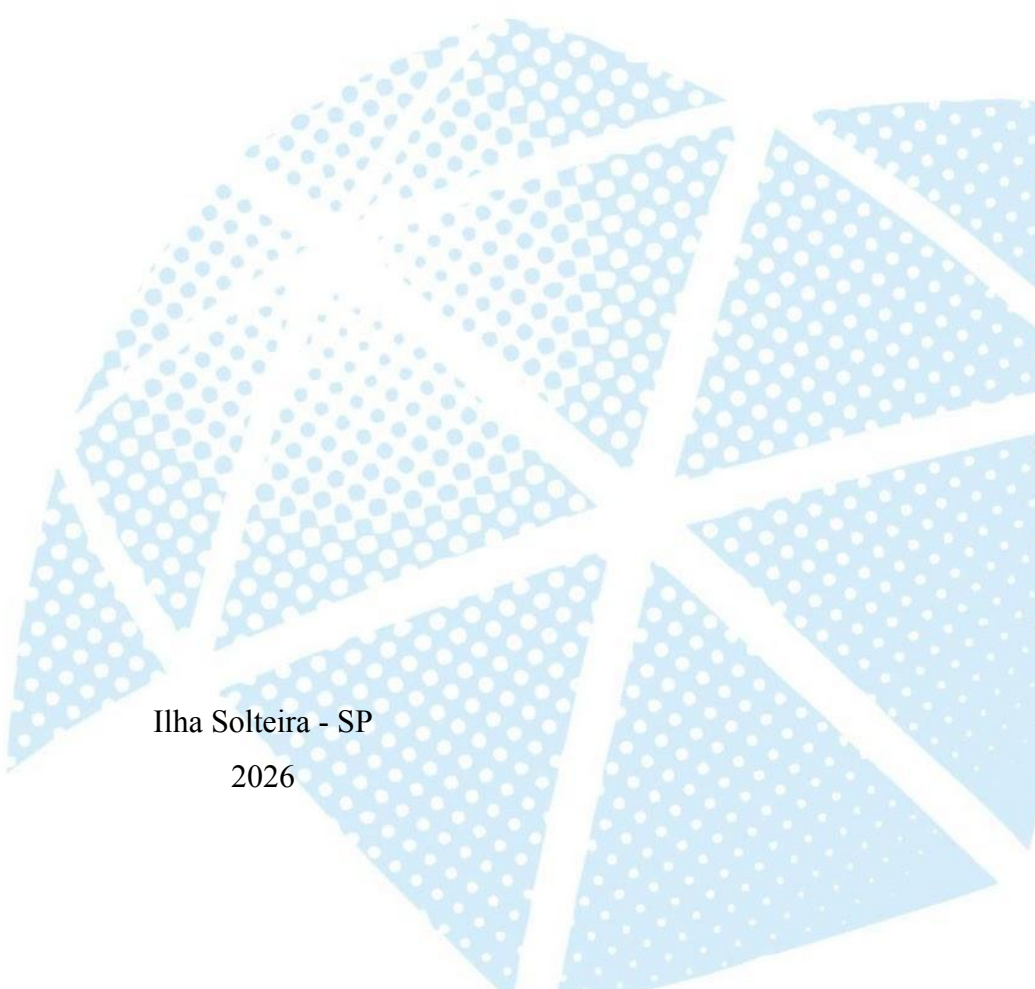


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Rhomulo Thiago Rodrigues Gouveia

Despacho de Reativos em Sistemas Elétricos de Potência

Ilha Solteira - SP
2026



Rhomulo Thiago Rodrigues Gouveia

Despacho de Reativos em Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

José Roberto Sanches Mantovani
Orientador

Ilha Solteira
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G719d Gouveia, Rhomulo Thiago.
Despacho de reativos em sistemas elétricos de potência / Rhomulo Thiago
Gouveia. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
69 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira
2026

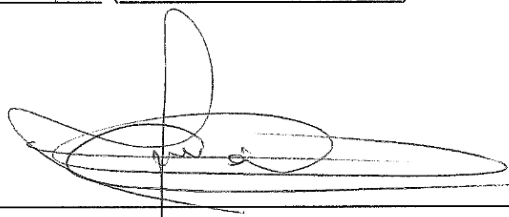
Orientador: José Roberto Sanches Mantovani

Inclui bibliografia

1. Fluxo de potência ótimo. 2. Despacho de reativos. 3. Meta-heurísticas. 4.
Algoritmo genético.

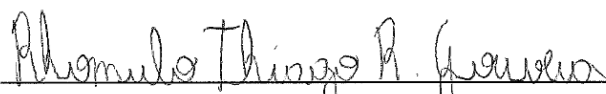
ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos trinta dias do mês de abril do ano de dois mil e vinte e seis, o discente **Rhomulo Thiago Rodrigues Gouveia**, matriculado sob o nº 182054624, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani, o Dr. Lucas do Carmo Yamaguti e o Eng. Luis Eduardo Mezas Madeira, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Despacho de Reativos em Sistemas Elétricos de Potência**", obtendo a nota 10,0 (Dez) e conceito Aprovado.



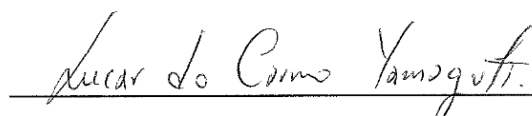
Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani

- orientador -



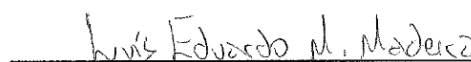
Rhomulo Thiago Rodrigues Gouveia

- discente -



Dr. Lucas do Carmo Yamaguti

- Membro da Banca -



Eng. Luis Eduardo Mezas Madeira

- Membro da Banca -

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. José Roberto Sanches Mantovani, pela orientação, paciência, confiança e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe, Cidirley Aparecida Rodrigues, e à minha irmã, Karime Vitória Rodrigues Gouveia, por todo o amor, suporte e incentivo durante os anos de graduação.

À Marianna Lisbôa Mendes, pelo amor, companheirismo e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus amigos Luciano Rodrigues Maia e Thalles Nathan Bezerra de França, pela amizade e parceria constante desde o início desta jornada.

Aos colegas do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LaPSEE), pelo grande apoio técnico e pessoal durante o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Nos sistemas elétricos de potência deve ocorrer o controle tanto do consumo como da geração de reativos devido às características indutivas de seus componentes como linhas de transmissão, geradores e fator de potência das cargas. Com o objetivo de otimizar o despacho de reativos e manter a regulação de tensão e minimizar as perdas na rede de transmissão, tem-se o problema de despacho ótimo de reativo. Neste trabalho, propõe-se um algoritmo genético (AG) de otimização meta-heurística com o objetivo de reduzir as perdas reativas dos sistemas através do despacho otimizado das fontes de potência reativa lentas e rápidas instaladas na rede para segurança de operação do sistema de transmissão, considerando-se que o despacho de potência ativa tenha sido realizado pelo operador central do sistema. Para validação do algoritmo, foram testados sistemas de pequeno (IEEE 30 barras) e médio porte (IEEE 118 barras) para condições de operação normais e contingências críticas. Os resultados obtidos mostram a viabilidade da metodologia proposta e as melhorias obtidas na regulação das magnitudes da tensão das barras e viabilidade física e operacional das restrições.

Palavras-chaves: Fluxo de potência ótimo; despacho de reativos, Meta-heurísticas; Algoritmo genético.

Abstract

In electrical power systems, control of both reactive power consumption and generation is necessary due to the inductive characteristics of their components, such as transmission lines, generators, and the power factor of loads. To optimize reactive power dispatch, maintain voltage regulation, and minimize losses in the transmission network, the optimal reactive power dispatch problem arises. This work proposes a metaheuristic optimization genetic algorithm (GA) to reduce reactive power losses in systems through optimized dispatch of slow and fast reactive power sources installed in the network for transmission network operational security, considering that active power dispatch has been performed by the central system operator. To validate the algorithm, small (IEEE 30 buses) and medium-sized (IEEE 118 buses) systems were tested under normal operating conditions and critical contingency conditions. The results obtained show the viability of the proposed methodology and the improvements achieved in regulating the voltage magnitudes of the system buses and feasibility physical and operational constraints.

Keywords: Optimal power flow; reactive power dispatch; metaheuristics; genetic algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do cromossomo da população.....	24
Figura 2 - Esquema simplificado dos algoritmos de crossover aplicados.....	29
Figura 3 - Diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido.....	32
Figura 4 – Diagrama unifilar do sistema IEEE 30.....	35
Figura 5 - Diagrama unifilar do sistema IEEE 118.....	36
Figura 6 - Infactibilidades dos limites das magnitudes de tensão para o caso base - IEEE 30.....	37
Figura 7 - Perdas ativas por ramo para o sistema IEEE 30.....	38
Figura 8 - Perdas reativas por ramo para o sistema IEEE 30.....	38
Figura 9 - Tensão nos barramentos para o caso base - IEEE 30 otimizado.....	39
Figura 10 – Potência reativa fornecida pelos geradores do caso IEEE 30 otimizado.....	39
Figura 11 - Convergência do AG vs. Gerações para o caso base - IEEE 30.....	40
Figura 12 - Infactibilidade dos limites das magnitudes de tensão para o caso base - IEEE 30.....	41
Figura 13 - Tensão nos barramentos para a contingência - IEEE 30 otimizado.....	41
Figura 14 – Potência reativa fornecida pelos geradores - IEEE 30 otimizado.....	42
Figura 15 - Convergência do AG vs. Gerações para a contingência - IEEE 30.....	42
Figura 16 - Perdas ativas por ramo no sistema IEEE 118.....	43
Figura 17 - Perdas reativas por ramo no sistema IEEE 118.....	44
Figura 18 – Magnitude de tensão nos barramentos para o caso base - IEEE 118 otimizado.....	44
Figura 19 - Convergência do AG vs. Gerações para o caso base - IEEE 118.....	47
Figura 20 - Tensão nos barramentos para a contingência 1 - IEEE 118 otimizado.....	48
Figura 21 - Convergência do AG vs. Gerações para a contingência 1 - IEEE 118.....	51
Figura 22 – Magnitude de tensão nos barramentos para a contingência 2- IEEE 118.....	52
Figura 23 - Convergência do AG vs. gerações para a contingência 2 - IEEE 118.....	55
Figura 24 – Magnitudes de tensão nos barramentos para a contingência 3 - IEEE 118.....	56
Figura 25 - Convergência do AG vs. gerações para a contingência 3 - IEEE 118.....	59
Figura 26 - Tensão nos barramentos para a contingência 4 - IEEE 118 otimizado.....	60
Figura 27 - Convergência do AG vs. gerações para a contingência 4 - IEEE 118.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Contingências analisadas.....	34
Tabela 2 - Número de variáveis.....	34
Tabela 3 - Variáveis de controle do AG após o DOR para o caso base - IEEE 30.....	40
Tabela 4 - Variáveis de controle do AG após o DOR para a contingência - IEEE 30.....	43
Tabela 5 - Potência reativa otimizada após o DOR para o caso base - IEEE 118.....	45
Tabela 6 - Valores de TAP da melhor solução para o caso base - IEEE 118.....	47
Tabela 7 - Valores de Shunt da melhor solução para o caso base - IEEE 118.....	47
Tabela 8 - Potência reativa otimizada após o DOR para a contingência 1 - IEEE 118.....	48
Tabela 9 - Valores de TAP da melhor solução para o caso base - IEEE 118.....	51
Tabela 10 - Valores de Shunt da melhor solução para o caso base - IEEE 118.....	51
Tabela 11 - Potência reativa otimizada após o DOR para a contingência 2 - IEEE 118.....	52
Tabela 12 - Valores de TAP da melhor solução para a contingência 2 - IEEE 118.....	55
Tabela 13 - Valores de Shunt da melhor solução para a contingência 2 - IEEE 118.....	55
Tabela 14 - Potência reativa otimizada após o DOR para a contingência 3 - IEEE 118.....	56
Tabela 15 - Valores de TAP da melhor solução para a contingência 3 - IEEE 118.....	59
Tabela 16 - Valores de Shunt da melhor solução para a contingência 3 - IEEE 118.....	59
Tabela 17 - Potência reativa otimizada após o DOR para a contingência 4 - IEEE 118.....	60
Tabela 18- Valores de TAP da melhor solução para a contingência 4 - IEEE 118.....	63
Tabela 19 - Valores de Shunt da melhor solução para a contingência 4 - IEEE 118.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS

Sigla	Significado
AG	Algoritmo Genético
CA	Corrente Alternada
COS	Centros de Operação do Sistema
DE	Despacho Econômico
DOR	Despacho Ótimo de Reativos
ED	Evolução Diferencial
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PV	Barra de tensão controlada
SBX	<i>Simulated Binary Crossover</i>
VAr	Volt-Ampère Reativo

LISTA DE SÍMBOLOS

Conjuntos e índices:

i	Índices de identificação das barras do sistema
k	Índice de somatório
N_{barras}	Número total de barras no sistema
N_{PQ}	Número total de barras de carga do sistema
N_{gen}	Número total de geradores no sistema
N_{Bshunt}	Número total de barras com compensadores shunt no sistema
N_{TAP}	Número total de transformadores com tap controlado no sistema
λ_V	Fator de penalidade aplicado caso a magnitude da tensão viole os limites
λ_{Q_g}	Fator de penalidade aplicado caso a magnitude da potência reativa dos geradores viole os limites

Variáveis de contínuas:

B_{ik}	Susceptância nodal entre as barras i e k
G_{ik}	Condutância nodal entre as barras i e k
f_V	Função de minimização do desvio de tensão das barras de carga

f_{Min}	Função objetivo a ser minimizada
P_i	Potência ativa calculada/injetada na barra i
P_i^{sp}	Potência ativa especificada na barra i
PC_i	Potência ativa consumida na barra i
Q_i	Potência reativa calculada/injetada na barra i
Q_i^{sp}	Potência reativa especificada na barra i
QC_i	Potência reativa consumida na barra i
S_i	Potência aparente injetada na barra i
V_{Ref}	Tensão de referência do sistema
V_i	Tensão na barra do índice de referência i
Vn_i	Tensão nominal do índice de referência i
$Y_{i,k}$	Elementos da matriz de admitância nodal
$\theta_{i,k}$	Diferença angular entre as tensões das barras i e k

Parâmetros do AG:

N_{pop}	Número de indivíduos da população total
N_{gen}	Número de gerações

p_c	Porcentagem de cruzamento da população
$k_{torneio}$	Potência ativa calculada/injetada na barra i
η_c	Índice de distribuição do cruzamento
η_e	Índice de elitismo da população
η_m	Índice de distribuição para mutação polinomial
Bsh_i^{min}	Limite de faixa de operação do componente de compensação i
Bsh_{si}^{max}	Limite de faixa de operação do componente de compensação i
Q_{Gi}^{min}	Potência reativa mínima do gerador i
Q_{Gi}^{max}	Potência reativa máxima do gerador i
TAP_i^{min}	Limite do TAP de operação mínimo do transformador i
TAP_i^{max}	Limite do TAP de operação máximo do transformador i
V_i^{min}	Limite mínimo de tensão no barramento i
V_i^{max}	Limite máximo de tensão no barramento i

SUMÁRIO

1. O PROBLEMA DE DESPACHO ÓTIMO DE REATIVOS.....	13
1.1. Aspecto geral do problema.....	13
1.2. Metodologias da literatura.....	14
2. OBJETIVOS.....	19
3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	20
3.1. Equações de fluxo de potência.....	20
3.2. Restrições de Desigualdade (Limites Operacionais).....	21
3.3. Função objetivo.....	21
4. METODOLOGIA.....	23
4.1. Parâmetros iniciais de calibração do AG.....	23
4.3. Variáveis de controle e geração da população inicial.....	23
4.4. Elitismo da população.....	24
4.5. Critério de seleção para a população de pais.....	25
4.6 Crossover.....	26
4.7. Mutação da prole.....	29
4.8. Atualização da população.....	31
4.9. Diagrama de blocos completo do AG.....	31
5. TESTES E RESULTADOS.....	33
5.1 Sistemas Elétricos.....	34
5.1.1. Características dos Sistemas Testes.....	34
5.1.2. Sistemas Testes: IEEE 30 e IEEE 118.....	34
5.2 Simulações no sistema IEEE 30 barras.....	37
5.2.1 Caso Base (Operação Normal):.....	37
5.2.2 Avaliação do Sistema IEEE 30 sob Contingência.....	40
5.3. Simulações no Sistema IEEE 118 Barras.....	43
5.3.1 Caso Base (Operação Normal):.....	43
5.3.2 Avaliação do Sistema IEEE 118 sob Contingência.....	48
5. CONCLUSÃO.....	64
6. REFERÊNCIAS.....	65

1. O PROBLEMA DE DESPACHO ÓTIMO DE REATIVOS

A operação eficiente e segura do sistema de transmissão de energia elétrica é uma exigência fundamental aos centros de controle para acesso à energia elétrica, crescimento e o bem-estar de uma sociedade. Sua função é fornecer energia elétrica de forma segura, eficiente e com confiabilidade e qualidade, atuando em conjunto com os setores de geração e distribuição. Para garantir que o sistema opere nestas condições, uma das ferramentas de suporte essencial ao planejamento da operação do sistema elétrico é a simulação de problemas de Fluxo de Potência Ótimo (FPO).

Neste cenário, o despacho ótimo de reativos (DOR) constitui um subproblema crítico dentro do problema de FPO. Diferente da abordagem global do FPO, que busca otimizar todo o estado do sistema, no DOR considera-se os ajustes das variáveis de controle de potência reativa e de tensão. Frequentemente, assume-se no DOR que o despacho da potência ativa tenha sido efetuado para satisfazer a demanda das cargas e evitar sobrecargas térmicas nos circuitos (GRANVILLE, 1994; SUN *et al.*, 1984). A relevância deste problema está na busca por uma operação que não apenas seja economicamente viável, minimizando perdas, mas que também respeite estritamente os limites físicos e operacionais dos componentes e equipamentos da rede elétrica (ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2011).

1.1. Aspecto geral do problema

A operação segura e de qualidade dos sistemas elétricos de potência impõe o desafio de manter as magnitudes de tensão em todas as barras dentro de faixas operativas aceitáveis, tanto em regime permanente quanto sob a ocorrência de contingências. Para atingir estas condições, os operadores dispõem de um conjunto de diferentes controles para os sistemas de energia elétrica. Estes controles envolvem a especificação de variáveis contínuas, como as tensões nos terminais de geradores e barras de tensão controlada e a injeção de reativos de compensadores e máquinas síncronas, e variáveis discretas como o chaveamento de bancos de capacitores/reatores *shunt* e o ajuste de *taps* de transformadores (SHAHIDEHPOUR; DEEB, 1990; MANTOVANI; MODESTO; GARCIA, 2001).

Para o sistema operando sob condições de contingências, o despacho inadequado de potência reativa pode provocar diferentes tipos de falhas severas, destacando-se:

- **Instabilidade de Tensão:** Flutuações de tensão que podem levar a um colapso de tensão (*blackout*).
- **Aumento das Perdas Elétricas:** O controle inadequado de potência reativa prejudica a regulação de tensão do sistema e aumenta as perdas por efeito Joule nas linhas de transmissão e transformadores, reduzindo a eficiência energética do sistema.
- **Sobrecarga de Equipamentos:** A operação fora das faixas de tensão nominais pode danificar os equipamentos e reduzir sua vida útil.
- **Redução da Capacidade de Transmissão:** Limitações no controle de reativos podem restringir a capacidade de transferência de potência ativa através das linhas e transformadores instalados no sistema.

Desta forma, a resolução do problema de despacho ótimo de reativos é essencial para a operação segura e planejamento e controle dos sistemas elétricos de potência, visando a máxima confiabilidade e qualidade com o menor custo possível. Um dos grandes obstáculos para a solução deste problema é que o mesmo apresenta natureza não linear e não convexa e envolve, em redes reais, milhares de restrições e variáveis.

Além disso, em cenários de carga pesada ou falhas de equipamentos, pode surgir a inviabilidade técnica, em que os recursos disponíveis sejam insuficientes para satisfazer todas as restrições operacionais de tensão. Nesses casos, o problema pode acabar sendo de minimização das violações ou a identificação de novos investimentos em fontes de geração de reativos (planejamento de VAr) para restaurar a viabilidade operativa (GRANVILLE *et al.*, 1988). A manipulação algébrica do modelo de otimização quando existe falta de reativos nos sistemas através de variáveis de folga ou custos de penalidade é essencial para garantir que o algoritmo sempre convirja para uma solução, mesmo que infactível, fornecendo uma solução de "mínimo desvio" como uma das soluções possíveis.

1.2. Metodologias da literatura

A evolução das estratégias de resolução para problemas de operação de sistemas de potência possui um histórico consolidado. Conforme descreve Oliveira (2020), a proposição original do problema de FPO ocorreu em 1962, introduzida por Carpentier no contexto do DE. Subsequentemente, a partir dos conceitos do despacho econômico, Dommel e Tinney

estabeleceram, em 1968, o modelo formal de FPO. Este marco inicial foi decisivo para impulsionar o desenvolvimento de uma vasta quantidade de trabalhos focados na modelagem e solução do problema de FPO, fundamentados inicialmente em técnicas clássicas de otimização (OLIVEIRA, 2020).

No estado da arte atual, encontra-se na literatura uma diversidade de modelos, tanto lineares quanto não lineares para o DOR, que é um subproblema do FPO. Essas formulações distinguem-se pela adoção de diferentes funções objetivo, pela natureza das restrições e pelos tipos de variáveis de decisão, que podem ser reais, inteiras ou discretas. As técnicas de solução propostas dividem-se em métodos clássicos de otimização, métodos baseados em heurísticas e meta-heurísticas e metodologias de otimização matheurísticas, as quais hibridizam meta-heurísticas com técnicas clássicas e heurísticas.

1.2.1. Métodos Clássicos de Otimização

O começo da aplicação do método de Newton, inicialmente apenas para o problema FPO em sistemas de potência, representou um avanço significativo em relação aos métodos de gradiente reduzido propostos por Dommel e Tinney (1968), e outras técnicas baseadas em sensibilidade de primeira ordem. Conforme detalhado por Sun *et al.* (1984), esta abordagem formula o problema através da construção de uma função Lagrangeana, buscando satisfazer as condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (KKT). A contribuição principal desse tipo de técnica está na resolução simultânea das variáveis de estado (tensões e ângulos) e das variáveis de controle, utilizando a matriz Hessiana (matriz de segundas derivadas parciais da função lagrangeana). A principal vantagem desta formulação é a sua convergência quadrática, que depende do ponto inicial de operação, o que garante precisão elevada e redução significativa do erro nas iterações finais quando o ponto de operação está próximo da solução ótima global ou local do problema (Sun *et al.*, 1984).

No entanto, o rigorismo matemático do modelo de FPO resolvido pelo método de Newton impõe limitações severas em problemas de despacho de reativos. Como observado por Lai *et al.* (1997), estes métodos determinísticos dependem da existência de derivadas (diferenciabilidade) e da convexidade do modelo matemático. O problema de despacho de reativos apresenta, inerentemente, características não linear e multimodal (possui múltiplos mínimos locais). Consequentemente, métodos baseados em derivadas tendem a estagnar em soluções ótimas locais dependendo do ponto de inicialização, podendo falhar na identificação

do ótimo global. Além disso, as variáveis de controle discretas, como *taps* de transformadores e bancos de capacitores, introduzem descontinuidades que dificultam o cálculo direto das derivadas exigidas pelos métodos que usam informações das derivadas do modelo (LAI *et al.*, 1997; MANTOVANI; MODESTO; GARCIA, 2001).

Para mitigar as dificuldades combinatórias associadas ao tratamento das restrições de desigualdade no método de Newton (identificação do conjunto de restrições ativas), ganharam destaque os Métodos de Pontos Interiores. Granville (1994) propôs a aplicação do algoritmo *primal-dual* com barreira logarítmica para o despacho de reativos. Diferentemente do método Simplex, que percorre os pontos extremos da região factível, esta técnica aproxima-se da solução ótima explorando o interior do espaço de busca. Matematicamente, as restrições de desigualdade (como limites de tensão e geração de reativos) são incorporadas à função objetivo através de funções de barreira logarítmica penalizadas por um parâmetro de barreira. À medida que o algoritmo avança na sua execução, este parâmetro é reduzido praticamente a zero, forçando a convergência para a solução ótima restrita. A robustez deste método é evidenciada em redes de grande porte: o esforço computacional e o número de iterações mostram-se pouco sensíveis ao aumento do número de barras ou variáveis de controles, tornando-o superior aos métodos de gradiente convencionais para sistemas complexos e mal condicionados (GRANVILLE, 1994). Trata-se de uma técnica de segunda ordem que utiliza o método de Newton para resolver o sistema de equações não lineares resultante da aplicação das condições de KKT no problema de programação não linear original.

A validade prática e a eficiência computacional desta abordagem são corroboradas por sua implementação em ferramentas de simulação modernas amplamente utilizadas na academia e na indústria, como o software MATPOWER, Knitro, etc. Conforme descrevem Zimmerman, Murillo-Sánchez e Thomas (2011), este *software* utiliza como padrão para a resolução do FPO-AC o *solver* MIPS (*Matlab Interior Point Solver*).

1.2.2. Métodos Heurísticos e Algoritmos Evolutivos

A complexidade inerente ao DOR está em sua caracterização como um problema de otimização não linear e não convexo. Trata-se, portanto, de um problema multimodal que demanda a manipulação simultânea de variáveis de natureza distinta: inteiras, discretas e reais. Diante das limitações apresentadas pelas técnicas clássicas de programação matemática

em tratar com essa diversidade de variáveis e com a não convexidade, tem-se buscado alternativas robustas nas técnicas de inteligência computacional.

Devido à natureza não convexa e multimodal das funções objetivo no despacho de reativos, mais recentemente, aliada à presença de controles discretos, alguns trabalhos encontrados na literatura têm proposto o uso de algoritmos meta-heurísticos e computação evolutiva. Estas técnicas procuram realizar uma busca global no espaço de soluções do problema. Dentre as principais técnicas, destacam-se:

Algoritmos Genéticos (AG): Técnica usada neste trabalho, os AGs são algoritmos de busca estocástica baseados nos mecanismos de seleção natural e genética. Conforme detalhado por Lai *et al.* (1997), ao contrário dos métodos de ponto inicial único, os AGs mantêm uma população de soluções candidatas diversas, permitindo um amplo espaço de busca e, evitando a estagnação do processo de busca em ótimos locais comuns em funções não diferenciáveis. Trabalhos como os de Lai e Ma (1997) e Mantovani, Garcia e Modesto (2001) demonstram que os AGs superam métodos baseados em gradiente na busca pelo ótimo global, permitindo a codificação direta de variáveis discretas (como *taps* de transformadores e bancos de capacitores) sem a necessidade de arredondamentos ou linearizações imprecisas que poderiam degradar a qualidade e viabilidade da solução final. Além disso, a flexibilidade na codificação, seja binária ou decimal, facilita a integração com outras técnicas, como a programação linear sucessiva, para o ajuste fino de variáveis contínuas (MANTOVANI; GARCIA; MODESTO 2001).

Otimização por Enxame de Partículas (PSO): Inspirado no comportamento social de bandos de pássaros ou cardumes de peixes, o PSO (*Particle Swarm Optimization*) tem se mostrado uma alternativa competitiva devido à sua simplicidade de implementação e rápida convergência. No contexto do FPO com restrições de segurança (FPO-SC), Oñate Yumbla, Ramirez e Coello Coello (2008) propõem uma variante do PSO que utiliza "operadores de reconstrução". Esta abordagem permite lidar eficientemente com variáveis mistas (contínuas para geração ativa e discretas para *taps* e injeções de reativos), garantindo que as partículas permaneçam dentro do espaço viável e satisfaçam restrições operacionais complexas, como rampas de carga e tempos mínimos de operação, sem depender excessivamente de funções de penalidade que podem distorcer o processo de busca (OÑATE YUMBLA; RAMIREZ; COELLO COELLO, 2008).

Evolução Diferencial (ED): A ED é uma técnica estocástica paralela de busca direta que utiliza a diferença vetorial entre membros da população para gerar novas soluções candidatas. Vaisakh e Srinivas (2008) destacam que o algoritmo ED é particularmente robusto para resolver problemas de FPO com características de custo não convencionais (não convexas e não suaves), como aquelas que apresentam efeitos de "*valve-point loading*" em geradores térmicos. O método opera através de etapas de mutação, cruzamento e seleção, demonstrando ser computacionalmente mais rápido e apresentar melhores características de convergência global em comparação a outras heurísticas simples, como a programação evolutiva, especialmente em espaços de busca multimodais (VAISAKH; SRINIVAS, 2008).

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- Desenvolver uma metodologia baseada em algoritmo genético para simular o despacho otimizado de reativos em sistemas de transmissão de energia elétrica.
- Viabilizar a operação segura do sistema, operando em condições normais ou sob contingências, mantendo-se o perfil regulado das magnitudes e estabilidade das tensões através do despacho otimizado de reativos

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de DOR é modelado, matematicamente, como um problema de otimização não linear, com variáveis mistas (contínuas e discretas) e restrições operacionais de natureza física e de qualidade do produto. O objetivo é determinar os ajustes ótimos das variáveis de controle (u), que minimizem uma função objetivo escalar (f), satisfazendo simultaneamente as equações operacionais e os limites impostos pelas condições físicas da rede.

3.1. Equações de fluxo de potência

No problema de fluxo de carga em CA, o objetivo é determinar o estado de operação do sistema, magnitude e o ângulo da tensão em cada barra, garantindo que as potências ativas e reativas injetadas equilibrem a demanda e as perdas do sistema. A formulação matemática geral, utilizada pelo *software* MATPOWER, que é utilizado como ferramenta auxiliar neste trabalho, baseia-se nas equações de injeção de potência nodal, obtidas a partir da Equação 1:

$$S_i = Vn_i \sum_{k=1}^{N_{barras}} Y_{ik} Vn_k \quad (1)$$

Onde as componentes de potência ativa (P) e reativa (Q) em cada nó são expressas pelas Equações 2 e 3:

$$P_i(\theta, V) = Vn_i \sum_{k=1}^{N_{barras}} Vn_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) \quad (2)$$

$$Q_i(\theta, V) = Vn_i \sum_{k=1}^{N_{barras}} Vn_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik}) \quad (3)$$

Dessa forma, o sistema de equações de fluxo de potência é descrito pelo conjunto de equações 4 e 5:

$$P_i^{sp} - PC_i - P_i(\theta, V) = 0 \quad (4)$$

$$Q_i^{sp} - QC_i - Q_i(\theta, V) = 0 \quad (5)$$

O sistema de equações (4) e (5) são não-lineares, e para encontrar a sua solução no software do MATPOWER é utilizado o método de Newton-Raphson, que expande essas funções em uma Série de Taylor de primeira ordem para encontrar a solução de forma iterativa através da Matriz Jacobiana, até atingir um critério de convergência preestabelecido.

3.2. Restrições de Desigualdade (Limites Operacionais)

As variáveis de estado e de controle devem respeitar seus limites físicos e normativos:

I. Limites de Tensão nas Barras: Garante que a magnitude da tensão V em cada barra i permaneça dentro da faixa permitida, modelada pela equação 6.

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, i = 1, \dots, N_{barras} \quad (6)$$

II. Limites de Geração de Reativos (Q_{Gi}^{lim}): Representa a capacidade física dos geradores de fornecer ou absorver potência reativa, dada pela equação 7.

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, i = 1, \dots, N_{gen} \quad (7)$$

III. Limites de Compensação Reativa (Bsh^{lim}): Define a faixa de atuação dos dispositivos de compensação (capacitores/reatores), podendo ser até 25% maior ou menor que o valor de referência, dada pela equação 8.

$$Bsh_i^{min} \leq Bsh_i \leq Bsh_{si}^{max}, i = 1, \dots, N_{Bshunt} \quad (8)$$

IV. Limites de TAP dos transformadores (TAP^{lim}): Representam os limites físicos do sistema para a atuação dos transformadores com controle automático de *taps* nas linhas, modelado na equação 9.

$$TAP_i^{min} \leq TAP_i \leq TAP_i^{max}, i = 1, \dots, N_{TAP} \quad (9)$$

3.3. Função objetivo

A função objetivo utilizada baseia-se no método dos Mínimos Quadrados para minimizar o desvio das magnitudes de tensão nas barras do sistema. Esta função é proposta na literatura de sistemas de potência para problemas de estimação de estado e controle de tensão (SHAHIDEHPOUR; DEEB, 1990). O objetivo é minimizar o somatório dos erros quadráticos entre a tensão real da barra e sua tensão de referência e garantir que os limites operacionais sejam atendidos. A função do método dos mínimos quadrados a ser minimizada pelo Algoritmo Genético é expressa pela equação 10.

$$f_V = \frac{1}{2} \sum_{i \in VPQ} [(V_i^{Max} - V_{ref})^2 + (V_{ref} - V_i^{min})^2] \quad (10)$$

Aplicando-se ao final fatores de penalidades, caso haja violação de algum dos limites operacionais, a função objetiva final a ser minimizada é apresentada na equação 11.

$$f_{Min} = \lambda_V f_V + \sum_{k \in Q_{Gi}^{lim}} \lambda_{Q_G} (Q_{Gi} - Q_{Gi}^{lim})^2 \quad (11)$$

4. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os conceitos matemáticos e teóricos do AG desenvolvido e implementado para a solução do problema de DOR.

4.1. Parâmetros iniciais de calibração do AG

Para que o AG atinja um desempenho satisfatório na busca pela solução ótima do problema de DR, deve ser realizada a calibração de seus parâmetros iniciais. Estes parâmetros são responsáveis por equilibrar a exploração de novas regiões do espaço de busca e a convergência para uma solução otimizada de boa qualidade. Os principais parâmetros para o controle e calibração do AG desenvolvido neste trabalho são:

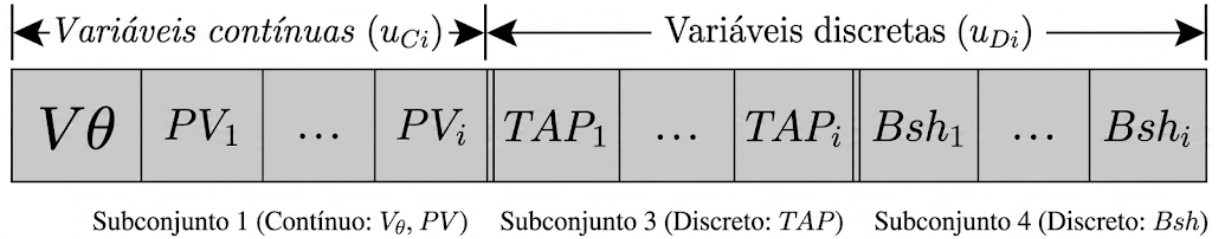
- **Tamanho da População Inicial:** O tamanho da população define quantos indivíduos serão avaliados simultaneamente a cada ciclo do AG.
- **Número Máximo de Gerações:** Este parâmetro define a quantidade de ciclos evolutivos (avaliação, seleção, cruzamento e mutação) que o algoritmo executa antes de ser encerrado. Em cada geração, uma população com novos atributos genéticos é produzida.
- **Taxa de Elitismo:** Refere-se à proporção (ou percentual) de indivíduos com os melhores valores de *fitness* da geração atual que são transferidos para a próxima geração sem que sejam submetidos ao operador de seleção natural.
- **Dimensão do Conjunto do Torneio:** Define o número de indivíduos extraídos aleatoriamente da população para competirem entre si na fase de seleção das soluções pais.
- **Taxa de Cruzamento ou Crossover:** Define a probabilidade de dois indivíduos pais trocarem material genético entre si para gerar novos descendentes.
- **Taxa de Mutação:** Representa a probabilidade de um gene (variável de controle, como um *tap* ou banco de compensação de reativos *shunt*) sofrer uma alteração aleatória em seu valor durante a transição de gerações.

4.3. Variáveis de controle e geração da população inicial

Na Figura 1, ilustra-se o sistema de codificação utilizado em que as variáveis de controle do sistema são codificadas em um vetor que representa a estrutura cromossômica de cada indivíduo da população indicado pelo vetor X_i no diagrama da Figura 3. As variáveis de controle utilizadas são as magnitudes das tensões nas barras de referência, ($V\theta$), e de tensão

controlada(PV) (subconjunto 1), os valores discretos dos taps dos transformadores (subconjunto 2) e dos equipamentos de compensação de reativos (bancos de compensadores reativos) (subconjunto 3).

Figura 1 - Estrutura do cromossomo da população



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A quantidade de variáveis do cromossomo varia conforme o número de variáveis de controle do sistema simulado, sendo identificada inicialmente na execução da implementação computacional do algoritmo. De acordo com o tamanho da população inicial, são geradas as soluções candidatas, sendo que cada variável de controle de uma solução é gerada aleatoriamente, respeitando os limites também impostos, mostrados pelas Equações (6) – (9). Após a geração de cada solução, é calculado, para cada indivíduo da população, o fluxo de potência do sistema pelo método Newton-Raphson, sendo calculado ao final o valor da função objetivo final, dado pela equação 9.

4.4. Elitismo da população

O processo de elitismo é adotado para manter os indivíduos que apresentam os melhores resultados de função objetivo, garantindo a continuidade das soluções de elite para a próxima geração do algoritmo. Embora o AG possa encontrar soluções de qualidade, existe o risco de que nas etapas de reprodução sejam descartados esses resultados. O elitismo corrige essa vulnerabilidade, permitindo ao algoritmo explorar as zonas de convergência mais favoráveis dentro do espaço de busca. A implementação desse processo está descrita no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 - Função para realização do elitismo na população

Algorithm 1 Elitismo

Require: *pop*, *taxelite*

Ensure: *pop* atualizado

- 1: Obter t_i , o total de indivíduos em *pop.total.pops*
 - 2: $telite \leftarrow \text{round}(taxelite)$
 - 3: Ordenar os índices de *pop.total.FO* em ordem crescente e armazenar em *order*
 - 4: Reordenar *pop.total.pops*, *pop.total.FO* e *pop.total.losses* com base em *order*
 - 5: Dividir os dados em elite e resto:
 - 6: $pop.elite.pops \leftarrow pop.total.pops[1 : telite, :]$
 - 7: $pop.rest.pops \leftarrow pop.total.pops[(telite + 1) : end, :]$
 - 8: $pop.elite.FO \leftarrow pop.total.FO[1 : telite, :]$
 - 9: $pop.rest.FO \leftarrow pop.total.FO[(telite + 1) : end, :]$
 - 10: $pop.elite.losses \leftarrow pop.total.losses[1 : telite, :]$
 - 11: $pop.rest.losses \leftarrow pop.total.losses[(telite + 1) : end, :]$
 - 12: **return** *pop*
-

Fonte: Elaborado pelo autor.

A taxa de elitismo adotada é sempre pequena, variando de 1% a 5% da população. Caso sejam utilizadas porcentagens muito elevadas, o AG pode sofrer uma convergência prematura; nesse cenário, a população converge para uma única solução rapidamente, estagnando em um ótimo local e perdendo diversidade genética.

4.5. Critério de seleção para a população de pais

A seleção é a etapa em que os indivíduos são escolhidos para compor o "*pool* de reprodução" com base em sua aptidão baseada no valor da função objetivo da população. Embora existam métodos tradicionais amplamente citados na literatura, como a Roleta (*Roulette Wheel*), onde cada indivíduo possui um setor proporcional à sua aptidão (MANTOVANI; MODESTO; GARCIA, 2001; LAI *et al.*, 1997), neste trabalho adotou-se o método de torneio, conforme apresentado no Algoritmo 2.

Algoritmo 2 - Função para realização do método de seleção por torneio.

Algorithm 2 Torneio

Require: *pop, numt, nums*

Ensure: *parentes*

- 1: Obter *trest*, o total de indivíduos em *pop.rest.pops*
 - 2: Inicializar *parentes* como matriz vazia
 - 3: Criar *selectedIndices*, um vetor de tamanho *nums*
 - 4: Gerar *numt* índices aleatórios para o torneio em *tournamentIndices*
 - 5: **for** $i \leftarrow 1$ até *trest* **do**
 - 6: Encontrar o índice *winnerIndex* do indivíduo com menor aptidão em *pop.rest.FO[tournamentIndices]*
 - 7: Armazenar *tournamentIndices[winnerIndex]* em *selectedIndices[i]*
 - 8: Copiar *pop.rest.pops[selectedIndices[i], :]* para *parentes[i, :]*
 - 9: Atualizar *tournamentIndices* com novos índices aleatórios
 - 10: **end for**
 - 11: **return** *parentes*
-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este método foi escolhido por sua eficiência e capacidade de ajustar a pressão seletiva. Um subgrupo de indivíduos é escolhido aleatoriamente da população, e seus valores de *fitness* são comparados, o indivíduo com a melhor aptidão dentro desse subgrupo é selecionado para ser um dos pais da próxima geração (TANGPATIPHAN; YOKOYAMA, 2009). Diferente da roleta, o torneio não requer o ordenamento de toda a população ou o cálculo da soma total de aptidões, sendo robusto e fácil de implementar.

4.6 Crossover

Com o objetivo de se obter uma maior diversidade populacional, após ser determinada a população dos pais através da técnica de torneios, uma parcela da população é submetida ao *crossover*, de acordo com uma taxa preestabelecida no início da execução do algoritmo. A função utilizada é apresentada no Algoritmo 3.

Algoritmo 3 - Função execução do *Crossover* Híbrido (SBX e uniforme)

Algorithm 3 Crossover Híbrido (SBX e Uniforme)

Require: $p1, p2, prob_cross, var_types, var_bounds, \eta_c$

Ensure: $c1, c2$

```

1: Inicializar  $c1, c2$  como cópias de  $p1, p2$ 
2: if Número aleatório  $r \leq prob\_cross$  then
3:   for cada índice  $i$  de 1 até  $num\_vars$  do
4:     if  $var\_types[i] = 1$  then (a) Variável Contínua – Crossover SBX)
5:       Número aleatório  $u \leftarrow rand$ 
6:       if  $u \leq 0.5$  then
7:          $\beta \leftarrow (2 * u)^{1/(\eta_c+1)}$ 
8:       else
9:          $\beta \leftarrow (\frac{1}{2 * (1 - u)})^{1/(\eta_c+1)}$ 
10:      end if
11:       $v_1 \leftarrow 0.5 * ((1 + \beta) * p1[i] + (1 - \beta) * p2[i])$ 
12:       $v_2 \leftarrow 0.5 * ((1 - \beta) * p1[i] + (1 + \beta) * p2[i])$ 
13:       $c1[i] \leftarrow \max(var\_bounds[i, 1], \min(var\_bounds[i, 2], v_1))$ 
14:       $c2[i] \leftarrow \max(var\_bounds[i, 1], \min(var\_bounds[i, 2], v_2))$ 
15:    else if  $var\_types[i] = 2$  then (b) Variável Discreta - Crossover UNIFORME)
16:      if Número aleatório  $r \leq 0.5$  then
17:         $c1[i] \leftarrow p2[i]; c2[i] \leftarrow p1[i]$ 
18:      end if
19:    end if
20:  end for
21: end for
22: return  $c1, c2$ 

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido à presença de diferentes tipos de variáveis de controle no problema de DOR, optou-se pela implementação de um modelo de cruzamento híbrido. Esta abordagem aplica diferentes estratégias de recombinação genética, respeitando a natureza física, heterogênea e o domínio de cada variável (contínua ou discreta).

Cruzamento para Variáveis Contínuas: Para o tratamento das variáveis contínuas, que representam as magnitudes de tensão nos barramentos de tensão controlada, implementou-se o método de Cruzamento Binário Simulado (*Simulated Binary Crossover* - SBX). O SBX simula o princípio de busca do cruzamento de ponto único de algoritmos genéticos binários, mas operando diretamente no domínio dos números reais. Sejam V_g^1 e V_g^2 Os valores das tensões de dois indivíduos pais selecionados. O operador SBX gera dois descendentes, $V_g^{1'}$ e $V_g^{2'}$ em torno das soluções parentais, calculados pelas equações 12 e 13.

$$V_g^{1'} = 0,5 [(1 + \beta) V_g^1 + (1 - \beta) V_g^2] \quad (12)$$

$$V_g^{2'} = 0,5 [(1 + \beta) V_g^1 + (1 - \beta) V_g^2] \quad (13)$$

Onde β é um fator de espalhamento (*spread factor*) que determina a distância dos filhos em relação aos pais. O fator β é dependente de uma variável aleatória u (com distribuição uniforme no intervalo) e de um índice de distribuição do cruzamento predefinido, ηc (adotado como 20 neste trabalho), sendo calculado pelas equações 14 e 15.

$$\beta = (2u)^{\frac{1}{\eta c + 1}} \quad \text{se } u \leq 0,5 \quad (14)$$

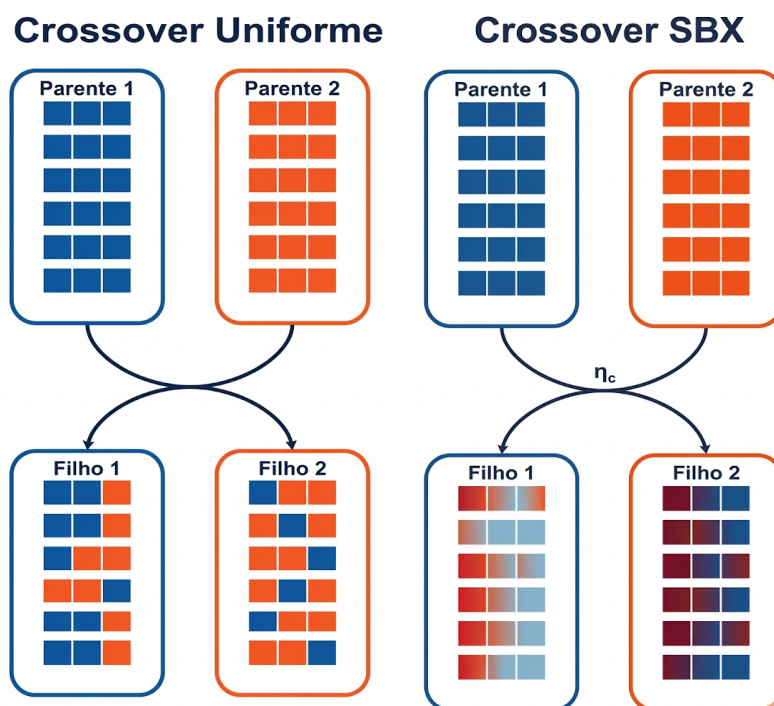
$$\beta = \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta c + 1}} \quad \text{se } u > 0,5 \quad (15)$$

A formulação do SBX garante que a média dos valores das variáveis dos filhos seja igual à média dos pais, possuindo alta probabilidade de gerar descendentes próximos aos progenitores, o que favorece uma convergência estável do fluxo de potência (DEB; AGRAWAL, 1995). Para assegurar a integridade e os limites operacionais dos geradores, os valores resultantes $V_g^{1'}$ e $V_g^{2'}$ são estritamente limitados às restrições físicas de tensão mínima e máxima (V_g^{min} e V_g^{max}).

Cruzamento para Variáveis Discretas: Para as variáveis de natureza discreta, que neste contexto representam os *taps* dos transformadores com comutação sob carga e os módulos dos bancos de capacitores/reatores *shunt*, adotou-se uma estratégia baseada no cruzamento uniforme. Neste esquema, para cada gene discreto avaliado, o algoritmo decide de forma aleatória, com 50% de probabilidade, se o indivíduo descendente herdará o valor exato do pai 1 ou do pai 2. Esse operador atua apenas realizando a troca ou permutação direta de "peças" (valores de *taps* ou bancos), garantindo que os limites de controle físico dos equipamentos elétricos sejam rigorosamente preservados.

Na Figura 2 exemplificam-se os métodos de *crossover* BLX- α e uniforme, considerando as variáveis de controle como componentes de um vetor (cada bloco representa uma variável de decisão).

Figura 2 - Esquema simplificado dos algoritmos de crossover aplicados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7. Mutação da prole

O operador de mutação tem como função principal inserir pequenas perturbações aleatórias nos indivíduos da população, garantindo a manutenção da diversidade genética ao longo das gerações e prevenindo que o algoritmo convirja prematuramente para ótimos locais. Seguindo a mesma filosofia adotada no operador de cruzamento, o operador de mutação foi modelado de forma híbrida para respeitar as restrições físicas e a natureza das variáveis (contínua ou discreta). O algoritmo implementado é o pseudocódigo do Algoritmo 4.

Algoritmo 4 - Função execução da Mutação Híbrida (Polinomial e uniforme)

Algorithm 4 Mutação Híbrida (Polinomial e uniforme)

Require: ind , $prob_mut$, var_types , var_bounds , $discrete_steps$, η_m

Ensure: $mutated_ind$

```

1:  $mutated\_ind \leftarrow$  copiar de  $ind$ 
2: for cada índice  $i$  de 1 até  $num\_vars$  do
3:   Número aleatório  $r \leftarrow rand$ 
4:   if  $r \leq prob\_mut$  then
5:     if  $var\_types[i] = 1$  then (a) Variável Contínua - Mutação Polinomial
6:       Número aleatório  $u \leftarrow rand$ 
7:        $delta\_max \leftarrow var\_bounds[i, 2] - var\_bounds[i, 1]$ 
8:       if  $u \leq 0.5$  then
9:          $delta \leftarrow (2 * u)^{1/(\eta_m+1)} - 1$ 
10:      else
11:         $delta \leftarrow 1 - (2 * (1 - u))^{1/(\eta_m+1)}$ 
12:      end if
13:       $mutated\_val \leftarrow ind[i] + delta * delta\_max$ 
14:       $mutated\_ind[i] \leftarrow \max(var\_bounds[i, 1], \min(var\_bounds[i, 2], mutated\_val))$ 
15:    else if  $var\_types[i] = 2$  then (b) Variável Discreta - Mutação Discreta
16:       $step \leftarrow discrete\_steps[i]$ 
17:       $num\_steps \leftarrow \text{round}((var\_bounds[i, 2] - var\_bounds[i, 1]) / step)$ 
18:      Número aleatório  $i\_step \leftarrow \text{randi}([0, num\_steps])$ 
19:       $mutated\_val \leftarrow var\_bounds[i, 1] + i\_step * step$ 
20:       $mutated\_ind[i] \leftarrow \max(var\_bounds[i, 1], \min(var\_bounds[i, 2], mutated\_val))$ 
23: end for
24: return  $mutated\_ind$ 

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso o gene seja sorteado para sofrer mutação, aplica-se uma das seguintes abordagens dependendo do tipo da variável:

Mutação de Variáveis Contínuas: Para promover uma exploração refinada do espaço de busca contínuo, optou-se pelo uso da mutação polinomial. Diferente de métodos de perturbação baseados em ruído branco, a mutação polinomial utiliza uma distribuição de probabilidade polinomial para perturbar o valor de um gene em relação aos seus limites físicos inferior e superior (V_g^{min} e V_g^{max}) (DEB, 1995). Quando um gene contínuo $V_{g[i]}$ do indivíduo é selecionado para mutação (mediante uma probabilidade pré-definida), o novo valor mutado $V'_{g[i]}$ é calculado pela Equação 16.

$$V'_{g[i]} = V_{g[i]} + \delta_q (V_g^{max} - V_g^{min}) \quad (16)$$

onde δq é um parâmetro de perturbação gerado a partir de uma variável aleatória u (com distribuição uniforme entre 0 e 1) e de um índice de distribuição de mutação η_m . A lógica de cálculo para a variável δ_q garante que a probabilidade de criar uma solução próxima ao valor original do pai seja maior do que a de criar uma solução distante. O parâmetro η_m é calibrado de forma que valores altos de η_m geram mutações com perturbações muito pequenas, e valores baixos permitem saltos maiores pelo domínio da variável.

Mutação de Variáveis Discretas: Diferentemente das tensões, os *taps* de transformadores e os bancos de capacitores/reatores (*shunts*) operam através de estágios de comutação fixos (degraus). Na modelagem adotada, os passos físicos definidos foram de 0,01 p.u. (totalizando 20 passos possíveis entre 0,9 a 1,1) para os *taps*, e para os compensadores shunt adotou-se um passo variável de acordo com os valores máximos e mínimos iniciais, sempre totalizando no máximo 5 passos possíveis de valores. Para preservar essa característica discreta, a mutação atua por meio do incremento ou decremento de um passo de operação.

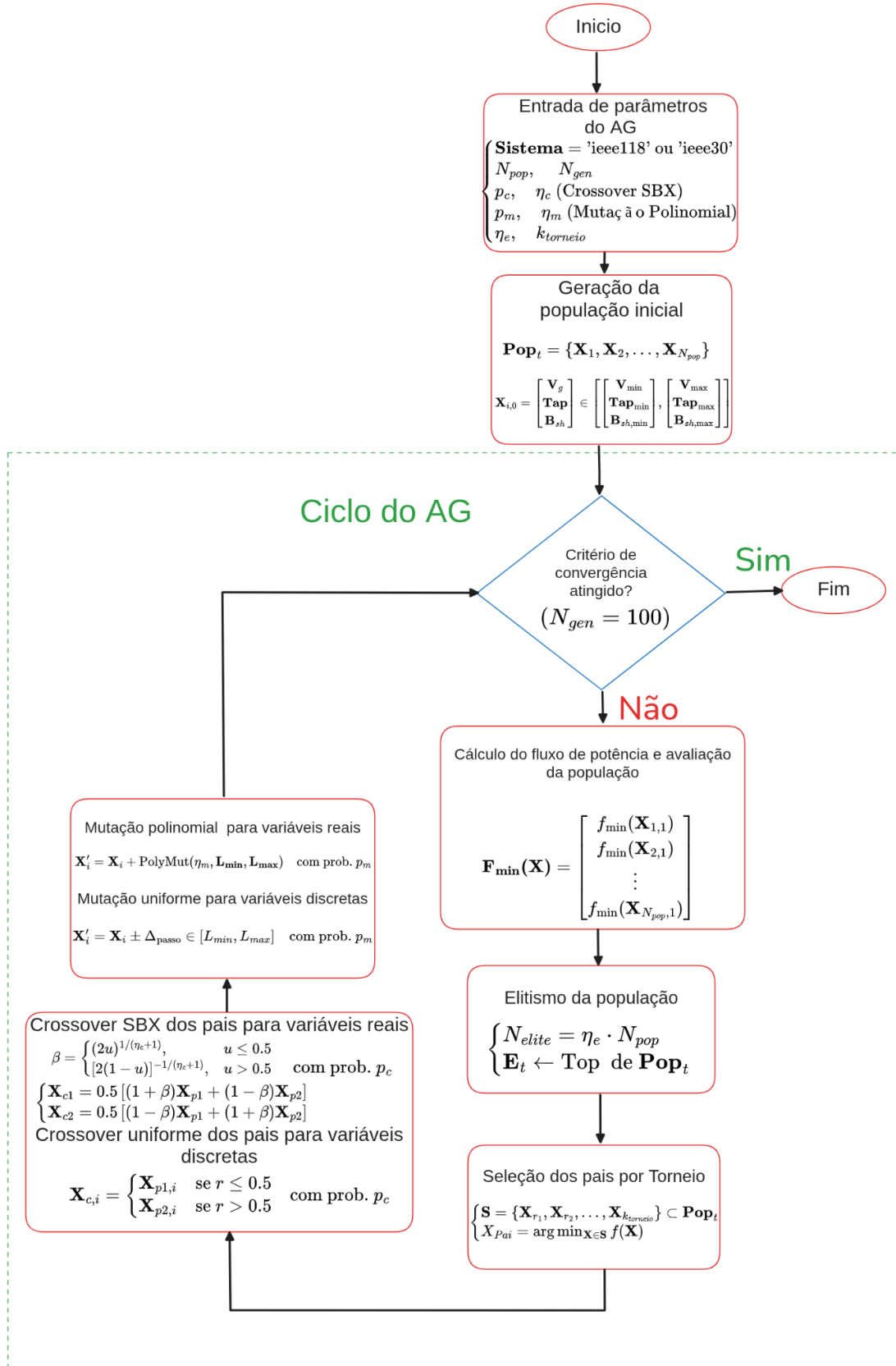
4.8. Atualização da população

Ao final de todos os processos descritos em relação à obtenção da nova população, calculam-se as funções objetivo das novas soluções. As populações menos aptas são eliminadas da população total, sendo reiterado um novo ciclo para uma nova geração até ser atingido o número de gerações totais, que é adotado como critério de parada do algoritmo.

4.9. Diagrama de blocos completo do AG

A lógica operacional completa do modelo proposto, detalhando todas as etapas de evolução, é ilustrada no diagrama de blocos da Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos a partir da implementação computacional do AG desenvolvido para a solução do problema de DOR. Para avaliar a robustez e escalabilidade da metodologia proposta, o algoritmo foi testado para os sistemas elétricos de potência padronizados pelo IEEE (sistemas de 30 e 118 barras), contemplando tanto cenários de operação em estado normal (caso base) quanto em operação sob contingências simples de desligamentos de linhas.

Para a execução das simulações e o cálculo do fluxo de potência, etapa necessária para a avaliação da função de adaptação (*fitness*) de cada indivíduo da população em cada geração, utilizou-se o *software* de simulação MATPOWER versão 8.0, uma ferramenta computacional amplamente reconhecida e validada na pesquisa acadêmica na área de sistemas de potência. O uso do MATPOWER garante que as equações não lineares de fluxo de potência sejam resolvidas com alta precisão e confiabilidade matemática durante o processo evolutivo do algoritmo.

Todas as simulações computacionais apresentadas nas seções seguintes são desenvolvidas e executadas no ambiente de programação MATLAB versão 2024a, utilizando um computador com processador Ryzen 5, operando a 2.1 GHz, com 8GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 24.10. Para garantir a padronização e a base de comparação dos testes, os parâmetros de controle do Algoritmo Genético foram ajustados empiricamente e definidos com os seguintes valores base para todas as simulações:

- **Tamanho da População (N_{pop}):** 200 indivíduos.
- **Número Máximo de Gerações (N_{gen}):** 100 gerações.
- **Tamanho do Torneio ($k_{torneio}$):** 4 indivíduos por disputa.
- **Probabilidade de Cruzamento (p_c):** 80% da população total.
- **Probabilidade de Mutação (p_m):** 10% por gene.
- **Taxa de Elitismo ($k_{torneio}$):** Preservação dos 5% melhores indivíduos a cada geração.
- **Desvio Padrão do SBX Crossover (η_c):** Até 10% para as variáveis contínuas de tensão.
- **Índice de distribuição (η_m):** 20 para variáveis contínuas.

5.1 Sistemas Elétricos

Nas seções a seguir, os resultados são divididos, primeiramente, pela topologia dos sistemas de teste (IEEE 30 e IEEE 118 barras). Para cada sistema, o desempenho do AG é avaliado pelo despacho de reativos do caso base e pela restauração da segurança do sistema frente a cenários distintos de contingências de maior criticidade, Tabela 1, analisando-se a convergência da função objetivo, a minimização das perdas ativas totais e a correção do perfil da magnitude de tensão nas barras.

Tabela 1- Contingências analisadas

Contingências	Sistema
Retirada da linha 1-2	IEEE 30 Barras
Retirada da linha 26-30	IEEE 118 Barras
Retirada da linha 65-68	IEEE 118
Retirada da linha 89-92	IEEE 118
Retirada do trafo 5-8	IEEE 118

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.1. Características dos Sistemas Testes

A quantidade de variáveis de controle dos dois sistemas de teste analisados é apresentada no Tabela 2.

Tabela 2 - Número de variáveis

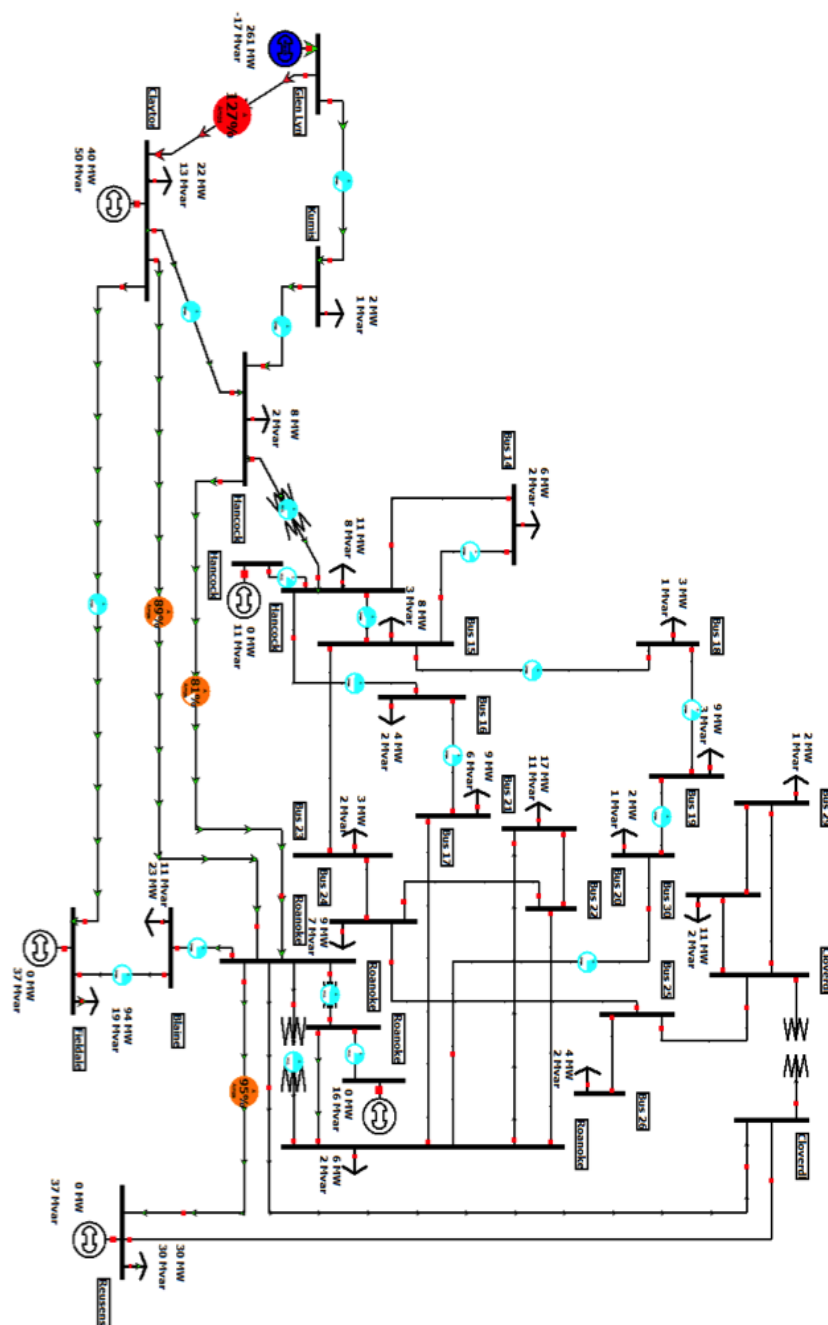
Sistema	TAP dos Trafos	Bancos de Compensadores	Unidades geradoras	Total
Caso 30 IEEE	4	2	6	12
Caso 118 IEEE	11	14	54	79

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.2. Sistemas Testes: IEEE 30 e IEEE 118

O sistema IEEE 30 possui 30 barras, 6 unidades geradoras, 41 linhas de transmissão, 4 transformadores com *taps* controlados automaticamente e dois bancos de capacitores, como ilustrado no diagrama unifilar da Figura 4.

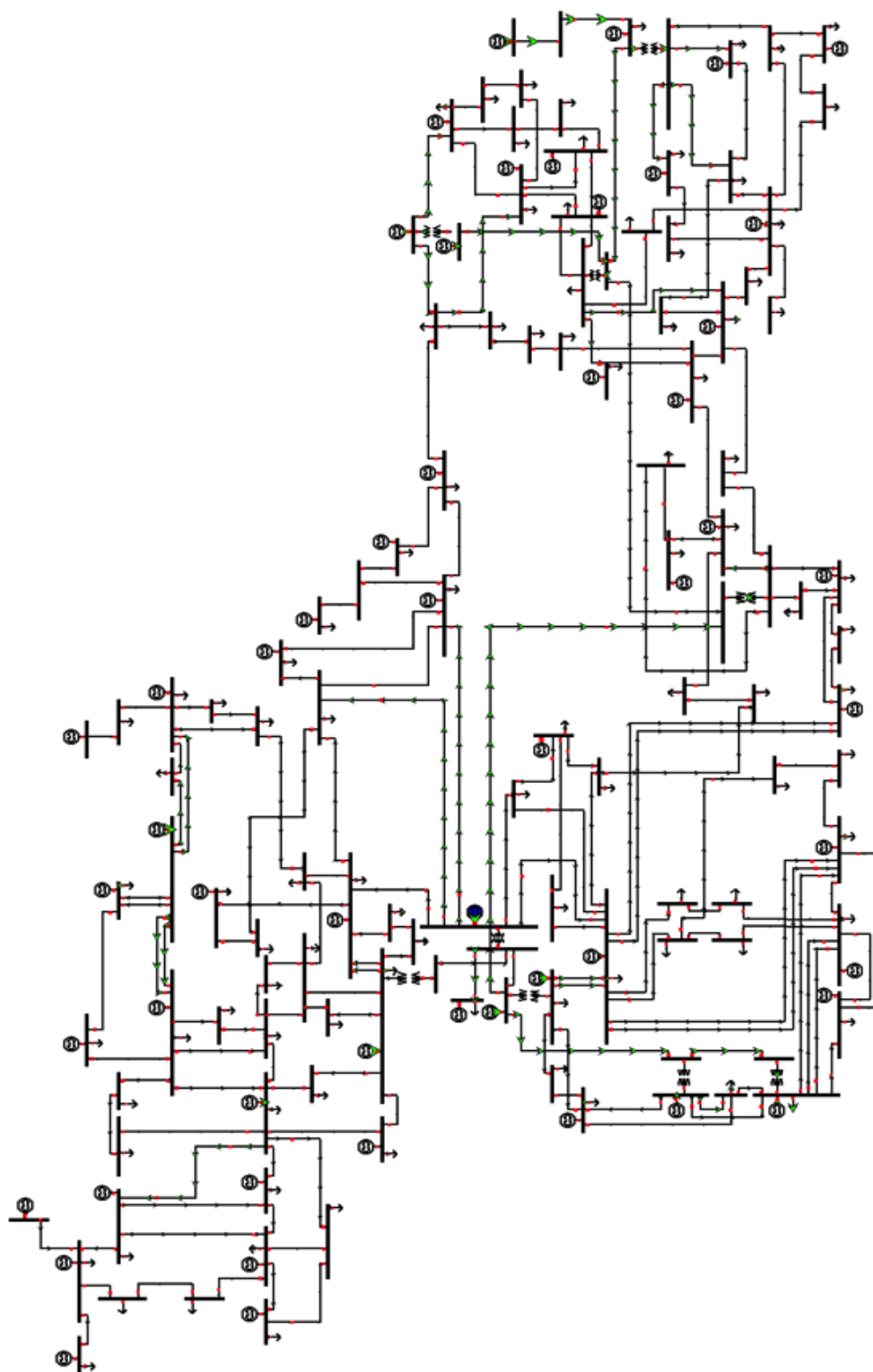
Figura 4 – Diagrama unifilar do sistema IEEE 30.



Fonte: IEEE (2024).

O sistema teste IEEE de 118 barras representa uma aproximação simples do sistema de energia elétrica americano (*Midwest* dos EUA) em dezembro de 1962. Este sistema possui 118 barras, 54 unidades geradoras, 177 linhas, 9 transformadores e 91 cargas, de acordo com o diagrama unifilar ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama unifilar do sistema IEEE 118.



Fonte: IEEE (2024).

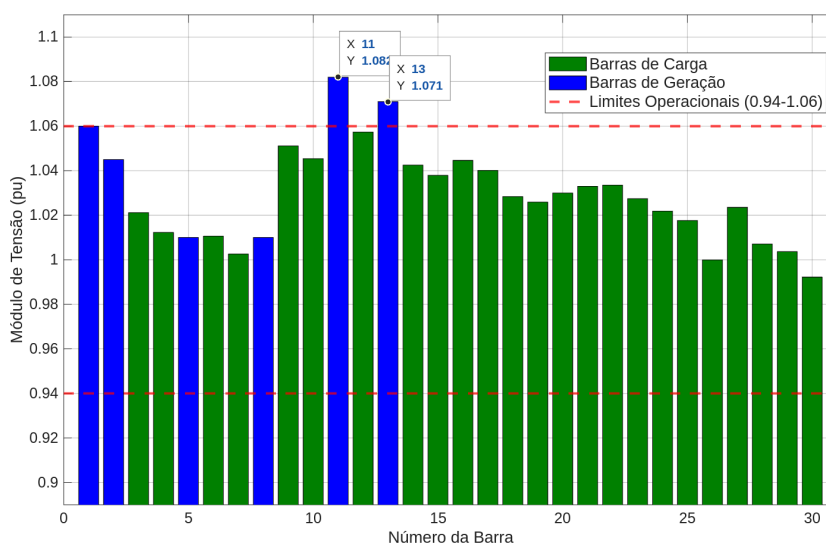
5.2 Simulações no sistema IEEE 30 barras

Com base nos casos apresentados na tabela 2 para o sistema IEEE 30 barras executou-se o algoritmo com os parâmetros de controle do AG calibrados anteriormente, obtendo-se resultados para o caso base e a contingência 1.

5.2.1 Caso Base (Operação Normal):

A simulação do fluxo de potência inicial com os dados existentes na base de dados, executada via MATPOWER, mostrou que no estado não otimizado o sistema apresenta perdas ativa total na transmissão da ordem de 17,5569 MW e reativas de 32,9833 MVar, e duas infactibilidades nas barras 11 e 13, como apresentado na Figura 6.

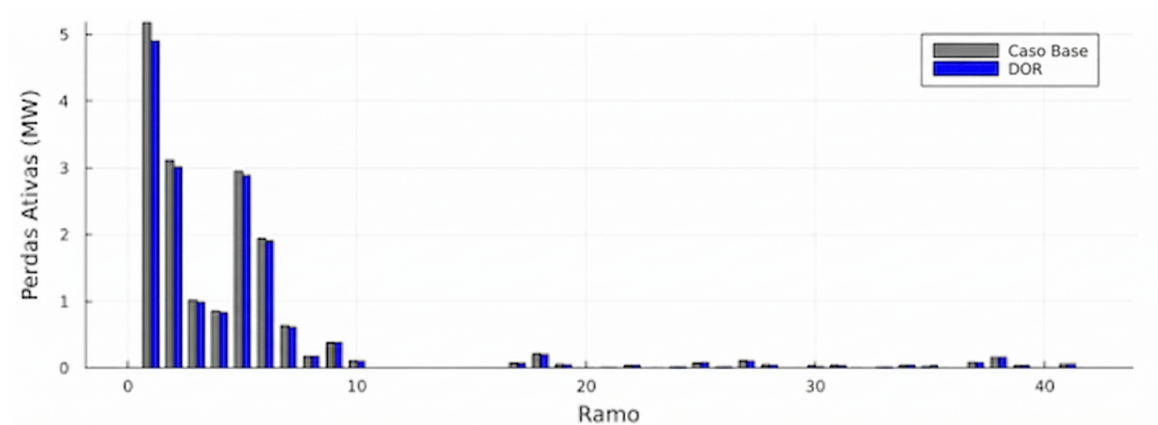
Figura 6 - Infactibilidades dos limites das magnitudes de tensão para o caso base - IEEE 30



Fonte: Elaborado pelo autor.

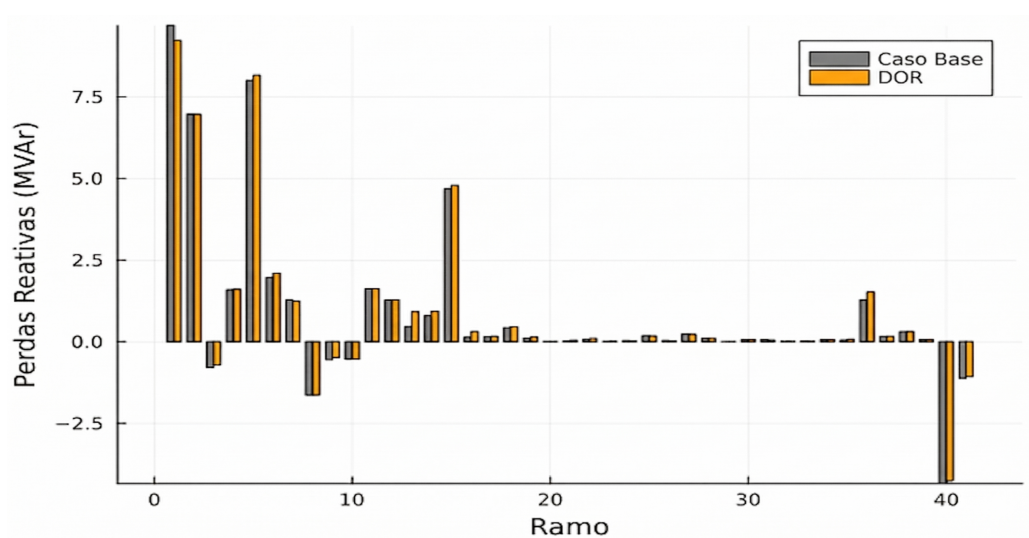
Com a execução do algoritmo de despacho otimizado de reativos foram obtidas perdas ativas de 17,4334 MW e 31,3305 MVar. Nas Figuras 7 e 8, apresentam-se as perdas ativa e reativa para o caso base e após executar a simulação do DOR.

Figura 7 - Perdas ativas por ramo para o sistema IEEE 30



Fonte: Elaborado pelo autor.

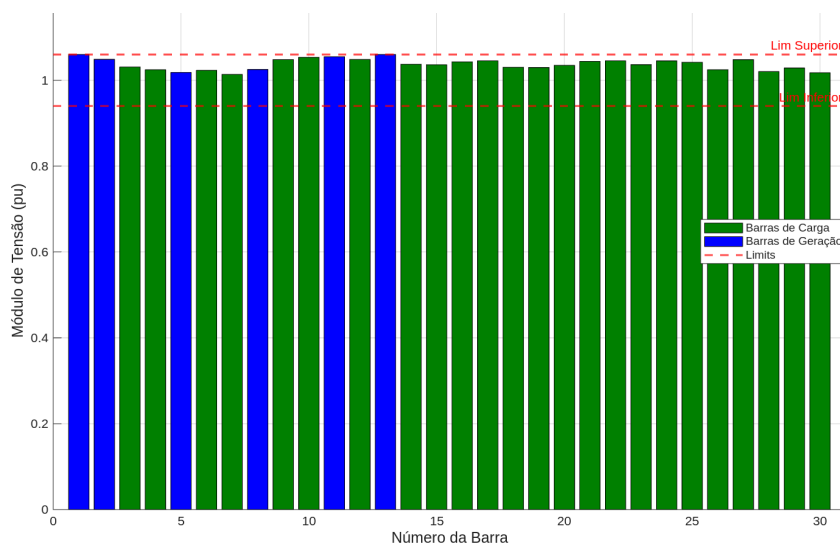
Figura 8 - Perdas reativas por ramo para o sistema IEEE 30



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram analisados também os limites operacionais da solução proposta. Nas Figuras 9 e 10, verifica-se que os resultados obtidos se mantiveram dentro das faixas permitidas, tanto para as magnitudes de tensão nos barramentos quanto para a potência reativa dos geradores. As linhas tracejadas em vermelho delimitam os valores máximos e mínimos, enquanto os barramentos com unidades geradoras, destacados em azul, também operam conforme as restrições do sistema.

Figura 9 - Tensão nos barramentos para o caso base - IEEE 30 otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

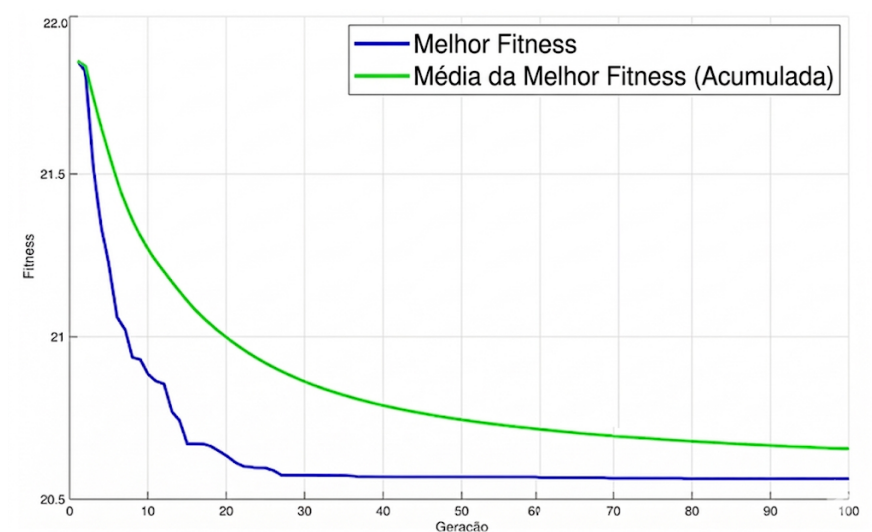
Figura 10 – Potência reativa fornecida pelos geradores do caso IEEE 30 otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustrado na Figura 11, observa-se que o algoritmo converge para uma solução ótima já na 27.^a geração, apresentando uma melhoria de 5,01% comparada com o estado inicial do sistema. A curva de *fitness* média acumulada também valida a convergência do algoritmo, apresentando o comportamento assintótico previsto para o AG. As variáveis de controle da iteração final após o DOR, são apresentadas na Tabela 3.

Figura 11 - Convergência do AG vs. Gerações para o caso base - IEEE 30



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Variáveis de controle do AG após o DOR para o caso base - IEEE 30

Teste \ Variável	Vg_1	Vg_2	Vg_3	Vg_4	Vg_5	Vg_6	TAP_1	TAP_2	TAP_3	TAP_4	Bsh_1 (MVar)	Bsh_2 (MVar)
Caso base	1,06	1,034	1,003	1,005	1,044	1,06	0,96	0,97	0,96	0,93	30	15

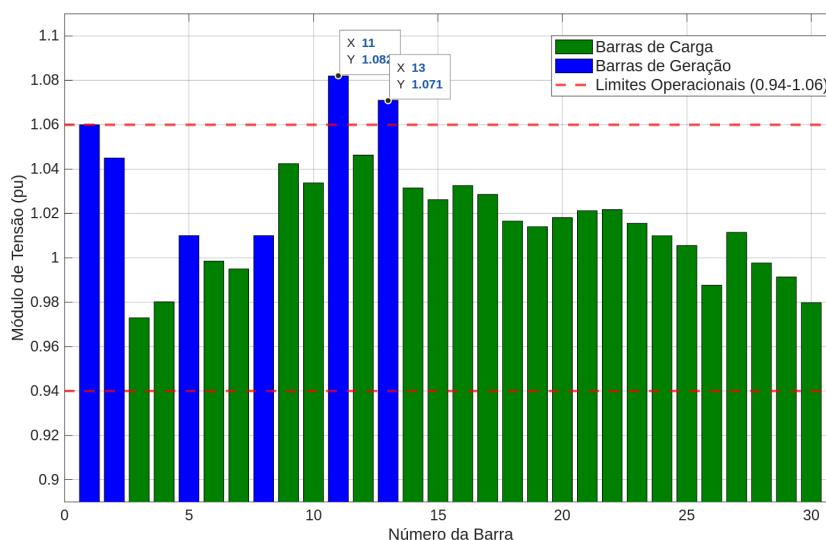
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Avaliação do Sistema IEEE 30 sob Contingência

Considerando agora a retirada da linha 1-2 do caso base, foi executado o cálculo do fluxo de potência inicial via MATPOWER, obtendo-se perdas ativa e reativa totais na transmissão da ordem de 60,6290 MW e 190,5987 MVar, respectivamente, sendo uma solução infactível por exceder os limites máximos de tensão nos barramentos 11 e 13, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Infactibilidade dos limites das magnitudes de tensão para o caso base -

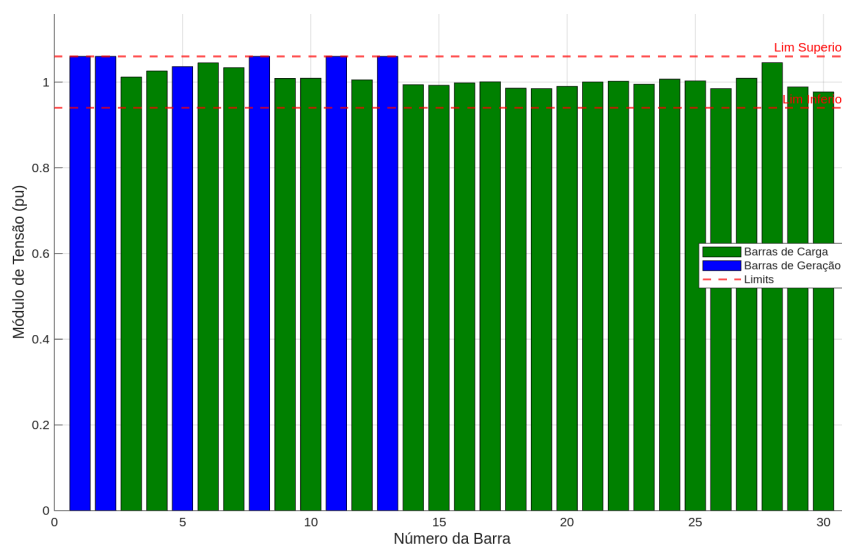
IEEE 30



Fonte: Elaborado pelo autor.

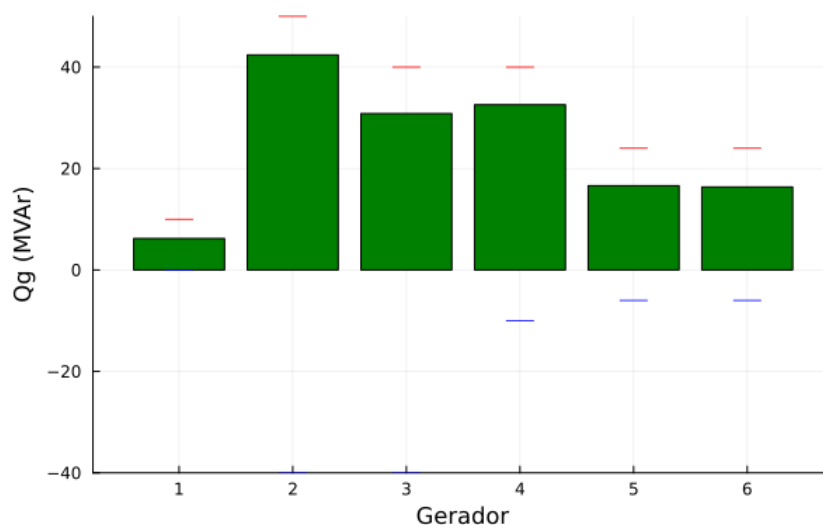
Após a execução do algoritmo, as perdas ativa registradas foram de 56,7388 MW e reativa de 182,2623 MVar, obtendo-se, ao final, uma redução de 4,37% nas perdas totais reativas. Os limites operacionais das magnitudes de tensão e geração de reativos do sistema sob contingência não foram violados, como apresentado nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 - Tensão nos barramentos para a contingência - IEEE 30 otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

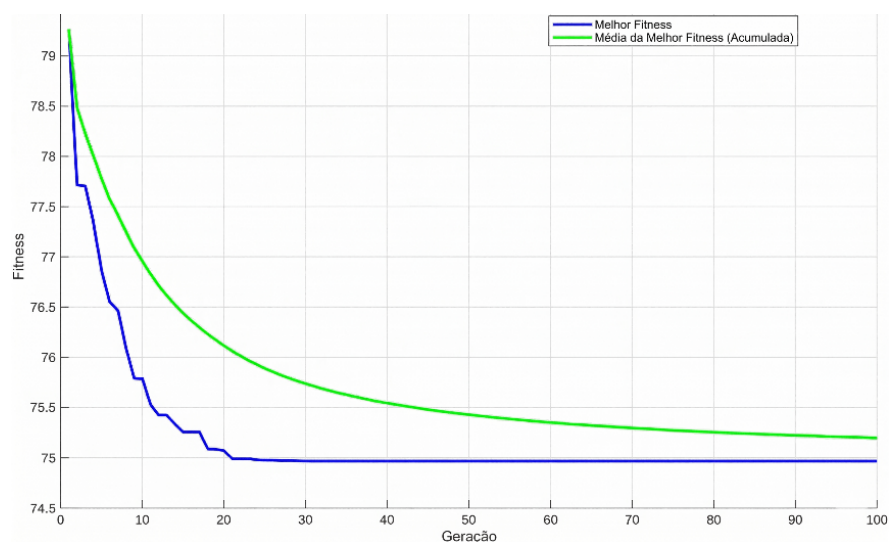
Figura 14 – Potência reativa fornecida pelos geradores - IEEE 30 otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando-se o gráfico da Figura 15, verifica-se que a implementação computacional do AG atinge a convergência da solução na 21.^a geração, fornecendo uma redução de reativos dentro dos limites de operação, mesmo dentro da condição de contingência mais crítica do sistema.

Figura 15 - Convergência do AG vs. Gerações para a contingência - IEEE 30



Fonte: Elaborado pelo autor.

As variáveis de controle obtidas seguindo a ordem em que aparecem nos barramentos ou ramos da contingência do caso pelo AG após o DOR, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Variáveis de controle do AG após o DOR para a contingência - IEEE 30

Teste \ Variável	Vg_1	Vg_2	Vg_3	Vg_4	Vg_5	Vg_6	TAP_1	TAP_2	TAP_3	TAP_4	Bsh_1 (MVar)	Bsh_2 (MVar)
Contingência 1	1,06	1,034	1,007	1,009	1,058	1,06	0,96	0,97	0,96	0,94	30	15

Fonte: Elaborado pelo autor.

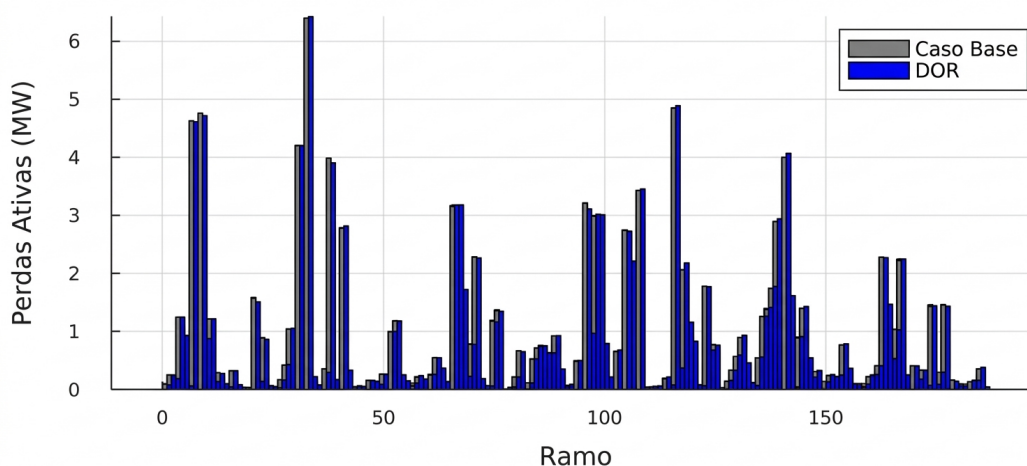
5.3. Simulações no Sistema IEEE 118 Barras

Com base nos casos apresentados no Tabela 2 para o sistema IEEE 118 barras, executa-se a implementação computacional do algoritmo com os parâmetros de controle do AG calibrados previamente, obtendo-se resultados para o caso base e as contingências 1,2,3 e 4.

5.3.1 Caso Base (Operação Normal):

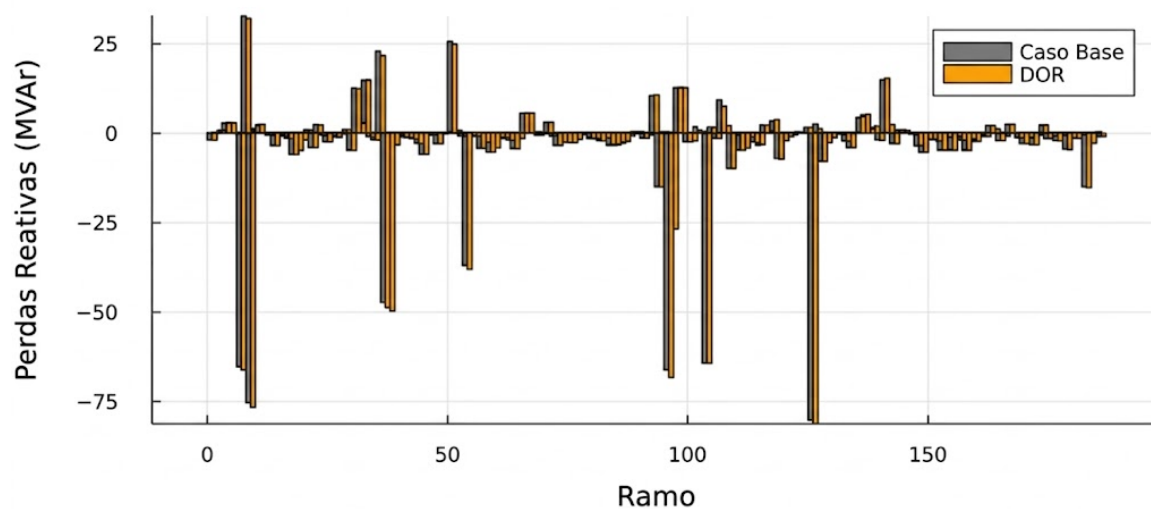
O fluxo de potência inicial é calculado para o estado não otimizado do sistema que fornece perdas ativas totais de transmissão da ordem de 132,8629 MW e reativas de 557,9474 MVar, sendo infactível devido a violação dos limites de operação dos geradores 9,16, 43 e 48, como mostrado em negrito nos ID's para os valores de Q_g inicial apresentados na tabela 5. Com a execução do AG foram obtidas perdas ativa de 134,6387 MW e reativa de -513,3135 MVar, havendo uma redução da compensação reativa do sistema. As perdas ativa e reativa podem ser verificadas, antes e depois do DOR, respectivamente, nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 - Perdas ativas por ramo no sistema IEEE 118



Fonte: Elaborado pelo autor.

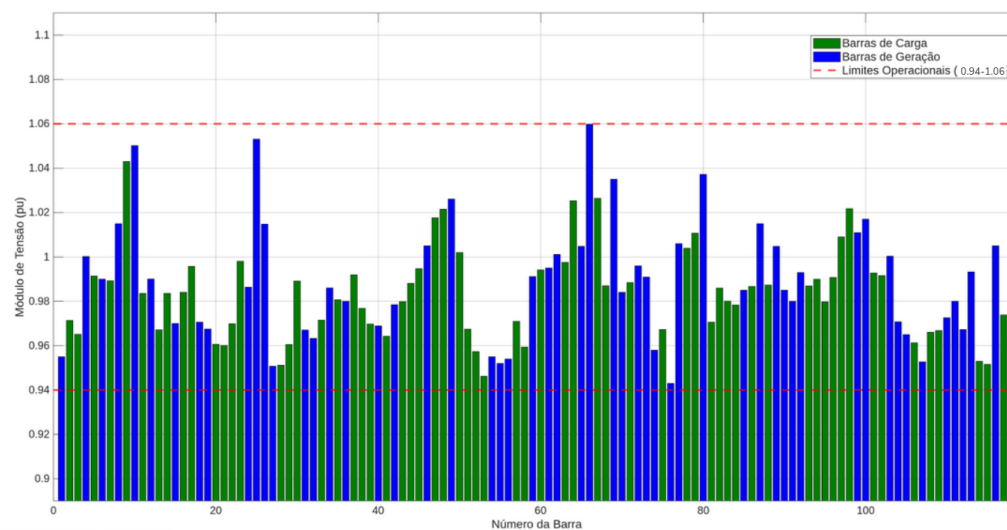
Figura 17 - Perdas reativas por ramo no sistema IEEE 118



Fonte: Elaborado pelo autor.

A conformidade com os limites de barramento e de potência reativa pode ser verificada na Figura 18 e pelos valores da Tabela 5, demonstrando a factibilidade da solução encontrada.

Figura 18 – Magnitude de tensão nos barramentos para o caso base - IEEE 118 otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Potência reativa otimizada após o DOR para o caso base - IEEE 118

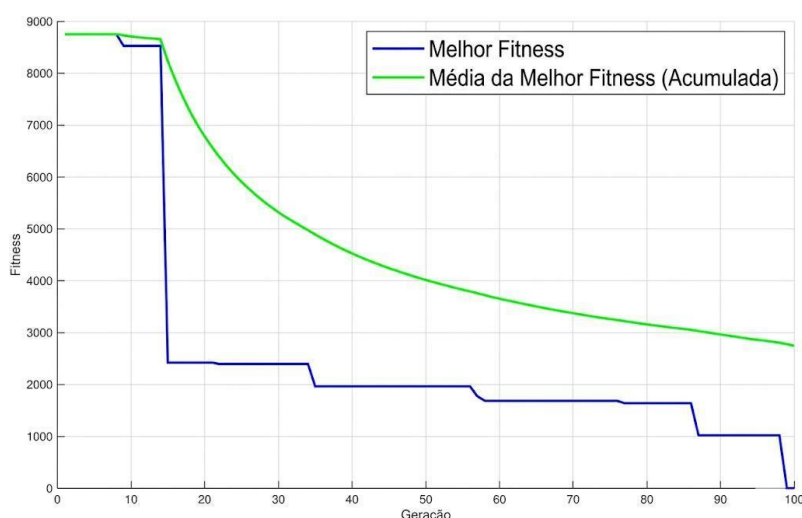
ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg Otimizado (MVar)	Qg máximo (MVar)
1	-5	-3,1	2,76	15
2	-300	-15,01	150,83	300
3	-13	15,93	35,52	50
4	-300	63,14	-143,62	300
5	-147	-51,04	-50,74	200
6	-35	91,29	100,19	120
7	-10	7,16	-7,72	30
8	-16	28,43	7,21	50
9	-8	-14,27	17,13	24
10	-300	-14,91	-35,37	300
11	-47	50,04	78,11	140
12	-1000	10,12	-3,92	1000
13	-300	3,98	-48,27	300
14	-300	32,59	40,06	300
15	-14	-16,28	19,47	42
16	-8	-20,83	-8	24
17	-8	7,73	-1,71	24
18	-300	28,45	31,47	300
19	-300	41,03	30,72	300
20	-100	-5,03	-12,06	100
21	-85	115,85	100,02	210
22	-300	3,9	0,37	300
23	-8	4,66	1,83	23
24	-8	-2,29	-7,84	15
25	-60	76,83	32,18	180
26	-100	-40,39	156,43	300
27	-20	1,26	7,16	20
28	-67	81,51	-2,01	200

ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg Otimizado (MVar)	Qg máximo (MVar)
29	-67	-1,96	52,6	200
30	-300	-82,42	237,52	300
31	-10	9,67	6,89	32
32	-100	-11,13	7,56	100
33	-100	9,65	6,14	100
34	-6	-5,63	-5,64	9
35	-8	5,27	5,21	23
36	-20	12,17	19,61	70
37	-165	105,47	44,33	280
38	-8	-5,61	-0,37	23
39	-100	11,02	11,02	1000
40	-210	-5,9	-14,84	300
41	-300	59,31	5971	300
42	-100	-13,09	-15,35	100
43	-3	-13,96	1,86	9
44	-100	-17,54	-14,5	100
45	-50	95,55	111,64	155
46	-15	75,42	39,5	40
47	-8	2,39	7,53	23
48	-8	-18,33	-7,57	23
49	-200	6,56	-0,95	200
50	-8	0,28	16,42	23
51	-100	-1,84	-1,27	1000
52	-100	41,51	30,31	1000
53	-100	6,75	5,38	200
54	-1000	51,32	-302,26	1000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando-se a curva de convergência das soluções ao longo das gerações, ilustrada na Figura 19, verifica-se que a convergência é atingida apenas na 98ª geração, obtendo-se ao final uma melhoria na função objetivo de 8,01% em comparação com o caso base. Esse comportamento está relacionado ao maior número de variáveis de controle, se comparado com o caso IEEE 30 analisado inicialmente (no total um acréscimo de 658% das variáveis de controle), característica que faz com que o algoritmo exija mais iterações para encontrar uma solução otimizada.

Figura 19 - Convergência do AG vs. Gerações para o caso base - IEEE 118



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores das variáveis de controle discretas finais fornecidos pela melhor solução do AG são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Valores de *TAP* da melhor solução para o caso base - IEEE 118

Teste \ Variável	TAP_1	TAP_2	TAP_3	TAP_4	TAP_5	TAP_6	TAP_7	TAP_8	TAP_9	TAP_{10}	TAP_{11}
Caso base	0,96	0,96	0,94	0,96	1,04	1	0,92	1,09	0,9	1,02	1,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Valores de *Shunt* da melhor solução para o caso base - IEEE 118

Teste \ Variável	Bsh_1 (MVar)	Bsh_2 (MVar)	Bsh_3 (MVar)	Bsh_4 (MVar)	Bsh_5 (MVar)	Bsh_6 (MVar)	Bsh_7 (MVar)	Bsh_8 (MVar)	Bsh_9 (MVar)	Bsh_{10} (MVar)	Bsh_{11} (MVar)	Bsh_{12} (MVar)	Bsh_{13} (MVar)	Bsh_{14} (MVar)
Caso base	25	5	20	20	10	20	25	20	5	30	0	15	10	10

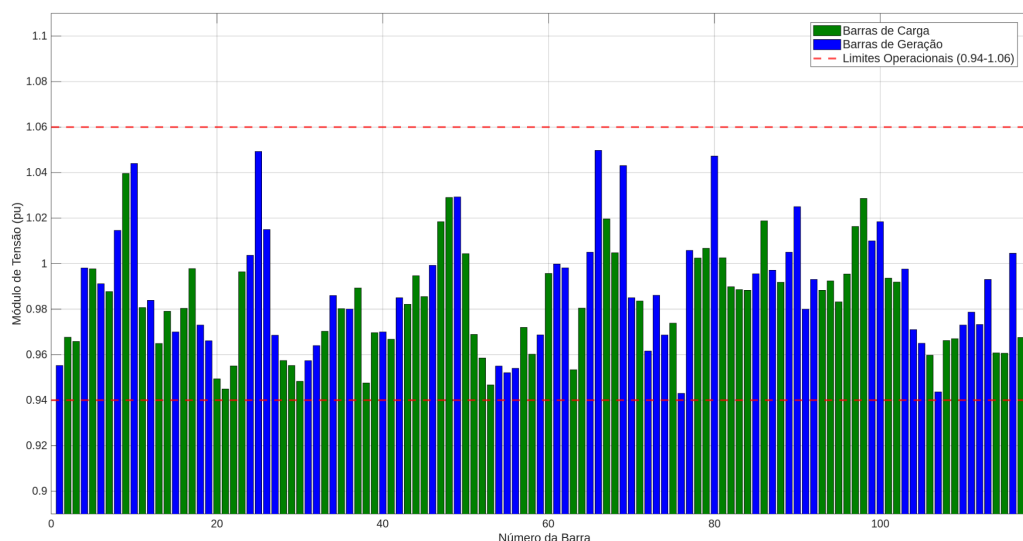
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2 Avaliação do Sistema IEEE 118 sob Contingência

- **Contingência 1: Retirada da linha 26-30.**

A retirada da linha 26-30 foi analisada com o cálculo do fluxo de potência do sistema sem otimizar o despacho de reativos, usando o *software* MATPOWER, obtendo-se perdas ativas totais de transmissão na ordem de 165,8977 MW e reativas de -312,67 MVar, portanto infactível, como pode ser observado pelos limites violados dos Geradores 43, 46 e 48, destacados em negrito, na Tabela 8. Após a execução do algoritmo de despacho de reativos, as perdas ativa e reativa obtidas são de 166,4525 MW e -297,118 MVar, respectivamente, que corresponde a uma redução de 4,37% nas perdas reativas. Os limites do sistema otimizado foram respeitados pelo AG, conforme mostrado nas Figuras 20 e 21.

Figura 20 - Tensão nos barramentos para a contingência 1 - IEEE 118 otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Potência reativa otimizada após o DOR para a contingência 1 - IEEE 118

ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
1	-5	-3,02	5,51	15
2	-300	-13,35	46,11	300
3	-13	15,91	38,91	50

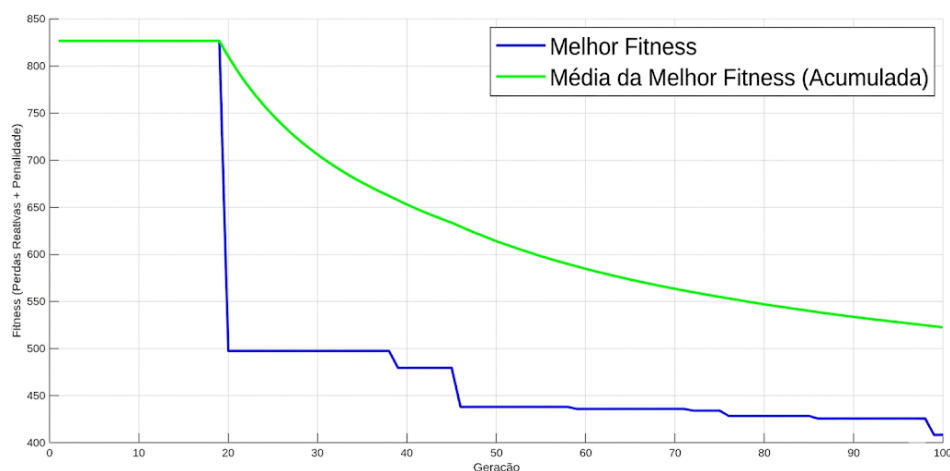
ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
4	-300	78,84	22,58	300
5	-147	-51,04	-58,77	200
6	-35	92,82	57,12	120
7	-10	18,75	-5,08	30
8	-16	37,63	14,48	50
9	-8	-5,01	13,22	24
10	-300	10,05	39,98	300
11	-47	82,9	41,08	140
12	-1000	37,19	70,43	1000
13	-300	28,28	32,38	300
14	-300	40,68	15,19	300
15	-14	4,06	11,5	42
16	-8	-9,54	17,34	24
17	-8	9,49	2,9	24
18	-300	28,75	29,11	300
19	-300	43,49	40,74	300
20	-100	-3,06	-16,18	100
21	-85	123,25	139,11	210
22	-300	3,83	7,27	300
23	-8	4,66	12,34	23
24	-8	-2,29	7,97	15
25	-60	76,87	-28,61	180
26	-100	-40,38	51,42	300
27	-20	1,24	-15,17	20
28	-67	97,62	109,1	200
29	-67	-2,21	-13,4	200
30	-300	-79,01	-26,89	300
31	-10	1,59	-5,24	32
32	-100	-10,7	-33,32	100

ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
33	-100	9,62	5,98	100
34	-6	-6,35	-1,49	9
35	-8	4,62	-1,08	23
36	-20	10,77	-18,85	70
37	-165	109,02	177,32	280
38	-8	-5,61	-3,8	23
39	-100	11,02	31,36	1000
40	-210	-5,93	-86,38	300
41	-300	59,31	171,35	300
42	-100	-13,09	-62,33	100
43	-3	-13,88	-2,45	9
44	-100	-17,54	-22,88	100
45	-50	95,63	120,2	155
46	-15	75,42	26,41	40
47	-8	2,39	9,36	23
48	-8	-18,33	-3,94	23
49	-200	6,56	-1,18	200
50	-8	0,28	17,14	23
51	-100	-1,84	-3,55	1000
52	-100	41,51	38,8	1000
53	-100	29,07	3,1	200
54	-1000	50,06	2,46	1000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que a convergência foi alcançada apenas na 81^a geração, apresentando um comportamento similar à média do melhor *fitness* referente ao caso base, como ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Convergência do AG vs. Gerações para a contingência 1 - IEEE 118



Fonte: Elaborado pelo autor.

As variáveis de controle discretas fornecidas pelo AG após o DOR são apresentadas nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Valores de *TAP* da melhor solução para o caso base - IEEE 118

Teste \ Variável	TAP_1	TAP_2	TAP_3	TAP_4	TAP_5	TAP_6	TAP_7	TAP_8	TAP_9	TAP_{10}	TAP_{11}
Contingência 1	1,02	0,95	0,9	0,94	0,94	0,99	0,94	0,94	0,94	1,1	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Valores de *Shunt* da melhor solução para o caso base - IEEE 118

Teste \ Variável	Bsh_1 (MVar)	Bsh_2 (MVar)	Bsh_3 (MVar)	Bsh_4 (MVar)	Bsh_5 (MVar)	Bsh_6 (MVar)	Bsh_7 (MVar)	Bsh_8 (MVar)	Bsh_9 (MVar)	Bsh_{10} (MVar)	Bsh_{11} (MVar)	Bsh_{12} (MVar)	Bsh_{13} (MVar)	Bsh_{14} (MVar)
Contingência 1	15	5	25	25	0	5	30	5	0	10	10	20	6	20

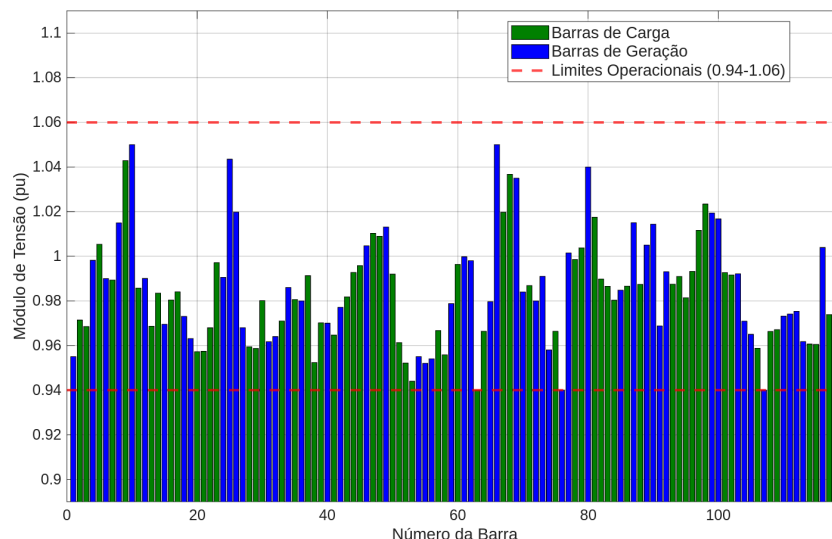
Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Contingência 2: Retirada da linha 65-68.**

O cálculo do fluxo de potência inicial, via MATPOWER, forneceu as perdas ativas totais de transmissão da ordem de 131,9821 MW e reativas de -493,4367 MVar, com infactibilidades devido ultrapassar os limites de potência reativa dos geradores 9, 16, 43, 46 e 48, os quais estão destacados em negrito para os ID's mencionados, como apresentado na

tabela 9. Após a execução do algoritmo de despacho de reativos, as perdas ativas registradas são de 134,4589 MW e -430,8410 MVar, totalizando uma redução de 12,69% nas perdas reativas. Os limites de operação são factíveis para a solução encontrada, conforme ilustrado na Figura 22 e apresentado na Tabela 11.

Figura 22 – Magnitude de tensão nos barramentos para a contingência 2- IEEE 118



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Potência reativa otimizada após o DOR para a contingência 2 - IEEE 118

ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
1	-5	-3,11	-4,98	15
2	-300	-15,02	-55,73	300
3	-13	15,93	9,57	50
4	-300	63,15	60,42	300
5	-147	-51,04	-50,93	200
6	-35	91,29	92,34	120
7	-10	7,10	25,74	30
8	-16	28,38	47,75	50
9	-8	-14,32	-7,82	24
10	-300	-14,45	-13,85	300

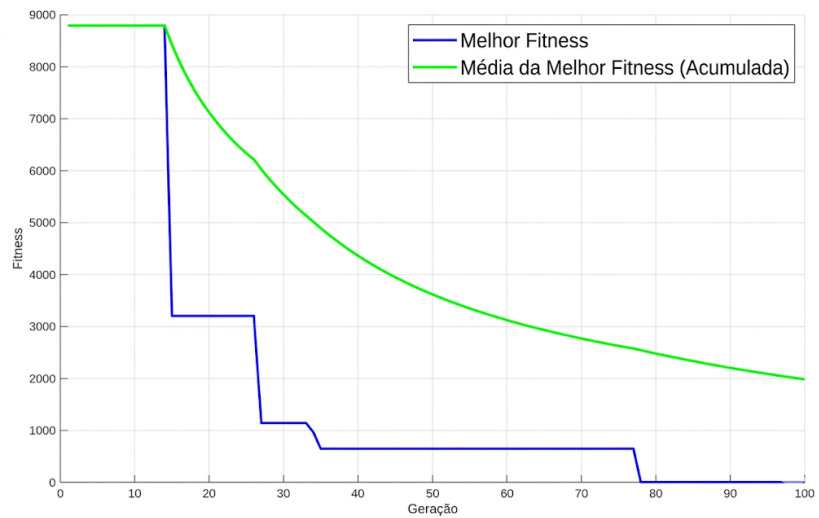
ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
11	-47	49,89	97,08	140
12	-1000	10,00	-34,85	1000
13	-300	3,95	8,45	300
14	-300	32,57	27,58	300
15	-14	-16,48	9,82	42
16	-8	-20,65	-0,55	24
17	-8	7,75	-0,64	24
18	-300	28,49	36,15	300
19	-300	41,00	35,76	300
20	-100	-5,32	4,18	100
21	-85	114,30	45,01	210
22	-300	3,78	16,28	300
23	-8	4,66	7,44	23
24	-8	-2,30	9,68	15
25	-60	76,90	5,57	180
26	-100	-40,37	74,58	300
27	-20	1,22	-16,94	20
28	-67	104,67	1,28	200
29	-67	-2,42	85,13	200
30	-300	-76,23	-289,51	300
31	-10	8,73	10,06	32
32	-100	-11,16	-10,43	100
33	-100	9,63	9,64	100
34	-6	-5,70	-1,53	9
35	-8	5,18	4,55	23
36	-20	11,98	-12,76	70
37	-165	108,87	59,73	280
38	-8	-5,61	-7,92	23
39	-100	11,02	11,08	1000

ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
40	-210	-5,91	-57,95	300
41	-300	59,31	154,14	300
42	-100	-13,09	-70,7	100
43	-3	-13,94	8,9	9
44	-100	-17,54	-0,98	100
45	-50	95,57	113,02	155
46	-15	75,42	9,64	40
47	-8	2,39	13,27	23
48	-8	-18,34	7,76	23
49	-200	6,56	-3,41	200
50	-8	0,28	17,95	23
51	-100	-1,84	-9,62	1000
52	-100	41,51	41,76	1000
53	-100	6,67	-73,3	200
54	-1000	86,86	418,75	1000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustrado na Figura 23, a convergência do AG foi atingida somente na 77ª geração. Verifica-se, novamente, que o padrão de curva de convergência observado no caso base repete-se para a contingência 2.

Figura 23 - Convergência do AG vs. gerações para a contingência 2 - IEEE 118



Fonte: Elaborado pelo autor.

As variáveis de controle discretas fornecidas pelo AG após o DOR estão apresentadas nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Valores de TAP da melhor solução para a contingência 2 - IEEE 118

Teste \ Variável	TAP_1	TAP_2	TAP_3	TAP_4	TAP_5	TAP_6	TAP_7	TAP_8	TAP_9	TAP_{10}	TAP_{11}
Contingência 1	0,99	0,99	0,96	0,93	0,92	0,99	0,93	0,9	0,94	1	1,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 - Valores de $Shunt$ da melhor solução para a contingência 2 - IEEE 118

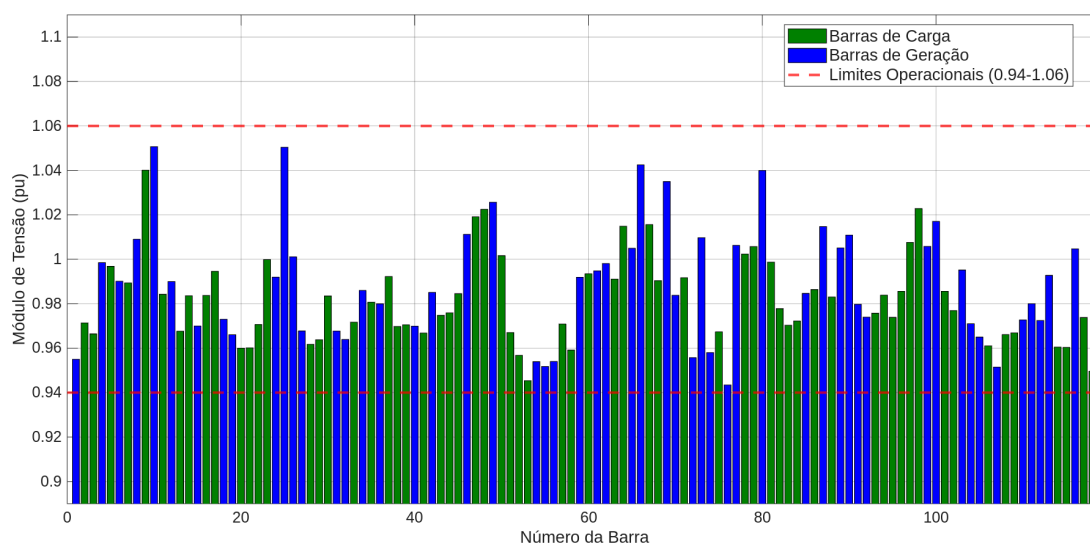
Teste \ Variável	Bsh_1 (MVar)	Bsh_2 (MVar)	Bsh_3 (MVar)	Bsh_4 (MVar)	Bsh_5 (MVar)	Bsh_6 (MVar)	Bsh_7 (MVar)	Bsh_8 (MVar)	Bsh_9 (MVar)	Bsh_{10} (MVar)	Bsh_{11} (MVar)	Bsh_{12} (MVar)	Bsh_{13} (MVar)	Bsh_{14} (MVar)
Contingência 1	25	15	25	10	30	5	10	10	10	25	15	15	5	6

Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Contingência 3: Retirada da linha 89-92.**

Para analisar a retirada da linha 89-92, executou-se o cálculo do fluxo de potência inicial via MATPOWER, obtendo-se perdas ativas totais na transmissão da ordem de 134,1740 MW e reativas de -545,9835 MVar, porém infactível com restrições violadas nos geradores 9, 16, 43, 46 e 48, conforme destacado em negrito na tabela 14. Após a execução do algoritmo de despacho de reativos, as perdas ativas registradas são de 136,4260 MW e -486,1807 MVar, o que corresponde a uma redução de 10,95% nas perdas reativas. As restrições físicas e operacionais do sistema otimizado são factíveis após simulação do AG, conforme ilustrado na Figura 24 e apresentado na Tabela 14.

Figura 24 – Magnitudes de tensão nos barramentos para a contingência 3 - IEEE 118



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 - Potência reativa otimizada após o DOR para a contingência 3 - IEEE 118

ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
1	-5	-3,10	-0,23	15
2	-300	-15,01	58,27	300
3	-13	15,93	25,96	50
4	-300	63,13	-91,61	300

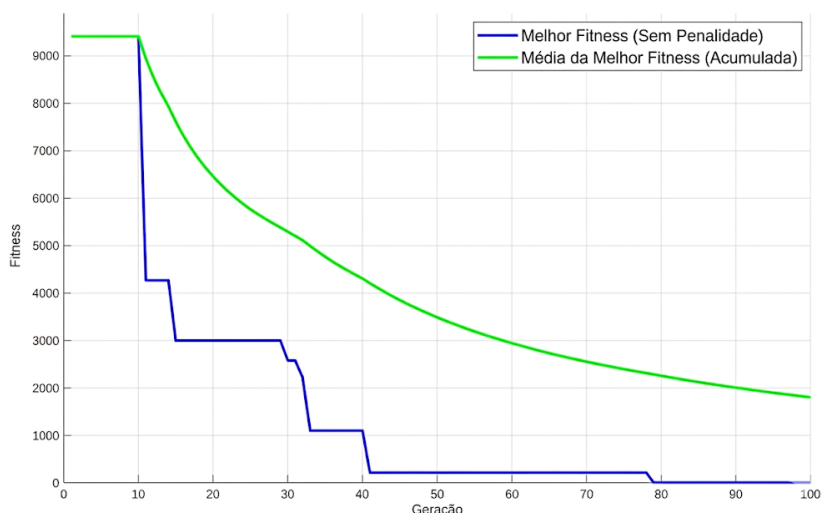
ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
5	-147	-51,04	-39,77	200
6	-35	91,29	96,02	120
7	-10	7,17	-2,21	30
8	-16	28,43	21,45	50
9	-8	-14,27	4,97	24
10	-300	-14,97	-3,53	300
11	-47	50,07	91,32	140
12	-1000	10,14	-43,48	1000
13	-300	3,99	1,00	300
14	-300	32,59	33,58	300
15	-14	-16,26	-12,92	42
16	-8	-20,86	-7,46	24
17	-8	7,72	-2,38	24
18	-300	28,44	26,27	300
19	-300	41,05	40,81	300
20	-100	-4,94	-3,76	100
21	-85	116,30	133,95	210
22	-300	3,93	-13,05	300
23	-8	4,67	0,67	23
24	-8	-2,28	4,78	15
25	-60	76,82	54,90	180
26	-100	-40,40	102,85	300
27	-20	1,27	8,88	20
28	-67	81,11	71,62	200
29	-67	-1,84	-48,16	200
30	-300	-84,70	-47,89	300
31	-10	9,99	-4,76	32
32	-100	-11,12	-38,02	100
33	-100	9,66	40,68	100

ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
34	-6	-5,47	5,63	9
35	-8	5,19	5,61	23
36	-20	22,20	37,40	70
37	-165	109,78	191,68	280
38	-8	20,75	21,76	23
39	-100	11,02	11,05	1000
40	-210	-8,63	-46,89	300
41	-300	86,55	157,27	300
42	-100	8,08	-11,86	100
43	-3	40,48	5,22	9
44	-100	-16,51	-23,73	100
45	-50	94,55	149,33	155
46	-15	75,42	20,19	40
47	-8	2,39	11,65	23
48	-8	-18,34	0,50	23
49	-200	6,56	6,09	200
50	-8	0,28	7,51	23
51	-100	-1,84	-1,51	1000
52	-100	41,51	37,96	1000
53	-100	6,76	7,01	200
54	-1000	51,32	-139,88	1000

Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando o perfil da curva de convergência do AG, ilustrada na figura 25, verifica-se uma melhor convergência em relação aos casos de contingência 1 e 2. A convergência é atingida sem penalidade na 41ª geração, tendo o melhor *fitness* na 78ª geração.

Figura 25 - Convergência do AG vs. gerações para a contingência 3 - IEEE 118



Fonte: Elaborado pelo autor.

As variáveis de controle discretas fornecidas pelo AG após o DOR encontram-se nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Valores de TAP da melhor solução para a contingência 3 - IEEE 118

Teste \ Variável	TAP_1	TAP_2	TAP_3	TAP_4	TAP_5	TAP_6	TAP_7	TAP_8	TAP_9	TAP_{10}	TAP_{11}
Contingência 3	1,07	0,97	0,93	9,97	0,95	1	0,935	0,97	0,96	0,96	0,99

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 - Valores de $Shunt$ da melhor solução para a contingência 3 - IEEE 118

Teste \ Variável	Bsh_1 (MVar)	Bsh_2 (MVar)	Bsh_3 (MVar)	Bsh_4 (MVar)	Bsh_5 (MVar)	Bsh_6 (MVar)	Bsh_7 (MVar)	Bsh_8 (MVar)	Bsh_9 (MVar)	Bsh_{10} (MVar)	Bsh_{11} (MVar)	Bsh_{12} (MVar)	Bsh_{13} (MVar)	Bsh_{14} (MVar)
Contingência 3	25	0	30	30	5	15	15	0	0	0	5	30	5	10

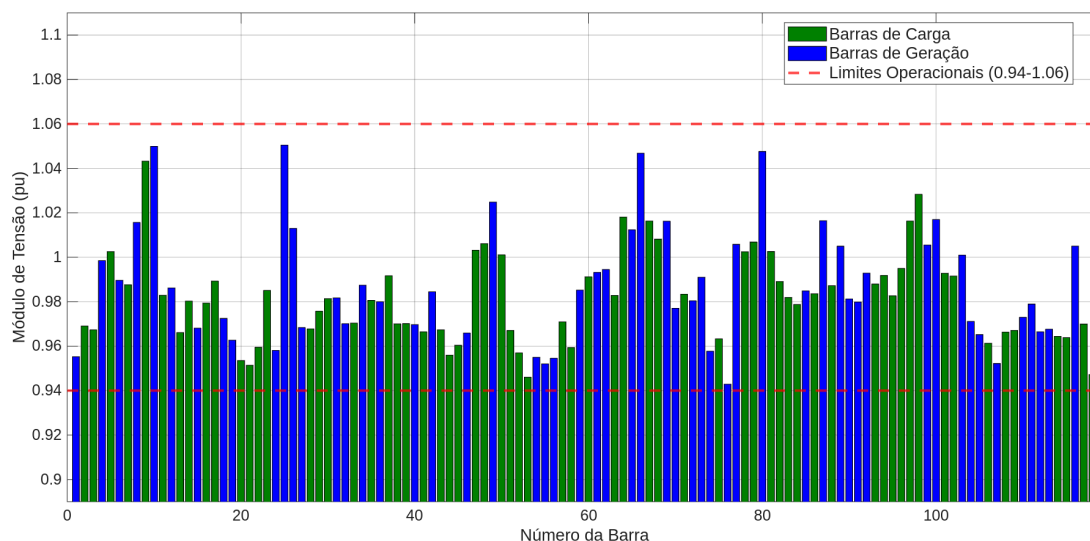
Fonte: Elaborado pelo autor.

● Contingência 4: Retirada do transformador da linha 5-8

Para a quarta contingência, o cálculo do fluxo de potência inicial forneceu um total de perdas ativas totais de transmissão na ordem de 134,1613 MW e reativas de -547,5457 MVar, sendo infactível devido a violação de restrições nos geradores 9, 16, 46 e 48, como pode ser identificado na tabela 17. Após a execução do algoritmo de despacho de reativos, as perdas ativas registradas são de 137,0436 MW e reativas de -489,2033 MVar, obtendo-se uma

redução de 10,66% nas perdas reativas. Os limites das restrições do sistema otimizado são obedecidos pelo AG, conforme ilustrado na Figura 26 e apresentado na Tabela 17.

Figura 26 - Tensão nos barramentos para a contingência 4 - IEEE 118 otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 - Potência reativa otimizada após o DOR para a contingência 4 - IEEE 118

ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
1	-5	-1,51	0,59	15
2	-300	22,15	-12,03	300
3	-13	21,31	20,3	50
4	-300	13,95	13,9	300
5	-147	-51,04	-52,34	200
6	-35	94,33	72,48	120
7	-10	7,32	9,52	30
8	-16	28,42	36,38	50
9	-8	-14,28	-3,41	24
10	-300	-14,9	-74,88	300
11	-47	50,05	76,43	140

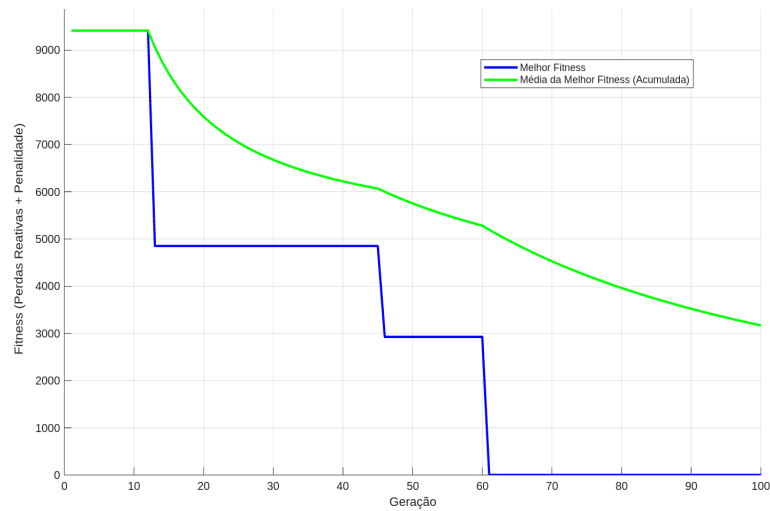
ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
12	-1000	10,14	5,5	1000
13	-300	3,99	-15,34	300
14	-300	32,58	59,51	300
15	-14	-16,28	22,79	42
16	-8	-20,82	10,35	24
17	-8	7,73	-6,53	24
18	-300	28,45	27,07	300
19	-300	41,03	40,61	300
20	-100	-5,03	-49,57	100
21	-85	115,87	193,75	210
22	-300	3,9	-2,03	300
23	-8	4,66	0,94	23
24	-8	-2,29	7,96	15
25	-60	76,83	-14,16	180
26	-100	-40,39	165,81	300
27	-20	1,26	-6,22	20
28	-67	81,5	38,33	200
29	-67	-1,95	-39,66	200
30	-300	-82,49	251,04	300
31	-10	9,68	9,33	32
32	-100	-11,13	8,19	100
33	-100	9,65	17,21	100
34	-6	-5,62	-3,75	9
35	-8	5,27	9	23
36	-20	12,45	14,35	70
37	-165	105,46	163,8	280
38	-8	-5,03	-0,51	23
39	-100	11,02	8,42	1000
40	-210	-5,94	-5,83	300

ID do gerador	Qg mínimo (MVar)	Qg inicial (MVar)	Qg (MVar)	Qg máximo (MVar)
41	-300	59,93	50,1	300
42	-100	-13,09	-11,14	100
43	-3	-2,93	8,03	9
44	-100	-17,51	-28,93	100
45	-50	95,1	109,65	155
46	-15	75,42	39,31	40
47	-8	2,39	7,96	23
48	-8	-18,33	6,19	23
49	-200	6,56	12,02	200
50	-8	0,28	-3,6	23
51	-100	-1,84	-3,18	1000
52	-100	41,51	28,47	1000
53	-100	6,74	-71,73	200
54	-1000	51,32	-322,65	1000

Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva de convergência obtida pelo algoritmo está ilustrada na Figura 27. A convergência na simulação da contingência 4 é atingida em torno da 62ª geração. Obtém-se uma redução pequena da geração de reativos totais, quando comparada com o caso base, porém uma solução factível, com todas as restrições de limite atendidas.

Figura 27 - Convergência do AG vs. gerações para a contingência 4 - IEEE 118



Fonte: Elaborado pelo autor.

As variáveis de controle obtidas, seguindo a ordem em que aparecem nos barramentos ou ramos, fornecidas pelo AG após o DOR, tanto para as variáveis discretas TAP , quanto Bsh encontram-se nas Tabelas 18 e 19, respectivamente.

Tabela 18- Valores de TAP da melhor solução para a contingência 4 - IEEE 118

Teste \ Variável	TAP_1	TAP_2	TAP_3	TAP_4	TAP_5	TAP_6	TAP_7	TAP_8	TAP_9	TAP_{10}
Contingência 4	0,96	0,95	0,95	0,94	1	0,94	1,1	0,94	0,99	0,99

Fonte:Elaborado pelo autor.

Tabela 19 - Valores de $Shunt$ da melhor solução para a contingência 4 - IEEE 118

Teste\ Variável	Bsh_1 (MVar)	Bsh_2 (MVar)	Bsh_3 (MVar)	Bsh_4 (MVar)	Bsh_5 (MVar)	Bsh_6 (MVar)	Bsh_7 (MVar)	Bsh_8 (MVar)	Bsh_9 (MVar)	Bsh_{10} (MVar)	Bsh_{11} (MVar)	Bsh_{12} (MVar)	Bsh_{13} (MVar)	Bsh_{14} (MVar)
Contingência 4	25	30	25	0	10	15	0	25	0	25	0	0	0	30

Fonte: Elaborado pelo autor.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho teve-se como objetivo principal propor, desenvolver e validar uma ferramenta computacional baseada em um AG para a resolução do complexo problema de DOR em Sistemas Elétricos de Potência. O problema de fluxo de potência ótimo, de natureza inerentemente não linear, não convexa e com variáveis de controle de domínio misto (contínuas e discretas), foi concebido para minimizar as perdas de potência reativa e manter o perfil de tensão estritamente dentro dos limites operacionais. A avaliação da metodologia foi conduzida através de simulações de fluxo de potência no *software* MATPOWER, testando o algoritmo sob condições normais de operação (caso base) e sob cenários críticos de contingência.

A análise dos resultados obtidos comprovou a eficácia, a precisão e a robustez da técnica meta-heurística proposta. No sistema teste de pequeno porte, o sistema IEEE 30 barras, o algoritmo demonstrou uma rápida taxa de convergência (atingindo o ótimo na 27ª geração). Analisando-se a segurança operativa, a simulação da contingência mais crítica de saída da linha de transmissão atestou a capacidade de auto restauração do sistema via otimização, uma vez que o AG readequou o despacho compensatório sem permitir a violação dos limites físicos de injeção de reativos dos geradores ou dos limites de magnitude de tensão nos barramentos.

A verificação da escalabilidade do algoritmo, uma etapa fundamental no desenvolvimento de metodologias de otimização, foi validada com sucesso através do sistema de médio porte IEEE 118 barras, o qual impõe um desafio combinatório severo devido à necessidade de ajustar 79 variáveis de controle. O algoritmo não apenas mitigou o excesso de compensação reativa presente no estado inicial, como forneceu resultados factíveis para as quatro condições severas de contingência testadas.

Conclui-se, portanto, que a aplicação da inteligência computacional, materializada através do AG desenvolvido neste trabalho, atende plenamente aos exigentes requisitos de segurança e economicidade das redes de transmissão. Diante da robustez demonstrada tanto na otimização de regimes normais de operação quanto na restauração da viabilidade sistêmica frente a cenários severos de contingência, a ferramenta desenvolvida consolida-se como um recurso computacional viável, flexível e altamente confiável para o suporte à tomada de decisão estratégica nos Centros de Operação do Sistema (COS), garantindo a integridade e a eficiência contínua da matriz energética.

7. REFERÊNCIAS

- GRANVILLE, S. Optimal reactive dispatch through interior point methods. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 136-146, 1994.
- GRANVILLE, S.; LIMA, M. C. A. Application of decomposition techniques to VAR planning: methodological & computational aspects. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 1780–1787, 1994.
- GRANVILLE, S.; PEREIRA, M. V. F.; MONTICELLI, A. J. An integrated methodology for VAR sources planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 2473-2476, 1988.
- HISIO, Y. *et al.* A computer package for optimal multi-objective VAR planning in large scale power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 668-676, 1994.
- IBA, K. Reactive power by genetic algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 685-692, 1994.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE 30 Bus System**. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://icseg.itl.illinois.edu/ieee-30-bus-system/>. Acesso em: 25 nov. 2025.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE 118 Bus System**. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://icseg.itl.illinois.edu/ieee-118-bus-system/>. Acesso em: 25 nov. 2025.
- LEBOW, W. M. *et al.* A hierarchical approach to reactive volt-ampère (VAR) optimization in system planning. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [s. l.], v. 104, n. 8, p. 2051-2057, 1985.
- LIU, M.; TSO, S.; CHENG, Y. An extended nonlinear primal-dual interior-point algorithm for reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 982–991, 2002.

LOPEZ, J. C. *et al.* A Multi-Stage Stochastic Non-Linear Model for Reactive Power Planning Under Contingencies. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 1503-1514, 2013.

MANTOVANI, J. R. S.; GARCIA, A. V. A heuristic method for reactive power planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 68–74, 1996.

MANTOVANI, J. R. S.; GARCIA, A. V.; MODESTO, S. A. G. Var planning using genetic algorithm and linear programming. **IET Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, [s. l.], v. 148, n. 3, p. 257–262, 2001.

OLIVEIRA, W. C. de. **Fluxo de potência ótimo probabilístico com fontes de geração renováveis - abordagem através de técnica de otimização matheurística**. 2020. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira, 2020.

POWER ENGINEERING SOCIETY. **Tutorial course, Optimal power flow solution techniques, Requirements and Challenges**, PES 96 TP 111-0, p. 36-51, 1996.

SHAHIDEHPOUR, S.; DEEB, N. **An overview of the reactive power allocation in electric power systems**. *Electric Power Components and Systems*, [s. l.], v. 18, n. 6, p. 495–518, 1990.

SUN, D. *et al.* **Optimal power flow by Newton approach**. *IEEE Transactions on Power Systems*, [s. l.], v. 103, n. 10, p. 2864–2880, 1984.

TANGPATIPHAN, K.; YOKOYAMA, A. Optimal power flow with steady-state voltage stability consideration using improved evolutionary programming. *In: IEEE BUCHAREST POWERTECH, 2009, Bucharest. Proceedings [...]*. Bucharest: IEEE, 2009. p. 1-7.

VARADARAJAN, M.; SWARUP, K. Differential evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [s. l.], v. 30, n. 8, p. 435–441, 2008.

WU, Q.; MA, J. Power system optimal reactive power dispatch using evolutionary programming. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 1243–1249, 1995.

ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SÁNCHEZ, C. E.; THOMAS, R. J. MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 26, n. 1, p. 12-19, fev. 2011.