

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DIÁRIA DE SISTEMAS TERMO-EÓLICOS CONSIDERANDO A EMISSÃO DE POLUENTES E A INTERMITÊNCIA DO VENTO

ROBERTO F. A. MENEZES*, RONALDO R. B. DE AQUINO*, GUILHERME D. SORIANO*

**Laboratório Digital de Sistemas de Potência (LDSP)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Av. da Arquitetura, s/n – Cidade Universitária, 50740-550
Recife - PE, Brasil*

Emails: roberto.menezess@ymail.com, rrbquino@gmail.com, guisoriano@gmail.com

Abstract— The growth of electric energy consumption in recent years has increased the amount of generating sources, making the use of optimization tools more important in the electric sector, they offer safety and efficiency to power systems. A crucial energy planning problem is scheduling the daily operation of the thermal units of the system. The objective of this problem is to define the units that will be operating and how much power each one will provide for the required demand. These generating units must operate economically, giving the load variations, respecting operational and safety constraints of the system. In addition to the economic issue, the operation needs to reduce the emission of air pollutants caused by thermolectric plants. This work analyzes the problem for short-term planning taking into account the cost of CO₂ and NO₂, the penalty due to overestimation in the wind forecast, and series of restrictions related to wind-thermal generation. This problem is non-linear integer-mixed, therefore, the strategy for finding the solution uses an Adaptive Genetic Algorithm, for the allocation of the thermal units, and the Interior-Point Primal-Dual Predictor-Corrector Method, for the resolution of the optimal DC power flow in the economic dispatch problem. The results were obtained through simulations in the IEEE 30 bus test system with 6 thermal plants and 2 wind farms.

Keywords— Energy Operation, Emission of Air Pollutants, Wind-thermal System, Genetic Algorithm.

Resumo— O crescimento do consumo de energia elétrica nos últimos anos tem aumentado a quantidade de fontes geradoras, tornando o uso de ferramentas de otimização mais importantes no setor elétrico, oferecendo maior segurança e eficiência aos sistemas elétricos de potência. Um problema de planejamento energético crucial é a programação diária da operação das unidades termelétricas do sistema. O objetivo desse problema é definir quais serão as unidades que estarão em operação e qual a quantidade de potência que cada uma delas irá fornecer para a demanda requisitada. Essas unidades geradoras devem operar de forma econômica, mediante a variação da carga, respeitando restrições operativas e de segurança do sistema. Além da questão econômica, a operação necessita diminuir a emissão de poluentes provocada pelas termelétricas. Este trabalho analisa o problema do planejamento de curto prazo levando em consideração o custo da emissão de CO₂ e NO₂, a penalidade devido superestimação na previsão de vento, e uma série de restrições relacionadas a geração termo-eólica. Este problema é não-linear inteiro-misto, por isso, a estratégia para achar a solução envolve a utilização de um Algoritmo Genético Adaptativo, para alocação das unidades termelétricas, e o método de Pontos Interiores Primal-Dual Predictor-Corretor, para a resolução do fluxo de potência ótimo DC no problema do despacho econômico. Os resultados foram obtidos através de simulações no sistema teste de 30 barras do IEEE com 6 termelétricas e 2 parques eólicos.

Palavras-chave— Operação Energética, Emissão de Poluentes, Sistema Termo-eólico, Algoritmo Genético.

1 Introdução

A operação energética está se tornando uma tarefa complexa nas últimas décadas devido a expansão do sistema, impulsionada principalmente pelo aumento da demanda. Por isso, estudos estão sendo realizados com o propósito de oferecer, aos agentes do setor elétrico, técnicas que promovam maior eficiência e segurança no fornecimento de energia.

Um problema considerado de extrema importância na operação diária é o que envolve a Alocação de Unidades Termelétricas (AUT). Nele serão definidas quais as unidades que estarão em funcionamento. Esse problema é hierarquicamente superior ao Despacho Econômico, que determina quais serão as potências geradas por cada máquina de forma a minimizar a soma dos custos operacionais, satisfazendo o balanço energético do sistema (Wood and Wollenberg, 2012).

A geração de energia através da queima de combustíveis fósseis pelas unidades termelétricas (UTs) convencionais emite gases, como o dióxido de carbono (CO₂) e o dióxido de nitrogênio (NO₂), que contribuem para o aumento do efeito estufa. Para controlar a emissão desses poluentes é realizado o Despacho Econômico e Ambiental (DEA) além de serem inseridas fontes alternativas de energia ao sistema, como os parques eólicos (Denny and OMalley, 2006; Li et al., 2013; Zhang et al., 2015).

Nas últimas décadas a energia eólica é responsável por reduzir grande parte do efeito estufa no mundo, porém vários desafios são enfrentados devido à característica estocástica dessas fontes de geração. As variações da velocidade de vento nos parques eólicos impactam em sua potência gerada, o que pode influenciar na confiabilidade da operação e na garantia de uma reserva segura (Hetzler et al., 2008; Liu and Xu, 2010).

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as UTs têm papel fundamental em absorver a variabilidade das fontes com características intermitentes dentro da matriz de energia elétrica brasileira (ONS, 2017).

A representação linearizada do fluxo de potência tem sido adotada nos estudos de DEA devido a sua simplicidade e ao grau de precisão satisfatório. Assim, o modelo do problema de DEA pode ser formulado considerando os limites de potência dos geradores e o fluxo de carga das linhas. Nesse trabalho o problema de DEA é resolvido através do Método de Pontos Interiores (MPI) Primal-Dual Predictor-Corretor como nos trabalhos Oliveira and Filho (2003) e Menezes (2017).

Em geral, o problema de AUT é um problema de otimização não-linear, inteira-misto. Nesse problema a solução ótima pode ser encontrada checando todas as combinações possíveis, tornando inviável nos sistemas de grande porte. Desta forma, é necessário o uso de algoritmos eficientes para encontrar soluções viáveis. Nesse trabalho foi usado um Algoritmo Genético (AG) adaptativo descrito em Menezes and Sousa (2016) e Menezes (2017).

O planejamento da operação energética diária orienta os agentes do setor elétrico sobre seus riscos, logo o objetivo desse trabalho é analisar os impactos causados no custo da operação energética e na emissão de CO₂ e NO₂ devido à inclusão de parques eólicos no sistema. Essa análise leva em consideração os erros de previsão de vento, obtidos através da comparação entre a série de vento prevista e as séries sintéticas produzidas.

Os resultados foram adquiridos através de simulações no *software* MATLAB R2017a, utilizando o sistema teste do IEEE de 30 barras com 6 UTs e 2 parques eólicos.

2 Modelagem da Geração Eólica

Com o objetivo de verificar o erro de previsão do vento, esse artigo utiliza funções de probabilidade para gerar perfis de velocidade do vento, e, assim, verificar o efeito da superestimação da energia eólica disponível.

Dada a natureza estocástica do vento, sua velocidade e a potência eólica gerada podem ser descritas através de variáveis aleatórias.

Ignorando as não-linearidades, a potência gerada por um aerogerador pode ser simplificada como visto na Figura 1 (Hetzler et al., 2008).

Dessa forma, a potência gerada pode ser definida como em (1)

$$\begin{cases} W = 0, & V < v_{in} \text{ ou } V \geq v_{out} \\ W = \beta \cdot V + \gamma, & v_{in} \leq V < v_r \\ W = w_r, & v_r \leq V < v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

onde V é a velocidade do vento, W a potência gerada pelo aerogerador, v_{in} é a velocidade de *cut-in*,

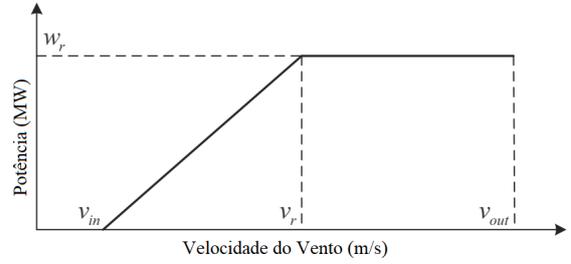


Figura 1: Curva de potência simplificada de um aerogerador.

v_{out} é a velocidade de *cut-out*, v_r é a velocidade que se se atinge a potência nominal, e w_r é a potência nominal do aerogerador. Além disso:

$$\beta = \frac{w_r}{v_r - v_{in}}, \quad \gamma = \frac{-v_{in} \cdot w_r}{v_r - v_{in}}$$

O perfil da velocidade do vento pode ser representado através da distribuição de Weibull e sua Função de Densidade de Probabilidade (FDP) é descrita em (2)

$$f_V(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

onde k e c são o fator de forma e escala, respectivamente, de Weibull, e v é a velocidade do vento.

A partir dessa distribuição, segundo Hetzer et al. (2008), a FDP da geração eólica pode ser definida através da transformação vista em (3)

$$\begin{aligned} f_W(w) &= f_V(h(w)) \cdot \left| \frac{dh(w)}{dw} \right|_{h(w)=V} = \\ &= f_V\left(\frac{w - \gamma}{\beta}\right) \cdot \left| \frac{1}{\beta} \right| = \\ &= \frac{k \cdot \mu \cdot v_{in}}{c \cdot w_r} \cdot \left(\frac{(\rho \cdot \mu + 1) \cdot v_{in}}{c}\right)^{(k-1)} \cdot \exp\left[-\left(\frac{(\rho \cdot \mu + 1) \cdot v_{in}}{c}\right)^k\right] \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

$$\rho = \frac{w}{w_r}, \quad \mu = \frac{v_r - v_{in}}{v_{in}}$$

3 Formulação Matemática do Problema

3.1 Função objetivo

O objetivo do problema é minimizar o custo total de geração vinculado ao custo de operação diária e ao custo da emissão de poluentes. A função objetivo pode ser vista em (4)

$$\text{Min } C_T = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_T} (C_{i,t}^P + C_{i,t}^E + C_{i,t}^L + C_{i,t}^D) \quad (4)$$

onde, T é o período total analisado, N_T é o número total de UTs, $C_{i,t}^P$ é o custo de operação da unidade i devido a queima de combustíveis no tempo t , equacionado por (5)

$$C_{i,t}^P = (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) \cdot U_{i,t} \quad (5)$$

onde a_i , b_i , c_i são coeficientes de custo da queima de combustível da unidade i , P_i é a potência de geração da UT i , e $U_{i,t}$ é o estado (ligado ou desligado) da unidade i no tempo t .

$C_{i,t}^E$ é o custo da unidade i devido a emissão de poluentes no tempo t , equacionado por (6)

$$C_{i,t}^E = \alpha_P \cdot \alpha_E \cdot (f_i P_{i,t}^2 + g_i P_{i,t} + h_i) \cdot U_{i,t} \quad (6)$$

onde α_P é o fator custo da emissão dos poluentes, α_E é o fator de emissão dos poluentes, f_i , g_i e h_i são coeficientes da quantidade de emissão de poluentes da unidade i .

$C_{i,t}^L$ é o custo devido ao ligamento no tempo t da unidade i , equacionado por (7)

$$C_{i,t}^L = [1 - U_{i,(t-1)}] \cdot C_i^L \cdot U_{i,t} \quad (7)$$

onde C_i^L é o custo de ligamento da unidade i .

$C_{i,t}^D$ é o custo devido ao desligamento no tempo t da unidade i , equacionado por (8)

$$C_{i,t}^D = [1 - U_{i,t}] \cdot C_i^D \cdot U_{i,(t-1)} \quad (8)$$

onde C_i^D é o custo de desligamento da unidade i .

Além dos custos mencionados anteriormente, neste trabalho outro custo é levado em consideração com o propósito de analisar o efeito do erro na previsão de geração eólica. Este custo de penalidade é baseado no fator de superestimação da energia eólica disponível. Este é explicável pela necessidade de obter a quantidade de energia de uma fonte alternativa, já que a quantidade de energia eólica assumida não está disponível no tempo previsto. A adição dessa penalidade é baseada no trabalho de Hetzer et al. (2008). A equação pode ser vista em (9)

$$C_{j,t}^V = \alpha_V \cdot (w_{j,t}^P - W_{j,t}) = \alpha_V \int_0^{w_{j,t}^P} [(w_{j,t}^P - w) \cdot f_W(w)] dw \quad (9)$$

onde $C_{j,t}^V$ é o custo de penalidade do parque eólico j em um tempo t , α_V é o fator de penalidade devido à potência não disponível que terá que ser suprida de outras fontes, $w_{j,t}^P$ é a geração prevista do parque j no tempo t , $W_{j,t}$ é a geração disponível do parque j no tempo t , e $f_W(w)$ é a FDP da geração eólica naquele local.

É importante destacar que o custo de penalidade só é utilizado após ser encontrada a melhor solução para o problema de minimização descrito em (4), considerando a geração eólica prevista.

3.2 Restrições

Varias restrições devem ser levadas em consideração no problema. São elas:

- Balanço energético

Essa restrição é responsável pelo atendimento da demanda de energia e é definida por (10)

$$\sum_{i=1}^{N_T} (P_{i,t} \cdot U_{i,t}) = L_t - \sum_{j=1}^{N_W} W_{j,t} \quad (10)$$

onde N_W é o número total de parques eólicos e L_t é a demanda requisitada pelo sistema no tempo t .

- Limites de geração

Nessa restrição são definidos os limites operativos para as UTs, modelados por meio de seus limites máximos e mínimos de fornecimento de potência ativa. Essa restrição é mostrada em (11)

$$P_i^{Min} \leq P_i \leq P_i^{Max} \quad (11)$$

onde P_i^{Min} e P_i^{Max} são as potências mínimas e máximas, respectivamente, referente a UT i .

- Reserva girante

Essa restrição prevê uma folga entre a demanda prevista, a geração eólica e a potência disponível entre as UTs em operação. Essa folga permite suprir o sistema mesmo com um aumento inesperado de carga ou a indisponibilidade da geração eólica. Esta folga é representada em (12) (Dawn et al., 2016)

$$\sum_{i=1}^{N_T} (P_i^{Max} \cdot U_{i,t}) \geq (1 + \alpha_{RT}) \cdot L_t + \alpha_{RW} \cdot \sum_{j=1}^{N_W} w_j^r \quad (12)$$

onde α_{RT} é o coeficiente de reserva das UTs (geralmente 10 %), α_{RW} é o coeficiente de reserva dos parques eólicos (geralmente 5 %) e w_j^r é a potência nominal do parque eólico j .

- Variação da potência (Rampa)

A restrição de rampa acopla o nível de geração de uma UT entre dois períodos consecutivos da programação, onde não é possível admitir variações abruptas da potência gerada nesse intervalo de tempo. Ela é definida por (13)

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,(t-1)} \leq R_i^S \\ P_{i,(t-1)} - P_{i,t} \leq R_i^D \end{cases} \quad (13)$$

onde R_i^S e R_i^D são as variações de potência de subida e descida, respectivamente, permitidas na UT i .

- Duração de permanência e saída de operação

O motivo de utilização dessa restrição está relacionado com questões de ordem técnica, fadiga do material e gradientes térmicos inerentes às UTs. Ela evita que essas unidades sejam ligadas e desligadas frequentemente ao longo do horizonte de

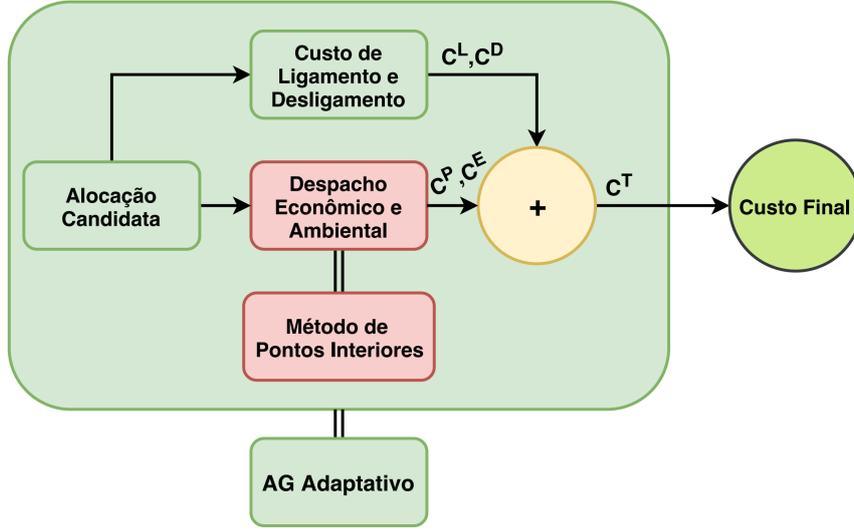


Figura 2: Metodologia proposta para resolução do problema.

planejamento. Essa restrição pode ser escrita como mostrado em (14)

$$\begin{cases} X_{i,t}^L \geq T_i^L \\ X_{i,t}^D \geq T_i^D \end{cases} \quad (14)$$

onde $X_{i,t}^L$ e $X_{i,t}^D$ são o número de horas que a unidade i permaneceu em operação, e o número de horas que a unidade i ficou fora de operação, respectivamente. Os valores de T_i^L e T_i^D dependem das características da UT e fixam a duração mínima, em horas, permitida para cada unidade i permanecer ou sair de operação, respectivamente.

3.3 Subproblema de despacho econômico e ambiental

Nesse trabalho, os custos de $C_{i,t}^P$ e $C_{i,t}^E$ são calculados através do MPI Primal-Dual Predictor-Corretor. Esse método é responsável por fornecer o DEA das UTs que estão em operação no tempo t , e leva em consideração o balanço energético e os limites de geração de cada uma delas. Ou seja, o DEA é tratado como um subproblema de otimização onde a formulação é dada por:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i=1}^{N_T} (C_i^P + C_i^E) \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{i=1}^{N_T} P_i = L - \sum_{j=1}^{N_W} W_j \\ & P_i^{\text{Min}} \leq P_i \leq P_i^{\text{Max}} \end{aligned}$$

4 Metodologia Proposta

Os AGs possibilitam a realização da busca pela melhor solução do problema através da avaliação de diversas soluções candidatas e utilização de operadores genéticos no decorrer desse processo.

Para alcançar a melhor solução, neste trabalho é proposta a resolução do problema através de um AG mais eficiente que possui características modificadas da versão clássica. Para tanto, são utilizados operadores genéticos modificados, técnicas de adaptação dos parâmetros do algoritmo e uma busca local para o auxílio de melhores soluções.

O problema da programação diária de operação energética compreende a AUT e o subproblema de DEA. A metodologia proposta para resolução do problema é a de usar um AG adaptativo para selecionar uma alocação candidata, definindo as UTs que estarão em operação durante o dia, e em seguida realizar o DEA, através do MPI, para encontrar o ponto de operação de cada máquina. Além disso, a alocação candidata definirá os custos de ligamento e desligamento. Essa metodologia é sintetizada na Figura 2.

4.1 Codificação

A codificação utilizada foi adotada para atender os requisitos exigidos do problema. Os cromossomos do AG criado foram codificados como matrizes de dimensão $(N_T \times T)$. Essas matrizes são preenchidas com o estado de cada unidade, sendo representado por 1 quando a unidade está em operação, e por 0 caso contrário.

4.2 População inicial

A população inicial do AG proposto é composta por um número predefinido de N_P indivíduos que terão seus cromossomos iniciados de forma aleatória, ou seja, cada elemento das matrizes terá um número binário gerado através do arredondamento do valor adquirido por uma distribuição uniforme $\mathcal{U}\{0, 1\}$. Na Figura 3 é representada a população formada por cromossomos codificados de forma matricial.

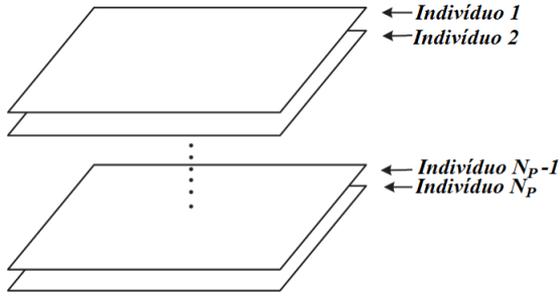


Figura 3: Representação da população formada por cromossomos matriciais.

4.3 Função de avaliação (fitness)

A avaliação de cada indivíduo leva em consideração se o mesmo está obedecendo às restrições do problema. Caso isso ocorra, o indivíduo será avaliado como descrito em (15)

$$fitness = \frac{C_T}{C^{Max}} \quad (15)$$

em que C^{Max} é o custo adquirido realizando o DEA com todas as UTs ligadas em potência máxima, durante todo o período analisado.

Caso as restrições do problema não sejam obedecidas, a avaliação será feita com base na quantidade de restrições que aquele indivíduo conseguiu obedecer. Dessa forma, esse indivíduo tem sua avaliação descrita por (16)

$$fitness = C^{Max} - 0,001 \cdot N_R \cdot C^{Max} \quad (16)$$

onde N_R é o número de restrições obedecidas pelo indivíduo.

4.4 Seleção e elitismo

A técnica de seleção utilizada no trabalho foi a da Roleta. Paralelamente à seleção, foi aplicada a técnica de Elitismo para garantir que as características de alguns indivíduos que tenham boa avaliação se propaguem nas próximas gerações. Nesse trabalho, N_E é a porcentagem de indivíduos da população que participarão do grupo elite.

4.5 Cross-over e mutação

Devido a sensibilidade das matrizes de alocação provocada pela restrição descrita em (14) foi aplicada a técnica anelar proposta em Pavez-Lazo and Soto-Cartes (2011) e Menezes (2017) para os operadores de *cross-over* e mutação.

As variáveis utilizadas para definir a probabilidade de ocorrência de *cross-over* e mutação são respectivamente P_{CO} e P_M . Um resumo da metodologia pode ser visto na Figura 4.

O *cross-over* é realizado a partir de uma probabilidade de ocorrência P_{CO} . Primeiramente são escolhidas, de forma aleatória, duas UTs de cada

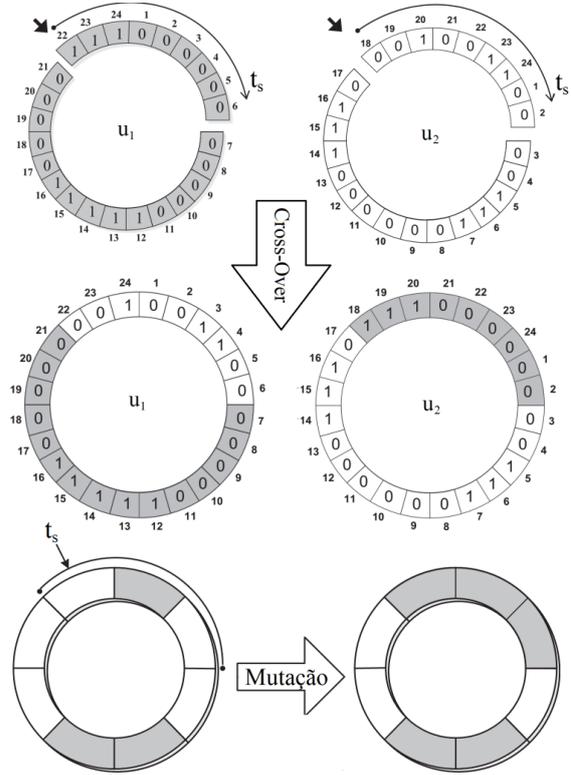


Figura 4: Resumo da metodologia de *cross-over* e mutação utilizada.

um dos indivíduos selecionados pela roleta. As duas linhas escolhidas contendo os estados operativos de cada UT são transformadas em um anel e logo depois são escolhidos os pontos de corte e o tamanho do semi-anel t_s , ambos de forma aleatória. Por fim, o cruzamento pode ser realizado.

Semelhante ao que foi feito no *cross-over*, a mutação é realizada a partir de uma probabilidade de ocorrência P_M . Nessa metodologia é criado um anel com uma linha contendo os estados operativos de uma unidade, escolhida aleatoriamente. Logo depois é escolhido o ponto de corte e o tamanho do semi-anel t_s , ambos de forma aleatória. Nesse semi-anel será verificado se a maioria dos estados possuem o valor 0 ou 1. Caso a maioria dos valores sejam 0, a mutação provocará uma espécie de "contaminação" no semi-anel, modificando todos os valores para 1 e vice-versa.

4.6 Adaptabilidade

O processo de adaptabilidade utilizado varia o valor de P_M de acordo com o Grau de Homogeneidade da População (GHP).

O GHP mede o quanto os indivíduos da população são semelhantes. A verificação do mesmo é feita a partir de uma frequência F_{GHP} de gerações, ou seja, é analisado se o GHP ultrapassou o limite estabelecido de homogeneidade L_H de forma periódica. Caso esse limite tenha sido ultrapassado, a probabilidade de ocorrência do operador de mu-

tação passa de um valor mínimo inicial P_{Min}^M para um valor máximo P_{Max}^M que irá decaindo a uma taxa T_X , a medida que as gerações vão avançando, até voltar ao valor mínimo inicial.

4.7 Busca local

As técnicas de busca local incorporadas ao AG utilizado são a 1-OPT e 2-OPT.

A busca do tipo 1-OPT modifica o estado de cada uma das UTs para todo o período de operação analisado, ou seja, cada elemento da matriz de alocação terá seu valor alterado. A busca do tipo 2-OPT modifica, primeiramente, o estado de duas UTs para cada hora, e, posteriormente, o estado de cada unidade para duas horas diferentes. Nesse último tipo, a alteração do estado é feita através de uma combinação simples dos elementos de cada linha ou coluna da matriz de alocação.

Nessa técnica, a avaliação do indivíduo é feita a cada modificação realizada. A busca só parará caso encontre uma solução melhor que a da última geração ou caso não ache melhor solução.

Cabe destacar que a busca local só será requisitada no AG proposto quando não houver mudança do melhor indivíduo encontrado após um número F_{BL} de gerações.

4.8 Critério de parada

Neste trabalho, além da estagnação dos resultados encontrados, que desencadeia no processo de busca local, outro critério utilizado como decisão de parada é o número máximo de gerações N_{Max} .

Os parâmetros do AG foram sintonizados à medida que o estudo foi avançando. Houve uma preocupação em utilizar o mínimo de gerações possíveis no processo de busca, sem depreciar os resultados. Os parâmetros utilizados no AG podem ser vistos na Tabela 1.

5 Casos Analisados e Resultados

A análise da operação diária foi testada em um sistema composto por 6 UTs, sendo 3 que utilizam carvão como combustível, 2 utilizam gás e apenas 1 utiliza óleo. Os parâmetros associados ao custo de produção e ao consumo de combustíveis podem ser vistos na Tabela 2, e as características das plantas termelétricas podem ser vistas na Tabela 3. O sistema de transmissão utilizado foi o IEEE de 30 barras (Yao et al., 2012; Zhang et al., 2015).

Além das UTs, 2 parques eólicos fazem parte do sistema, sendo situados em áreas geográficas diferentes. As características desses parques, os parâmetros de Weibull e os fatores de penalidade podem ser vistos na Tabela 4 (Yao et al., 2012; Zhang et al., 2015).

Por se tratar de uma análise feita num sistema potencial, a energia eólica prevista para os

parques não obedeceu nenhum modelo de previsão. Os perfis da velocidade do vento foram gerados através da função `wblrnd` do MATLAB. Essa função tem como entrada os parâmetros c e k do local, e retorna um valor de velocidade aleatória obedecendo as características da região. A energia eólica utilizada e a demanda do sistema podem ser vistas na Tabela 5.

Os fatores de emissão e de custo dos gases poluentes podem ser vistos nas Tabelas 6 e 7, respectivamente (Yao et al., 2012; Zhang et al., 2015).

Foram analisados três casos diferentes para o mesmo sistema teste. O primeiro caso não considera os parques eólicos no sistema com objetivo de verificar qual o custo total de operação e a quantidade de poluentes emitidos pelas UTs. O segundo caso insere os parques eólicos com a previsão de vento esperada para observar como a AUT se modifica e se há redução do custo de operação e da emissão de poluentes, onde $w_{j,t}^P = W_{j,t}$. Nesses dois casos o processo com o AG foi iniciado 50 vezes e escolhido o melhor resultado encontrado.

Com o resultado da AUT obtido do segundo caso, um terceiro caso é analisado e são simuladas possíveis condições de vento para o dia de operação através de séries sintéticas. Nesse caso são geradas 100 séries sintéticas (obtidas através da função `wblrnd`) com base nos valores de c e k dos locais onde se encontram os parques e $w_{j,t}^P \neq W_{j,t}$. Em seguida, com cada um dos cenários criados e com o resultado do Caso 2, é observado o efeito do erro na previsão da geração eólica.

Os resultados da operação diária obtidos no Caso 1 e no Caso 2 podem ser vistos nas Tabelas 8 e 9, respectivamente. Como é possível observar, as UTs 1 e 2, que utilizam carvão como combustível, continuam não entrando em operação mesmo com a adição da geração eólica, e a unidade 4 continua sempre em operação. Também percebe-se que a unidade 3 modifica sua operação, sendo requisitada na hora 6, diminuindo o ponto de operação da unidade 4, e operando nas horas 7, 8 e 9, tirando a unidade 5 de operação. Por fim, a unidade 6 passa operar por mais horas em sua potência máxima, tirando a unidade 3 de operação nas horas 22, 23 e 24.

Além disso, nas Tabelas 10 e 11, respectivamente, são mostrados os custos de operação obtidos no Caso 1 e no Caso 2, como também os custos de ligamento e desligamento, e o custo com a emissão de poluentes. Observa-se uma diminuição significativa no custo total de operação e no custo total de ligamento e desligamento, e um aumento no custo total de emissão. Embora a soma de todos os custos totais tenha diminuindo, nota-se que houve um aumento no custo de emissão motivado tanto pelo período mais prolongado de ligamento da UT 6, a óleo, quanto pela diminuição dos pontos de operação das UTs 4 e 5, a gás, e aumento do ponto de operação da UT 3, a carvão.

Tabela 1: Parâmetros utilizados no AG.

Parâmetro	N_P	N_E	P_{CO}	P_M^{Min}	P_M^{Max}	T_X	F_{GHP}	L_H	F_{BL}	N_{Max}
Valor	20	5%	80%	10%	80%	5%	15 gerações	80%	50 gerações	5000 gerações

Tabela 2: Parâmetros de geração.

Termelétrica (i)	Barra	Combustível	Coeficientes de Custo de Produção			Coeficientes de Consumo de Combustível		
			a	b	c	f	g	h
1	1	Carvão	0,002 \$/MW ²	100 \$/MW	2000 \$	4.10^{-5} t/MW ²	0,2 t/MW	40,0 t
2	2	Carvão	0,0025 \$/MW ²	150 \$/MW	2500 \$	5.10^{-5} t/MW ²	0,3 t/MW	50,0 t
3	13	Carvão	0,0018 \$/MW ²	90 \$/MW	6000 \$	24.10^{-5} t/MW ²	0,12 t/MW	80,0 t
4	22	Gás	0,00315 \$/MW ²	180 \$/MW	923,4 \$	84.10^{-3} m ³ /MW ²	48,0 m ³ /MW	2462,4 m ³
5	23	Gás	0,0032 \$/MW ²	200 \$/MW	950 \$	9.10^{-3} m ³ /MW ²	50,0 m ³ /MW	2500,0 m ³
6	27	Óleo	0,003432 \$/MW ²	234 \$/MW	124,8 \$	343.10^{-5} t/MW ²	0,234 t/MW	1,248 t

Tabela 3: Características das plantas termelétricas.

Termelétrica (i)	P^{Min} [MW]	P^{Max} [MW]	R^S [MW]	R^D [MW]	T^L [h]	T^D [h]	C^L [S]	C^D [S]	Estado Inicial* [h]
1	20	110	110,00	110,00	5	5	400,00	3000,00	-5
2	20	100	100,00	100,00	4	2	360,00	3000,00	-6
3	120	600	600,00	600,00	6	4	2250,00	3000,00	+1
4	110	520	520,00	520,00	4	3	3600,00	3000,00	+1
5	110	500	500,00	500,00	4	3	3300,00	3000,00	-1
6	40	200	200,00	200,00	3	4	2230,00	3000,00	-1

* Estado Inicial: (+) termelétrica em operação e (-) fora de operação

Tabela 4: Dados dos parques eólicos.

Parque Eólico (j)	Barra	Nº de Turbinas	c [m/s]	k	v_{in} [m/s]	v_{out} [m/s]	v_r [m/s]	w_r [MW]	α_v [\$/MW]
1	14	30	4,6024	1,8862	4	25	16	90	30
2	19	20	4,4363	1,7128	3	25	13	60	20

Tabela 5: Energia eólica prevista e a demanda do sistema.

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
w_1^P [MW]	16	10	18	25	23	56	21	28	20	16	38	15
w_2^P [MW]	26	12	32	36	40	35	45	28	10	39	33	37
L [MW]	609	507	433	397	388	417	569	741	927	1109	1359	1510
t	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
w_1^P [MW]	7	20	34	29	17	27	39	26	13	33	17	30
w_2^P [MW]	36	50	33	53	34	32	15	49	49	26	8	20
L [MW]	1600	1633	1559	1478	1503	1519	1532	1463	1293	1081	888	712

Tabela 6: Fatores de emissão dos gases poluentes.

Combustível	Carvão	Gás	Óleo
α_E do CO ₂	3,16040 kg/kg	1,84000 kg/m ³	2,85230 kg/kg
α_E do NO ₂	0,00123 kg/kg	0,00034 kg/m ³	0,00033 kg/kg

Tabela 7: Fatores de custo de emissão.

Poluente	CO ₂	NO ₂
α_P	2,0 \$/t	4,5 \$/kg

Os resultados de emissão obtidos no Caso 1 e no Caso 2 podem ser vistos nas Tabelas 12 e 13, respectivamente. Observa-se que houve aumento na emissão dos dois poluentes motivado pela mudança na operação descrita no parágrafo anterior.

Ou seja, embora o processo de busca tenha achado um custo menor, ele não conseguiu diminuir o nível de emissão de poluentes.

Por último, com as séries sintéticas de vento criadas, é possível observar na Tabela 14 o efeito da penalidade devido à sobrestimação na previsão de vento. Houve um aumento no custo total de \$ 16576,47, no pior caso criado, e de \$ 3158,12, no melhor caso. Assim, nota-se um aumento no custo total final da operação que, nesse caso, pode chegar até 2,75 %.

Analisando o mesmo caso, a emissão total de poluentes teve um aumento no pior caso criado, porém, em média, para as séries criadas, há uma diminuição de 20,35 t em relação à emissão total observada no Caso 2. Isso pode ser explicado pelo

Tabela 8: Resultados da operação diária do Caso 1 [MW].

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Termelétrica 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Termelétrica 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Termelétrica 3	388,802	326,945	282,069	260,237	254,779	0	0	0	0	513,472	599,976	598,018
Termelétrica 4	220,198	180,055	150,931	136,763	133,221	417	287,733	374,438	468,2	301,106	383,524	359,81
Termelétrica 5	0	0	0	0	0	0	281,267	366,562	458,8	294,422	375,5	352,172
Termelétrica 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200,000
t	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Termelétrica 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Termelétrica 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Termelétrica 3	599,999	600	599,993	587,27	596,462	599,202	599,836	600	592,504	501,231	557,998	451,265
Termelétrica 4	404,18	420,815	383,515	349,097	357,065	363,75	369,983	435,938	354,02	293,162	330,002	260,735
Termelétrica 5	395,821	412,185	375,492	341,633	349,472	356,048	362,18	427,062	346,476	286,607	0	0
Termelétrica 6	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	0	0	0	0

Tabela 9: Resultados da operação diária do Caso 2 [MW].

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Termelétrica 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Termelétrica 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Termelétrica 3	363,331	313,604	251,747	223,041	214,6	215,491	324,519	434,891	563,456	537,376	504,291	578,605
Termelétrica 4	203,669	171,396	131,253	112,959	110,4	110,509	178,481	250,109	333,544	316,624	295,148	343,383
Termelétrica 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	288,561	336,012
Termelétrica 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200,000	200,000	200,000
t	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Termelétrica 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Termelétrica 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Termelétrica 3	599,992	599,995	592,928	551,479	575,985	579,478	587,27	547,991	479,372	0	0	0
Termelétrica 4	382,507	385,53	353,302	325,803	341,679	343,951	349,097	323,528	278,976	415,27	335,118	233,795
Termelétrica 5	374,501	377,474	345,77	318,718	334,336	336,571	341,633	316,48	272,652	406,73	327,882	228,206
Termelétrica 6	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000

Tabela 10: Custos do Caso 1.

Termelétrica (i)	Custo de Operação [S]	Custo On/Off [S]	Custo de Emissão [S]
1	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00
3	220761,48	5250,00	32939,38
4	169925,31	0,00	2020,98
5	137632,76	6300,00	1553,00
6	39536,64	5230,00	2343,87
Total	567856,19	16780,00	38857,23

Tabela 13: Resultados de emissão do Caso 2.

Termelétrica (i)	Emissão de CO ₂ [t]	Emissão de NO ₂ [t]
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	9332,62	3,81
4	725,50	0,13
5	513,63	0,09
6	2114,41	0,24
Total	12686,16	4,28

Tabela 11: Custos do Caso 2.

Termelétrica (i)	Custo de Operação [S]	Custo On/Off [S]	Custo de Emissão [S]
1	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00
3	221474,12	3000	33045,71
4	147859,07	0	1758,54
5	110342,82	3300	1245,00
6	74131,18	2230	4394,76
Total	553807,20	8530	40444,01

Tabela 14: Resultados para o Caso 3.

	Custo Total [S]	Emissão Total [t]
Valor Mínimo	605947,33	12604,38
Valor Médio	611487,52	12670,09
Valor Máximo	619357,67	12730,07

Tabela 12: Resultados de emissão do Caso 1.

Termelétrica (i)	Emissão de CO ₂ [t]	Emissão de NO ₂ [t]
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	9380,98	3,83
4	820,69	0,15
5	636,82	0,12
6	1127,69	0,13
Total	11966,18	4,23

impacto das séries sintéticas de vento criadas que tem maior efeito no balanço energético.

6 Conclusões

Esse trabalho analisou o problema da operação diária de sistemas termo-eólicos, onde foram levados em consideração os custos relacionados à operação, à emissão de poluentes e à penalidade devido a sobrestimação do vento.

Por se tratar de um problema não-linear inteiro-misto, o problema principal de busca, que utilizou o AG, gerou um subproblema de otimização resolvido através do MPI. Esta metodologia é lenta, para essa análise, e requer várias inicializações para obter um resultado satisfatório.

A inclusão de parques eólicos ao sistema utilizado, contendo apenas UTs, promoveu a diminuição do custo total, porém o mesmo não ocorreu para a emissão de poluentes. Por fim, as séries de vento criadas mostraram como diferentes características de vento, que podem surgir no dia da operação, influenciam no custo e na emissão de poluentes.

Em suma, a análise feita durante o planejamento da operação energética é uma importante ferramenta quando se deseja verificar os riscos inerentes a intermitência do vento. Para verificar melhor a eficácia da metodologia utilizada, deve-se utilizar curvas de demanda diferentes e outras características das UTs, além de outros tipos de geração. O trabalho apresentou resultados compatíveis com os encontrados na literatura, de maneira que pode-se afirmar que ele alcançou satisfatoriamente os objetivos pretendidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Referências

- Dawn, S., Tiwari, P. K. and Goswami, A. K. (2016). A joint scheduling optimization strategy for wind and pumped storage systems considering imbalance cost & grid frequency in real-time competitive power market, *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* **6**(4): 1248–59.
- Denny, E. and OMalley, M. (2006). Wind generation, power system operation, and emissions reduction, *IEEE Transactions on power systems* **21**(1): 341–347.
- Hetzer, J., David, C. Y. and Bhattarai, K. (2008). An economic dispatch model incorporating wind power, *IEEE Transactions on energy conversion* **23**(2): 603–611.
- Li, F., Gu, C., Yuan, C., Kuri, B. and Dunn, R. W. (2013). New problem formulation of emission constrained generation mix, *IEEE Transactions on Power Systems* **28**(4): 4064–4071.
- Liu, X. and Xu, W. (2010). Economic load dispatch constrained by wind power availability: A here-and-now approach, *IEEE Transactions on sustainable energy* **1**(1): 2–9.
- Menezes, R. F. A. (2017). Programação diária da operação de sistemas termelétricos utilizando algoritmo genético adaptativo e método de pontos interiores, *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Sergipe. Sergipe*.
- Menezes, R. F. A. and Sousa, A. A. (2016). Alocação de unidades geradoras térmicas via algoritmo genético adaptativo, *CBA 2016*.
- Oliveira, A. R. L. and Filho, S. S. (2003). Métodos de pontos interiores para problema de fluxo de potência ótimo dc, *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica* **14**(3): 278–284.
- ONS (2017). Plano da operação energética 2017/2021 - sumário executivo, *ONS*.
- Pavez-Lazo, B. and Soto-Cartes, J. (2011). A deterministic annular crossover genetic algorithm optimisation for the unit commitment problem, *Expert Systems with Applications* **38**(6): 6523–6529.
- Wood, A. J. and Wollenberg, B. F. (2012). *Power generation, operation, and control*, John Wiley & Sons.
- Yao, F., Dong, Z. Y., Meng, K., Xu, Z., Iu, H. H. and Wong, K. P. (2012). Quantum-inspired particle swarm optimization for power system operations considering wind power uncertainty and carbon tax in australia, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **8**(4): 880–888.
- Zhang, Y., Yao, F., Iu, H. H., Fernando, T. and Trinh, H. (2015). Wind-thermal systems operation optimization considering emission problem, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **65**: 238–245.