

ALGORITMO BIOINSPIRADO APLICADO NA OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA TERMELÉTRICO ABASTECIDO POR REDE DE GÁS NATURAL

Fernando J. Aguirre Ramos da SILVA, Adriane C. Fernandes REIS, Ariane C. Fernandes REIS, Lucas de O. REIS, Ana Beatriz das N. CONCEIÇÃO

RESUMO

Este artigo destina-se a apresentar o processo de otimização integrada dos Sistemas Elétrico e de Gás Natural (GN), considerando as condições operacionais de ambas as redes. Para atingir esse propósito, foi implementado a estratégia de computação Bioinspirada, denominada Algoritmo Genético (AG). Esse método foi escolhido pois trabalha com um conjunto de possíveis soluções simultaneamente, enquanto a maioria dos métodos convencionais de otimização e busca, trabalha de forma sequencial, avaliando a cada instante uma possível solução. O Algoritmo Genético dedica-se à codificação do conjunto de parâmetros, operando com uma população de soluções candidatas, simultaneamente, e ainda, utiliza funções de custo, ou de recompensa, aplicando regras de transição probabilística e não, determinísticas. Essas características do AG são essenciais para o modelo que considera o sistema de geração termelétrica a Gás Natural suprido por um sistema de gasodutos. O propósito fundamental é minimizar a função objetivo, formada pelas variáveis Geração de Energia Elétrica, Transporte do GN nos dutos, e Pressão do Gás Natural, nos nós produtores. As exigências do sistema, tais como satisfação da demanda de carga elétrica, limites da pressão do fluxo de Gás Natural na rede e de gasodutos são representadas na formulação. Os resultados obtidos revelam valores ótimos que garantem a segurança e a estabilidade dos sistemas elétrico e de Gás Natural.

Palavras-Chave: Gás Natural. Termelétrica. Sistema Elétrico de Potência. Computação Evolucionária. Algoritmo Genético.

ABSTRACT

This paper aims to present the integrated optimization process of Electrical and Natural Gas (NG) Systems, considering the operational conditions of both networks. To achieve this purpose, the Bioinspired computing strategy, called Genetic Algorithm (GA), was implemented. This method was chosen because it works with a set of possible solutions simultaneously, while most conventional optimization and search methods work sequentially, evaluating a possible solution at each moment. The Genetic Algorithm is dedicated to coding the set of parameters, operating with a population of candidate solutions,



simultaneously, and also using cost or reward functions, applying probabilistic and non-deterministic transition rules. These AG characteristics are essential for the model that considers the Natural Gas thermoelectric generation system supplied by a gas pipeline system. The fundamental purpose is to minimize the objective function, formed by the variables Electricity Generation, NG Transport in the pipelines, and Natural Gas Pressure, in the producing nodes. The system requirements, such as satisfaction of electrical load demand, pressure limits of Natural Gas flow in the network and gas pipelines are represented in the formulation. The results obtained reveal optimal values that guarantee the safety and stability of the electrical and Natural Gas systems.

Keywords: Natural gas. Thermoelectric. Electrical Power System. Evolutionary Computation. Genetic Algorithm.

1. INTRODUÇÃO

O Despacho Integrado entre a Rede de Gás Natural (GN) e a Rede Elétrica (RE) é um problema não-linear e não-convexo, cujo o processo de solução é extremamente complexo. Métodos convencionais de programação não-linear podem não ser capazes de fornecer uma solução ótima adequada, considerando que, geralmente, a solução fica enclausurada em uma superfície de resposta contendo um ótimo local (Costa, 2016).

Como alternativa, a esse problema, os métodos de Computação Bioinspirada têm sido utilizados para solucionar uma variedade de problemas devido a sua capacidade para alcançar o valor ótimo global. Todavia, os trabalhos que empregaram a computação evolucionária para resolver o problema do despacho não empregavam as redes de Gás e de eletricidade, simultaneamente.

Essa pesquisa suscita metodologia de otimização baseadas em Algoritmos Genéticos (AG) como proposta para determinar o melhor conjunto de valores, a fim de minimizar o custo da geração de energia termelétrica, a partir do Gás Natural.

A fundamentação teórica apresentada, neste trabalho, identifica a evolução das pesquisas que contemplam a interdependência operativa do sistema Gás-eletricidade, a partir de diferentes cenários operativos em ambos os sistemas energéticos. Dessa forma, considera-se, como premissa, a forte interdependência entre o sistema elétrico e o sistema de gasodutos, sendo este último, o responsável pelo transporte de GN, desde o poço de produção até o ponto de consumo.

Tradicionalmente, essa interdependência é desconsiderada nos estudos de planejamento ótimo da operação de termelétricas a GN. Contudo, essa simplificação pode



afetar a operação segura e econômica dos sistemas integrados, pois perdas de pressão, contingências em gasodutos, falta de armazenamento ou interrupções de fornecimento do GN podem ocasionar corte de unidades geradoras.

Na ocorrência de desligamentos de gasodutos ou de linhas de transmissão, procedimentos inconsistentes de corte de fornecimento do GN aos geradores térmicos podem restringir a operação do sistema elétrico ou mesmo levar a desligamentos adicionais. O ajuste de potência ativa em um número arbitrário de geradores pode afetar os fluxos na rede de Gás, o que mostra a interdependência entre ambas as redes. Logo, esta forte correlação operativa entre estes dois sistemas requer uma operação coordenada para se obter redução dos custos operacionais e de congestionamentos, sem por em risco à segurança dos sistemas.

Dentro deste contexto, esse artigo propõe um método baseado em Algoritmo Genético (AG) para o despacho ótimo integrado das Redes de Gás Natural (GN) e Elétrica, sob restrições de segurança, visando minimizar os custos associados com a geração termelétrica, produção e transporte do GN. A equação algébrica não-linear que representa a integração dos sistemas foram estruturadas mediante o Método de Regressão Múltipla Não-Linear e otimizada aplicando-se o AG, no sentido de avaliar o despacho ótimo da matriz energética global sob uma condição operacional pré-especificada.

A potência ativa da barra de geração *swing* não é inicializada pelo AG, tendo em vista que esta barra é responsável por atender o balanço carga-geração do sistema elétrico. A estratégia adotada para a solução do fluxo de Gás é semelhante a do fluxo de carga. Os valores iniciais de pressões em nós de demanda de Gás para fins elétricos e não elétricos e dos nós adjacentes, ou seja aqueles que não possuem demanda ou produção, são medidos em Bária.

A aplicabilidade do método proposto foi testada na rede de Gás de 15 nós, integrada à Rede IEEE de 118 barras. Os resultados demonstram que o método proposto fornece soluções eficientes e seguras do despacho de unidades geradoras térmicas para diferentes cenários operativos em ambos os sistemas energéticos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem inúmeros trabalhos publicados sobre o Gás Natural e a geração de energia. Com o objetivo de acelerar o processo computacional, principalmente nos casos em que os



limites de transferência de potência precisam ser constantemente atualizados, diversos trabalhos têm focado na otimização da transmissão utilizando, apenas, como critério o desempenho do sistema em regime permanente.

Costa et al (2021a) propõem uma estratégia fundamentada em Algoritmo Genético ao despacho ótimo com restrição de segurança de redes integradas de energia elétrica e Gás Natural, considerando cenários operacionais em ambos os sistemas de energia, demonstrando a importância do ensino interdisciplinar nos conteúdos acadêmicos de Matemática, Física e Computação na modelagem de problemas das Engenharias.

Costa et al (2021b) exibem um modelo que combina o Algoritmo Genético e o Enxame de Partículas, com auxílio de métodos da computação paralela, a fim de otimizar a distribuição elétrica em uma rede energética baseada em um Sistema IEEE de 14 barras. Os resultados apresentados destacaram o sucesso da metodologia implementada que alcançou excelentes soluções globais em sua otimização.

No trabalho de Costa et al (2022), os autores recomendam, como transição a curto prazo, a substituição do óleo diesel pelo Gás Natural na geração termelétrica. Como estratégia para que essa substituição ocorra de forma segura, a otimização foi executada por metodologia Bioinspirada.

Costa et al (2023) destacam, de forma lógica, uma modelagem Matemática-Computacional, para ser aplicada em termelétricas, indicando o Gás Natural como uma das fontes capaz de promover uma transição segura de geração de energia elétrica, principalmente, em substituição ao carvão mineral, ao óleo diesel e à madeira.

Evidenciando que é indispensável incluir, no planejamento de um sistema de potência, a infraestrutura com o Gás Natural, Costa et al (2024) publicam um artigo extremamente relevante e atualizado. Os autores destacam a necessidade de operação coordenada entre os sistemas de energia elétrica e de Gás Natural, pois a integração dessas estruturas aumenta a complexidade e incerteza da tarefa de despachar a geração de energia elétrica e a produção do Gás, uma vez que as redes de Gás Natural não são diretamente supervisionadas e controladas por centros de operação de sistemas de energia.

Nesse artigo direciona-se, à formulação matemática do problema de otimização, uma função multiobjetivo que visa minimizar, tanto os custos da geração térmica, a Gás Natural,



indicando os melhores valores à Pressão e ao Transporte do Gás Natural. Esses fatores foram, sumariamente, evidenciados nos trabalhos supracitados.

3. METODOLOGIA

3.1 Modelagem Matemática

A Figura 1 mostra a configuração que foi aplicada nesta pesquisa. O sistema consiste de N usinas térmicas conectadas numa barra com uma carga d . Para cada usina, existe um fator c_i , representando a taxa de custo de geração (\$/unidade de energia elétrica, por exemplo, MWh) de cada unidade geradora. A restrição básica desse sistema é satisfazer o balanço de potência, ou seja, a soma das potências geradas nas usinas deve ser igual à carga.

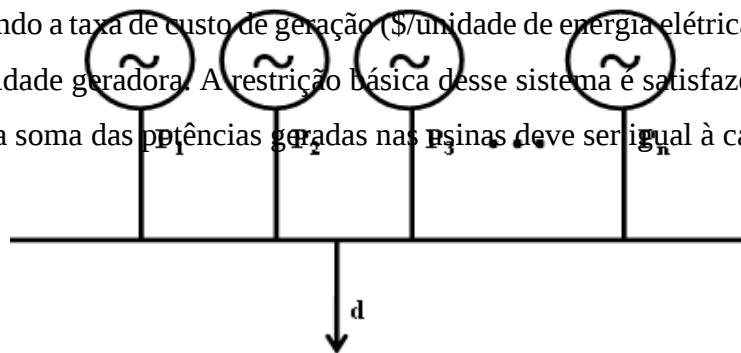


Figura 1. Modelo do despacho de usinas térmicas em uma barra.

Fonte: Autores.

Matematicamente o problema consiste em minimizar uma função objetivo, ϕ , representada na Eq. (1), que é igual à soma dos custos de geração das usinas, satisfazendo a restrição de balanço de potência entre potência gerada e demandada. Nessa simplificação, pode-se notar que nenhuma perda de transmissão ou limite operativo foi considerada. Além disso, desconsideram-se também, neste caso, os tipos de usina termelétrica, sendo cada uma delas apenas uma injeção de potência no sistema.

$$\begin{aligned} \min F_T &= F_1(P_1) + F_2(P_2) + F_3(P_3) + \dots + F_N(P_N) = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \\ \text{sujeito a} \quad \phi &= d - \sum_{i=1}^N P_i = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Deve-se, obviamente, adicionar a equação do balanço de potência e as restrições operativas de cada usina, as quais acrescentarão inequações ao sistema, conforme indica a Eq. (2).



$$P_{i \text{ mín}} \leq P_i \leq P_{i \text{ máx}} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N P_i = d$$

No caso acima descrito não foram consideradas as perdas elétricas na rede de transmissão.

O problema de operação econômica em sistemas termelétricos, modelando a rede de transmissão, é ilustrado na Figura 2. Neste problema, **n** geradores devem atender uma carga composta por **k** componentes, interligados por um sistema de transmissão.

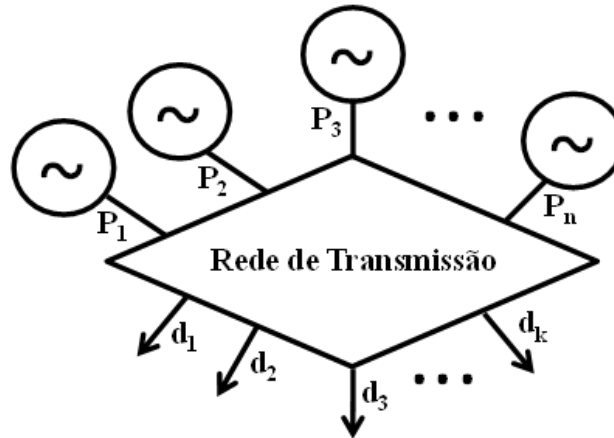


Figura 2. Modelo com representação da Rede de Transmissão.
Fonte: Autores.

Acrescenta-se, neste caso, uma variável ao sistema de equações mostrado na Eq. (3), que são as perdas no sistema de transmissão (P_{perdas}), as quais o balanço de potência terá que satisfazer. Assim, o sistema fica como mostrado em (3.3).

$$\sum_{j=1}^K d_j + P_{\text{perda}} - \sum_{i=1}^N P_i = \phi = 0 \quad (3)$$

3.2 Modelagem Computacional

Como estratégia de otimização esse trabalho aplica o modelo de computação bioinspirada, denominado, Algoritmo Genético (AG). O AG é um algoritmo de otimização, e busca, baseado nos mecanismos de seleção natural e genética. O método consiste



inicialmente de uma população formada por uma série de bits (*string* – representando os cromossomos), que é transformada por três operadores genéticos: seleção, reprodução e mutação (GOLDBERG, 1989).

O Algoritmo Genético foi escolhido, pois, na relação *Aplicabilidade x Eficiência* dos métodos disponíveis atualmente, ele se enquadra na categoria 3, conforme indica a Figura 3.

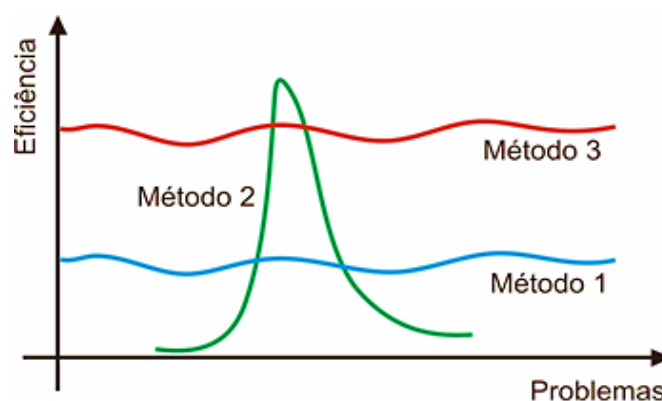


Figura 3. Aplicabilidade em Problemas x Eficiência de Resolução dos Métodos
Fonte: Autores.

Dentro deste contexto, o Algoritmo Genético se aproxima da terceira classe de métodos, não sendo mais eficiente que aqueles projetados especificamente para determinado problema, contudo, perturbações no problema original trariam poucos, ou quase nenhum, prejuízo ao AG, mas, possivelmente, a inutilidade de outros métodos. O AG permite encontrar um perfil de geração seguro sem necessariamente limitar o intercâmbio entre os fluxos de gás e de carga, no sistema termelétrico. A Figura 4 indica os principais elementos envolvidos no AG.

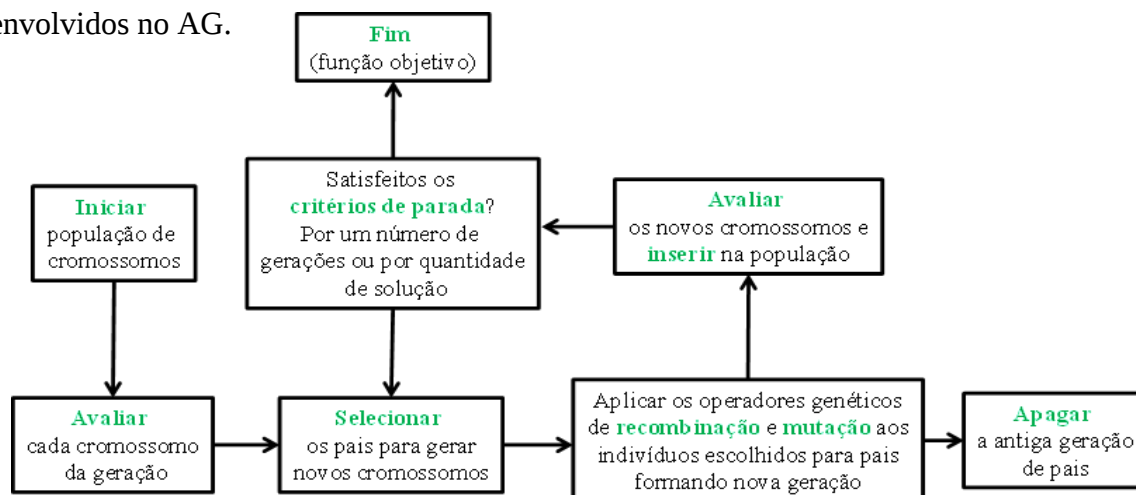


Figura 4. Funcionamento do Algoritmo Genético

Fonte: Autores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos, nessa pesquisa, foram gerados a partir das informações apresentadas por Costa et al (2016). No artigo os autores indicam os limites operacionais para as Redes Elétrica e de Gás Natural, como mostra a Tabela 1:

Tabela 1. Limites operacionais.

Variável de Controle	Valor máximo	Valor Mínimo
Geração Termelétrica (MW)	564,86	15,27
Pressão nos nós produtores de GN (bar)	62,032678	36,0042075
Transporte de GN no gasoduto (Mm ³ /h)	23,1469665	1,4811768

Fonte: Costa et al (2016).

Aplicando o Método de Regressão Múltipla Não-Linear (MRMNL), nos dados das Redes Elétrica e de Gás Natural, promovidas em Costa et al (2016), foi possível desenvolver um modelo matemático, denominado função objetivo, conforme indica a Eq. (4).

$$c_0 = 2,1442 \cdot 10^3; c_1 = -106,1262; c_2 = 101,2620; c_3 = 1,2344; c_4 = 3,5850; \\ c_5 = -13,8615; c_6 = -0,0720; c_7 = 0,1414; c_8 = 0,1162$$

$$g(p, t) = c_0 + c_1p + c_2t + c_3p^2 + c_4pt + c_5t^2 + c_6p^2t + c_7pt^2 + c_8t^3 \quad (4)$$

Sendo,

$c_i \rightarrow$ os coeficientes da função *fitness*; $p \rightarrow$ pressão nos nós produtores de GN; $t \rightarrow$ transporte de GN nos dutos; $g \rightarrow$ geração de energia termelétrica.

A Figura 5 representa o comportamento da função de geração de energia termelétrica, em função da pressão e do transporte de Gás Natural.

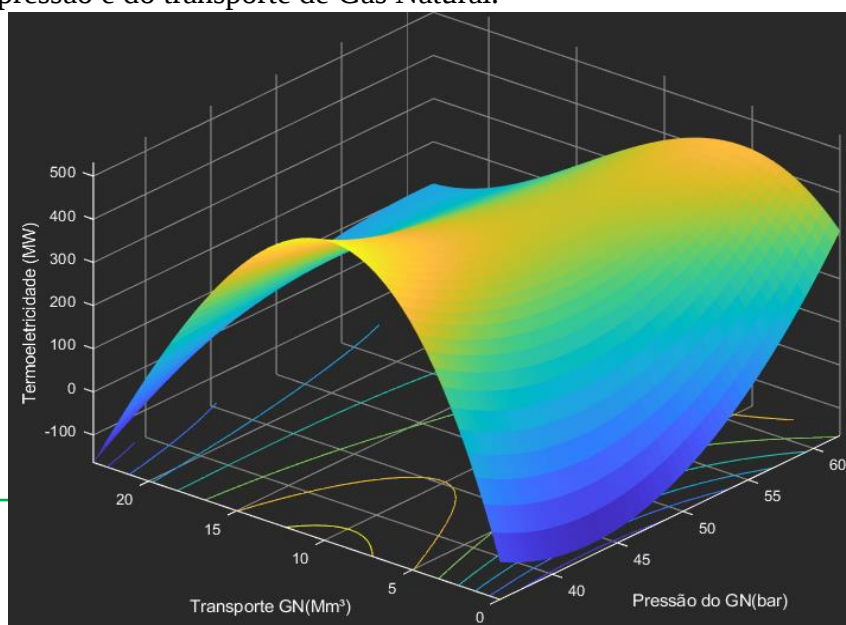


Figura 5: Comportamento da função objetivo $g(p, t)$.

Fonte: Autores.

A estratégia de otimização realizada via Algoritmo Genético, considerando as restrições e condições do sistema, está representada nas Figuras 6, 7 e 8:

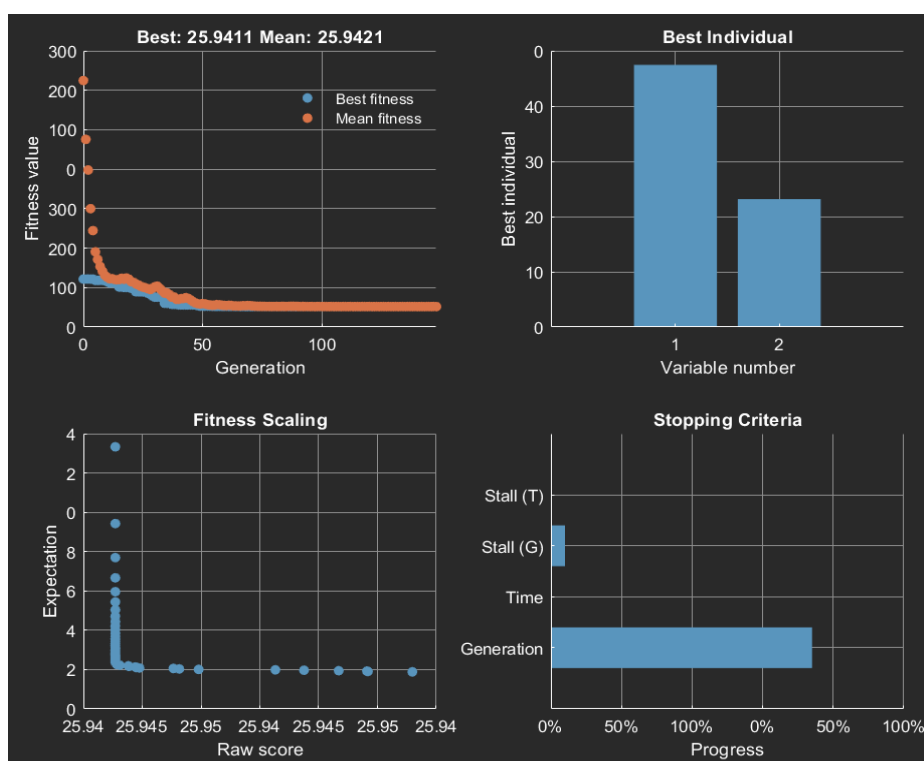


Figura 6: Resposta do AG – Parte I.

Fonte: Autores.

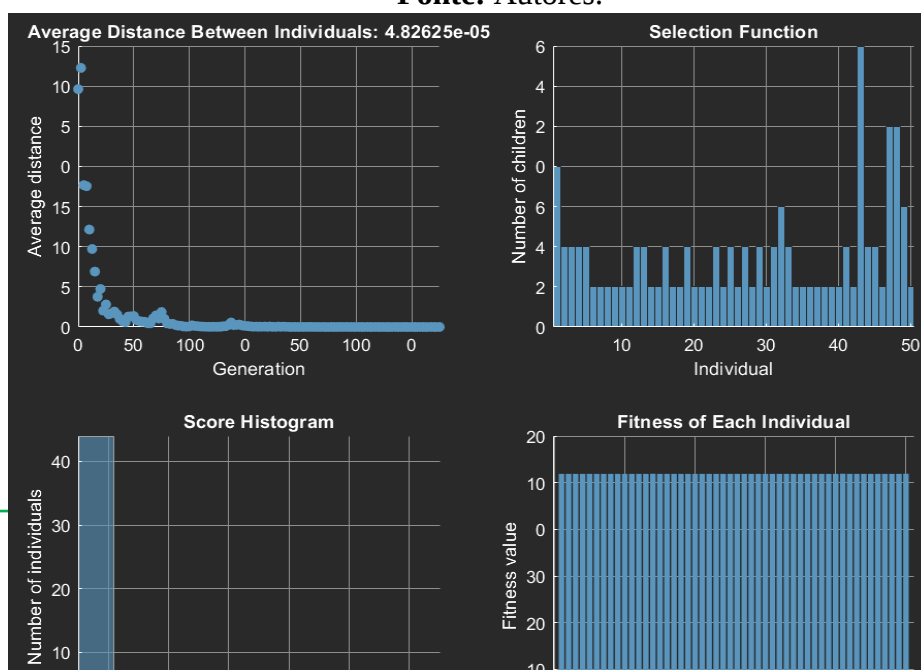


Figura 7: Resposta do AG – Parte II.

Fonte: Autores.

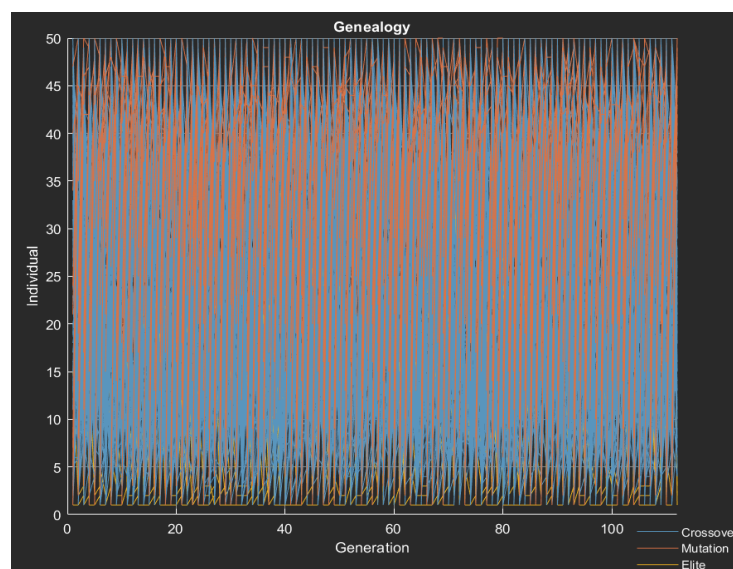


Figura 8: Resposta do AG – Parte III.

Fonte: Autores.

Os gráficos destacados na Figura 6, exibem: *Best* e *Mean* → o comportamento da função *fitness* durante o processo de otimização; *Best Individual* → os valores ótimos da função objetivo; *Fitness Scaling* → a dimensão da função *fitness*; *Stopping Criteria* → os critérios aplicados à estratégia de parada da simulação computacional.

Os gráficos destacados na Figura 7, exibem: *Average Distance Between Individuals* → a distância média entre cromossomos em cada geração; *Selection Function* → a seleção dos pais na produção de novos indivíduos; *Score Histogram* → as pontuações da população em cada geração; *Fitness of each Individual* → as pontuações individuais em cada geração.

O gráfico da Figura 8, exibe: *Genealogy* → a genealogia dos indivíduos, ou seja, as informações transmitidas de uma geração para a próxima, codificadas por cores para distinguir filhos de mutação, filhos de cruzamento e indivíduos de elite.

Após a execução do Algoritmo Genético, os valores ótimos obtidos estão apresentados, numericamente, na Tabela 2 e, graficamente, na Figura 9.

Tabela 2. Limites operacionais otimizados.

Variável de Controle	Valor ótimo
Geração Termelétrica (MW)	25,9411
Pressão nos nós produtores de GN (bar)	47,4556
Transporte de GN no gasoduto (Mm ³ /h)	22,3582

Fonte: Autores.

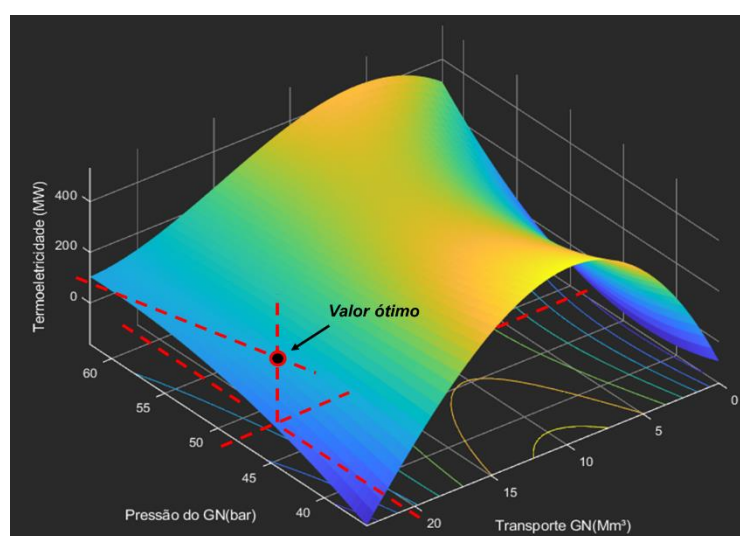


Figura 9: Limites operacionais otimizados.

Fonte: Autores.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs uma sistematização computacional à otimização de sistemas termelétricos a Gás Natural. Neste modelo, fundamentado em Computação Evolucionária, foi considerado que as usinas termelétricas a GN consomem esse combustível diretamente dos pontos de entrega. Por esse motivo, foram adotadas restrições do sistema de produção do gás, seu transporte até a geração de energia, relacionando-as com as restrições do sistema elétrico.

As restrições operacionais da rede de gás, devidos às manutenções ou demandas excessivas, podem impor limites na geração termelétrica. Neste contexto, os modelos que integram a operação dos dois sistemas são importantes para o planejamento e a operação do sistema elétrico e de produção e transporte de gás. Nesse artigo, as condições operacionais

foram aplicadas da implementação da função objetivo. Dessa forma, os valores ótimos obtidos estão considerando essas restrições de ambos os sistemas: elétrico e de Gás Natural.

Os resultados obtidos garantem, para os cenários aplicados, um geração termelétrica otimizada, segura e estável, sempre estimando uma distribuição de energia justa e moderna.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA *Campus* Ananindeua. À excelente equipe de Docentes e Discentes do Bacharelado em Ciência e Tecnologia desse *Campus*: extremamente competentes e sempre dedicados. Às Pesquisadoras e aos Pesquisadores do grupo Gradiente de Modelagem Matemática e Simulação Computacional – GM²SC, pela motivação e dedicação científica. Muito obrigado pelo seu tempo disponibilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COSTA, Denis C. L.; Nunes, Marcus V.A.; Vieira, João P.A. & Bezerra, Ubiratan H. **Decision Tree-Based Security Dispatch Application in Integrated Electric Power and Natural-Gas Networks**. *Electric Power Systems Research* 141, 442–449. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.08.027>. 2016.

COSTA, Denis C. L. **Despacho Ótimo de Redes Integradas de Energia Elétrica e de Gás Natural com restrições de segurança via Árvores de Decisão**. Universidade Federal do Pará - UFPA, Instituto de Tecnologia – ITEC - PPGEE, Belém, 2016.

COSTA, Heictor A. de O.; COSTA, Denis C. L.; MENESES, Lair A. de. **Interdisciplinarity Applied to the Optimized Dispatch of Integrated Electricity and Natural Gas Networks using the Genetic Algorithm**. *Research, Society and Development, [S. l.]*, v. 10, n. 2, p. e42110212641, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i2.12641. 2021a.

COSTA, Heictor A. de O.; GOMES, Larrisa L.; COSTA, Denis C. L. **Genetic algorithm and particle swarm applied in electric system optimization**. *Research, Society and Development, [S. l.]*, v. 10, n. 10. DOI: 10.33448/rsd-v10i10.18871. 2021b.

COSTA, Denis C. L. ; MENESES, Lair A. de; LIMA, Mara L. V. de; COSTA, Heictor A. de O.; REIS, A. C. F.; PINHEIRO, H. F. B.; COSTA, E. F. da.; SILVA, A. R. dos S. da; REIS, A. C. F.; RAIOL, F. M.; SANTOS, R. C. P. dos. **Thermoelectric generation with reduced pollutants made possible by bio-inspired computing**. *Research, Society and Development, [S. l.]*, v. 11, n. 1, p. e7611124568. DOI: 10.33448/rsd-v11i1.24568. 2022.

COSTA, Denis C. L.; SOARES, Jaiza de S.; BATISTA, Patricia R. do N.; SERRA, Jhonathan A. F. M.; REIS, Adriane C. F.; SILVA, Fernando J. A. R. da. **O Gás Natural como Transição para Geração de Energia Limpa**. In: Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais. Diamantina(MG) Online. Disponível em:



<https://www.even3.com.br/anais/cobicet2023/637773-O-GAS-NATURAL-COMO-TRANSICAO-PARA-GERACAO-DE-ENERGIA-LIMPA.2023>.

COSTA , Denis C. L.; PEREIRA JÚNIOR, Rodrigo A.; SOARES , Jaiza de S.; FREITAS, Tatiane P. de; PINHEIRO , Klewton A. O.; REIS, Adriane C. F.; REIS , Ariane C. F.; SILVA, F. J. A. R. da; SILVA , Ana B. das N. da; ARAUJO, Márcio J. O. de; DIAS, Flávio O.; CARVALHO , Diego. A.; PINHEIRO, Huan F. B.; SANTANA, David D. L. de; COSTA, Erick F. da. **A utilização do Gás Natural como transição estável da matriz energética.** Caderno Pedagógico, [S. l.]. DOI: 10.54033/cadpedv21n3-195. 2024.

GOLDEBERG, D. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning.** Addison-Wesley Professional 1989.

