

ABORDAGENS META HEURÍSTICAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DA GERAÇÃO MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO FONTES RENOVÁVEIS

GUILHERME COSTA SILVA*, ADRIANO C. LISBOA†, DOUGLAS A. G. VIEIRA‡, RODNEY R. SALDANHA*

*Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos, 6627 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brazil

†Gaia Solutions on Demand - Rua Professor José Vieira Mendonça, 770, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

‡ENACOM Handcrafted Technologies - Alameda das Latâneas, 215, 31270-800, Belo Horizonte, MG, Brasil

Emails: guicosta@ufmg.br, adriano.lisboa@gaiasd.com, douglas.vieira@enacom.com.br, rodney@cpdee.ufmg.br

Abstract— Generation expansion planning is a recurring problem in power systems that considers several aspects such as costs, reliability, environmental impacts, among others. In this work, meta-heuristic methods are employed in the multi-objective generation expansion planning of an adapted case study which considers the inclusion of renewable sources and minimization of investment costs and environmental impacts of the plants introduced into the studied system. The obtained results are promising and fulfill the purpose of prioritizing renewable sources in the planning of power systems.

Keywords— Generation Expansion Planning, Renewable Sources, Meta-heuristic methods, Evolutionary Algorithms.

Resumo— O planejamento de expansão da geração é um problema recorrente na área de sistemas elétricos de potência que considera vários aspectos como custos, confiabilidade, impactos ambientais, dentre outros. Neste trabalho, alguns métodos meta heurísticos são empregados no planejamento de expansão da geração multiobjetivo aplicado a um estudo de caso adaptado que considera a inclusão de fontes renováveis e a minimização dos custos de investimento e dos impactos ambientais provenientes das usinas introduzidas ao sistema em questão. Os resultados obtidos são promissores e cumprem com o propósito de priorizar as fontes renováveis no planejamento de sistemas elétricos de potência.

Palavras-chave— Planejamento de Expansão da Geração, Fontes Renováveis, Métodos Meta Heurísticos, Algoritmos Evolucionários.

1 Introdução

O planejamento da expansão da geração (GEP), segundo [1, 2], consiste em identificar o melhor plano de expansão, determinando as unidades geradoras a serem construídas e sua disponibilidade considerando um planejamento de longo prazo, minimizando todos os custos implícitos ao planejamento. De acordo com [3], o GEP está relacionado com o investimento na produção de energia, e deve considerar diferentes aspectos, com o objetivo de expandir o sistema de energia existente para atender a crescente demanda no futuro e satisfazer todos os critérios definidos pelos fatores considerados no problema.

O GEP é considerado, de acordo com [5], como um problema de otimização predominantemente não-linear, não diferenciável, de alta dimensionalidade e discreto. Contém várias abordagens de diferentes número de objetivos, número de restrições, e até mesmo diferentes fatores, como custos de planejamento, custos de manutenção, confiabilidade, tipo de usinas, emissão de combustível, dentre outros. Com o objetivo de resolver o problema, várias técnicas têm sido utilizadas, desde

a linearização de alguns de seus aspectos [4], até o uso de abordagens meta heurísticas multiobjetivo [1].

Este trabalho possui como objetivo realizar testes para o problema GEP, considerando diferentes formulações e as meta heurísticas avaliadas, de forma a resolver o problema e avaliar as soluções obtidas, principalmente no aspecto da inclusão das fontes renováveis, que segundo [5], provê uma grande revolução nos fundamentos do problema em termos de seus objetivos, suas restrições e os métodos usados na análise.

2 Planejamento da expansão da geração

Na formulação do problema GEP, geradores e cargas são considerados e, em alguns casos, o tipo de combustível é considerado, juntamente com os geradores ou separadamente, com cada gerador usando um determinado tipo de combustível e de cargas representado na demanda total necessária. Isto é claramente especificado em [4], considerando possíveis integrações entre os problemas de expansão e o transporte de combustível represen-

tado como um fator de custo a ser minimizado. Na Figura 1, um gráfico que descreve a relação entre todos os componentes é mostrada, considerando também a relação entre combustíveis e geradores.

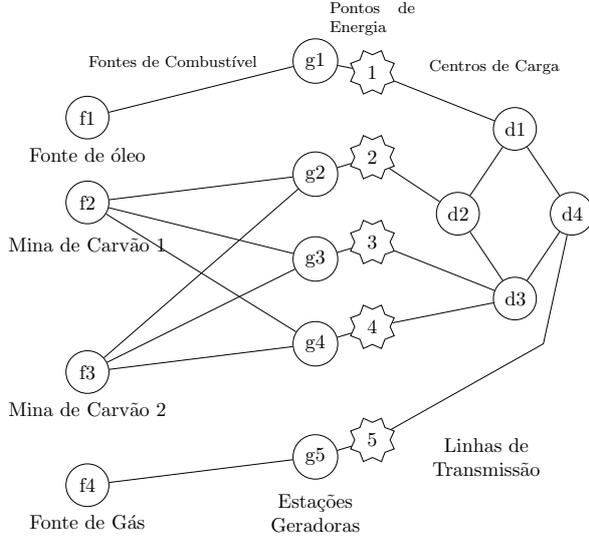


Figura 1: Exemplo típico de um sistema teste, baseado em [4]. Representando relações entre fontes de combustível, geradores, barras e cargas.

O planejamento de expansão da geração [1] é definido inicialmente como um problema mono-objetivo que propõe a implantação de novos geradores a estarem disponíveis para um determinado período ou estágios após a data atual. O problema contém um objetivo de custo, e conjuntos de restrições leves e rígidas.

São adicionadas a esta formulação as variáveis relativas a emissão de poluentes e benefícios associados à introdução de fontes renováveis, conforme apresentado a seguir.

2.1 Objetivo de custo

O objetivo de custos são definidos em (1), com os seus componentes e variáveis definidas em (2) até (7):

$$C = \sum_{t=1}^T [I(U_t) + M(X_t) + O(X_t) - S(U_t)] \quad (1)$$

onde:

$$X_t = x_{t-1} + U_t \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (2)$$

$$I(U_t) = (1 + d)^{-2t} \sum_{i=1}^N (CI_i \times U_{t,i}) \quad (3)$$

$$S(U_t) = (1 + d)^{-2(T+1)} \sum_{i=1}^N (CI_i \times \sigma_i^{2(T-t+1)} \times U_{t,i}) \quad (4)$$

$$M(X_t) = \sum_{s'=0}^l (1 + d)^{-(2.5+t'+s')} \times \sum_{i=1}^N ((X_{t,i} \times FC_i) + MC_i) \quad (5)$$

$$O(X_t) = EENS_t \times C(EENS) \times \sum_{s'=0}^l (1 + d)^{-(2.5+t'+s')} \quad (6)$$

Onde:

$$EENS = \sum_{j: Y_j > R_j} (Y_j - R_j) P(Y_j) O t_j \quad (7)$$

Y_j é a capacidade de interrupção do sistema no estado j ;

R_j é a capacidade de reserva do sistema no estado j ;

$P(Y_j)$ é a probabilidade estimada de ocorrência de um estado j ;

$O t_j$ é o tempo de interrupção do estado j .

A energia esperada não servida (EENS), necessária para o cálculo de (6) em (1), assim como a perda de probabilidade de carga (LOLP), tratada como restrição leve, são calculadas a partir dos índices de confiabilidade.

As demais variáveis são definidas abaixo:

| | |
|-----------|--|
| C | custo total, \$; |
| U_t | vetor N-dimensional de unidades recentemente introduzidas em um período de t estágios; |
| $U_{t,i}$ | número de unidades recentemente introduzidas do tipo i no período t ; |
| X_t | vetor de capacidade cumulativa de unidades existentes no período t , (MW); |
| $X_{t,i}$ | vetor de capacidade cumulativa de unidades existentes do tipo i in stage t , (MW); |
| $I(U_t)$ | valor atual do custo de investimento da unidade recém introduzida no t -ésimo período, \$; |
| $M(X_t)$ | valor atual do custo total de operação e manutenção de unidades existentes e das recém introduzidas, \$; |
| s' | variável usada para indicar que o custo de manutenção é calculado no meio de cada ano; |
| $O(X_t)$ | valor atual do custo de interrupção das unidades existentes e das recém introduzidas, \$; |
| $S(U_t)$ | valor residual da unidade recém adicionada no t -ésimo estágio, \$; |
| d | taxa de desconto; |

| | |
|------------|---|
| CI_i | valor capital de investimento da i -ésima unidade, \$; |
| σ_i | fator residual da i -ésima unidade; |
| T | duração do planejamento (em estágios); |
| N | número total de diferentes tipos de unidades; |
| FC | custo fixo de operação e manutenção das unidades, \$/MW; |
| MC | custo variável de operação e manutenção das unidades (energia), \$/MWh; |
| $EENS$ | energia prevista não servida, MWh. |
| $C(EENS)$ | custos relacionados com a energia prevista não servida. |

Em uma formulação alternativa descrita em [1], o custo de interrupção é avaliado como um outro objetivo relacionado com os custos restantes.

2.2 Restrições leves

As restrições leves são avaliadas em (8).

$$C_{err} = R_{err} + LOLP_{err} \quad (8)$$

onde:

C_{err} é o conjunto correspondente à soma das restrições;

R_{err} é a violação na margem de reserva;

$LOLP_{err}$ é a violação na confiabilidade do sistema.

Margem de reserva: as unidades selecionadas devem satisfazer a margem de reserva mínima e máxima em (9).

$$(1 + R_{min}) \times D_t \leq \sum_{i=1}^N X_{t,i} \leq (1 + R_{max}) \times D_t \quad (9)$$

onde:

R_{min} é a margem de reserva mínima;

R_{max} é a margem de reserva máxima;

D_t é a demanda no t -ésimo período em MW;

$X_{t,i}$ é a capacidade cumulativa da i -ésima unidade no t -ésimo período.

Critério de confiabilidade: As unidades selecionadas, juntamente com as unidades existentes devem satisfazer um critério de confiabilidade relacionado com a perda de probabilidade de carga (LOLP) em (10).

$$LOLP(X_t) \leq \epsilon \quad (10)$$

onde ϵ é a LOLP máximo permitido, de acordo com o critério de confiabilidade. $LOLP$ pode ser calculada através do mesmo método que calcula o $EENS$, conforme visto no cálculo do custo de interrupção. Mais sobre a confiabilidade em problemas GEP e seus índices podem ser vistos em [10].

As restrições leves em (8) podem ser modeladas como um objetivo, conforme proposto em [2], minimizando a soma das violações de restrições normalizadas, cujos valores estão entre 0 e 1. Isso transforma o problema mono-objetivo em um equivalente multiobjetivo.

2.3 Restrições Rígidas

Na formulação básica, o limite de construção superior e a restrição de demanda são as principais restrições rígidas do problema GEP.

Neste caso, como a modelagem do algoritmo utiliza dois métodos apresentados mais adiante como a VMP e a IIPG, estas restrições não precisam ser verificadas, como em alguns algoritmos que exigem a codificação básica.

2.4 Limites de emissão de gases

Uma vez que certas tecnologias podem envolver a emissão de gases a partir de combustíveis fósseis (CO_2 , por exemplo), a quantidade destes deve ser minimizada. Trabalhos como [11] e [12] consideram este fator, que é muito relevante devido à minimização dos impactos ambientais implícitos na operação da usina. De acordo com [11], a emissão deve satisfazer o critério em (11).

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (Er_{j,i,t} \times X_{i,t}) \leq Er_{j,max} \quad (11)$$

onde:

$Er_{j,i,t}$ taxa de emissão (ton/MWh) para o j -ésimo gás emitido pela unidade de geração i no período t ;

$Er_{j,max}$ subsídio máximo da emissão de gases do tipo j ;

$g_{i,t}$ produção de energia acumulada de unidade geradora i no período t (MW);

j tipo (ID) do gás considerado, normalmente relacionados com CO_2 , SO_2 or NO_x .

A emissão de gases na (11) também pode ser tratada como um outro objetivo do problema, como considerado em [11] para emissão de CO_2 . Isto também pode ser considerado como uma terceira função objetivo do problema principal.

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (Er_{i,t}^{CO_2} \times X_{i,t}) \quad (12)$$

2.5 Benefícios associados ao uso de fontes renováveis

Os incentivos financeiros suplementares para substituir sistemas de geração convencionais por fontes de energia renováveis podem ser considerados,

além de uma possível diminuição dos consumos de combustível. Estes dois aspectos podem ser quantificados em duas variáveis a saber [6].

Economia nos custos de combustível (FORS): este valor pode ser obtido pela determinação da energia compensada pela queima de combustível convencional, cujo valor equivale à produção anual de energia pelas fontes renováveis, calculado usando a seguinte formulação

$$FORS_t = AFC_t \times \left[\sum_{j \in R} X_{t,j} \right] \quad (13)$$

onde:

AFC_t é o custo médio do combustível no período de tempo t (em $\$/MWh$);

R é o conjunto de fontes renováveis;

Benefícios obtidos de incentivos (BOI): O valor monetário dos benefícios ambientais pode ser calculado da seguinte forma:

$$BOI_t = REPI_t \times \left[\sum_{j \in R} X_{t,j} \right] \quad (14)$$

onde:

$REPI_t$ é o índice de produção de energia renovável;

Desta forma, o objetivo pode ser definido por um custo de retorno, que pode ser considerado nos custos da primeira função objetivo:

$$\max C_{ret} = \sum_{t=1}^T d(FORS_t + BOI_t) \quad (15)$$

2.6 GEP multiobjetivo

Neste trabalho, a formulação multiobjetivo adotada para o planejamento da expansão da geração define três objetivos, dois deles como em [1], considera os custos de investimento, porém, com a adição dos benefícios associados às fontes renováveis (16), e as restrições leves (18) adicionando também os impactos ambientais avaliados pela emissão de gás carbônico pelas usinas instaladas em (17) ao conjunto de objetivos do problema.

$$\min C_1 = \sum_{t=1}^T [I(U_t) + M(X_t) + O(X_t) - S(U_t) - C_{ret}] \quad (16)$$

$$\min C_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (Er_{i,t}^{CO_2} \times X_{i,t}) \quad (17)$$

$$\min C_3 = R_{err} + LOLP_{err} \quad (18)$$

3 Metodologias

3.1 Métodos de resolução

O trabalho está concentrado na aplicação de métodos meta heurísticos ao problema do GEP, principalmente nas abordagens baseadas nos métodos evolucionários ou baseados em enxame. Tais métodos são escolhidos por causa da fácil implementação pois, de acordo com [3], não é necessário converter o modelo do sistema elétrico a um conjunto de regras para programação de otimização, e os estudos de dinâmica e da análise de estabilidade podem ser realizados sem a reorganização do modelo. Nestes métodos, no entanto, o algoritmo pode ficar preso a soluções de ótimos locais, em vez de localizar soluções globais desejadas.

A aplicação de tais métodos em GEP pode ser descrito pelo fluxograma da Figura 2.

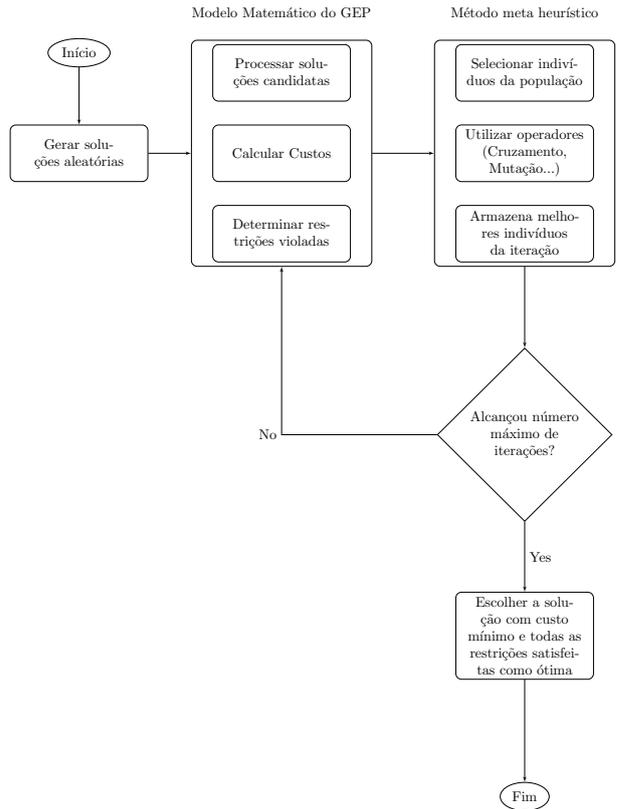


Figura 2: Fluxograma da aplicação dos métodos meta heurísticos no GEP, adaptado de [13].

Dentre alguns métodos, o NSGA-II foi adotado em alguns trabalhos relacionados com o problema GEP, como [1, 2]. Quando aplicado no problema mono-objetivo (usando restrições leves

Tabela 1: Exemplo do VMP, conforme [1].

| X_1 (qtde.) | X_2 (qtde.) | Y_1 (MW) | Y_2 (MW) | $Y_1 + Y_2$ (MW) | Y |
|------------------|------------------|---------------|---------------|---------------------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 100 | 100 | 1 |
| 1 | 0 | 100 | 0 | 100 | 2 |
| 0 | 2 | 0 | 200 | 200 | 3 |
| 1 | 1 | 100 | 100 | 200 | 4 |
| 2 | 0 | 200 | 0 | 200 | 5 |
| 2 | 1 | 200 | 100 | 300 | 6 |
| 1 | 2 | 100 | 200 | 300 | 7 |
| 2 | 2 | 200 | 200 | 400 | 8 |

como função objetivo), o NSGA-II pode fornecer uma alta taxa de sucesso em comparação com o GA mono-objetivo, de acordo com [2]. Outro método empregado consiste na Evolução Diferencial, aplicada ao GEP em [7, 8], principalmente para a abordagem de mono-objetivo. Estes métodos são frequentemente utilizados para fins de comparação como em [9].

3.2 Procedimento de Mapeamento Virtual

Com o objetivo de proporcionar melhorias no desempenho dos métodos de meta heurística, é possível empregar algumas outras técnicas que podem proporcionar um tratamento melhor dos dados. Algumas dessas técnicas são amplamente utilizadas no GEP e foram apresentadas em [9].

O Procedimento de Mapeamento Virtual (VMP) é uma tabela adotada para o problema da GEP, que transforma cada combinação das variáveis do problema (unidades candidatas para cada ano, neste caso) em um número codificado. Este método lida com a representação solução de classificação de cada solução considerando a ordem de capacidade total crescente, conforme representado na Tabela 1.

Estas variáveis codificadas são as variáveis de decisão neste problema. Utilizando VMP, a variável de decisão obtida é reduzida a um múltiplo de número de períodos, permitindo a redução no tamanho do matriz de variáveis de decisão e até mesmo melhorando o desempenho.

A Geração Inteligente da População Inicial (IIPG) considera o uso de critério margem de reserva para determinar fronteiras no espaço de solução, considerando as capacidades mínimas e máximas acumuladas disponíveis nas etapas anteriores. Para isso, um cálculo com base em todos os valores de demanda é realizado. Um exemplo de IIPG é mostrado na tabela 2. O mecanismo é útil para reduzir o espaço de solução de acordo com exigências do problema, aumentando a chance de encontrar soluções viáveis e ótimos globais e pode ser feito em conjunto com o VMP.

Tabela 2: Exemplo da IIPG, conforme [9].

| Período | I (MW) | II (MW) | III (MW) |
|--|-------------|--------------|---------------|
| Demanda (D) | 7000 | 9000 | 10000 |
| Demanda mínima $D \times (1 + R_{min})$ | 8400 | 10800 | 12000 |
| Demanda máxima $D \times (1 + R_{max})$ | 9800 | 12600 | 14000 |
| Capacidade mínima requerida | 2950 | 1000 | 0 |
| Capacidade máxima requerida | 4350 | 4200 | 3800 |

3.3 Testes propostos

Um estudo de caso baseado no *benchmark* do IEEE de 30 barras é proposto neste trabalho com a finalidade de prover um teste que considere os aspectos relevantes do problema, tais como os impactos ambientais e o uso de fontes renováveis, levando estes fatores em conta no processo de otimização do planejamento da geração.

Um dos principais algoritmos de otimização multiobjetivo é o NSGA-II, que tem sido amplamente aplicado para o problema GEP, especialmente em alguns trabalhos discutidos. Recentemente, foi proposto um outro algoritmo evolucionário multiobjetivo baseado em GA, o NSGA-III [14] é a mais nova abordagem baseada na família de métodos NSGA. Em relação ao seu antecessor, o NSGA-III aplica um mecanismo de seleção baseado em ponto de referência que substituiu o *Crowding Distance*, melhorando a diversidade e a distribuição de soluções Pareto-ótimas. O NSGA-III ainda não foi aplicado aos problemas de planejamento de expansão, em outras palavras, não se sabe até em que ponto o NSGA-III pode melhorar os resultados obtidos pelo NSGA-II nestes problemas.

4 Estudo de Caso

O sistema de teste proposto é baseado no *benchmark* IEEE de 30 barras e usa diferentes tipos de usinas com base no tipo de combustível utilizado Carvão, óleo, Gás e Nuclear, além das tecnologias renováveis como as hidrelétricas, eólicas e geotérmicas, dentre as usinas candidatas. O problema consiste em planejar a expansão em 3 diferentes cenários com 3 estágios (6 anos). A demanda de carga prevista e os dados técnicos são apresentados no apêndice A.

Para resolver o problema, quatro abordagens multiobjetivo serão utilizadas, sendo eles o NSGA-II e o NSGA-III, e as formulações multiobjetivo do *Particle Swarm Optimization* (PSO) e do *Differential Evolution* (DE), para fins comparativos, baseadas em [18] e adaptadas para o problema em questão.

4.1 Parâmetros do problema

O custo esperado de energia não atendida (EENS) é fixado em 0.05 \$/kWh. Variações na demanda ou geração por hora não são consideradas. Os limites inferior e superior da margem de reserva são fixados em 20% e 80% respectivamente. Além disso, a taxa de desconto é considerada como 10%, o critério LOLP é 0,01 e a demanda por eletricidade é considerada com 15% de aumento anual. O valor residual para as unidades candidatas está na faixa de 10 a 20%. O valor adotado como o custo médio de combustível é 10 \$/MWh e o índice de produção de energia renovável é 0,01 \$/kWh. Os limites de emissão de dióxido de enxofre (SO_2) e nitróxidos (NO_x), baseado na emissão anual em [15], são respectivamente de 5 e 2.6 Mtons.

O problema abordado seguirá a abordagem multiobjetivo, sendo o primeiro objetivo relativo aos custos do planejamento, que incluem também os benefícios associados ao uso de fontes renováveis e o segundo objetivo relativo à emissão de gás carbônico. As restrições leves serão avaliadas como um terceiro objetivo. A solução com menor emissão de CO_2 e que menos viola as restrições leves será a escolhida.

4.2 Parâmetros dos algoritmos

Nessas simulações, foi definido um conjunto de parâmetros que podem proporcionar um bom desempenho sem exigir maiores custos computacionais. Os parâmetros base são apresentados na Tabela 3, tais parâmetros são baseados em implementações bem sucedidas dos algoritmos em outros problemas.

Tabela 3: Parâmetros dos algoritmos evolucionários.

| ID | Descrição | Valor | Algoritmo |
|-------|----------------------------|-------|--------------|
| It | Número de Iterações | 100 | Todos |
| Cr | Taxa de Cruzamento | 0.8 | NSGA (2 e 3) |
| Mr | Taxa de Mutação | 0.35 | NSGA |
| Pop | Tamanho da População Base | 50 | NSGA e DE |
| Mem | Tamanho da Pop. de Memória | 30 | PSO e DE |

4.3 Resultados

As medidas de desempenho, a melhor curva Pareto obtida a partir dos algoritmos NSGA-II, NSGA-III, PSO e DE e as melhores soluções oferecidas são discutidas a seguir.

De forma a garantir resultados satisfatórios, cada algoritmo foi rodado 10 vezes, tendo as suas soluções salvas e uma rodada usando estas as mesmas soluções na população de memória inicial com menos iterações foi executada para fins de avaliação.

Para os algoritmos NSGA-II e NSGA-III, foram obtidos os mesmos resultados considerando a solução que emite menos poluentes, para estes algoritmos, o PSO e o DE, estão disponíveis os resultados na Figura 3, na Figura 4, e na Figura 5, respectivamente. Na Tabela 4, estes resultados são detalhados.

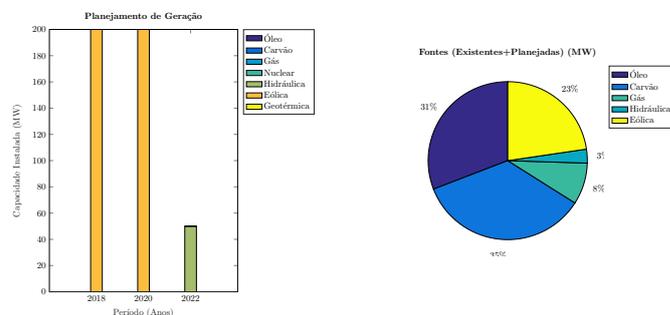


Figura 3: Resultados obtidos para o NSGA-II e NSGA-III.

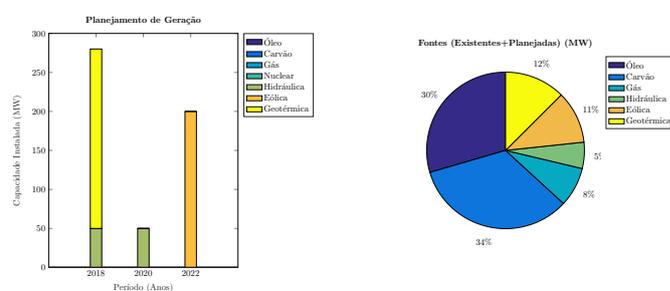


Figura 4: Resultados obtidos para o PSO.

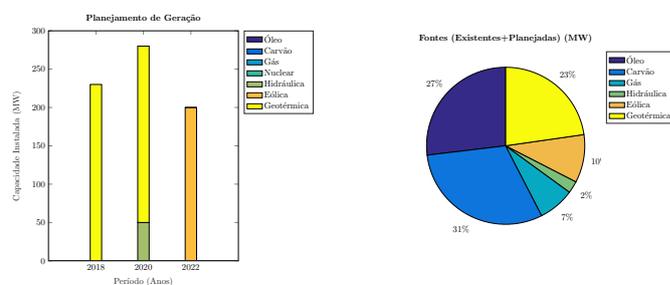


Figura 5: Resultados obtidos para o DE.

De acordo com os resultados, os métodos baseados nos algoritmos genéticos ofereceram as melhores soluções em termos de custos, além do fato destas soluções serem baseadas em fontes renováveis. As soluções obtidas não oferecem maiores impactos ambientais.

Os resultados oferecidos pelo NSGA-II e NSGA-III foram idênticos, mostrando que neste problema, o comportamento dos métodos é semelhante. A Figura 6 mostra a curva Pareto obtida pelos dois algoritmos.

Dos quatro algoritmos avaliados, apenas o DE não conseguiu aproximar o número de soluções da fronteira, ficando atrás dos demais.

Tabela 4: Resultados obtidos pelos métodos analisados.

| Método | MW/Ano | | | F_1 (M\$) | F_2 (Mton /MW) |
|----------|--------|-----|-----|----------------|---------------------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| NSGA-II | 200 | 200 | 50 | 254,83 | 2,949 |
| NSGA-III | 200 | 200 | 50 | 254,83 | 2,949 |
| PSO | 280 | 50 | 200 | 255,81 | 2,949 |
| DE | 230 | 280 | 200 | 268,44 | 2,949 |

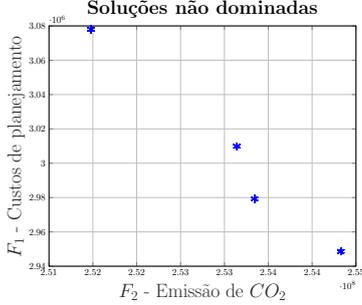


Figura 6: Curva Pareto obtida.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou o planejamento de expansão da geração trazendo um estudo de caso adaptado com a inclusão de fontes renováveis e buscando resolver o problema através das meta-heurísticas.

Os resultados apresentados no trabalho são promissores considerando as semelhanças entre os algoritmos genéticos multiobjetivo usados e o favorecimento das fontes renováveis na solução do problema.

Dentre outros estudos a serem realizados, podem ser listados: a avaliação do problema em um mercado desregulado e o tratamento de restrições baseadas no fluxo de potência ótimo, como em [2]. Além disso, propõe-se realizar testes em um estudo de caso baseado no Sistema Interligado Brasileiro. Finalmente, considerando os métodos, uma análise mais profunda entre os algoritmos genéticos utilizados e suas semelhanças pode ser realizada em estudos futuros, além de uma análise paramétrica que pode determinar em até que ponto os algoritmos utilizados podem prover desempenhos satisfatórios.

Agradecimentos

O presente trabalho contou com os apoios das agências CAPES, FAPEMIG e CNPq.

A Dados do IEEE 30 barras adaptado

A.1 Demanda

Os dados da demanda estão relacionados com a previsão feita em [16], exceto pela redução em 1000MW feita em termos de adequação do pro-

Tabela 5: Dados de carga prevista, adaptado de [16].

| Período (ano) | 2018 | 2020 | 2022 | 2024 |
|---------------|------|------|------|------|
| Demanda (MW) | 870 | 950 | 1130 | 1250 |

blema, conforme a Tabela 5, dado um período de 2 (dois) anos.

A.2 Usinas existentes

O benchmark IEEE 30 Barras contém 6 barras nas quais estão disponíveis as usinas já existentes, de acordo com [12], apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Dados das usinas existentes [12].

| ID | Barra | Tipo | Cap. (MW) | FOR | Custo Fixo | Custo Variável |
|----|-------|--------|-----------|------|------------|----------------|
| U1 | 1 | Carvão | 460 | 0.05 | 98305 | 7,07 |
| U2 | 2 | Óleo | 175 | 0.05 | 17980 | 18,84 |
| U3 | 5 | Óleo | 175 | 0.05 | 17980 | 18,84 |
| U4 | 8 | Gás | 150 | 0.06 | 19001 | 10,95 |
| U5 | 11 | Carvão | 160 | 0.04 | 39504 | 7,07 |
| U6 | 13 | Óleo | 195 | 0.05 | 20131 | 18,84 |

A.3 Usinas candidatas

Os 7 tipos de usinas a serem instaladas, baseadas em [17], apresentadas na Tabela 7. Neste estudo, o número de usinas eólicas a serem instaladas foi aumentado como forma de maximizar o investimento em fontes renováveis.

Tabela 7: Dados das usinas candidatas [17].

| ID | # | Tipo | Cap. (MW) | FOR |
|----|---|------------|-----------|-------|
| C1 | 3 | Óleo | 197 | 0.06 |
| C2 | 3 | Carvão | 155 | 0.065 |
| C3 | 3 | Gás | 76 | 0.02 |
| C4 | 2 | Nuclear | 400 | 0.1 |
| C5 | 6 | Eólica | 50 | 0.05 |
| C6 | 2 | Hidráulica | 200 | 0.055 |
| C7 | 2 | Geotérmica | 230 | 0.07 |

| ID | Custo Fixo | Custo Variável | Custo Capital |
|----|------------|----------------|---------------|
| C1 | 20130 | 18,84 | 80,57 |
| C2 | 85820 | 7,07 | 179,0 |
| C3 | 19001 | 10,9 | 40,74 |
| C4 | 234000 | 0,83 | 847,0 |
| C5 | 11600 | 0 | 69,74 |
| C6 | 111000 | 0 | 440,0 |
| C7 | 114000 | 0 | 455,0 |

A.4 Emissão de poluentes

No investimento de algumas fontes não renováveis, deve-se levar em conta os impactos ambientais proveniente da instalação destas usinas, avaliado pela emissão de gases, cuja informação é provida pela Tabela 8, com a minimização da emissão de gás carbônico sendo um dos objetivos do problema e os demais gases tratados nas restrições

Tabela 8: Dados sobre a emissão de poluentes em Kg/MW, adaptado de [12].

| Tipo | CO ₂ | SO ₂ | NO _x |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Óleo | 743,0 | 3,49 | 1,21 |
| Carvão | 834,6 | 6,26 | 1,67 |
| Gás | 403,2 | 0,32 | 0,254 |

leves. As demais fontes avaliadas não emitem poluentes.

Referências

- [1] S. Kannan, S. Baskar, J. D. McCalley, P. Murugan, *Application of NSGA-II Algorithm to Generation Expansion Planning*, in Power Systems, IEEE Transactions on, vol.24, no.1, pp.454–461, Feb. 2009
- [2] P. Murugan, S. Kannan, S. Baskar, *Application of NSGA-II Algorithm to Single-Objective Transmission Constrained Generation Expansion Planning*, in Power Systems, IEEE Transactions on, vol.24, no.4, pp.1790–1797, Nov. 2009
- [3] R. Hemmati, R. A. Hooshmand, A. Khodabakhshian, *Comprehensive review of generation and transmission expansion planning*, in Generation, Transmission & Distribution, IET, vol.7, no.9, pp.955–964, Sept. 2013
- [4] I. Sharan, R. Balasubramanian, *Integrated generation and transmission expansion planning including power and fuel transportation constraints*, Energy Policy, Volume 43, Pages 275-284, April 2012.
- [5] H. Sadeghi, M. Rashidinejad, A. Abdollahi, *A comprehensive sequential review study through the generation expansion planning*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 67, pp. 1369–1394, 2017.
- [6] J. Aghaei, M. A. Akbari, A. Roosta, M. Gitzadeh, T. Niknam, *Integrated renewable-conventional generation expansion planning using multiobjective framework*, in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, no. 8, pp. 773–784, August 2012.
- [7] S. Kannan, P. Murugan, *Solutions to transmission constrained generation expansion planning using differential evolution*, European Transactions on Electrical Power, Volume 19, Issue 8, Pages 1033–1039, 2009.
- [8] K. Karthikeyan, S. Kannan, S. Baskar, C. Thangaraj, *Application of self-adaptive Differential Evolution algorithm to generation expansion planning*, J. Electr. Syst., 9 (2) (2013), pp. 203–211
- [9] S. Kannan, S.M.R. Slochanal, N.P. Padhy, *Application and comparison of metaheuristic techniques to generation expansion planning problem*, in Power Systems, IEEE Transactions on, vol.20, no.1, pp.466–475, Feb. 2005
- [10] A.M. Al-Shaalan, *Reliability evaluation in generation expansion planning based on the expected energy not served*, Journal of King Saud University - Engineering Sciences, Volume 24, Issue 1, January 2012, Pages 11-18, ISSN 1018-3639
- [11] J. Aghaei, M.A. Akbari, A. Roosta, A. Baharvandi, *Multiobjective generation expansion planning considering power system adequacy*, Electric Power Systems Research, Volume 102, Pages 8-19, September 2013.
- [12] M. Mohammadian, S.K. Kazerunian, *Optimal generation expansion planning considering maximum loadability limit*, International Journal of Power and Energy Conversion, Volume 5, Issue 1, 24-46, 2014.
- [13] M. Ozcan, S. Ozturk, M. Yildirim, *Turkey's long-term generation expansion planning with the inclusion of renewable-energy sources*, Computers & Electrical Engineering, Volume 40, Issue 7, Pages 2050-2061, October 2014.
- [14] K. Deb, H. Jain, *An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based non-dominated sorting approach, Part I: solving problems with box constraints*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Volume 18, Issue 4, Pages 577–601, 2014.
- [15] Burtraw, Dallas and Szambelan, Sarah Jo Fueyo, U.S. Emissions Trading Markets for SO₂ and NO_x (October 16, 2009). Resources for the Future Discussion Paper No. 09-40. Disponível em SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1490037>
- [16] M. Samadi, M. H. Javidi, M. S. Ghazizadeh, *Modeling the effects of demand response on generation expansion planning in restructured power systems*, Journal of Zhejiang University-SCIENCE C (Computers & Electronics), Vol. 14, No. 12, pp. 966–976, 2013.
- [17] J. Aghaei, M. A. Akbari, A. Roosta, M. Gitzadeh and T. Niknam, *Integrated renewable-conventional generation expansion planning using multiobjective framework*, in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, no. 8, pp. 773–784, 2012.
- [18] S. M. K. Heris, Yarpiz - Academic Source Codes and Tutorials, acessado em 1 Jul. 2018, <http://www.yarpiz.org>