

Evolução Diferencial Aplicada a Contratação do Montante de Uso do Sistema de Transmissão

Thiago Hanisch dos Santos * Juliana Almansa Malagoli *

* Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Curitiba, PR, Brasil. (e-mail: thiago.hanisch@ufpr.br) (e-mail: juliana.malagoli@ufpr.br).

Abstract: The objective of this article is to implement the Differential Evolution optimization method in the problem of contracting the Use Value of the Transmission System, with the objective of finding the lowest value to be contracted within the calculated values. The method was applied to a case found in the literature with the aim of testing the effectiveness of hiring. Thus, it is important to note that the analysis is carried out considering the probability of the occurrence of the values determined at the connection points between the National Interconnected System and the accesses, during the entire period of validity of the Transmission System Use Contract.

Resumo: O presente artigo tem como finalidade realizar a implementação do método de otimização de Evolução Diferencial sobre o problema de contratação do Montante de Uso do Sistema de Transmissão, com o propósito de encontrar o menor valor a ser contratado dentro dos valores apurados. O método foi aplicado em um caso encontrado na literatura a fim de se testar a efetividade na contratação. Dessa maneira, destaca-se a importância de que a análise seja realizada considerando a probabilidade de ocorrência dos montantes verificados nos pontos de conexão entre o Sistema Interligado Nacional e os acessantes, durante todo o período de vigência do Contrato de Uso do Sistema de Transmissão.

Keywords: Differential Evolution; Optimization; Amount of Transmission System; Probability of Occurrence; Power Flow.

Palavras-chaves: Evolução Diferencial; Otimização; Montante do Sistema de Transmissão; Probabilidade de Ocorrência; Fluxo de potência.

1. INTRODUÇÃO

Em decorrência das novas regulamentações aplicadas sobre o setor elétrico brasileiro a partir da década de 90, a estrutura do sistema de transmissão ficou sobrecarregada devido ao acesso concedido a distribuidoras, geradores e grandes consumidores (Rudnick et al., 2005). Assim, a transmissão se torna um ponto crítico do Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo fruto de várias fontes de estudos, como o fluxo de potência ótimo em sistema com a incidência de geradores eólicos e solares usando otimização por enxame de partículas e da busca gravitacional (Ullah et al., 2019), a precificação de um sistema de alívio de congestionamento na transmissão devido ao armazenamento de energia (Arteaga et al., 2020) e os montantes contratados de energia, levando em consideração aspectos de geração e características dos sistemas de energia (Castro et al., 2018) (Filietaz et al., 2019).

Os métodos de otimização se mostram eficientes para facilitar a análise, diminuir gastos e reduzir perdas em sistemas de energia. Dentre esses métodos, a Evolução Diferencial (ED), se torna um método de simples aplicação, devido a não utilização de derivadas. O algoritmo ED, assim como os outros métodos de otimização, consiste na busca da solução ótima dentro de uma função objetivo e suas variáveis dependendo ou não de restrições a fim de

determinar um espaço de busca condizente. Dessa forma, os métodos como a ED e outras variantes, conhecidos como métodos naturais, são aplicados para a solução de problemas de diversas áreas da engenharia (Malagoli, 2016).

Com a atual regulamentação imposta pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e administrada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), agentes beneficiários do sistema de transmissão devem anualmente determinar, no Contrato de Uso do Sistema de Transmissão (CUST), os valores de Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST) nos pontos onde há interligação com a rede básica e os agentes consumidores. Os valores contratados representam o fluxo de potência ativa determinados para cada ponto de conexão e devem ser definidos para dois períodos tarifários, ponta e fora de ponta (Castro et al., 2018).

A apuração dos valores de potência ativa é avaliada para duas situações nos pontos de conexão. A primeira determina que os valores contratados de MUST devem respeitar o nível superior, sendo o valor registrado menor que 110% do valor contratado. Esta etapa é avaliada mensalmente, sendo efetuada sobre o maior valor registrado caso haja mais de uma ultrapassagem. A segunda etapa consiste na avaliação dos valores respeitando o nível inferior, sendo que, em apenas uma vez, no período de 12 meses, o valor

registrado deve ser maior que 90% do valor contratado de MUST. Caso não respeitem as margens especificadas, as penalidades são aplicadas aos agentes consumidores (ANEEL, 2015).

Assim, cabe aos agentes consumidores realizar uma contratação com responsabilidade, na busca do valor ótimo de MUST, uma vez que o valor de penalidade deve ser arcado pela distribuidora e não repassado ao consumidor final (Castro et al., 2018). Para realizar a contratação, devem ser levados em conta os 12 meses vigentes no CUST e ser realizadas simulações de contingências tanto para elementos dentro da rede básica, como da distribuidora de energia.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova metodologia de escolha do valor contratado de MUST. Para isso, utiliza-se o método de otimização da ED em conjunto com a probabilidade de ocorrência de valor de potência em um limite de valores, aplicando essa metodologia aos casos já simulados anteriormente no trabalho acadêmico de Filietaz et al. (2019). Assim, o presente visa à comparação entre os valores de potência obtidos anteriormente em Filietaz et al. (2019), a partir de casos reais de verificação de MUST, e os valores por ora propostos pela implementação do método na ED.

As próximas seções deste artigo são organizadas da seguinte maneira; na seção 2, é abordado o MUST; a seção 3 aborda a otimização com a ED adotada no desenvolvimento deste trabalho; na seção 4 serão mostradas as formulações para o problema de otimização do MUST; a seção 5 abordará os resultados e discussões; e por fim, a seção 6 descreverá as considerações finais deste trabalho.

2. MONTANTE DE USO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Agentes consumidores, como distribuidoras, grandes consumidores e centrais geradoras utilizam a rede de transmissão para suprir a carga instalada ou despachar a energia gerada. Assim faz que seja igualmente exigida a remuneração, sobre o uso da rede de transmissão, devido à energia consumida ou gerada pelos agentes a qual percorre a rede básica.

No caso analisado das distribuidoras, este uso é regulado pelo CUST e firmado no contrato. Os agentes de transmissão garantem a prestação do serviço mediante encargos, calculados através da Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST) e do MUST (ANEEL, 2011). Para isso, em ANEEL (2015), regulamenta os processos de contratação do MUST anual e para os 4 anos subsequentes, para cada ponto de interligação e postos tarifários determinados como horários de ponta e fora de ponta.

Para se obter os valores de fluxo passantes nos pontos de interligação, são realizadas apurações mensais dos valores de MUST e os maiores valores registrados de cada ponto são comparados aos valores contratados. Esta medição é realizada em períodos de 15 minutos, os quais são integralizados para uma hora. Caso haja alguma identificação de valores fora do nível contratado, serão computados data e horário do evento (ONS, 2016). Dessa maneira, a resolução normativa ANEEL (2015) determina que os Encargos de Uso do Sistema de Transmissão (EUST) sejam

calculados, para cada ponto de conexão e regime tarifário, pelo produto entre a TUST e o MUST. Assim, o custo para cada ponto de conexão, caso não ocorra parcelas de ineficiência, é matematicamente expresso por (1).

$$EUST_{PER} = \sum_{m=1}^{12} (TUST_P * MUST_{PER P})_m + (TUST_{FP} * MUST_{PER FP})_m \quad (1)$$

Onde:

$EUST_{PER}$: são os encargos de uso do sistema de transmissão associados aos MUST a serem remunerados por ponto de conexão para os 12 meses;

$MUST_{PER P}$: é o MUST vigente no mês, no período de ponta, associado ao ponto de conexão;

$MUST_{PER FP}$: é o MUST vigente no mês, no período fora de ponta, associado ao ponto de conexão;

$TUST_P$: é a tarifa de uso do sistema de transmissão vigente no mês, no período de ponta, associado ao ponto de conexão;

$TUST_{FP}$: é a tarifa de uso do sistema de transmissão vigente no mês, no período fora de ponta, associado ao ponto de conexão;

m : os meses vigentes em contrato.

Caso ocorra em algum período do mês uma parcela de ineficiência de caráter de subcontratação, ou seja, caso o valor apurado de fluxo de potência ativa seja maior que 110% do valor contratado, para cada posto tarifário, será computado no mês em análise uma penalidade mensal (ONS, 2016). Esta parcela é expressa por (2):

$$PI_u = [3 * TUST * (MUST_V - 1,1 * MUST_{PER})]_P + [3 * TUST * (MUST_V - 1,1 * MUST_{PER})]_{FP} \quad (2)$$

Onde:

PI_u : é a parcela mensal de ineficiência por subcontratação a ser cobrada da distribuidora por ponto de conexão;

$TUST$: é a tarifa de uso do sistema de transmissão;

$MUST_V$: é o máximo valor mensal de MUST verificado;

$MUST_{PER}$: é o MUST contratado na modalidade permanente.

Já a parcela de ineficiência de caráter de sobrecontratação ocorre quando o valor apurado de fluxo de potência ativa registrada anual é menor que 90% do valor contratado, para cada posto tarifário. O valor registrado é computado anualmente para análise. Caso ocorra um momento que o valor ultrapasse a margem inferior de contratação, a distribuidora não paga por essa parcela (ONS, 2016). Esta parcela é expressa por (3):

$$PI_s = 12 * [(0,9 * MUST_P - D_{max\ anual\ P}) * (TUST_P)] + 12 * [(0,9 * MUST_{FP} - D_{max\ anual\ FP}) * (TUST_{FP})] \quad (3)$$

Onde:

PI_s : é a parcela de ineficiência por sobrecontratação a ser cobrada da distribuidora por ponto de conexão;

$D_{max\ anual\ P}$: é a demanda máxima anual medida no ponto de conexão em horário de ponta quando inferior a 90% do MUST contratado;

$D_{max\ anual\ FP}$: é a demanda máxima anual medida no

ponto de conexão em horário fora de ponta quando inferior a 90% do MUST contratado.

Então, o custo de contratação do MUST se resume à soma da equação em caráter permanente descrita em (1) e as parcelas de ineficiência (2) e (3), caso seja registrado .

2.1 Probabilidade de Ocorrência

Ao analisar o MUST, o principal critério que deve ser respeitado se caracteriza como critério de segurança. O SIN é dimensionado respeitando contingências $N - 1$. Isso significa que o sistema deve operar sem violações na operação com a perda de até um elemento elétrico. Tal situação faz que o montante deva ser contratado assegurando o critério, pois tais contingências podem interferir diretamente no fluxo elétrico nos pontos de contratação, alterando o valor de MUST.

Além disso, diferentes valores de injeção de potência das usinas dentro das distribuidoras, valores de carga instalada e outras situações climáticas e políticas interferem diretamente no valor de MUST verificado (Filietaz et al., 2019). Devido a diversas situações criadas, a probabilidade de ocorrência deve ser levada em consideração, uma vez que uma contratação com um valor muito alto, estabelecido a fim de se evitarem multas por subcontratação, pode se deparar com um caso de subcontratação, ocorrendo o mesmo no caso contrário.

3. EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A ED foi proposta pela primeira vez em Storn and Price (1997) para problemas de otimização. Enquanto, outros Algoritmos Evolucionários (AEs) mudam a população usando quantidades aleatórias nas fases de mutação e recombinação, ED opera com diferenças ponderadas entre vetores de solução para mudar a população (Rout et al., 2013). Dessa maneira, o algoritmo ED incorpora os conceitos de grandes populações de algoritmo genéticos e mutação auto-adaptável das estratégias evolutivas.

A ideia de ED implica em uma população de membros candidatos, o que constitui uma sequência de "genes", cada qual criado aleatoriamente por opção de gerenciamento para o modelo e caracterizado por sua adequação. Para cada membro, um de cada vez, um desafiante é desenvolvido. Se este desafiante tiver um condicionamento físico superior, substituirá o membro mais fraco na próxima geração (Mayer et al., 2005).

Para criar o desafiante, três outros membros são escolhidos aleatoriamente, com cada gene especificamente endereçado para um propósito. Com uma probabilidade igual à taxa de cruzamento, o gene é adotado do membro desafiador. Caso contrário, um novo valor de gene é construído com o valor do membro somado ao fator de mutação multiplicado pela diferença entre os valores dos outros dois membros que foram escolhidos aleatoriamente. Além disso, desafiantes bem-sucedidos substituem seus respectivos membros e, junto com os membros sobreviventes, compõem uma nova geração com maior aptidão média (Mayer et al., 2005).

3.1 Fluxograma

Para evidenciar o funcionamento do método, a Fig. 1 irá simplificar os passos para entendimento da ED.

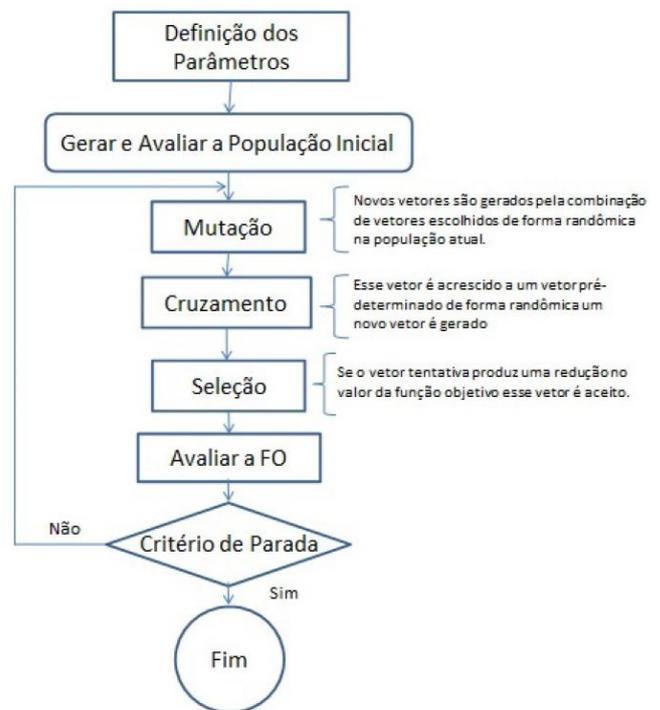


Fig. 1. Fluxograma do algoritmo de ED.

3.2 Algoritmo

O método ED tem 10 estratégias de busca distintas, o passo a passo abaixo representa um caso geral.

(1) Inicialização:

- Gerar uma população inicial aleatórias, dentro das restrições;
- Escolher um indivíduo aleatório $X_s^{(q)}$ ou adotar $X_{best}^{(q)}$, de acordo com a estratégia escolhida, a ser substituído (alvo);
- Escolher outros três indivíduos $X_\alpha^{(q)}$, $X_\beta^{(q)}$ e $X_\gamma^{(q)}$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq s$ ou cinco indivíduos distintos, dependendo da estratégia adotada.

(2) Mutaçao:

- Gerar um indivíduo doador $V^{(q+1)}$ de acordo com a estratégia escolhida;

(3) Cruzamento:

- Gerar um indivíduo $U^{(q+1)}$ a ser comparado com $X_s^{(q)}$ ou $X_{best}^{(q)}$ através da equação dada por:

$$U^{(q+1)} = \begin{cases} v(i)^{(q+1)}, & \text{se } \text{rand}_i \leq P_c \\ x_s(i)^{(q)} \text{ ou } x_{best}(i)^{(q)}, & \\ \text{se } \text{rand}_i > P_c, i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

- Se após o cruzamento uma ou mais componentes de $U^{(q+1)}$ estiver fora da região de busca, faz-se a seguinte correção:

$$\begin{cases} rand_i \leq P_c, u(i)^{(q+1)} = v(i)^{(q+1)}, \\ rand_i > P_c, u(j)^{(q)} = x_s(j)^{(q)}, \\ j = i + 1, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

(4) Seleção:

- Escolher o melhor indivíduo analisando a função objetivo:

$$\begin{cases} \text{Se } u(i) < x(i)^{inf}, \text{ então } u(i) = x(i)^{inf}, \\ \text{Se } u(i) > x(i)^{sup}, \text{ então } u(i) = x(i)^{sup}, \\ i = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (6)$$

(5) Critério de Parada:

- Se um Critério de parada é satisfeito, o algoritmo finaliza. Senão, inicia próxima geração e volta ao passo item 3.

3.3 Aplicação na Engenharia

Para evidenciar a aplicação do algoritmo de ED, o método foi implementado na função de minimização de custo de quatro geradores em um problema de despacho de carga econômica. A função de geração de custo de cada máquina e a capacidade em MW são mostradas na Tabela 1. A perda de potência ativa nas linhas é expressa em (7). Além disso, a função custo é expressa por (8) e as restrições por (9) e (10). O problema é encontrar um valor para potência do gerador (P_g) que minimize a função custo.

Tabela 1. Custo e capacidade de geração.

Custo[\$/h]	Limites [MW]
$C_1(P_{g1}) = 9 * 10^{-3} * P_{g12} + 80 * P_{g1} + 140$	$0 \leq P_{g1} \leq 400$
$C_2(P_{g2}) = 8 * 10^{-3} * P_{g22} + 90 * P_{g2} + 100$	$10 \leq P_{g2} \leq 400$
$C_3(P_{g3}) = 8 * 10^{-3} * P_{g32} + 70 * P_{g1} + 90$	$0 \leq P_{g3} \leq 400$
$C_4(P_{g4}) = 80 * P_{g4} + 100$	$0 \leq P_{g4} \leq 300$

$$P_i(P_g) = P_g * \begin{bmatrix} 2.10^{-4} & 10^{-4} & 0 & 10^{-4} \\ 10^{-4} & 2.10^{-4} & 10^{-4} & 10^{-4} \\ 0 & 10^{-4} & 2.10^{-4} & 10^{-4} \\ 0 & 10^{-4} & 2.10^{-4} & 3.10^{-4} \end{bmatrix} \cdot P_g^T \quad (7)$$

$$\text{Min } C(P_g) = P_g^t * Q * P_g + b^t * P_g + co \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^4 P_{gi} - P_d - P_l(P_g) \quad (9)$$

$$P_g = [P_{g1} \ P_{g2} \ P_{g3} \ P_{g4}] \quad (10)$$

A Tabela 2 mostra o mínimo, a média, a mediana, o máximo e o desvio padrão após 30 execuções no algoritmo, juntamente com o respectivo valor de P_g para o mínimo e máximo valor.

Tabela 2. Resultados.

Mínimo	32065.334396
Valores P_g	[104.391, 10, 307.549, 0]
Média	32065.337454
Mediana	32065.334397
Máximo	32065.399963
Valores P_{g3}	[105.387, 10, 306.458, 0.002]
Desvio Padrão	0.012145
Teste dos postos	$1, 673.10^{-6}$

Ao problema exemplificado, o algoritmo ED se mostrou satisfatório. O valor de desvio padrão é muito baixo:

aproxima-se rapidamente do ponto ótimo. Nas 30 simulações, os valores máximo e mínimos são bem próximos, analisando que, mesmo considerando apenas uma simulação, a probabilidade do valor ser muito próximo do ponto ótimo é relevante. Ao ser implementado em casos complexos diminui o tempo de simulação ou a quantidade de casos a serem simulados para verificar a eficiência.

4. OTIMIZAÇÃO DO MUST

Para avaliação do MUST contratado, o uso do algoritmo ED implementado com a probabilidade de ocorrência é pertinente para a realização da contratação, uma vez que a quantidade de simulações a serem realizadas para se obter o menor valor é proporcional à complexidade do sistema. Assim, a implementação propõe uma busca rápida, podendo ser adicionados diversos critérios e restrições após a simulação das contingências e de fluxo passante nos pontos de conexão.

Para a comprovação da funcionalidade do método serão utilizados os dados encontrados em um trabalho acadêmico Filietaz et al. (2019), uma vez que o propósito do presente artigo é avaliar a contratação, e não o método de avaliação para o fluxo de potência ativa passante nos pontos de interligação.

O problema foi escolhido devido à realização de simulações em pontos reais de uma distribuidora. Para isso, foram consideradas, tanto no sistema interno da distribuidora, quanto na rede básica, as diferentes situações de geração, o histórico de geração de cada unidade geradora do sistema, as contingências $N - 1$ e casos $N - 2$. Levou-se em conta, ainda, a não utilização um método de otimização para contratar o montante.

Os valores apresentados foram simulados para as duas tarifas horárias, ponta e fora de ponta, para cada ponto de conexão. Além disso, os valores obtidos, definidos como geração máxima e geração normal, foram reunidos na mesma simulação, a fim de aumentar a população inicial de busca.

Os casos nos quais não foram convergentes ou divergiram, definidos como NC e D , foram substituídos por zero para se evitar o erro nas simulações. Após os dados serem refinados, é definida a faixa de busca, que consiste no maior valor registrado subtraído do menor valor registrado no período de busca dividido por uma taxa. A taxa é definida a fim de deixar o valor de faixa de busca próximo ou igual a um. Quanto menor a faixa de busca, mais preciso será o valor contratado, respeitando a faixa de maior ocorrência de cada período. Dessa maneira, os valores de cada mês analisado são verificados, criando, assim, a faixa de valores em que foi registrado o maior número de ocorrência e os limites de busca. Os limites de busca são definidos pelo intervalo no qual ocorre as maiores probabilidades de ocorrências em cada mês. Nos meses onde os casos não convergentes ou divergentes forem maior que a probabilidade de ocorrência de uma faixa de valores maior que zero, ou seja, quando a maior probabilidade de ocorrência de montante simulado foi na faixa que contém zero, então foi considerada a faixa de segundo maior valor, para evitar a faixa onde ocorre montante nulo.

A partir disso, cada limite de busca é relacionado a uma variável de decisão e aos limites máximos e mínimos nos quais se encontram a faixa de maior probabilidade de ocorrências correspondentes do mês. A variável que será determinada como o montante contratado será limitada aos valores mínimos e máximos verificados em todas as simulações. Obtém-se, assim, o número de variáveis de decisão igual a quantidade de meses utilizada para a simulação somada a uma variável de decisão que será o montante contratado.

A cada geração, esses valores são mudados, a fim de encontrar o menor custo anual de contratação. Com as variáveis de busca definidas e os limites estipulados, o algoritmo entra na função custo. A função custo é responsável por obter o custo anual e é definida através das equações e restrições descritas de (11) a (14). As equações descritas e representadas como M_V e M_C são os valores verificados e valores contratados. Os valores representados por V_1 e V_2 são calculados através das equações, obtendo o valor do custo final de contratação.

Para garantir que o processo não se depare com uma subcontratação, em (15) realiza a conferência dentro do período anual, onde é comparado o maior valor da iteração com valor contratado. Então, caso haja subcontratação, o valor a ser cobrado é descrito como pela parcela em (11).

$$Custos = V_1 * (TUST) + V_2 * (3 * TUST) + V_3 * (12 * TUST) \quad (11)$$

$$\text{Se } V_{Mv} \leq V_{Mc} \Rightarrow \begin{cases} V_1 = V_{Mc} \\ V_2 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{Se } V_{MC} < V_{MV} \leq 1,1 * V_{MC} \Rightarrow \begin{cases} V_1 = V_{MV} \\ V_2 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{Se } 1,1 * V_{MC} < V_{MV} \Rightarrow \begin{cases} V_1 = V_{MV} \\ V_2 = V_{MV} - 1,1 * V_{MC} \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{Se } V_{MV\text{ anual}} < 0,9 * V_{MV} \Rightarrow \begin{cases} V_3 = 0,9 * V_{MC} \\ -V_{Mv\text{ anual}} \end{cases} \quad (15)$$

Assim, os valores contratados são verificados a fim de se realizar uma contratação dentro dos valores mais prováveis de ocorrência, respeitando as faixas de eficiência. O processo pode ser resumido através dos passos apresentados a seguir.

- Carregar o caso simulado para cada ponto de conexão;
- Definir os limites para determinar faixa de ocorrência;
- Realizar a conferência, mês a mês, da faixa de maior probabilidade de ocorrência;
- Definir os limites máximos e mínimos de busca para cada variável de decisão (montante verificado de cada mês);
- Definir a faixa de busca do montante contratado;
- Com a geração criada, é realizada a conferência mês a mês do montante contratado e do maior valor anual;
- Obter o custo anual com MUST respeitando as restrições;

- Caso tenha garantido o menor valor dentro das restrições, esse valor é usado na simulação; caso contrário é criada uma nova geração até atender as restrições.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas as verificações para os três pontos de conexão e os resultados obtidos são apresentados nas seções a seguir em forma de tabelas e gráficos. As tabelas, para todos os casos simulados, fornecem a faixa de ocorrência e o valor de casos encontrados para cada faixa de ocorrência. Além disso, os valores de TUST, para os casos simulados, foram considerados unitários, já que o valor só representaria de forma real a quantia a ser destinada.

5.1 Foz do Chopim

Para o ponto de conexão de Foz do Chopim e o período de ponta, foi analisada a probabilidade apresentada na Tabela 3. A partir desses limites, foi encontrado o valor ótimo de MUST de 195,52 MW, representado na Fig. 2 através da linha vermelha.

Tabela 3. Probabilidade de ocorrência no período de ponta de Foz do Chopim.

Meses	Ocorrências	Limite Inferior	Limite Superior
Janeiro	4	180.61	182.27
Fevereiro	4	203.81	205.47
Março	3	218.72	220.38
Abril	4	202.15	203.81
Mai	4	187.24	188.9
Junho	4	195.53	197.18
Julho	4	172.33	173.98
Agosto	5	200.5	202.15

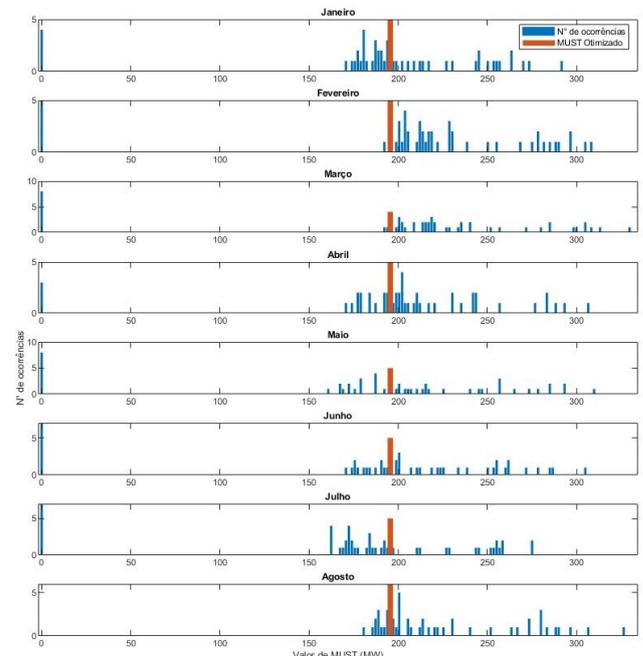


Fig. 2. Gráfico de ocorrência no período de ponta de Foz do Chopim.

Para o período de fora de ponta, os casos foram simulados e os valores encontrados são apresentados na Tabela 4 e

Tabela 4. Probabilidade de ocorrência no período de fora de ponta de Foz do Chopim.

Meses	Ocorrências	Limite Inferior	Limite Superior
Janeiro	5	204.57	208.09
Fevereiro	3	299.79	303.32
Março	4	218.67	222.2
Abril	3	215.15	218.67
Mai	3	208.09	211.62
Junho	6	183.4	186.93
Julho	4	186.93	190.46
Agosto	7	193.98	197.51

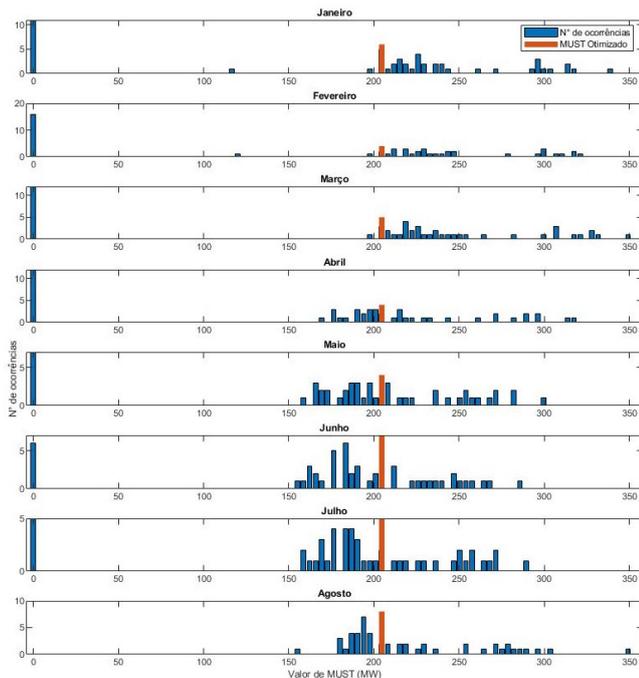


Fig. 3. Gráfico de ocorrência no período de fora de ponta de Foz do Chopim.

Fig. 3. Portanto, o valor ótimo de MUST para esse caso é 204,56 MW.

O valor ótimo encontrado, para o período de ponta, contempla em todos os meses analisados a faixa de maior ocorrência dentro das margens de contratação. Porém, para o período de fora de ponta no mês de fevereiro, a probabilidade de maior valor está na faixa entre 299,79 e 303,32 MW, assim, ficando fora das margens de contratação.

5.2 Pato Branco

Para o ponto de conexão de Pato Branco e período de ponta, foi analisada a probabilidade apresentada na Tabela 5. A partir desses limites, foi encontrado o valor de MUST de 95,3701 MW, apresentado na Fig. 4.

Para o período de fora de ponta, os casos foram simulados e os valores encontrados são apresentados na Tabela 6 e Fig. 5. Assim, o valor ótimo de MUST para esse caso é 100,89 MW.

Para os casos simulados, o valor ótimo contratado atendeu tanto o período de ponta como de fora de ponta, ficando apenas no limiar da contratação no mês de agosto, sendo

Tabela 5. Probabilidade de ocorrência no período de ponta de Pato Branco.

Meses	Ocorrências	Limite Inferior	Limite Superior
Janeiro	4	91.902	92.769
Fevereiro	4	97.971	98.838
Março	4	101.44	102.31
Abril	6	101.44	102.31
Mai	4	89.301	90.168
Junho	6	95.37	96.237
Julho	7	101.44	102.31
Agosto	5	104.91	105.77

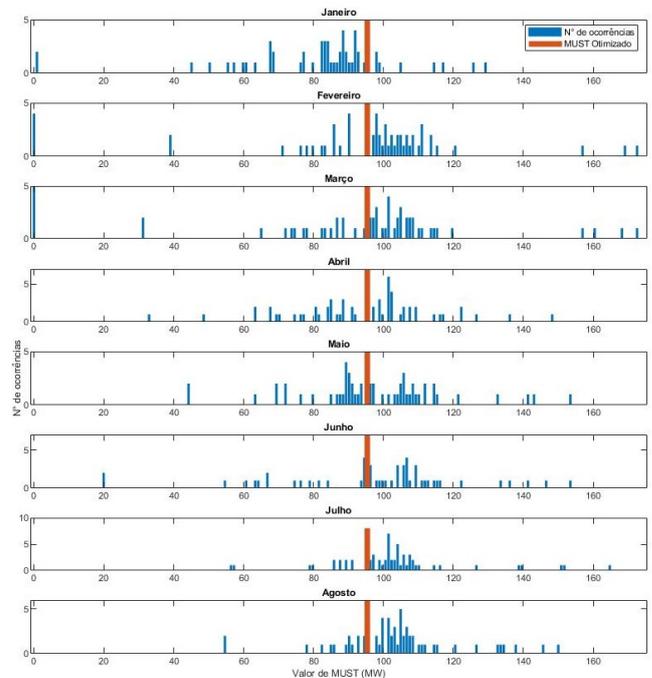


Fig. 4. Gráfico de ocorrência no período de ponta de Pato Branco.

Tabela 6. Probabilidade de ocorrência no período de fora de ponta de Pato Branco.

Meses	Ocorrências	Limite Inferior	Limite Superior
Janeiro	5	96.564	97.183
Fevereiro	4	100.28	100.9
Março	4	100.9	101.52
Abril	3	106.47	107.09
Mai	3	110.18	110.8
Junho	4	92.85	93.469
Julho	5	103.37	103.99
Agosto	4	112.66	113.28

o mês com os valores de ocorrência maiores devido à baixa produção das usinas da rede da distribuidora.

5.3 Realeza

Para o ponto de conexão de Realeza e período de ponta, foi analisada a probabilidade apresentada na Tabela 7. A partir desses limites foi encontrado o valor de MUST de 178,7559 MW, apresentado na Fig. 6.

Para o período de fora de ponta, os casos foram simulados e os valores encontrados são apresentados na Tabela 8 e Fig. 7. Portanto, o valor ótimo de MUST para esse caso é 168,9155 MW.

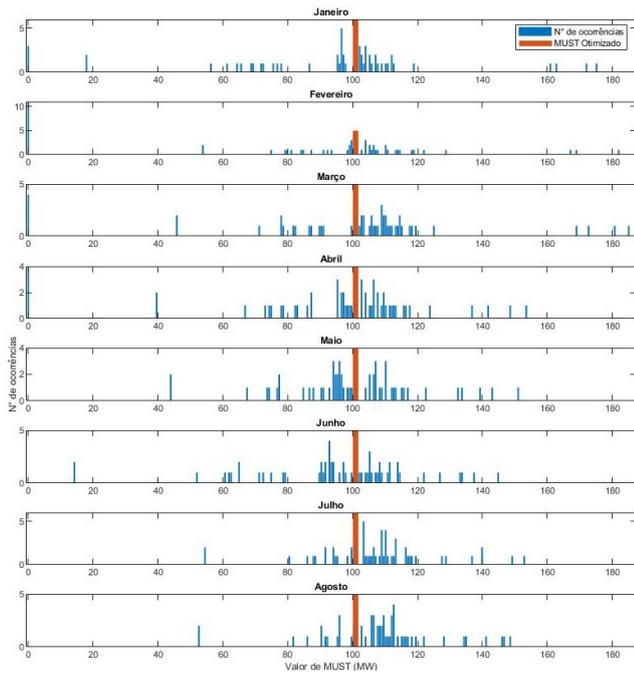


Fig. 5. Gráfico de ocorrência no período de fora de ponta de Pato Branco.

Tabela 7. Probabilidade de ocorrência no período de ponta de Realeza.

Meses	Ocorrências	Limite Inferior	Limite Superior
Janeiro	5	180.34	181.51
Fevereiro	4	109.37	110.53
Março	5	111.7	112.86
Abril	5	110.53	111.7
Mai	4	202.45	203.61
Junho	4	196.63	197.79
Julho	4	186.16	187.32
Agosto	7	107.04	108.21

Tabela 8. Probabilidade de ocorrência no período de fora de ponta de Realeza.

Meses	Ocorrências	Limite Inferior	Limite Superior
Janeiro	2	126.49	127.36
Fevereiro	2	131.72	132.59
Março	2	141.32	142.19
Abril	2	121.25	122.13
Mai	4	191.04	191.91
Junho	4	177.08	177.96
Julho	4	185.81	186.68
Agosto	6	105.55	106.42

Os valores ótimos encontrados, tanto para o período de fora de ponta, como de ponta, tiveram um aumento devido ao método usado para a análise do fluxo de potência dos pontos. Considerando esses fatores, o período entre maio e julho se mostrou mais crítico, elevando, assim, o montante ótimo.

5.4 Comparação de resultados

A fim de comparar os valores gastos em contratação, foi considerado o valor de maior ocorrência de cada mês em face dos valores sugeridos pelo trabalho acadêmico de Filietaz et al. (2019) e dos valores ótimos sugeridos pelo método implementado.

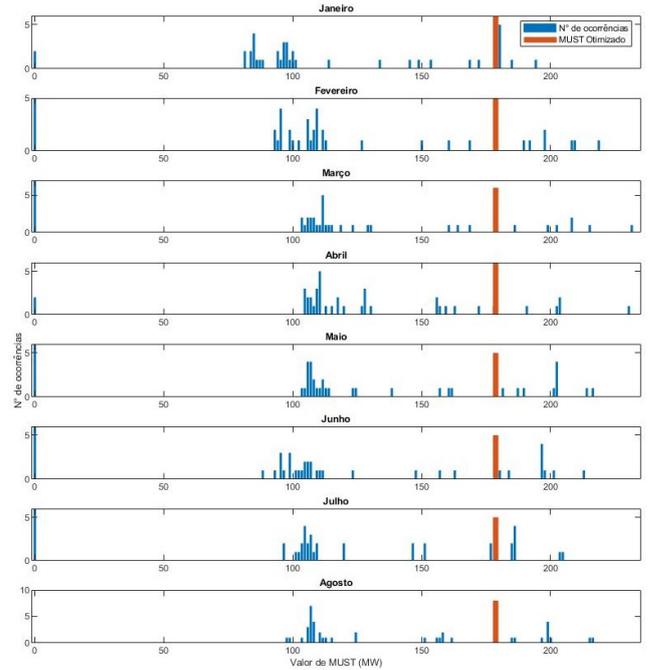


Fig. 6. Gráfico de ocorrência no período de ponta de Realeza.

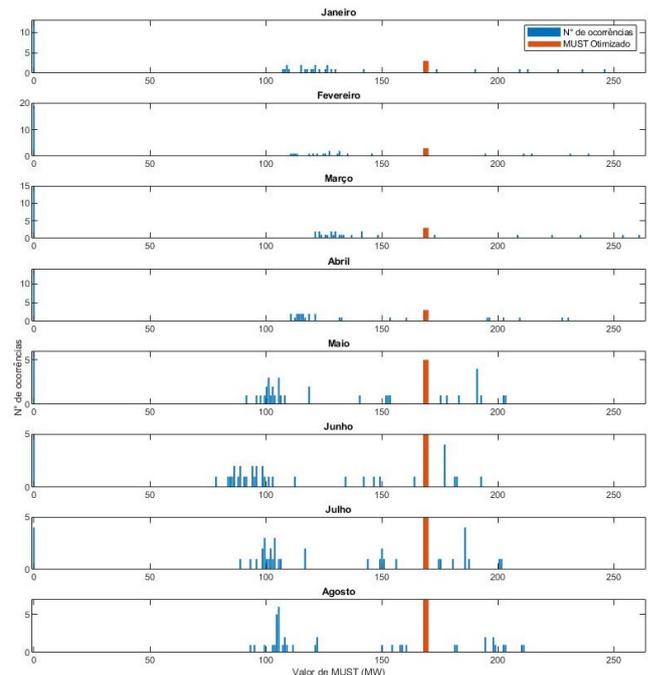


Fig. 7. Gráfico de ocorrência no período de fora de ponta de Realeza.

Ao se comparar os resultados obtidos, devem ser levados em consideração dois aspectos, motivo e contextualização da escolha do MUST. Os valores sugeridos no trabalho anterior de Filietaz et al. (2019) foram utilizados dentro de margens de contingências de linhas em situações de geração específicas, as quais, em situações reais, talvez não ocorram. O método usado neste artigo percorre todas as contingências pré simuladas e busca a maior ocorrência dentro de cada mês, obtendo, assim, o menor valor durante o ano.

A Tabela 9, apresenta cada ponto de conexão, o valor sugerido pelo trabalho acadêmico de Filietaz et al. (2019) e o valor gasto anualmente com o MUST. Além disso, é apresentada, para o valor sugerido pelo método implementado de ED e a Economia Anual de cada ponto considerando, a TUST como valor de R\$ 1,00 kWh/mês para cada período tarifário. Os Pontos 1, 2 e 3 representam respectivamente o ponto de Foz do Chopim, Pato Branco e Realeza no Paraná.

Tabela 9. Valores simulados ponta e fora de ponta.

Ponta					
Ponto Conexão	Valor Anterior	Valor Gasto	Valor Sugerido	Valor Gasto	Economia Anual
1	223	1784	196	1618.2	165.7
2	100	809.2	95.3	793.3	15.9
3	180	1498.9	178.7	1498.1	0.871
Fora de Ponta					
1	231	2053.8	205	1984.2	69,5
2	107	864.8	100.8	841.2	23.5
3	207	1656	168.9	1414.2	241.7

Em todos os casos simulados, houve economia. Considerou-se o preço da $TUST_p$ e $TUST_{fp}$ homologadas em ANEEL (2019), dessa maneira a economia poderia chegar em até R\$2.938.495,64.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contratação dos Montantes de Uso do Sistema de Transmissão (MUSTs) impacta economicamente tanto a distribuidora - quando o valor contratado não é eficiente e gera multas por parcelas de ineficiência - como para o consumidor final, uma vez que o valor de contratação é revertido na Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) de fio (ANEEL, 2019). O valor otimizado para todos os pontos de conexão da distribuidora pode representar um valor de economia significativa.

Este artigo apresentou uma nova abordagem para a contratação do MUST, usando o método de ED. Além disso, para uma melhor análise, deve levar-se em consideração a probabilidade de ocorrência de um maior número de simulações com valores de geração diferentes e carga do sistema. Assim, possibilita-se uma curva de contingências mais definidas para a busca inicial.

Por fim, além das restrições que o problema impõe pelas margens de contratação mês a mês, é possível a implementação, em trabalhos acadêmicos futuros, de restrição de algum elemento do sistema elétrico que se apresenta mais suscetível a contingências não programadas, fazendo com que o método inclua obrigatoriamente o valor de fluxo passante para a contingência específica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP) pelo recurso de custeio no apoio das atividades acadêmicas e participação no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI).

REFERÊNCIAS

ANEEL (2011). Agência nacional de energia elétrica-aneel. anexo 3: Contrato de uso do sistema transmissão.

- ANEEL (2015). Resolução homologatória nº 666, de 23 de junho de 2015. regulamenta a contratação do uso do sistema de transmissão em caráter permanente, flexível, temporário e de reserva de capacidade, as formas de estabelecimento dos encargos, agência nacional de energia elétrica.
- ANEEL (2019). Resolução homologatória nº 2.586, de 23 de julho de 2019. altera a base de dados e os anexo i, ii, iii e v aprovados pela resolução homologatória aneel nº 2.562, agência nacional de energia elétrica.
- Arteaga, J., Zareipour, H., and Amjady, N. (2020). Energy storage as a service: Optimal pricing for transmission congestion relief. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 7, 514–523. doi:10.1109/OAJPE.2020.3031526.
- Castro, A.M., Silva, N.S.M., Telles, E., Silva, A.M.L., and Street, A. (2018). Contratação ótima dos montantes de uso do sistema de transmissão via equivalentes estáticos flexíveis e fluxo de potência estocástico. *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, 1(1). doi:10.20906/CPS/CBA2018-0921.
- Filietaz, D.C., Martins, L.P., and Santos, T.H. (2019). Estudo de must- montante de uso do sistema de transmissão nos pontos de conexão entre a rede básica e a rede de alta tensão da distribuidora. *Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR, Brasil*.
- Malagoli, J.A. (2016). Multiobjective optimization applied to induction motors validated via finite elements. *Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Brasil*, 150. doi: 10.14393/ufu.te.2016.22.
- Mayer, D., Kinghorn, B., and Archer, A. (2005). Differential evolution – an easy and efficient evolutionary algorithm for model optimisation. *Agricultural Systems*, 83(3), 315–328. doi:10.1016/j.agsy.2004.05.002.
- ONS (2016). Operador nacional do sistema elétrico. submódulo 15.7 - apuração dos montantes de uso do sistema de transmissão.
- Rout, U.K., Sahu, R.K., and Panda, S. (2013). Design and analysis of differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power system. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(3), 409–421. doi:10.1016/j.asej.2012.10.010.
- Rudnick, H., Barroso, L., Skerk, C., and Blanco, A. (2005). South american reform lessons - twenty years of restructuring and reform in argentina, brazil, and chile. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(4), 49–59. doi: 10.1109/MPAE.2005.1458230.
- Storn, R. and Price, K. (1997). Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341–359. doi:10.1023/A:1008202821328.
- Ullah, Z., Wang, S., Radosavljević, J., and Lai, J. (2019). A solution to the optimal power flow problem considering wt and pv generation. *IEEE Access*, 7, 46763–46772. doi:10.1109/ACCESS.2019.2909561.