço Kelmer, s/n - São Pedro, Juiz de Fora, MG, 36036-330*

E-mails: felipe.laure@iftm.edu.br, leonardo.willer@engenharia.ufjf.br, edimar.joliveira@engenharia.ufjf.br

Abstract: The presence of variable energy conversion such as wind sources leads to new challenges to the Transmission Expansion Planning problem (TEP). Due to uncertainties related to the stochastic behavior of equipment and variable sources, methods based on scenarios and contingency lists are often preferable to more realistic tools such as Monte Carlo Simulation (MCS) due to the computational cost of the last kind. This work presents an efficient multi-objective algorithm for the probabilistic TEP by considering investment and reliability as objectives, integrating Pareto dominance concepts with the estimation of Expected Energy not Supplied through MCS to reduce the complexity of the problem and increasing its efficiency. The 24-bar IEEE-RTS system is used to demonstrate the technique's performance and ability to search for good solutions around 48% faster than the traditional method.

Resumo: A presença de fontes variáveis de conversão de energia como a eólica traz novos desafios ao problema de Planejamento da Expansão da Transmissão (PET). Devido às incertezas relacionadas ao comportamento estocástico de equipamentos e fontes variáveis, métodos baseados em cenários e listas de contingências são muitas vezes preferíveis a ferramentas mais realistas como a Simulação Monte Carlo (SMC) devido ao custo computacional destas últimas. Este trabalho apresenta um eficiente algoritmo multiobjetivo para o PET probabilístico ao considerar investimento e confiabilidade como objetivos, integrando conceitos de dominância de Pareto à estimação da Energia Esperada não Suprida (EENS) através da SMC para reduzir a complexidade do problema e aumentar sua eficiência. O sistema IEEE-RTS de 24 barras é utilizado para demonstrar o desempenho da técnica e capacidade de busca por boas soluções cerca de 48% mais rápido que o método tradicional.

Keywords: Transmission Expansion Planning; Multi-objective optimization; Reliability; Wind Power.

Palavras-chaves: Planejamento de Expansão da Transmissão; Otimização Multiobjetivo; Confiabilidade; Energia Eólica.

1. INTRODUÇÃO

A adequação dos sistemas elétricos a partir de reforços dos equipamentos frente ao crescimento de carga é um dos objetivos do Planejamento da Expansão da Transmissão (PET). Com o aumento da demanda e inserção de fontes limpas de geração, novas linhas de transmissão devem ser provisionadas de modo a atender às restrições operacionais e de confiabilidade do sistema a um mínimo custo total. A geração de energia eólica tem crescido rapidamente no Brasil, com 890 parques eólicos totalizando 25 GW de capacidade instalada em 2023. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), essa fonte responde por 20% da demanda energética do país e tem previsão de atingir 44,78 GW de capacidade instalada em 2028 (Gannoum, 2023). Diante da integração de fontes renováveis de energia, diferentes desafios têm sido agregados ao PET (Gomes and Saraiva, 2019), de modo que novas estratégias de planejamento devem ser capazes de incorporar o efeito intermitente dessas fontes de forma eficiente nos sistemas elétricos modernos.

Nos últimos anos, estudos de planejamento da expansão de geração e transmissão têm avaliado o impacto da energia eólica nos sistemas com base na distribuição espacial da velocidade do vento (Zolfaghari Moghaddam, 2019) e o investimento em energia eólica (Alshamrani et al., 2023) como parâmetros de saída em objetivo de otimização. As incertezas sobre a energia eólica podem ser ainda consideradas em uma formulação determinística do problema PET (Moraes et al., 2022). Estas incertezas são representadas através de

cenários obtidos a partir de séries históricas reais agrupadas utilizando o conhecido algoritmo *k-means*. O planejamento com inserção de geração eólica pode ser proposto considerando linhas de alta tensão AC e DC (Heydari and Barforoushi, 2024). Modelos que consideram redução do corte de vento tem o objetivo de maximizar o uso da geração eólica. Uma das abordagens encontradas na literatura é através da minimização dos custos de investimento juntamente com redução do corte de vento e energia esperada não suprida (EENS) (Ugranli and Karatepe, 2015).

Para solucionar o problema PET com fontes renováveis, métodos probabilísticos são utilizados para incorporar incertezas (Yuan et al., 2020). Um dos métodos mais tradicionais é a Simulação Monte Carlo (SMC) para modelar o comportamento da carga e do vento no PET (Roldán et al., 2020; Ghadimi et al., 2022). A SMC permite ainda a verificação da segurança do sistema através dos índices de confiabilidade como a EENS em problemas de expansão (Leite da Silva, Rezende, da Fonseca Manso, et al., 2010; A. N. de Paula et al., 2020; Kazemi and Ansari, 2022). No entanto, tais trabalhos consideram o custo de confiabilidade em um problema de objetivo único em adição ao custo de investimento. Isso significa que não se pode estabelecer soluções concorrentes entre investimento e segurança, uma vez que se tratam de objetivos conflitantes (Billinton and Allan, 1996).

Devido às limitações computacionais, alguns autores abordaram o problema probabilístico do PET usando o critério de segurança N-1 e cenários de vento para representar falhas de equipamentos e a variabilidade do vento (Arthur N. de Paula et al., 2020). Contudo, esta lista de contingências pode implicar em sobreinvestimentos (Leite da Silva, Rezende, Manso, et al., 2010). Em contrapartida, é possível reduzir o investimento necessário e manter um bom nível de confiabilidade aplicando métodos como a SMC (Miranda et al., 2023). Além disso, esse método é capaz de modelar a variabilidade do vento. Por outro lado, a SMC exige alto esforço computacional devido ao número de amostras necessárias para estimativas confiáveis, o que pode inviabilizar sua aplicação em estudos mais completos de expansão.

Diferente da literatura descrita anteriormente que considera a presença de geração eólica através de cenários e restrições de segurança via critério N-1, o método proposto neste trabalho emprega uma eficiente abordagem multiobjetivo para o PET considerando as características probabilísticas da geração eólica. Baseada nos critérios de dominância de Pareto, o método multiobjetivo denominado *Non-dominated Monte Carlo Simulation (ND-MCS)*, inicialmente proposto em (Miranda et al., 2023) é modificado para considerar o comportamento probabilístico de fontes eólicas através da incorporação de critérios de dominância na SMC para estimação da confiabilidade dos sistemas. Estudos de caso para o sistema IEEE-RTS (Subcommittee, 1979) demonstram a capacidade da técnica proposta em fornecer soluções de boa qualidade capazes de reduzir sobreinvestimentos em estudos de expansão quando comparadas a métodos tradicionais.

2. FORMULAÇÃO MULTIOBJETIVO DO PET

O problema de otimização multiobjetivo para busca de alternativas de expansão é apresentado em (1). O objetivo f_1 minimiza o custo de investimento (10^6 US$), penalizando o corte de carga e de vento, indesejáveis no planejamento. O objetivo f_2 refere-se à minimização da EENS (MWh), de modo a permitir encontrar soluções robustas evitando o sobreinvestimento.

$$Min(f_1) = \sum_{k \in K^C} C_k^T I_k^T + ch\left(\sum_{b \in B^D} hd_b + \sum_{b \in B^R} hr_b\right) \quad (1)$$
$$Min(f_2) = EENS$$

onde C_k^T é o custo de investimento da linha de transmissão k e I_k^T refere-se à disponibilidade dessa linha. A penalidade para o corte de carga hd_b e de vento hr_b na barra b é representada por ch. B^D, B^Re K^C referem-se ao conjunto de barras que contem carga, geração eólica e linhas candidatas, respectivamente.

As restrições de rede e do planejamento são modeladas em (2)-(9):

$$\sum_{g \in G_b} pg_g - \sum_{k \in K_b} f_k + hd_b - hr_b = d_b - \sum_{r \in R_b} pr_r \,, \forall\, b \in B \quad (2)$$

$$f_k = I_k^T\left(-b_k \theta_{ij}\right) \,, \forall\, k \in K_b \quad (3)$$

$$|f_k| \le \bar{f}_k \cdot I_k^T \,, \forall\, k \in K_b \quad (4)$$

$$0 \le pg_g \le \overline{pg}_g \,, \forall\, g \in G_b \quad (5)$$

$$0 \le hd_b \le d_b \,, \forall\, b \in B^D \quad (6)$$

$$0 \le hr_b \le \sum_{r \in R_b} pr_r \,, \forall\, r \in R_b \quad (7)$$

$$I_k^T \in \{0,1\} \,, \forall\, k \in K^C \quad (8)$$

$$I_k^T = 1 \,, \forall\, k \in K^E \quad (9)$$

onde B, G_b, R_b e K_b representam o conjunto de barras do sistema, de geradores despacháveis, geradores eólicos e de linhas conectadas à barra b, respectivamente. O conjunto K^E representa as linhas de transmissão existentes. O balanço de potência na barra b é modelado em (2), em que pg_g, f_k, d_b e pr_r referem-se à potência ativa despachada pelo gerador g, potência ativa que flui na linha k, demanda ativa na barra b e potência ativa despachada pelo gerador eólico r, respectivamente. Em (3) o fluxo de potência é calculado a partir da susceptância da linha b_k (pu-℧) e da abertura angular θ_{ij} (rad.). Em (4)-(7) são descritos os limites de potência ativa - $\bar{f}_k$, despacho de geradores - $\overline{pg}_g$, corte de carga e de vento, respectivamente. As restrições (8)-(9) modelam a variável de decisão em investimento para as novas linhas de transmissão.

3. METODOLOGIA PROPOSTA

A solução do problema PET multiobjetivo em que se avalia probabilisticamente a segurança dos planos alternativos através de índices de confiabilidade em conjunto com a otimização permite uma representação realista das condições operativas dos sistemas, evitando sobreinvestimentos. No entanto, essa análise "*a priori*" dos índices de segurança pode ser impraticável computacionalmente em virtude do número de estados avaliados através do método de SMC.

A maioria das soluções encontradas em um algoritmo de otimização metaheurística multiobjetivo para o PET são consideradas dominadas durante o processo de convergência. O objetivo do método *ND-MCS* é interromper a avaliação probabilística do índice de confiabilidade para uma solução quando esta é identificada como dominada por um conjunto de soluções candidatas. Os requisitos de dominância de Pareto (Wang et al., 2011) são propostos como parte do processo de convergência. Dessa forma, a aplicação do *ND-MCS* permite um expressivo ganho computacional e melhoramento do espaço de busca por soluções de menor custo.

Para isso, as funções de estimação de desempenho do sistema para a EENS são avaliadas em conjunto com uma função teste de dominância F_{DOM}, formulada em (10). A cada iteração, F_{DOM} é atualizada de modo a fornecer uma estimativa confiável de que uma solução é dominada. O valor esperado para F_{DOM} para uma solução X é dado por (11).

$$F_{DOM}(X) = \begin{cases} 0, & se\ X\ é\ não-dominado \\ 1, & se\ X\ é\ dominado \end{cases} \quad (10)$$

$$\tilde{E}\left(F_{DOM}(X)\right) = \frac{1}{NS(X)} \sum_{s=1}^{NS(X)} F_{DOM,s}(X) \quad (11)$$

onde $F_{DOM,s}(X)$ é o valor estimado de $F_{DOM}(X)$ para o estado s e $NS(X)$ é o número de estados amostrados para o sistema. A incerteza sobre a estimativa é dada pela variância da função teste $V(X)$ e do coeficiente de incerteza $\beta_{DOM}(X)$, apresentados em (12) e (13), respectivamente:

$$V(X) = \frac{V(F_{DOM}(X))}{NS(X)} \quad (12)$$

$$\beta_{DOM}(X) = \frac{\sqrt{V\left(\tilde{E}(F_{DOM}(X))\right)}}{\tilde{E}(F_{DOM}(X))} \times 100\% \quad (13)$$

Se o critério $\beta_{DOM}(X)$ não é atingido, isto é, se a solução é considerada como não-dominada, o *ND-MCS* converge baseado nos critérios convencionais de performance do sistema (e.g. β_{EENS}) sem prejuízo de estimação. Assim, somente soluções não-dominadas que integram a fronteira de Pareto são efetivamente avaliadas, evitando um número substancial de análises desnecessárias pela SMC.

Neste trabalho o algoritmo *ND-MCS* é modificado de modo a considerar a inserção de geração com características intermitentes como a eólica. A variação da geração eólica é de natureza estocástica e não-controlável, seu comportamento estatístico é influenciado pela variação de velocidade do vento ao longo do tempo. Dessa forma, a SMC é utilizada para definir a potência de saída das unidades eólicas despachadas no cálculo de f_1 e estimação de f_2 através do fluxo de potência ótimo. A potência de saída das unidades é dada em função da velocidade do vento, cuja incerteza é modelada a partir de uma distribuição Weibull de probabilidade (Ghadimi et al., 2022). O pseudocódigo do *ND-MCS* descrito é apresentado no Algoritmo 1, sendo N o número de alternativas de expansão para o planejamento.

Algoritmo 1: Pseudocódigo para o *ND-MCS*

```
Inicializar os parâmetros do sistema
Inicializar os planos de expansão iniciais
Enquanto (iter < iter_MAX), faça:
    para i = 1 até N_PLANOS, faça:
    Calcular f1
    Inicializar a estimação de f2 e de Ẽ(F_DOM(X))
        se i é dominado, então:
        Atualizar soluções dominadas
        senão
        Verificar convergência de f2
            se estimação de f2 convergiu, então:
            Atualizar soluções não-dominadas
            senão
            Atualizar a estimação de f2
            fim se
        fim se
    iter = iter + 1
    fim para
fim Enquanto
Aplicar critério de decisão para solução final
```

4. ESTUDOS DE CASO

O algoritmo *ND-MCS* modificado para inserção de geração eólica é aplicado na solução do problema PET multiobjetivo do sistema IEEE-RTS 24 barras (Subcommittee, 1979), composto por 24 barras interligadas por 34 ramos que contêm linhas existentes e candidatas. A carga pico do sistema é de 8.550 MW e a capacidade máxima de geração é de 10.215 MW. Esse sistema é comumente modificado na literatura duplicando sua demanda e capacidade de geração para torna-lo menos confiável e aumentar a dificuldade do problema PET (Arthur N. de Paula et al., 2020).

Para representar a presença de geração eólica, uma usina eólica é inserida na barra 6 (Rashedi and Askarzadeh, 2022). A usina é composta por 300 turbinas com as seguintes características: $v_{nom} = 12{,}5\ m/s$, $v_{in} = 3{,}5\ m/s$, $v_{out} = 16{,}5\ m/s$ e $P_{nom} = 1{,}8\ MW$, definidas como velocidade nominal, de entrada, de saída e potência nominal, respectivamente. Os resultados consideram a carga pico do sistema e um máximo de três linhas podem ser adicionadas em cada ramo. As simulações foram realizadas utilizando o software MATLAB® de computação numérica. O processamento foi realizado por computador Intel® Core™ i5-5200 de 2,2 GHz. As análises que envolvem solução de fluxos de potência ótimo são realizadas pelo pacote de otimização CPLEX 12.9.0 (Copyright© IBM Corp.) através do método dos pontos interiores.

A metaheurística *Multiobjective Grey Wolf Optimization* (MOGWO) (Mirjalili et al., 2016) é associada ao *ND-MCS* modificado para determinação do conjunto de soluções de Pareto. Utilizando os parâmetros originais do MOGWO e um número máximo de 100 iterações, são propostos os seguintes estudos de caso:

- $MOGWO_{ND\text{-}MCS}$ – metaheurística MOGWO associada ao algoritmo proposto, ND-MCS, na presença de geração eólica.
- $MOGWO_{MCS}$ – metaheurística MOGWO associada à SMC tradicional, na presença de geração eólica.
- $MOGWO_{N\text{-}1}$ – metaheurística MOGWO associada ao critério de contingências N-1, na presença de geração eólica.

Ao longo do processo de convergência, inúmeras soluções são consideradas dominadas sob o ponto de vista da metodologia. Isso significa que, por terem sido consideradas dominadas, o *ND-MCS* interrompe precocemente a etapa de estimação dos índices de confiabilidade, responsável pelo maior dispêndio computacional. A Fig. 1 ilustra a convergência dos parâmetros de incerteza para uma solução obtida, dominada pelo custo de investimento de US$ 2.450,00 $\times 10^6$.

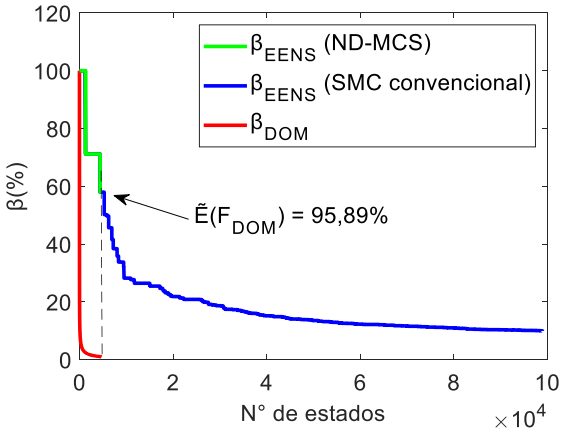

Fig. 1 Coeficientes de convergência – solução dominada.

Considerando β_{EENS} de 10%, 103.196 verificações de estados seriam necessárias através da SMC convencional para se obter uma EENS precisa de 49,01 MWh. Esse valor, juntamente com f_1, torna a solução dominada frente aos outros planos em análise. No entanto, com a atuação do *ND-MCS*, o plano de expansão é considerado dominado a partir de 8.968 verificações de estados, o que corresponde a uma redução de 91,31% no número de avaliações necessárias. Nessa situação, o valor esperado para a função teste de dominância $\tilde{E}\left(F_{DOM}(X)\right)$ é de 95,89%, que se refere à probabilidade de a solução ser efetivamente dominada com erro máximo admitido de 1%, $\beta_{DOM}(X)$. A Fig. 2 ilustra a interrupção precoce da EENS pelo *ND-MCS* se comparado com a SMC convencional. Embora o índice obtido (17,55 MWh) não seja condizente com o valor preciso (49,01 MWh), o plano é descartado pelo otimizador, tornando-se irrelevante para o método.

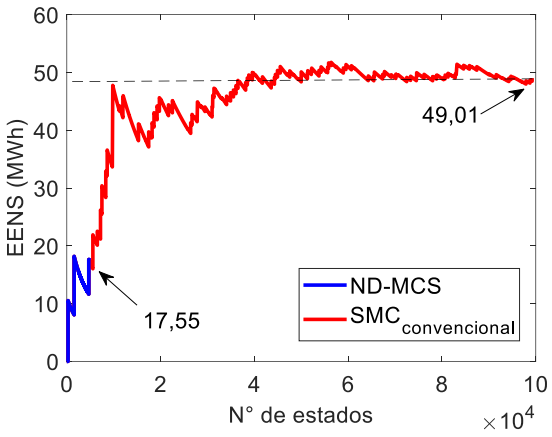

Fig. 2 Convergência da EENS – solução dominada.

As fronteiras de Pareto obtidas pelo MOGWO para os estudos de caso são ilustradas nas Fig. 3 e 4. Observa-se na Fig. 3 que a fronteira de Pareto obtida pelo $MOGWO_{ND\text{-}MCS}$ é aderente à fronteira obtida pelo $MOGWO_{MCS}$, ambos baseados em amostragem aleatória, o que demonstra que a abordagem proposta mantém as características originais do método de SMC convencional. Verifica-se ainda que o $MOGWO_{ND\text{-}MCS}$ é capaz de evitar sobreinvestimentos ao propor soluções com menores custos de expansão.

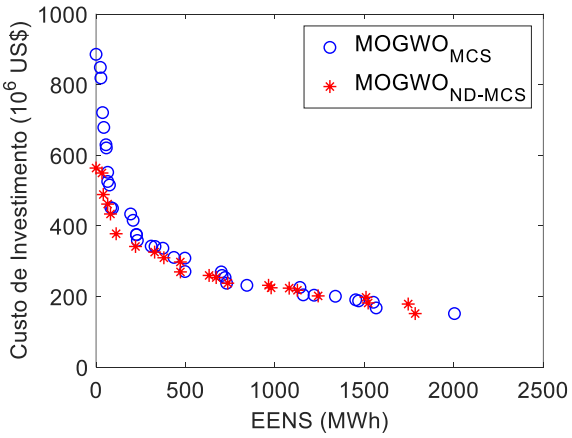

Fig. 3 Fronteiras de Pareto – $MOGWO_{ND\text{-}MCS}$ × $MOGWO_{MCS}$.

Quando comparada com o método baseado em lista de contingências, $MOGWO_{N\text{-}1}$, é possível evidenciar a capacidade de filtragem de soluções pela metodologia proposta ao encontrar uma melhor Fronteira de Pareto, conforme Fig. 4. Na prática, uma lista selecionada e reduzida de contingências de alto impacto é comumente considerada pelo critério N-1. Assim, planejar o sistema para apoiar esses eventos considerando que eles necessariamente ocorrerão (100% probabilidade) pode implicar em sobreinvestimentos. As soluções finais não-dominadas dos estudos de caso, extraídas das fronteiras de Pareto, são definidas com base em um critério *Fuzzy* de tomada de decisão (Gholizadeh-Roshanagh et al., 2020) e apresentadas na Tabela 1. É possível observar que os três métodos foram capazes de sugerir linhas

Tabela 1. Planos finais obtidos para o sistema IEEE-RTS 24 barras

Estudo de caso	Reforços adicionados	f_1 (10^6 US$)	f_2 (MWh)
$MOGWO_{ND-MCS}$	'1'(1,5), '1'(3,24), '2'(6,10), '2'(7,8), '1'(10,12), '1'(14,16), '1'(20,23)	270,00	471,71
$MOGWO_{MCS}$	'1'(2,4), '1'(3,24), '2'(6,10), '2'(7,8), '1'(10,12), '1'(14,16), '1'(15,16), '1'(16,17)	311,00	435,17
$MOGWO_{N-1}$	'1'(1,5), '1'(3,24), '2'(6,10), '2'(7,8), '1'(10,12), '1'(15,24), '1'(13,14)	320,00	593,50

de transmissão importantes para o sistema na presença de geração eólica – (6-10), (7-8) e (10-12) – reforços na região da barra que contém a usina intermitente. No entanto, a solução apresentada pela metodologia proposta apresenta o menor custo de investimento e também o menor valor para a EENS, que correspondem a uma redução de 15,62% e 20,52% para f_1 e f_2, respectivamente, quando comparada ao pior caso. Nota-se ainda que a solução de maior custo é obtida pelo $MOGWO_{N-1}$, associado a uma maior EENS devido à lista de contingências consideradas. A Fig. 5 ilustra a topologia para o sistema IEEE-RTS 24 barras com a usina eólica conectada à barra 6 em que se destaca os reforços adicionados pela metodologia proposta.

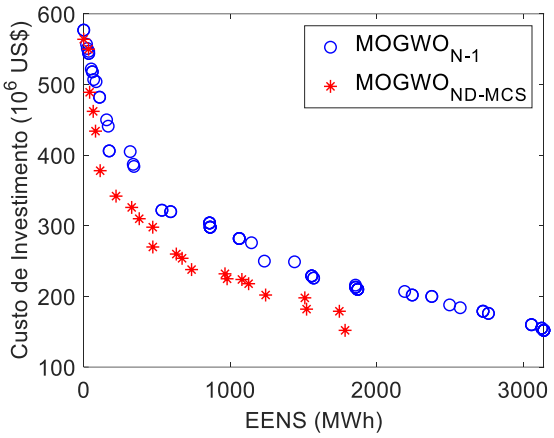

Fig. 4 Fronteiras de Pareto – $MOGWO_{ND-MCS}$ × $MOGWO_{N-1}$

O tempo de CPU para o $MOGWO_{ND-MCS}$ foi de 8h e 47 min., enquanto que o $MOGWO_{MCS}$ obteve os resultados em 17h e 06 min. É evidente, portanto, um expressivo ganho computacional da técnica proposta quando comparada ao método convencional baseado em amostragem aleatória, correspondendo a um *speed up* de 1,94, ou uma redução de 48,6% no tempo de processamento.

Por fim, pode-se concluir que a técnica proposta apresenta performance superior a seus pares tradicionalmente utilizados na literatura para solução do problema PET, uma vez que é capaz de encontrar um conjunto de soluções com melhores investimentos, além de elevado ganho computacional quando comparada à SMC convencional. Além disso, por considerar o comportamento estocástico dos equipamentos e intermitência de geração eólica ao longo do processo de otimização (‘*a priori*’), evita-se o sobreinvestimento decorrente das condições de pior caso consideradas no método de contingências N-1.

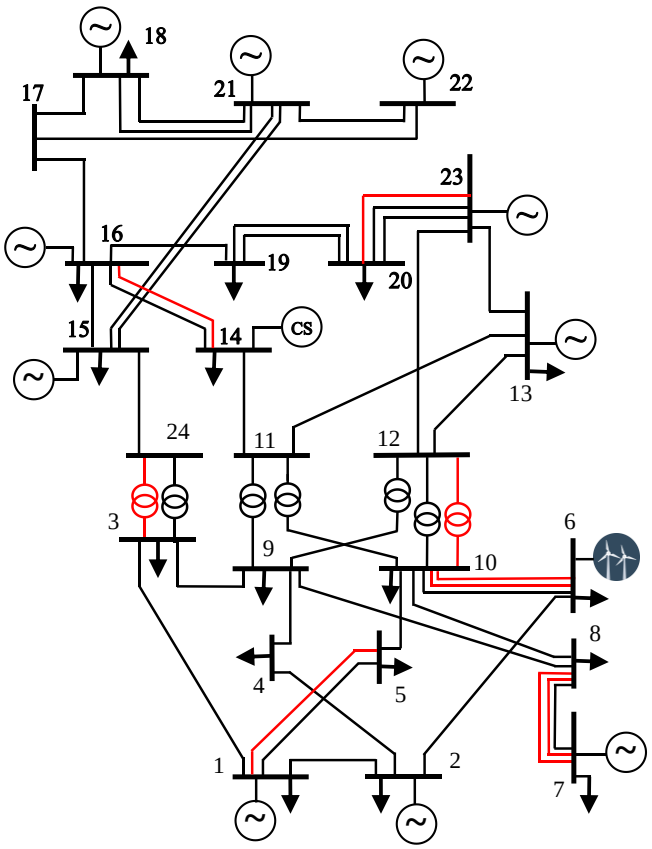

Fig. 5 Topologia para o sistema IEEE-RTS 24 barras com reforços.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho é proposto um eficiente algoritmo de solução do problema PET multiobjetivo na presença de geração eólica. Os critérios de dominância de Pareto são associados ao método de SMC para obter planos de expansão de maneira eficiente utilizando o método de SMC para estimação da EENS do sistema, adaptado para geração eólica. Devido à característica de interrupção precoce da SMC para soluções dominadas, o método proposto é capaz de filtrar boas soluções para o PET, evitando sobreinvestimentos, um dos principais desafios para o planejamento sob incertezas.

Os estudos de caso realizados para o sistema IEEE-RTS de 24 barras demonstram ainda que o algoritmo proposto é capaz de encontrar soluções com melhores investimentos associados a menores expectativas de energia não suprida (EENS) quando

comparada à otimização que utiliza a SMC convencional e o critério de contingências N-1. A partir dos resultados obtidos, juntamente com a performance computacional desenvolvida, o algoritmo adaptado proposto se apresenta como potencial ferramenta de suporte ao planejamento sob incertezas. Para contribuições futuras, pretende-se utilizar sistemas mais confiáveis, o que pode evidenciar ainda mais a eficiência computacional da ferramenta.

REFERÊNCIAS

Alshamrani, A. M. et al. (2023) Transmission Expansion Planning Considering a High Share of Wind Power to Maximize Available Transfer Capability. *IEEE Access*. [Online]

Billinton, R. & Allan, R. N. (1996) *Reliability Evaluation of Power Systems*. [Online]. Boston, MA: Springer US.

Gannoum, E. (2023) *Brazilian Association of Wind Energy* [online]. Available from: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/424_ABEEOLICA_INFOVENTO_N31_JUNHO_EN_V1.pdf (Accessed 2 August 2023).

Ghadimi, A. A. et al. (2022) Stochastic transmission expansion planning in the presence of wind farms considering reliability and N-1 contingency using grey wolf optimization technique. *Electrical Engineering*. [Online] 104 (2), 727–740.

Gholizadeh-Roshanagh, R. et al. (2020) An A-Posteriori Multi-Objective Optimization Method for MILP-Based Distribution Expansion Planning. *IEEE Access*. [Online] 860279–60292.

Gomes, P. V. & Saraiva, J. T. (2019) State-of-the-art of transmission expansion planning: A survey from restructuring to renewable and distributed electricity markets. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. [Online] 111 (June 2018), 411–424. [online]. Available from: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.035.

Heydari, R. & Barforoushi, T. (2024) HVDC/ HVAC transmission network expansion planning in electricity markets in the presence of wind resources. *Electric Power Systems Research*. [Online] 229110182.

Kazemi, M. & Ansari, M. R. (2022) An integrated transmission expansion planning and battery storage systems placement - A security and reliability perspective. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. [Online] 134.

Leite da Silva, A. M., Rezende, L. S., da Fonseca Manso, L. A., et al. (2010) Reliability worth applied to transmission expansion planning based on ant colony system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. [Online] 32 (10), 1077–1084.

Leite da Silva, A. M., Rezende, L. S., Manso, L. A. F., et al. (2010) 'Transmission expansion planning: A discussion on reliability and "N-1" security criteria', in *2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*. [Online]. June 2010 IEEE. pp. 244–251.

Miranda, F. L. et al. (2023) Multi-objective transmission expansion planning based on Pareto dominance and neural networks. *Electric Power Systems Research*. [Online] 214.

Mirjalili, S. et al. (2016) Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert Systems with Applications*. [Online] 47106–119.

Moraes, C. A. et al. (2022) A probabilistic approach to assess the impact of wind power generation in transmission network expansion planning. *Electrical Engineering*. [Online] 104 (2), 1029–1040.

de Paula, A. N. et al. (2020) Reliability-constrained dynamic transmission expansion planning considering wind power generation. *Electrical Engineering*. [Online] 102 (4), 2583–2593.

de Paula, Arthur N. et al. (2020) Robust Static Transmission Expansion Planning Considering Contingency and Wind Power Generation. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. [Online] 31 (2), 461–470.

Rashedi, B. & Askarzadeh, A. (2022) A multi-objective approach for solving transmission expansion planning problem considering wind power uncertainty. *Evolutionary Intelligence*. [Online] 15 (1), 497–511.

Roldán, C. et al. (2020) Robust transmission expansion planning with uncertain generations and loads using full probabilistic information. *Electric Power Systems Research*. [Online] 189106793.

Subcommittee (1979) IEEE reliability test system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. [Online] PAS-98 (6), 2047–2054.

Ugranli, F. & Karatepe, E. (2015) Multi-objective transmission expansion planning considering minimization of curtailed wind energy. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. [Online] 65348–356.

Wang, L. et al. (eds.) (2011) *Multi-objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing*. [Online]. London: Springer London.

Yuan, Z. et al. (2020) Probabilistic decomposition-based security constrained transmission expansion planning incorporating distributed series reactor. *IET Generation, Transmission & Distribution*. [Online] 14 (17), 3478–3487.

Zolfaghari Moghaddam, S. (2019) Generation and transmission expansion planning with high penetration of wind farms considering spatial distribution of wind speed. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. [Online] 106232–241.