

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

GUSTAVO PACCOLA ROSA

**ANÁLISE DO IMPACTO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E CARGAS
ELÉTRICAS ESPECIAIS NO PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO DE REDES
DE DISTRIBUIÇÃO: Abordagem através de um algoritmo genético dedicado**

Ilha Solteira
2024

GUSTAVO PACCOLA ROSA

**ANÁLISE DO IMPACTO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E CARGAS
ELÉTRICAS ESPECIAIS NO PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO DE REDES
DE DISTRIBUIÇÃO: Abordagem através de um algoritmo genético dedicado**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista

José Roberto Sanches Mantovani
Orientador

Juan Manuel Home Ortiz
Co-orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R788a Rosa, Gustavo Paccola.
Análise do impacto da geração fotovoltaica e cargas elétricas especiais no planejamento de curto prazo de redes de distribuição: abordagem através de um algoritmo genético dedicado / Gustavo Paccola Rosa. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
56 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2024

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani

Co-orientador: Juan Manuel Home Ortiz

Inclui bibliografia

1. Planejamento de redes de distribuição. 2. Geração fotovoltaica. 3. Carros híbridos. 4. Meta-heurística. 5. Algoritmo genético. 6. MATLAB.


Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB-8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

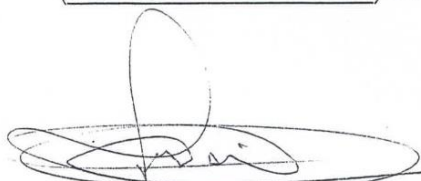
FICHA DE APROVAÇÃO

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

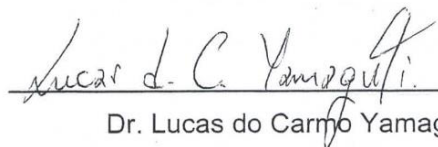
Aos seis dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente **Gustavo Paccola Rosa**, matriculado sob o nº 191051691, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani, o Dr. Lucas do Carmo Yamaguti e o Dr. Juan Manuel Home Ortiz, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**ANÁLISE DO IMPACTO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E CARGAS ELÉTRICAS ESPECIAIS NO PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO: Abordagem através de um algoritmo genético dedicado**", obtendo a nota 10,0 (DEZ) e conceito Aprovado.



Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani
- orientador-



Gustavo Paccola Rosa
- discente-



Dr. Lucas do Carmo Yamaguti
- Membro da Banca -



Dr. Juan Manuel Home Ortiz
- Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que, de alguma maneira, contribuíram e me apoiaram nessa caminhada, principalmente aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Destaco os meus agradecimentos inicialmente aos meus pais, Eliane e Reginaldo, e a minha irmã, Mariana, que sempre forneceram todo o apoio e carinho durante a minha graduação. Agradeço por estarem presentes em todas as etapas da minha educação e pela confiança depositada neste caminho. Com certeza, essa trajetória não seria possível sem vocês.

Em seguida a minha namorada, Mayara, que me incentivou a ingressar, e esteve comigo durante toda a minha experiencia científica. Obrigado pelo apoio, pela força e pela inspiração nesse processo.

Deixo meu agradecimento, a república Casa da Mãe Joana e a todos meus irmãos que me acompanharam durante a graduação. Levarei todos comigo para a vida, sou grato pelo apoio e suporte nesses anos de moradia.

Também sou grato aos professores e todos os profissionais presentes na minha busca por conhecimento. Agradeço o aprendizado e experiencia compartilhada.

E por fim, em especial, ao meu orientador Dr. José Roberto Sanches Mantovani, pela oportunidade científica fornecida, por toda atenção e confiança no trabalho desenvolvido, e ao Dr. Juan Manuel Home Ortiz, por acompanhar e apoiar todo esse processo. Obrigado a vocês pelo conhecimento teórico e prático repassado, que foram, e serão, importantes para meu desenvolvimento e início de trajetória como engenheiro.

“A formulação de um problema frequentemente é mais essencial do que sua solução, que pode ser apenas uma questão de habilidade matemática ou experimental. Levantar novas questões, novas possibilidades, ver questões antigas de um novo ângulo, exige imaginação criadora e assinala reais avanços na ciência.”

– Albert Einstein

RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste em analisar o impacto das gerações fotovoltaicas e de cargas especiais, veículos híbridos *plug-in*, para o planejamento de curto prazo de redes de distribuição de energia, considerando um modelo de otimização genérico de programação não linear. Para solução desse modelo propõe-se um algoritmo genético que otimiza uma função objetivo que considera custos operacionais e financeiros, e compra de energia do mercado. Instalação de bancos de capacitores é considerada por meio de custos fixos, enquanto perdas técnicas e compra de energia são consideradas custos variáveis. Os geradores fotovoltaicos são modelados para fornecer potência constante, e com fator de potência específico que mantenha a qualidade da energia da rede. Para os veículos híbridos, considera-se a sua demanda, incluindo a modelagem da sua bateria, o perfil de uso dos veículos e os horários de maior demanda. Para implementar a meta-heurística utilizou-se o *software* MATLAB e como ferramenta auxiliar para resolver o problema de fluxo de potência, o *software* de código aberto MatPower. Para validar a metodologia proposta, foram utilizados o sistema IEEE33 barras e um sistema de 134 barras. O algoritmo genético implementado fornece resultados satisfatórios e próximos aos encontrados na literatura em cenários menos complexos e em sistemas de pequeno porte, sua eficácia é reduzida à medida que a complexidade do sistema aumenta. No entanto, é possível identificar e compreender os impactos técnicos e financeiros do planejamento das redes de distribuição e o comportamento do algoritmo genético. Os aspectos financeiros desempenham um papel importante na função objetivo, e a geração fotovoltaica e os carros híbridos interferem na demanda da rede de maneiras opostas, com os painéis solares reduzindo e os carros híbridos aumentando a demanda. O algoritmo genético é uma ferramenta útil para o planejamento de redes de distribuição, desde que seja implementado de maneira adequada e leve em consideração os fundamentos teóricos das meta-heurísticas e as características físicas da rede.

Palavras-chave: Sistema de energia. Redes de distribuição. Planejamento de redes de distribuição. Geração fotovoltaica. Carros híbridos. Meta-Heurística. Algoritmo Genético. MATLAB. MatPower.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the impact of photovoltaic generations and special loads, plug-in hybrid vehicles, for short-term planning of power distribution networks, considering a generic nonlinear programming optimization model. To solve this model, a genetic algorithm is proposed that optimizes an objective function that considers operational and financial costs, and energy purchase from the market. Installation of capacitor banks is considered through fixed costs, while technical losses and energy purchase are considered variable costs. Photovoltaic generators are modeled to provide constant power, with a specific power factor that maintains the quality of the network's energy. For hybrid vehicles, their demand is considered, including modeling their battery, vehicle usage profile, and peak demand times. To implement the meta-heuristic, MATLAB software was used, and as an auxiliary tool to solve the power flow problem, the open-source software MatPower was used. To validate the proposed methodology, the IEEE33 bus system and a 134 bus system were used. The implemented genetic algorithm provides satisfactory results and close to those found in the literature in less complex scenarios and small systems, its effectiveness is reduced as the system complexity increases. However, it is possible to identify and understand the technical and financial impacts of distribution network planning and the behavior of the genetic algorithm. Financial aspects play an important role in the objective function, and photovoltaic generation and hybrid cars interfere with network demand in opposite ways, with solar panels reducing and hybrid cars increasing demand. The genetic algorithm is a useful tool for distribution network planning, as long as it is implemented robustly and takes into account the characteristics of meta-heuristics and the physical characteristics of the network.

Keywords: Power system. Distribution networks. Planning of distribution networks. Photovoltaic generation. Hybrid cars. Meta-Heuristics. Genetic Algorithm. MATLAB. MATPOWER.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo processo de crossover	22
Figura 2 – Exemplo processo de mutação	23
Figura 3 – Ilustração evolutiva de um algoritmo genético	24
Figura 4 – Diagrama Ilustrativo do AG	41
Figura 5 – Evolução completa do AG vs. Número de gerações - Confiabilidade	46
Figura 6 – Evolução inicial do AG vs. Número de gerações - 33 barras	48
Figura 7 – Evolução convergida do AG vs. Número de gerações - 33 barras	49
Figura 8 – Evolução inicial do AG vs. Número de gerações - 134 barras	49
Figura 9 – Evolução convergida do AG vs. Número de gerações - 134 barras	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Fator de correção de demanda para 24 horas	34
Tabela 2 – Geração Fotovoltaica para 24 horas	38
Tabela 3 – Exemplos de operação da bateria	39
Tabela 4 – Consumo eletro postos para 24 horas	40
Tabela 5 – Valores iniciais do sistema de 33 barras	44
Tabela 6 – Valores iniciais do sistema de 134 barras.	44
Tabela 7 – Resultados sobre a confiabilidade e otimização do AG	45
Tabela 8 – Resultados obtidos para o sistema de 33 barras	47
Tabela 9 – Resultados obtidos para o sistema de 134 barras.....	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de representações em relação ao problema estudado	21
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Unesp	Universidade Estadual Paulista
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
SIN	Sistema Interligado Nacional
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
REN	Resolução Normativa
FP	Fluxo de Potência
PQ	Barras de carga
PV	Barras de geração
AG	Algoritmo Genético
CR	Cromossomo
BC	Barras candidatos
GD	Geração distribuída
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
FV	Inversores fotovoltaicos
FCEV	Veículos elétricos a célula de combustível
BEV	Veículos elétricos a bateria
PHEV	Veículos elétricos híbridos
C	Capacidade da bateria
G2V	Fonte de carga
V2G	Fonte de energia
SOC	<i>State of Charge</i>
AER	<i>All Electric Range</i>
EF	Eficiências

NOMENCLATURA

P : Potência ativa

S : Potência aparente

Q : Potência reativa

i : Indivíduo da população

f_i : Avaliação do indivíduo i na população

S_i : Potência aparente nó i

P_i : Potência ativa do nó i

Q_i : Potência reativa do nó i

V_i : Tensão complexa do nó i

$|V_i|$: Magnitude da tensão nó i

θ_i : Ângulo de fase do nó i

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.2 MOTIVAÇÃO.....	16
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	17
2 REVISÃO DE LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 META-HEURÍSTICAS	18
2.2 ALGORITMOS GENÉTICOS	20
2.3 REDES DE DISTRIBUIÇÃO.....	25
2.4 ENERGIA SOLAR.....	27
2.5 CARROS HÍBRIDOS ELÉTRICOS	28
3 METODOLOGIA	32
4 RESULTADOS.....	43
5 CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica alimentam, através de diferentes fontes de energia, cargas residenciais e comerciais, setor de serviços, empresas e indústrias. Os sistemas de distribuição são tradicionalmente planejados com base em projeções do crescimento temporal e espacial das cargas elétricas. As previsões realizadas são essenciais para dimensionar a infraestrutura de distribuição necessária e manter índices de qualidade e confiabilidade exigidos pelas agências reguladoras. No entanto, ao longo do tempo essas projeções frequentemente necessitam de reavaliações significativas devido às mudanças dinâmicas que ocorrem nas demandas de energia, como por exemplo, a adição de novos consumidores, a expansão de áreas industriais, comerciais e residenciais; estas alterações introduzem, portanto, incertezas complexas no processo de planejamento.

A dinâmica do planejamento de sistemas de distribuição é ainda mais desafiadora devido às novas tecnologias disruptivas, que estão redefinindo a maneira como a energia é gerada, distribuída e consumida. A geração fotovoltaica e os veículos híbridos elétricos com conexão à rede são exemplos proeminentes dessas tecnologias. Com suas vantagens ambientais e econômicas, essas tecnologias estão rapidamente ganhando aceitação entre os consumidores de baixa tensão. No entanto, a adoção em massa dessas tecnologias cria um cenário operacional novo e complexo para as redes elétricas.

O surgimento da geração fotovoltaica implica em uma geração descentralizada e intermitente, desafiando a estabilidade da rede e os padrões de fluxo de energia convencionais. Ao mesmo tempo, a disseminação de veículos híbridos elétricos introduz uma nova categoria de carga com requisitos de recarga variada e potencial impacto na demanda em diferentes períodos do dia, exigindo uma reavaliação fundamental das abordagens tradicionais de planejamento e controle de sistemas de distribuição.

Neste contexto, o desenvolvimento de modelos matemáticos de otimização e técnicas de solução são de grande importância para direcionar as ações e investimentos das empresas distribuidoras. Assim, altos custos de investimentos e de

operação, somados ao fato que o sistema de distribuição é o que se conecta diretamente com os consumidores, ressaltam a importância do planejamento da expansão destes sistemas e a necessidade de atender os consumidores com qualidade de fornecimento de energia, altos índices de confiabilidade e custos competitivos. Ferramentas computacionais, desenvolvidas a partir de técnicas de otimização e heurísticas adotadas no processo de planejamento, podem proporcionar ganhos substanciais nos custos de expansão e operação.

Uma grande parte dos algoritmos de otimização convencionais é do tipo determinístico, e dentre eles, existem aqueles que são baseados na informação do gradiente da função. Porém, quando se trata de problemas altamente não lineares, não convexos, não diferenciáveis e não convexos, estes métodos determinísticos baseados em gradiente apresentam problemas na convergência, e por muitas vezes ficam estagnados em soluções ótimas locais.

Os algoritmos genéticos, introduzidos por John Holland em 1975, têm sido cada vez mais explorados na solução de problemas envolvendo busca e otimizações, principalmente pela robustez e simplicidade que oferecem. Trata-se de uma classe de algoritmos de otimização biologicamente inspirados, seguindo a teoria evolucionária de Charles Darwin, onde os seres sofrem mutações e os mais aptos (melhores) vão sobreviver. Então, investigar como ocorre tal seleção natural e efetuar simulações, permite gerar resultados com as características desejadas.

Neste trabalho, tem-se como objetivo explorar e analisar o impacto da integração da geração fotovoltaica e das cargas elétricas especiais no processo de planejamento de curto prazo de redes de distribuição. Investigam-se as transformações nos padrões de demanda, a volatilidade da geração solar, os desafios na manutenção da qualidade da energia elétrica e as implicações econômicas. Para superar esses desafios, é necessário desenvolver métodos de planejamento que considerem não apenas os aspectos técnicos, mas também os custos operacionais e de investimento.

O desenvolvimento de um algoritmo genético foi portanto a solução proposta, buscando robustez e resultados eficazes para a análise e planejamento de sistemas de distribuição. Nesse contexto, a proposta é desenvolver uma metodologia que considere tanto o estado de operação da rede quanto as perdas técnicas nos

condutores e que permita avaliar diversas configurações de circuitos de distribuição, com diferentes números de nós.

Um aspecto desafiador no problema de planejamento é a integração das fontes de geração fotovoltaicas e das cargas elétricas especiais. Para determinar o estado da rede e as perdas técnicas sob diferentes cenários de operação, é empregado o software do MATLAB, e da ferramenta computacional *MatPower*. As fontes de geração fotovoltaicas e as cargas especiais são alocadas no secundário dos transformadores de média para baixa tensão, usando modelos equivalentes. Isso permite uma análise abrangente dos impactos dessas tecnologias emergentes no sistema de distribuição. Ressalta-se que o foco deste estudo não está na busca de soluções ideais para a alocação dos equipamentos nos nós de baixa tensão, mas sim na modelagem das tecnologias emergentes para avaliar seus impactos nas redes de distribuição. A metodologia desenvolvida é testada em um sistema teste do IEEE de 33 nós e um sistema real de pequeno porte de 134 nós.

1.2 MOTIVAÇÃO

Nste trabalho, realizou-se o estudo, de uma forma geral, nos métodos empregados para o estudo do planejamento de sistemas de distribuição encontrados na literatura: Métodos Heurísticos (PONNAVAIKKO; RAO, 1987, citado por COSSI, 2008) e as Meta-Heurísticas – Algoritmos Evolutivos (COSSI; ROMERO; MANTOVANI, 2005, BERNAL AGUSTÍN; RAMIREZ ROSADO, 1998, PROENÇA, 1993, citado por COSSI, 2008) e Tabu Search (BAZAN, 2003, BAYKASOGLU; OWEN; GINDY, 1999, citado por COSSI, 2008).

Como revisão, exploram-se alguns modelos e técnicas de soluções meta-heurísticas, para o problema de planejamento de sistemas de distribuição.

No modelo matemático do planejamento da distribuição considera-se de forma realista as características econômicas e físicas da operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica como um problema de programação não linear inteiro misto de grande porte. As técnicas clássicas de otimização aplicadas na solução deste tipo de problema podem levar a soluções ótimas locais e, dependendo das dimensões da rede e dos modelos adotados para o problema sob estudo, podem ser inviáveis de aplicar. (COSSI, 2008, p. 25-26)

Computacionalmente, as técnicas heurísticas são vantajosas, pois não possuem limitações quanto às dimensões e não requerem modelos formais do problema de otimização. No entanto, elas não garantem soluções ótimas para sistemas de médio e grande porte. No planejamento, as meta-heurísticas têm se mostrado eficazes para problemas de grande e médio portes, permitindo encontrar soluções otimizadas de alta qualidade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este relatório está organizado em 5 Capítulos. Neste primeiro Capítulo é apresentada uma breve introdução do problema de planejamento de curto prazo de redes de distribuição com geração distribuída fotovoltaica e cargas elétricas especiais, assim como uma análise das técnicas de soluções encontradas na literatura e a motivação para o desenvolvimento da pesquisa. No Capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão bibliográfica dos principais trabalhos publicados relacionados ao estudo e aos objetivos desta pesquisa, com ênfase para modelagem dos veículos elétricos e geradores fotovoltaicos assim com a meta-heurísticas algoritmo genético. No Capítulo 3 é apresentada uma breve introdução sobre a meta-heurística de AG. Posteriormente apresenta-se detalhadamente a aplicação do AG para a solução do problema de planejamento com geração distribuída fotovoltaica com alocação de baterias, banco de capacitores e cargas especiais. No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões obtidos através das implementações computacionais das formulações gerais e proposta do problema de planejamento para sistemas elétricos testes clássicos da literatura. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os trabalhos publicados na literatura abordam diversas características físicas e meta-heurísticas importantes a serem exploradas e aprimoradas para melhoria de desempenho e resultado fornecidos pelos modelos matemáticos e técnicas de solução do problema de planejamento de curto prazo de redes de distribuição com geração distribuída e cargas elétricas especiais.

2.1 META-HEURÍSTICAS

Bazan (2003, citado por COSSI, 2008) propõe uma abordagem inovadora para o planejamento de redes primárias de distribuição de energia elétrica, utilizando um modelo de otimização não-linear, ou seja, um problema de otimização definido por um sistema de equações e desigualdades, denominadas restrições, através de um conjunto desconhecido de variáveis reais, discretas e inteiras, juntamente com uma função objetivo a ser maximizada ou minimizada, onde algumas das restrições e/ou a função objetivo são não lineares (ELGERD, 1981). O objetivo principal é reduzir os custos de expansão do sistema, tanto em termos de construção (custos fixos) quanto na redução das perdas técnicas (custos variáveis). A solução é baseada em um Algoritmo Genético, onde os operadores de recombinação e mutação foram especialmente desenvolvidos para encontrar soluções de alta qualidade. A população de configurações é representada por uma codificação binária, o que facilita a aplicação dos operadores genéticos devido à sua simplicidade. Durante o processo de mutação e recombinação, alguns indivíduos são substituídos por novos na geração seguinte, seguindo dois critérios: o crossover relativo, que envolve uma pequena quantidade de indivíduos recombinados através da roleta, resultando em uma baixa probabilidade de reposição; e a mutação relativa, onde um indivíduo mutado é substituído por um novo, evitando que variáveis se tornem muito semelhantes, e ocorra a saturação da população. Os autores introduzem também a “proteção elitista”, uma técnica que preserva as melhores configurações ao longo das gerações. Para evitar a convergência rápida e prematura, que é comum em algoritmos genéticos, os

autores definem o “fator de mutação”, uma técnica chamada “Epidemia”, que previne a convergência para soluções ótimas locais muito rapidamente, em vez de soluções ótimas globais. Esta técnica elimina todas as soluções exceto as melhores, que são substituídas por novas soluções, reiniciando o processo com uma nova população inicial de alta qualidade. Este algoritmo genético demonstrou ser eficaz, obtendo configurações otimizadas de alta qualidade para sistemas de distribuição de grande porte, com tempos de solução razoáveis em relação à complexidade do problema na simulação de sistemas de grande porte.

Proença (1993, citado por COSSI, 2008) emprega um algoritmo genético como técnica de solução para o problema da expansão de sistemas de distribuição. Na função objetivo consideram-se os custos fixos, perdas técnicas, confiabilidade e a qualidade do perfil das magnitudes de tensão. Os resultados obtidos são satisfatórios, atendendo às demandas previstas em cada estágio do horizonte de planejamento com eficiência e economia. Os valores das magnitudes de tensão permaneceram dentro dos limites estabelecidos, as perdas foram reduzidas e os fluxos nos alimentadores mantiveram-se dentro dos limites térmicos dos condutores. Esses resultados demonstram que o algoritmo genético é uma ferramenta viável para a solução de problemas de planejamento.

Tsai-Hsiang e Jeng-Tyan (2000, citado por COSSI, 2008) desenvolveram uma metodologia para reduzir o desequilíbrio de cargas entre as fases e, conseqüentemente, reduzir as perdas do sistema, utilizando um algoritmo genético como método de otimização. Nesse método, a população inicial é gerada aleatoriamente, com os genes representando os pontos de carga através de uma codificação binária. Para avaliar as soluções, é utilizado um programa simplificado de fluxo de potência (FP) baseado no modelo iterativo de Gauss. O processo de recombinação envolve a troca de segmentos entre pares selecionados, gerando duas novas configurações mais evoluídas. Durante a mutação, um bit é trocado aleatoriamente. O processo é considerado concluído quando o número máximo de gerações preestabelecidas é atingido e a solução atual não apresenta mais melhorias.

2.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Nos algoritmos genéticos (AGs), os termos técnicos são fundamentais para o desenvolvimento e implementação do método. Um cromossomo (CR) é uma estrutura de dados que representa uma das possíveis soluções dentro do espaço de busca do problema. Esses cromossomos passam por um processo evolutivo que inclui avaliação, seleção, recombinação (crossover) e mutação. Após vários ciclos de evolução, a população (conjunto de cromossomos) tende a conter indivíduos mais aptos. (PACHECO, 1994)

Pode-se estruturar os Algoritmos Genéticos através dos seguintes procedimentos (PACHECO, 1994):

1. Problema a ser otimizado
2. Representação das soluções de problema
3. Decodificação do cromossoma
4. Avaliação
5. Seleção
6. Operadores genéticos
7. Inicialização da população

A seguir é apresentada uma breve discussão sobre cada um desses aspectos, exemplificando-os quando apropriado. (PACHECO, 1994).

Os AGs são especialmente úteis para resolver problemas complexos de otimização. Eles são aplicados em situações que envolvem múltiplos parâmetros ou características que precisam ser combinados para encontrar a melhor solução; problemas com muitas restrições ou condições que não podem ser facilmente representadas matematicamente; e problemas que possuem grandes espaços de busca.

A forma como as possíveis soluções de um problema é representada no espaço de busca define a estrutura do cromossomo que é manipulado pelo algoritmo. Essa representação do cromossomo varia conforme o tipo de problema e o que se deseja

manipular geneticamente. Os principais tipos de representação estão apresentados no quadro 1.

Quadro 1 - Tipos de representações em relação ao problema estudado

Representação	Problemas
Binária	Numéricos, inteiros
Números Reais	Numéricos
Permutação de Símbolos	Baseados em Ordem
Símbolos Repetidos	Grupamento

Fonte: (PACHECO, 1994)

A representação binária é simples, fácil de manipular cromossomas através dos operadores genéticos, fácil de ser transformada em inteiro ou real e, ainda, facilita a prova de alguns teoremas. Todavia, a representação por números reais (ponto flutuante) oferece melhor desempenho (PACHECO, 1994). A decodificação do cromossomo consiste basicamente na construção da solução real do problema a partir da sua combinação de genes (responsáveis pela formação de um cromossomo). O processo de decodificação reconstrói a solução para que esta seja avaliada pelo problema. A vantagem da representação binária é a fácil transformação para inteiro ou real.

A avaliação dos indivíduos depois da decodificação das soluções é a conexão entre o AG e o problema físico rela. Ela é realizada por meio de uma função que melhor representa o problema, com o objetivo de fornecer uma medida de aptidão para cada indivíduo na população atual, orientando o processo de busca. Para um algoritmo genético, a função de avaliação desempenha um papel semelhante ao do meio ambiente para os seres humanos. Essas funções de avaliação são específicas para cada problema.

O processo de seleção em algoritmos genéticos seleciona indivíduos para a reprodução. A seleção é baseada na aptidão dos indivíduos, em que os mais aptos têm maior probabilidade de serem escolhidos para reprodução. Assim, se f_i é a

avaliação do indivíduo i na população, a probabilidade p_i do indivíduo ser selecionado é proporcional à Equação (1).

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (1)$$

Onde N é o número de indivíduos da População. A seleção em AGs é tipicamente implementada por uma roleta onde cada indivíduo é representado por uma fatia proporcional à sua aptidão relativa. O operador de seleção é um componente essencial dos algoritmos genéticos. Na literatura identificam-se cinco principais mecanismos de seleção: proporcional, por torneios, com truncamento, por normalização linear e por normalização exponencial (BLICKLE, 1996).

Indivíduos selecionados, reproduzidos na população seguinte, são recombinaados através do operador de crossover (com uma probabilidade p_c). O operador de crossover é considerado a característica fundamental dos AGs. Pares de genitores são escolhidos aleatoriamente da população, baseado na aptidão, e novos indivíduos são gerados a partir da troca do material genético. Os descendentes são diferentes de seus pais, mas com características genéticas de ambos os genitores. Por exemplo, verifica-se a diferença entre os genitores G1 e G2 com os descendentes D1 e D2 na figura 1.

Figura 1 – Exemplo processo de crossover

G1	1 1 0 0 0 0
G2	0 0 0 1 0 0
D1	1 1 0 1 0 0
D2	0 0 0 0 0 0

Fonte: próprio autor.

Na sua forma mais simples, o crossover de um ponto de corte (*one-point crossover*) corta os dois genitores em uma posição aleatoriamente escolhida, criando dois possíveis descendentes.

Os cromossomos criados a partir do operador de crossover são então submetidos à operação de mutação (com uma probabilidade pm). Mutação é um operador exploratório que tem por objetivo aumentar a diversidade na população. O operador de mutação troca o conteúdo de um gene do cromossomo, com uma determinada probabilidade, em geral baixa ($<1\%$). Na figura 2 ilustra-se o processo de mutação de um indivíduo C1.

Figura 2 – Exemplo processo de mutação

C1 1 1 1 1 0 0 antes
C1 1 1 1 1 0 1 depois da mutação

Fonte: próprio autor.

Existem várias outras formas de se efetuar mutação. Por exemplo, o operador genético denominado inversão, troca de posição dois genes aleatoriamente escolhidos. A importância deste operador é, no entanto, restrita a problemas baseados em ordem (MICHALEWICZ, 1994).

A geração da população inicial determina o processo de criação dos indivíduos para o primeiro ciclo do algoritmo. Tipicamente, a população inicial é gerada a partir de indivíduos aleatoriamente criados. Populações iniciais aleatórias podem ser geradas com bons cromossomos para uma evolução mais rápida, quando se conhece, *a priori*, o valor de boas “genéticas”. Uma técnica eficiente para se encontrar boas soluções em um problema, consiste em executar evoluções sucessivas, semeando-se a nova população evoluída com as melhores soluções encontradas na anterior.

Em um algoritmo genético vários parâmetros controlam o processo evolucionário, destacando-se:

Tamanho da População: Número de soluções do espaço de busca, sendo consideradas em simultaneamente a cada ciclo.

Taxa de Crossover: Probabilidade (pc) de um indivíduo ser recombinação com outro.

Taxa de Mutação: Probabilidade (pm) de o conteúdo de uma posição/gene do cromossoma ser alterado.

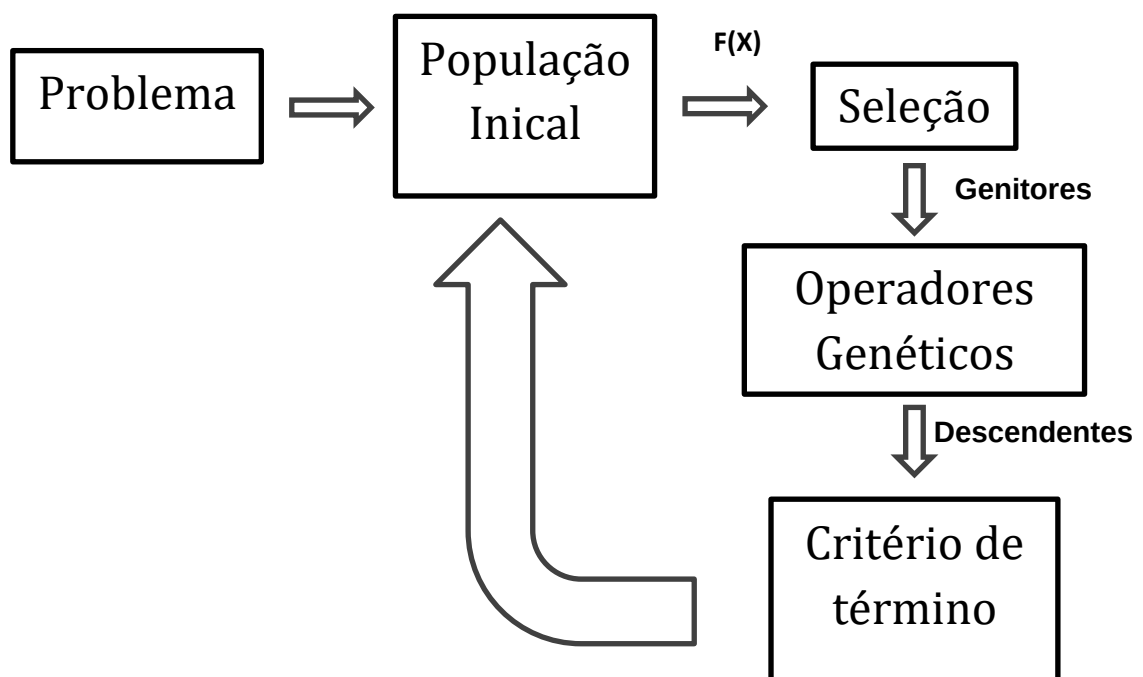
Número de Gerações: Total de ciclos de evolução de um AG.

Total de Indivíduos: Total de tentativas em um experimento (tamanho da população x número de gerações)

Os dois últimos parâmetros são em geral empregados como critério de parada de um AG.

Um AG pode ser descrito como um processo contínuo que repete ciclos de evolução controlados por um critério de parada, conforme apresentado na figura 3, readaptada conforme o trabalho do PACHECO, 1994.

Figura 3 – Ilustração evolutiva de um algoritmo genético



Fonte: próprio autor.

A definição precisa do problema é o primeiro passo essencial no uso de AGs. Isso envolve identificar o objetivo da otimização, as variáveis envolvidas e quaisquer

restrições que devem ser consideradas. Sem uma definição clara, o AG pode convergir para soluções subótimas ou infactíveis.

2.3 REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica alimentam as fontes de geração de energia às residências, empresas e indústrias. Tradicionalmente, o planejamento desses sistemas é baseado em projeções de crescimento das cargas elétricas, mas essas projeções frequentemente precisam ser reavaliadas devido às mudanças dinâmicas nas demandas de energia, como a adição de novos consumidores, fatores econômicos e a expansão de áreas industriais, comerciais e residenciais.

O mais importante modo de funcionamento do sistema elétrico é o regime permanente simétrico, que é o estado normal de funcionamento do sistema (ELGERD, 1981). O denominado estudo de fluxo de potência (ou fluxo de carga) é realizado considerando essa condição. Ele permite analisar as características de funcionamento global do sistema. A principal função de um sistema de energia elétrica é a de fornecer as potências ativas e reativas, necessárias às diversas cargas a ele ligadas, onde as potências geradas fluem pela rede elétrica para atender as cargas localizadas em determinados nós. Simultaneamente, a frequência e as várias tensões de barra devem ser mantidas dentro de limites especificados, apesar das variações, por vezes grandes e até certo ponto imprevisíveis, que podem apresentar as demandas das cargas.

O estudo de fluxo de potência determina, essencialmente, o módulo e ângulo da tensão de cada barra do sistema e as potências ativa e reativa que circulam nas linhas de transmissão. Outras grandezas podem ser obtidas, tais como: correntes nas linhas; potências a serem geradas; perdas nas linhas. A partir desse estudo pode-se verificar problemas de tensão e sobrecargas na rede, por exemplo.

As equações de fluxo de potência ajudam compreender como a energia elétrica flui através de uma rede de transmissão e distribuição e são modeladas a partir das leis de Kirchhoff e das grandezas complexas que representam a rede elétrica. As tensões em cada nó da rede são representadas como números complexos, e são representadas pela equação (2), em que V_i é a tensão complexa, $|V_i|$ é a magnitude da tensão e θ_i é o ângulo de fase.

$$V_i = |V_i| \angle \theta_i \quad (2)$$

Para as redes de distribuição radiais, as magnitudes das tensões são as incógnitas que precisam ser determinadas. A potência aparente (S_i) em um nó é calculada a partir da equação (3), sendo P_i a potência ativa do nó i e Q_i potência reativa do nó i .

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (3)$$

Em um sistema de potência, as barras podem ser classificadas em barra de referência ($V\theta$), barras de carga (PQ) e barras de geração (PV):

Barras PQ: São barras nas quais são conhecidos os valores de Potência ativa (P) e Potência Reativa (Q). Tanto as barras de geração quanto as barras de carga podem ser do tipo PQ;

Barras PV: São barras com tensão controlada, ou ainda, barras nas quais se conhece a tensão e esta é mantida constante, através de injeções de reativos. Nesse tipo de barra a potência ativa e o módulo da tensão são conhecidos e a potência reativa Q e o desfasamento angular da tensão são incógnitas;

Barra Slacks: Barras de referência, onde especificam-se o módulo e o ângulo da tensão.

O estudo de fluxo de potência é realizado pelas empresas do setor elétrico através de programas computacionais. *Softwares* especializados são usados para simular e analisar o fluxo de potência em sistemas elétricos complexos.

O *MatPower* é um *software* amplamente utilizado para análise e simulação de sistemas de energia elétrica. Ele é uma ferramenta computacional de código aberto desenvolvida em MATLAB para realizar cálculos de fluxo de potência, análise de estabilidade e otimização de sistemas elétricos, e é muito usado em universidades, laboratórios de pesquisa e pela indústria para analisar e planejar sistemas elétricos complexos.

Pode ser utilizado para aplicação em diversos casos, obtendo-se o cálculo de fluxo de potência, cuja simulação retorna os resultados de tensões, ângulos de fase, potências ativas e reativas em cada nó da rede, entre outros. Os resultados do fluxo de potência são retornados em uma estrutura de dados, que auxiliam a análise e planejamento da rede.

2.4 ENERGIA SOLAR

A geração distribuída (GD) é um modelo de produção de energia elétrica em que o produtor independente é responsável por gerar a sua própria eletricidade, no local de consumo ou próximo a ele, impactando na estabilidade da frequência do Sistema Interligado Nacional (SIN) e no fluxo de energia entre as cargas e barras. Em GD de pequena escala, o problema está na qualidade da infraestrutura de geração distribuída adotada nas residências. Se não forem utilizados bons inversores de energia solar, há o risco de afetar a qualidade da distribuição de energia na rede. O problema se agrava quando há a desconexão em cascata, que é quando diversos inversores começam a falhar ao mesmo tempo (ENGIE, 2022).

Sistemas de energia solar fotovoltaica, convertem radiação solar em energia elétrica. Painéis geram corrente contínua (CC), convertida em corrente alternada (CA) por um inversor. O estudo neste trabalho é realizado em sistemas de energia solar *on grid*, onde o sistema permanece conectado à rede de distribuição, assim, em momentos em que não há produção de energia, é possível utilizá-la da distribuidora e, em casos de excesso de produção, recebem-se créditos de energia.

A Resolução Normativa (REN) Nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), regulamentou a conexão de micro e minigeradores no sistema de distribuição brasileiro e estabeleceu as regras do sistema de compensação de energia elétrica. Segundo a REN, a energia ativa injetada na rede da concessionária deve ser abatida do consumo ativo das unidades consumidoras (UC), proporcionando economia aos clientes produtores de energia (ANEEL, 2012).

Considerando que os inversores fotovoltaicos (FV) mais antigos, são, geralmente, projetados para operar com fator de potência unitário, ou seja, gerando apenas energia ativa, a energia reativa necessária para o funcionamento de certos

equipamentos, como motores de indução, continuará sendo demandada da rede elétrica. Com a redução na geração de potência ativa e a manutenção da demanda por potência reativa, ocorre uma redução do fator de potência.

Na modelagem para geradores fotovoltaicos conectados à rede, de acordo com o seu objetivo, pode-se considerar (COLQUI, 2017):

Fornecimento de Potência Fixa: Os geradores fotovoltaicos fornecem potência constante à rede, sem considerar as condições solares ou demanda.

Fornecimento de Potência com Fator de Potência Preestabelecido: Os geradores fornecem potência com fator de potência específico, mantendo a qualidade da energia na rede.

As Equações (4) e (5) são utilizadas para representar como as cargas associadas aos nós podem ser expressas, considerando-se a existência de geração fotovoltaica. Onde, PL_i e QL_i são as potências ativa e reativa das cargas do tipo potência constante conectadas ao nó i e, P_{gi} e Q_{gi} são as potências ativa e reativa produzidas pelo gerador fotovoltaico conectado ao nó i .

$$P_i = PL_i - P_{gi} \quad (4)$$

$$Q_i = QL_i - Q_{gi} \quad (5)$$

2.5 CARROS HÍBRIDOS ELÉTRICOS

A proliferação de veículos híbridos elétricos introduz uma nova categoria de carga com requisitos de recarga variados e potencial impacto na demanda em diferentes momentos do dia. Existem três tipos básicos de veículos elétricos: totalmente elétricos, híbridos e híbridos *plug-in*.

Dentro da categoria de totalmente elétricos, encontram-se os veículos elétricos a bateria (BEV) e os veículos elétricos a célula de combustível (FCEV). Esses veículos são carregados pela energia da rede elétrica e podem ter parte da bateria recarregada

pelos freios regenerativos, que reaproveitam parte da energia perdida durante a frenagem do veículo.

Os veículos elétricos híbridos *plug-in*, empregados no estudo deste trabalho, combinam motor a combustão alimentado por gasolina/álcool ou diesel com um motor elétrico e um banco de bateria recarregável.

Diferentemente dos híbridos convencionais, os veículos elétricos híbridos *plug-in* pode ter sua bateria recarregada de duas formas: a primeira é via frenagem regenerativa, que é a conversão de parte da energia perdida na frenagem em eletricidade; a segunda forma é por cabo, alimentado de uma fonte externa, como a rede elétrica por exemplo, permitindo alcançar longas distâncias usando apenas eletricidade. Quando a bateria acaba, o motor a combustão funciona normalmente como um carro convencional.

A modelagem das cargas de carros elétricos é necessária para analisar sistemas de energia e planejar redes de distribuição, já que como citado, eles combinam motor a combustão com sistema elétrico e bateria recarregável.

Para avaliar os impactos dos veículos elétricos híbridos (PHEV) no sistema de distribuição, é necessário examinar as principais características desse tipo de carga, incluindo:

Modelagem de Propulsão Elétrica: A modelagem da propulsão elétrica considera a dinâmica da bateria, a eficiência do motor elétrico e o consumo de energia. Isso permite avaliar a demanda de energia do PHEV da rede elétrica.

Bateria e Armazenamento de Energia: A modelagem da bateria inclui características como capacidade, eficiência de carga/descarga e degradação.

Padrões de Uso e Perfil de Condução: A modelagem de PHEV deve considerar os padrões de uso típicos dos motoristas e seus perfis de condução. Isso afeta a demanda de energia e a frequência de recarga.

Integração na Rede Elétrica: A modelagem de PHEV também envolve como eles interagem com a rede elétrica. Isso inclui o momento da recarga, os pontos de conexão à rede e as interações com fontes de energia renováveis.

Impacto na Rede Elétrica: A modelagem permite avaliar o impacto na demanda de energia e nas perdas na rede elétrica. Isso é especialmente relevante para o planejamento de curto e longo prazo, permitindo dimensionar a capacidade da rede para acomodar o aumento dos PHEV

Os carros elétricos são cargas do tipo resistiva devido à presença de baterias e, quando possuem o formato *plug-in*, o seu carregamento, da maneira correta, pode ser realizado em postos de recarga e/ou residências. Esses veículos podem atuar tanto como fonte de carga (G2V) quanto fonte de energia (V2G), e por conta disso, é de grande importância a compreensão dos aspectos que controlam o estado da bateria.

A capacidade da bateria (C) é a quantidade máxima de energia que ela pode armazenar e liberar para dispositivos elétricos PHEVs. É medida em Ampère-hora (Ah), Watt-hora (Wh) ou quilowatt-hora (kWh). A capacidade influencia a distância percorrida em modo elétrico, chamada de *All Electric Range* (AER). A Equação (6) descreve matematicamente a capacidade da bateria em PHEVs.

$$C = ECPM \times AER \quad (6)$$

ECPM representa o consumo de energia elétrica da bateria por milha percorrida, medido em unidades de energia por unidade de distância (como kWh/mi). A relação $ECPM \times AER$ resulta na capacidade da bateria, indicando a quantidade total de energia que a bateria pode armazenar e utilizar para percorrer a distância especificada no modo elétrico.

Uma forma comum de modelar a capacidade da bateria é através do conceito de *State of Charge* (SOC), que indica a energia armazenada na bateria em relação à capacidade total. Ele reflete a energia armazenada restante após o uso diário do

veículo. Na Equação (7), descreve-se a modelagem do estado de carga da bateria, sendo λd a distância total percorrida em modo elétrico, em milhas.

$$SOC = \begin{cases} \left(1 - \frac{\lambda d}{AER}\right) 100 & \lambda d \leq AER \\ 0 & \lambda d \geq AER \end{cases} \quad (7)$$

A energia necessária para carregar baterias de veículos elétricos é um parâmetro importante na análise de sistemas de energia. Ela depende da capacidade da bateria, do estado inicial de carga e da eficiência do carregamento. Em PHEVs, a energia após cada viagem depende do estado de carga. A Equação (8) representa essa energia da rede de distribuição para carga total da bateria.

$$E_{rede} = \frac{\left(1 - \frac{SOC}{100}\right)C}{\eta} \quad (8)$$

em que, E_{rede} representa a eficiência no processo de recarga da bateria. Nesta equação considera-se a quantidade de energia necessária para levar a bateria do estado de carga inicial para o estado de carga final desejado.

3 METODOLOGIA

Resumidamente, uma formulação genérica para o problema de planeamento de sistemas distribuição de energia elétrica, estudado neste trabalho, considerando-se todos os aspectos do problema abordados no capítulo 2, pode ser estabelecida como:

Minimizar: Custos de investimento em equipamentos (banco de capacitores) + Custos operacionais relacionados à perda/compra de energia no mercado.

Sujeito a:

- *Equações algébricas não lineares de fluxo de potência (Lei de Kirchhoff da corrente nodal e das tensões nas malhas);*
- *Limites da magnitude de tensão nas barras;*
- *Máximo fluxo de corrente permitido nos alimentadores;*
- *Capacidade física (limites térmicos e potências nominais) dos equipamentos das subestações e rede de distribuição;*
- *Capacidade de geração e do limite térmico da geração distribuída disponível.*
- *Demanda dos consumidores e veículos elétricos.*

Dessa forma, na solução do problema de planeamento busca-se encontrar um equilíbrio ótimo entre a minimização de custos e a operação confiável do sistema. Para a solução do problema propõe-se a utilização de um algoritmo genético. O problema consiste basicamente em atender as demandas dos consumidores procurando minimizar os custos de operação e, principalmente, de investimentos e manter factíveis as restrições operacionais.

Para o desenvolvimento da implementação da metodologia é utilizado o *software* MATLAB e para a análise do impacto da geração fotovoltaica e carros híbridos elétricos, a curto prazo, na rede de distribuição, são adotados dois sistemas testes diferentes entre topologia e quantidade de nós, a fim de obter-se uma validação computacional e robusta do funcionamento da meta-heurística.

Os sistemas utilizados para testar a implementação computacional da metodologia são o IEEE33 com 33 nós e um sistema da literatura de 134 nós.

Ressalta-se que mesmo contando com uma implementação computacional que permite a simulação de sistemas com quaisquer números de nós, alguns parâmetros devem ser ajustados manualmente antes das simulações. Dentre estes parâmetros destacam-se o número de nós, os nós selecionados a receberem os bancos de capacitores, a geração fotovoltaica e a bateria dos PHEVs, chamados de nós candidatos (BC). Para uma execução correta, as baterias e a geração fotovoltaica devem ser instaladas nas mesmas barras, enquanto as barras candidatas escolhidas para os bancos de capacitores devem ser diferentes.

As barras possíveis de serem candidatas serão todas as barras do sistema sob análise. Portanto, para cada sistema que for ser simulado uma análise preliminar deve ser realizada nesses sistemas para as selecionar os melhores nós para alocação dos equipamentos. O critério para a escolha foram nós com maiores cargas e que abrangessem todas as partes do sistema, sendo assim, analisando esse impacto de uma maneira mais abrangente.

Para que o estudo fosse realizado em um cenário com demandas mais factíveis com a realidade, foram ajustadas as demandas dos sistemas em seus dados originais através de um fator de correção. Além disso, foram divididos os dias em 12 períodos com 2 horas cada, totalizando assim as 24 horas diárias. Porém, para permanecer a robustez do programa, essa demanda, a quantidade de períodos e a duração dos períodos podem ser alteradas.

Utilizou-se como rotina auxiliar da implementação computacional o código aberto *MatPower*, que é responsável por fornecer uma estrutura de dados com todas as grandezas do sistema.

Primeiramente, no MATLAB, é necessário carregar a topologia a ser analisada, através de uma função em que seu argumento é o próprio arquivo do sistema. Nesse comando carregam-se os dados base do sistema para uma estrutura de dados que o *MatPower* utiliza para retornar o estado de cada barra. Como são realizadas diversas alterações nas demandas de energia das barras, devido os bancos de capacitores, PHEVs e painéis solares, os dados base do sistema são salvos em uma variável

independente que não se altera, e em uma variável que sofre as modificações de acordo com a evolução da execução do algoritmo.

Após carregar os dados, usa-se uma função para executar o cálculo de fluxo de potência. Essa função aceita a estrutura de dados de entrada do sistema e retorna os resultados do fluxo de potência, incluindo tensões, ângulos de fase, potências ativas e reativas em cada nó da rede, entre outros. Antes de executar a função de cálculo de fluxo de potência é importante lembrar que qualquer alteração no sistema, como o ajuste da demanda, a inserção dos capacitores, do gerador fotovoltaico e da operação da bateria (carregando ou descarregando) dos PHEVs, para que se obtenha os resultados com o sistema completo.

Para ajustar a demanda do sistema com valores mais factíveis, deve-se aplicar um fator de correção para a energia ativa e reativa da base de dados da rede. O fator de correção utilizado para a demanda do sistema também foi dividido em 12 períodos, e está descrito na tabela 1.

Tabela 1– Fator de correção de demanda para 24 horas

Período (2h)	Fator de correção
1	0,8188
2	0,6921
3	0,6648
4	0,6731
5	0,7485
6	0,8372
7	0,8824
8	0,9365
9	0,9278
10	0,9960
11	0,8888
12	0,8686

Fonte: Próprio autor.

Para os capacitores, GD fotovoltaico e baterias, a lógica é mesma, porém, em vez da multiplicação deve-se retirar ou somar potências ativa e reativa. Para o capacitor, trata-se de uma potência reativa, e, portanto, alivia a energia reativa do sistema. Para o GD fotovoltaico o mesmo ocorre, com uma atenuação de energia,

porém nesse caso, para a potência ativa. A bateria também é um dispositivo ativo, porém devido a seu modo de operação pode-se absorver como também injetar essa potência da rede.

Neste trabalho, o fluxo de potência é executado para obter as perdas no sistema no caso base e com as modificações devido as ações de planejamento. A partir da solução obtida da função que calcula o fluxo de potência, utiliza-se uma outra função para obter as perdas, tendo essa função um retorno numericamente real e com as perdas de todas as linhas somadas. Todas as modificações, execução do fluxo e obtenção das perdas devem ser executadas por período, e no final, somando as perdas de todos os períodos, obtendo-se o valor final de perdas para cada indivíduo do AG.

Para a adequação dos limites de magnitudes de tensão estabeleceram-se os limites inferior e superior, conforme a inequação:

$$0,95 \leq V \leq 1,05 \text{ (pu)}$$

Para a verificação do limite, utilizam-se os dados de magnitudes de tensão dos nós obtidos após o cálculo do fluxo de potência. Verifica-se o valor de tensão para os dois limites, e caso ele seja menor que 0.95 ou maior que 1.05, penaliza-se esta restrição na função objetivo. Os limites muitas das vezes são ineficazes devido às características dos indivíduos da população do AG.

A penalidade é verificada para cada barra e para cada período, da mesma forma que as alterações no sistema. Portanto, quantas mais vezes o sistema apresentar restrições referentes a esse problema, maior será sua penalidade. Para deixar a penalização coerente com a gravidade da extrapolação de tensão, é inserida uma taxa fixa, que é multiplicada pela diferença dos limites excedidos e os limites propostos. Dessa forma, quanto mais fora do limite estiver a tensão, e quanto mais vezes esse limite é excedido, maior será a penalidade para o indivíduo do AG.

Para a otimização do sistema os bancos de capacitores são opções essenciais e práticas para o ajuste do fator de potência e consequentemente diminuição das perdas reativas. Neste trabalho, além do aspecto técnico, considera-se também o

aspecto financeiro dessa ação de planejamento, como o custo dos bancos e das chaves.

Para ambos os sistemas, foram utilizados bancos de capacitores fixos ou chaveados com capacitância de 300 kVAR. Dentro as possibilidades, poderia haver a necessidade de um banco ou até dois, totalizando assim uma capacitância de 600 kVAR.

É importante ressaltar que, cada banco instalado no nó da rede tem seu regime de funcionamento para cada período, podendo a partir daí ser fixo (mesma capacitância todos os períodos) ou chaveado (capacitância diferente de um período para o outro). A determinação desse banco de capacitor é feita de maneira aleatória em cada nó, sendo na maioria das vezes, um banco chaveado. Para sua codificação, tem-se que:

0 = Capacitância nula

1 = Capacitância de 300 kVAR

2 = Capacitância de 600 kVAR

Inicialmente, cria-se um vetor com a mesma quantidade de barras candidatas onde as posições são equivalentes. Logo, a primeira posição desse vetor equivale à primeira barra candidata. Aleatoriamente, é realizada a inserção do capacitor na sua respectiva barra, e depois é criado o banco chaveado ou fixo, também de forma aleatória. Para dois nós, por exemplo, cada um deles terá para cada período um vetor que descreve se ele tem alocado um capacitor fixo ou chaveado, como a seguir:

$$Cr = [1 \ 2 \ 111111111111 \ 222222212222]$$

Analisando-se esse vetor, tem-se no primeiro nó candidato um banco de 300kVAR, e ele é fixo para todos os períodos, enquanto para o segundo nó, tem-se um banco de 600 kVAR e ele é chaveado no oitavo período. Como discutido posteriormente, junto a esse vetor, adiciona-se a operação das baterias e tem-se a possível solução (cromossomo).

Referente aos custos, de acordo com valores adotados da literatura, adota-se a seguinte precificação:

$$\text{Capacitor} = 1563,99 \text{ (U\$)}$$

$$\text{Chave} = 517,01 \text{ (U\$)}$$

Dessa forma, sabe-se da necessidade de alocar um banco de capacitores, e se ele será fixo ou chaveado, e para encontrar o seu custo total, basta somar o preço definido com a estrutura necessária (Capacitor e Chave). Lembrando que cada barra terá o seu custo, e que todas elas juntas compõem a despesa para alocar esse tipo de equipamento.

Dessa forma, a solução final, que é avaliada e minimizada, é composta pelas perdas obtidas pelo fluxo de potência de acordo com cada indivíduo, dependendo também, caso tenha problemas com os limites de tensão, com a penalidade. Portanto, assim tem-se ao fim da análise uma solução que deve propor as melhores modificações e sem penalidade, com o menor custo de investimento possível, descrita pela função objetivo/função de aptidão a seguir:

$$\text{Função Objetivo} = \text{Perdas} + \text{Custos dos bancos} + \text{Penalidades}$$

É importante ressaltar que os custos dos geradores fotovoltaicos e baterias foram nulos pois considera-se que ambos já estão instalados na rede.

Para a geração fotovoltaica, é preestabelecido, de acordo com os períodos de maior produção de energia das placas solares, o valor de potência gerada pelo sistema. Logo, antes de calcular o fluxo de potência para cada período, é necessário realizar a respectiva injeção de potência aparente na rede; levando-se em consideração inversores com fator de potência unitário, é considerada apenas a potência ativa do painel. O fator utilizado para simular a produção do painel fotovoltaico (PV) é dado na Tabela 2.

Tabela 2 – Geração Fotovoltaica para 24 horas

Período do dia	Geração PV (kW)
1	0,0
2	0,0
3	0,0
4	0,532
5	140,174
6	319,579
7	265,305
8	400,036
9	292,005
10	88,909
11	0,0
12	0,0

Fonte: Próprio autor.

A capacidade da bateria é muito importante para condicionar seu estado e a energia necessária para carregá-la. Nesse trabalho foram consideradas baterias com capacidades máximas de 400 kWh, enquanto a mínima de 100 kWh, ou seja, a bateria nunca inicia seu carregamento zerado, já que tem uma capacidade mínima.

Outro fator bastante importante é o de estado da bateria (SOC), para conhecer sua energia em cada período. Nesse trabalho são usados os seguintes passos para simular a operação da bateria:

Passo 0 = A bateria não opera

Passo 1 = A bateria carrega/descarrega 25 kWh

Passo 2 = A bateria carrega/descarrega 50 kWh

Passo 3 = A bateria carrega/descarrega 75 kWh

Passo 4 = A bateria carrega/descarrega 100 kWh

Por simplicidade, a mesma lógica é feita para o descarregamento da bateria, porém com o sinal negativo para identificar o processo inverso. Finalmente pode-se ter o estado atual da bateria e, conseqüentemente, a energia necessária para terminar de carregá-la e a energia necessária para alimentar a rede. Nesses procedimentos é importante lembrar das eficiências (EF) da bateria, que nesse trabalho são consideradas para carga o valor de 0,95 e para descarga o valor de 0,93.

É importante que a bateria, durante os períodos, não ultrapasse sua capacidade máxima e que respeite a capacidade mínima, e também que o estado final, deve ser o mesmo do inicial, para que a ela inicie o primeiro período do dia na mesma condição de carga que finalizou o dia anterior. Esse ajuste é feito através de uma função desenvolvida especificamente neste trabalho.

Logo, tem-se que a bateria do veículo híbrido carrega e se descarrega durante os períodos, de acordo com a metodologia apresentada. Como exemplo, tem-se que:

Tabela 3 – Exemplos de operação da bateria

Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Exemplo 1	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	3	0
Exemplo 2	0	2	1	1	0	0	-1	-3	0	0	4	0

Fonte: Próprio autor.

Sua operação, seguindo a mesma lógica adotada para os capacitores, também é feita de forma aleatória.

Para os carros híbridos, consideram-se que as barras selecionadas têm também a função de um eletro posto. Ou seja, da mesma forma que se selecionaram os nós candidatos para alocação dos capacitores e geração solar/bateria, selecionaram-se os nós para carga e descarga dos carros híbridos. O fator de carga dos eletros posto, segue a mesma filosofia adotada para a geração fotovoltaica. Seguindo essa lógica tem-se os consumos horários dos eletropostos apresentados na tabela 4.

É importante ressaltar a característica de carga dos veículos elétricos, sendo assim, aumentando a demanda dos nós. Algumas outras hipóteses são necessárias de serem comentada. Considerou-se que a utilização dos eletros postos ocorre em um total de 12 horas, equivalente a 6 períodos atribuídos, sendo assim, deixando os 3 primeiros e os 3 últimos períodos do dia o posto desabilitado (totalizando os 12 períodos diários). Para o sistema de 33 barras foram considerados que 20 carros utilizariam desse eletro posto por dia. Dessa forma, considera-se que o eletro posto consumiria ao total 1000kW. Para o sistema de 134 barras foram considerados que

50 carros utilizariam os eletros postos. Logo, considera-se que seu consumo será de 2500kW.

Tabela 4 – Consumo eletro postos para 24 horas

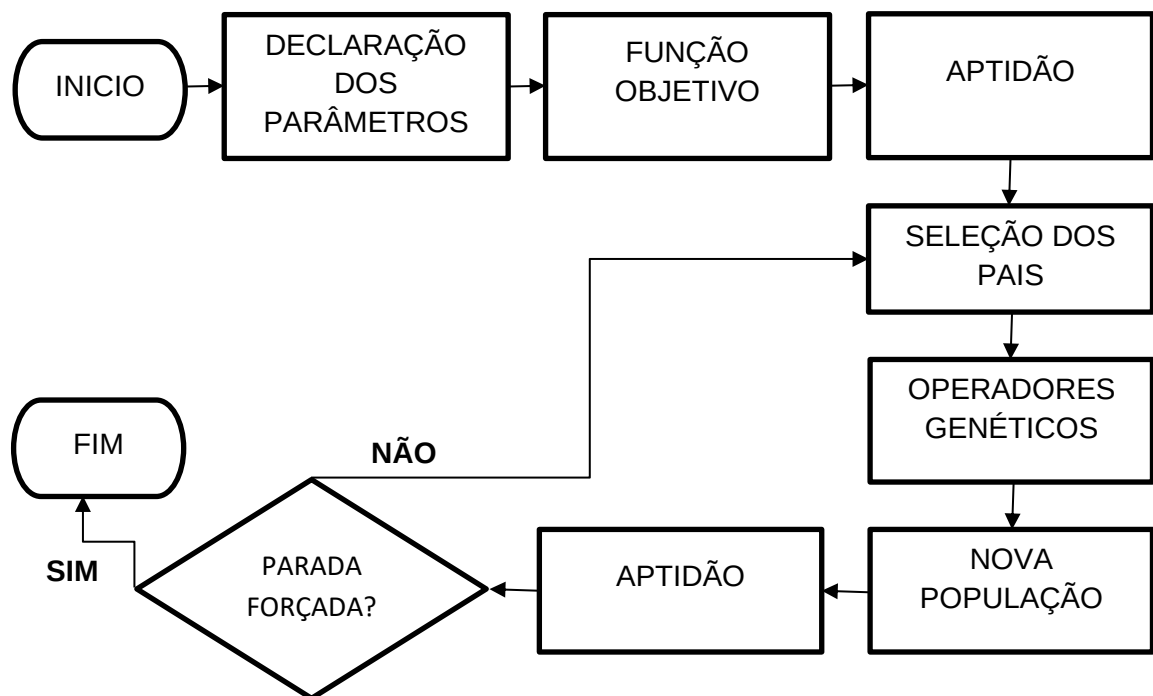
Período	Consumo 33 nós (kW)	Consumo 134 nós (kW)
1	0,0	0,0
2	0,0	0,0
3	0,0	0,0
4	125,0	312,5
5	125,0	312,5
6	250,0	625,0
7	250,0	625,0
8	125,0	312,5
9	125,0	312,5
10	125,0	0,0
11	0,0	0,0
12	0,0	0,0

Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, foram executados os ajustes para que os carros carreguem em períodos diferentes dentro dessas 12 horas. Primeiro, considerou-se que para as primeiras e últimas quatro horas 25% da frota utilizaria esse posto, enquanto as quatro horas intermediárias seriam utilizadas pelos 50% restantes da frota. Outra hipótese, é que foi considerado que os carros chegam com capacidade mínima de bateria para realizar o carregamento.

O AG dedicado ao problema de planejamento de curto prazo no sistema de energia elétrica está ilustrado no diagrama de blocos da figura 4.

Figura 4 – Diagrama Ilustrativo do AG



Fonte: Próprio autor.

O algoritmo é inicializado com a especificação dos parâmetros e variáveis que estão relacionados com as características elétricas e topológicas dos sistemas que são simulados e fornece os resultados para a tomada de decisões fornecida pela implementação computacional da metodologia.

Após a leitura de dados, avalia-se a função de adaptação do sistema para o caso base e são especificados os nós do sistema em que estão instalados os painéis fotovoltaicos e as estações de carregamento dos carros híbridos. Gera-se aleatoriamente a população inicial com as possíveis soluções, também chamadas de cromossomos. A proposta de planejamento fornecida pelos cromossomos do sistema de codificação do AG é avaliada com o auxílio do cálculo do fluxo de potência. Com a primeira geração, inicia-se o ciclo geracional do AG. Calculadas as funções de adaptação de cada indivíduo, é realizada a ordenação para determinar quais são as melhores soluções encontradas e, conseqüentemente, executar a seleção natural entre dois indivíduos selecionados aleatoriamente.

Primeiro é calculada uma probabilidade para cada indivíduo da população para gerar os novos cromossomos, de forma que os dois primeiros indivíduos que foram escolhidos através da seleção natural para prosseguirem na população, têm mais chances de serem escolhidos para o cruzamento, e assim por diante, de acordo com sua ordenação. Após esses procedimentos, o primeiro passo para o cruzamento é a seleção de dois pais, que são escolhidos através da geração de um número aleatório entre 0 e 1, e são selecionados aleatoriamente dois pontos de corte para o cromossomo. O conteúdo genético dentro dessa região do Pai 1, é transferido para a mesma região do Filho 2, que será completado com a região externa dos pontos de corte do Pai 2. Dessa forma garantem-se que os novos indivíduos, os filhos, contêm as informações dos dois pais, e levam para a nova família os genes dos pais, garantindo assim a formação de novas gerações que contenham genes mais próximos da solução otimizada.

Com a população nova formada, e verificada, é calculada a função objetivo acrescida dos termos de penalidade dos indivíduos ineficazes da nova geração e retorna-se ao início do processo iterativo para o cálculo das probabilidades de cada indivíduo dessa população. Após o fim do número de gerações preestabelecido ou a repetição do melhor indivíduo por gerações consecutivas tem-se o fim da execução do algoritmo e os resultados são apresentados.

4 RESULTADOS

A avaliação da eficiência da implementação computacional desenvolvida a partir da metodologia proposta, é realizada através de simulações incrementando a complexidade dos testes para avaliar a robustez e precisão do algoritmo genético. Para as simulações utilizou-se a versão 2024a do MATLAB, sendo a máquina utilizada, composta por um processador AMD Ryzen 7 8700G w/ Radeon 780M Graphics 4.20 GHz e RAM instalada de 16,0 GB. Referente ao sistema, operacional de 64 bits e Windows 11 Pro.

Para os dois sistemas testes analisados, foram executados testes com os valores de capacitores e chaves determinados na metodologia e com investimentos praticamente nulos, tendo assim uma análise melhor sobre a importância de considerar os investimentos na função objetivo. Também foram executadas simulações para os sistemas no caso base, obtendo as perdas e penalidades devido as violações de tensões, e depois inseridos, separadamente, os bancos de capacitores, o sistema fotovoltaico e os PHVEs.

O algoritmo é geral e aplicável a outras topologias, mas são necessários os ajustes de alguns parâmetros para simular diferentes sistemas. Para o sistema de 33 nós, é utilizada uma população individual 100 indivíduos, e a quantidade máxima de gerações definida em 500. Outro critério de parada é a repetição do mesmo resultado por 50 gerações. O conjunto de barras candidatas para a alocação de capacitores é {4 7 14 19 25 30 32}; e o conjunto de barras onde estão instalados os painéis fotovoltaicos é {3 8 18} e a estação de carregamento do carro híbrido está localizada na barra 2.

Para o sistema de 134 barras, devido ao aumento do número de barras, foi utilizada uma população e número de gerações maior, sendo 160 indivíduos e 1000 gerações. Como critério de parada foi escolhido a repetição de 100 indivíduos. A escolha foi realizada observando o melhor desempenho do algoritmo em relação a parâmetros maiores/menores. O conjunto de nós candidatos para a alocação de capacitores é {6 13 42 17 22 30 37 54 59 65 72 84 96 102 108 126}; o conjunto de nós onde estão instalados geradores fotovoltaicos é {47 93} e o conjunto de nós onde

estão alocadas as estações de carregamento para os carros híbridos estão localizadas é {20 50 95}.

A cardinalidade dos conjuntos de barras selecionadas está de acordo com o número total de barras do sistema e sua escolha foi de acordo com a topologia do sistema, visando um equilíbrio da rede. Para ambos a taxa de mutação definida foi 1% e a penalidade definidas em U\$ 1.000.000,00 para que as soluções com restrições fossem eliminadas da população.

A função objetivo é avaliada para os sistemas sem nenhuma ação de planejamento proposta, caso base, da maneira natural que ele operaria. Primeiro simulam-se os sistemas sem a geração solar e depois com ela inserida nos respectivos nós candidatos. Nas tabelas 5 e 6, apresentam-se os resultados para o sistema de 33 barras e 134 barras, respectivamente.

Tabela 5 – Valores iniciais do sistema de 33 barras

Sistema \ Função Objetivo	Perdas (U\$)	Perdas + Penalidade (U\$)
Sem capacitor e fotovoltaico	3313,80	2,76 E+06
Sem capacitor	2748,10	1,52 E+06

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 – Valores iniciais do sistema de 134 barras.

Sistema \ Função Objetivo	Perdas (U\$)	Perdas + Penalidade (U\$)
Sem capacitor e fotovoltaico	6744,37	2,3478 E+08
Sem capacitor	5587,90	1,73 E+08

Fonte: Próprio autor.

Nessa etapa, é importante ressaltar que os valores obtidos foram conferidos com resultados de perdas teóricas, fornecidos por programas especializados em obter esse resultado. Lembrando que o foco desse trabalho é avaliar a abordagem do tema através do algoritmo genético, e os resultados considerados “ideais” são importantes para verificar a precisão do AG.

O valor foi exatamente as perdas teóricas iniciais dos sistemas. A penalidade devida a sua característica para eliminar soluções infactíveis, aumenta demais essa função objetivo utilizada para o programa, mas avaliando só as perdas, verifica-se que o resultado obtido está de acordo com o esperado.

O sistema 33 barras é utilizado para testar a implementação computacional da metodologia desenvolvida devido a um resultado “ideal” realizado por modelagem clássica de otimização através de programação cônica, considerando as mesmas condições adotadas neste trabalho: com os bancos de capacitores, a energia fotovoltaica e os custos praticamente nulos. O resultado utilizado para comparação e os resultados obtidos pelo AG, nestas condições propostas, estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Resultados sobre a confiabilidade e otimização do AG

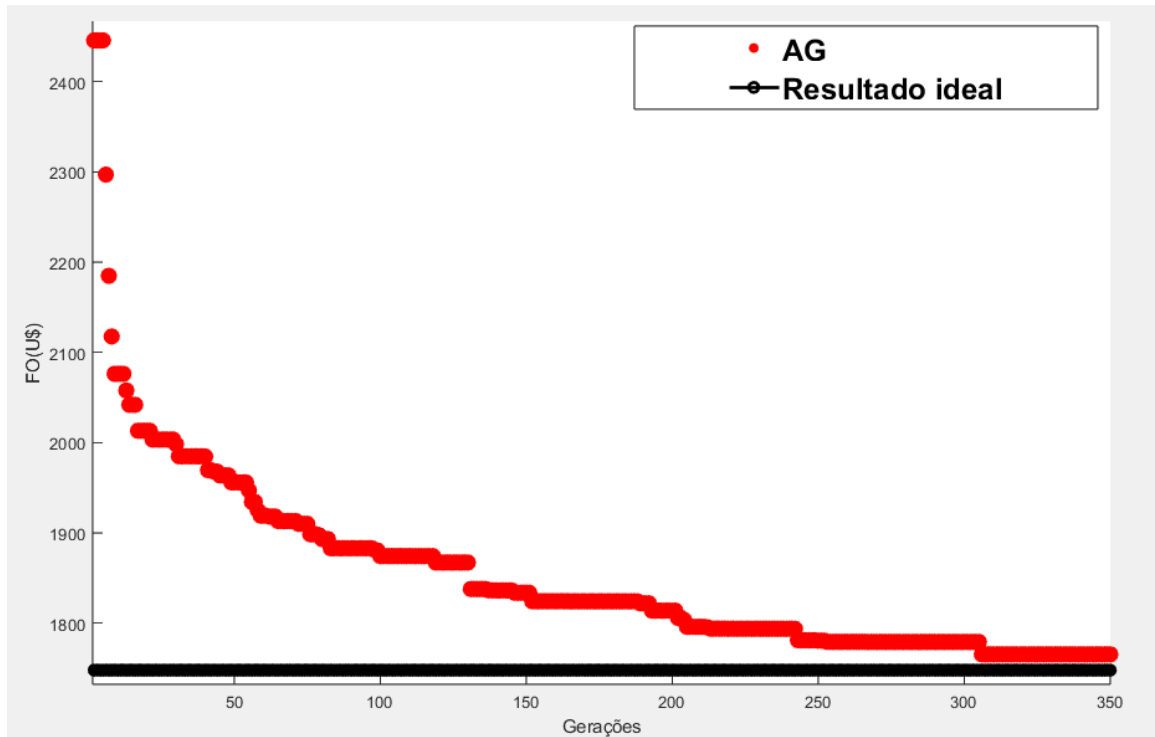
Teste	FO(U\$)	Custo do Banco (U\$)	Perdas Energia (U\$)	Banco Escolhido
IDEAL	1747,88	130	1617,88	[0 1 1 0 1 2 1]
1	1791,61	110	1677,2	[0 1 1 0 0 2 1]
2	1784,44	130	1646	[0 1 1 0 1 1 2]
3	1760,1	130	1630,01	[0 1 1 0 1 2 1]
4	1785,19	130	1655,19	[0 1 1 0 1 1 2]
5	1786,4	110	1676,4	[0 1 1 0 0 2 1]
6	1786,16	110	1676,16	[0 1 1 0 0 2 1]
7	1777,52	130	1647,52	[0 1 1 0 1 1 2]

Fonte: Próprio autor.

O resultado fornecido pela simulação 3 está próximo do resultado mínimo esperado, diferenciando apenas no chaveamento do banco de capacitores nos dois últimos nós. Para essa solução o penúltimo banco de capacitores é fixo e o último chaveado, enquanto na resposta 3, esse resultado está com capacitor chaveado na barra 30 e fixo na barra 32. Os testes apresentaram um erro médio, entre a solução

ótima fornecida pelo método de otimização clássica e as soluções otimizadas fornecidas pelo AG, de 2,31%. Na figura 5 ilustra-se o processo evolutivo do AG.

Figura 5 – Evolução completa do AG vs. Número de gerações - Confiabilidade



Fonte: Próprio autor.

A diferença entre os resultados do AG e do modelo de programação clássica está relacionada com as características deste problema de otimização que é não convexo e apresenta pontos de ótimos locais. Para o testar o processo genético de seleção e sobrevivência do cromossomo, inseriu-se a solução com os genes ideais, novamente com custos baixos e os PVs. Verificou-se a seleção natural da melhor função entre as gerações criadas, obtendo o mesmo gene após todas as populações geradas.

É importante ressaltar que esse procedimento inicial não foi realizado para o sistema de 134 barras. O objetivo desse teste é analisar, isoladamente, o AG e suas características com relação a um resultado base, para verificar se a funcionalidade do AG está de acordo com a sua concepção. A precisão do programa para outros sistemas e a influência do aumento da complexidade, pode ser testada e avaliada com

o resultado ideal final (custos referenciados na metodologia e todos os equipamentos instalados na rede), estudando junto aos problemas de planejamento desses sistemas, a robustez do programa e se o seu resultado está compatível física e tecnicamente.

Os valores de custos de investimento são ajustados de acordo com o proposto na metodologia e foram realizadas as simulações utilizando o AG e o processo evolutivo. Primeiro, sem os PHEVs e PVs, depois inserindo a geração solar, e finalizando com todos os equipamentos instalados, com a inserção dos carros híbridos *plug-in*. Nas tabelas 8 e 9 apresentam-se os resultados obtidos para os casos de 33 e 134 barras, respectivamente.

Tabela 8 – Resultados obtidos para o sistema de 33 barras

SISTEMA	FO(U\$)	CUSTO(U\$)	PERDAS(U\$)	BANCO CAPACITORES
Sem instalação de PHEV e PV	14734,87	12498,96	2235,90	[0 2 2 0 0 2 1]
Sem instalação PHEV	12115,90	10417,96	1697,94	[0 1 1 0 0 2 2]
Todos os equipamentos instalados	16021,69	14062,95	1958,74	[1 2 2 0 0 2 1]

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 – Resultados obtidos para o sistema de 134 barras

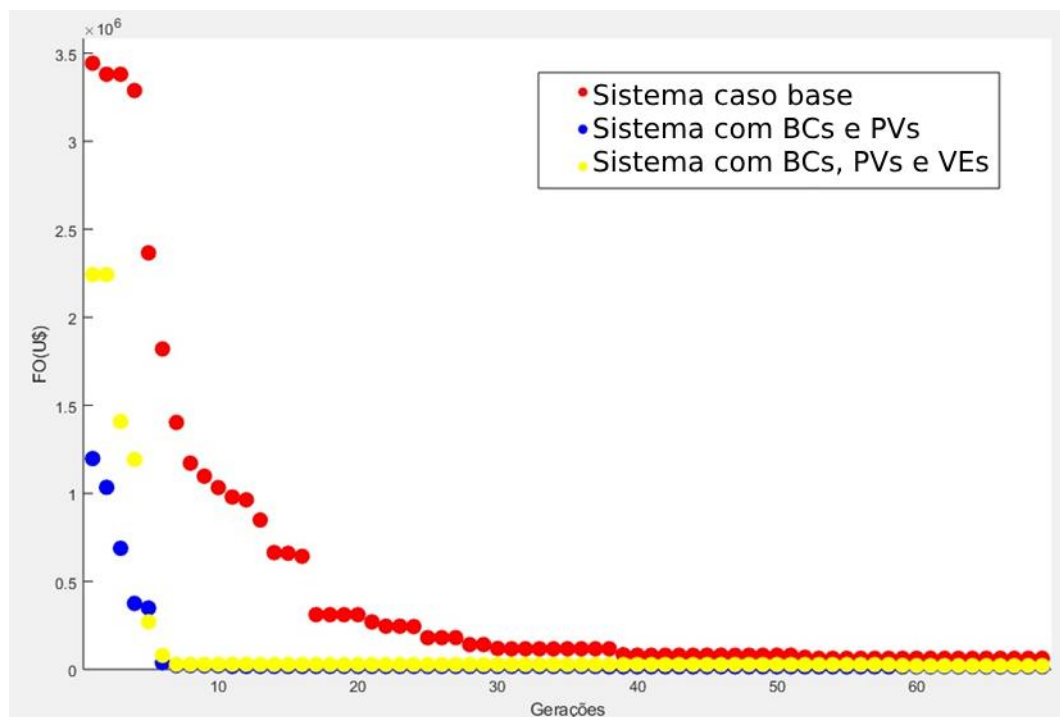
SISTEMA	FO(U\$)	CUSTO(U\$)	PERDAS(U\$)	BANCO CAPACITORES
Sem instalação de PHEV e PV	31403,98	26031,90	5372,00	[1 2 1 1 2 0 2 2 1 2]
Sem instalação PHEV	23729,81	18754,98	4974,88	[0 1 1 0 2 1 2 1 1 2]
Todos os equipamentos instalados	28244,06	22903,96	5340,10	[1 1 2 0 1 1 2 2 1 1]

Fonte: Próprio autor.

Analisando-se as tabelas 8 e 9, verifica-se a o impacto dos custos dos bancos de capacitores na função objetivo. A perdas de energia estão bem próximas dos valores dos testes executados com custos menores, porém analisando-se a alocação dos bancos de capacitores, sua quantidade diminui, já que seus valores são consideráveis e os que mais impactam a função objetivo/aptidão. Essa característica tem uma influência maior na eficiência da solução. A diferença entre os valores atribuídos às perdas na função objetivo é consideravelmente menor em comparação com os custos de investimentos.

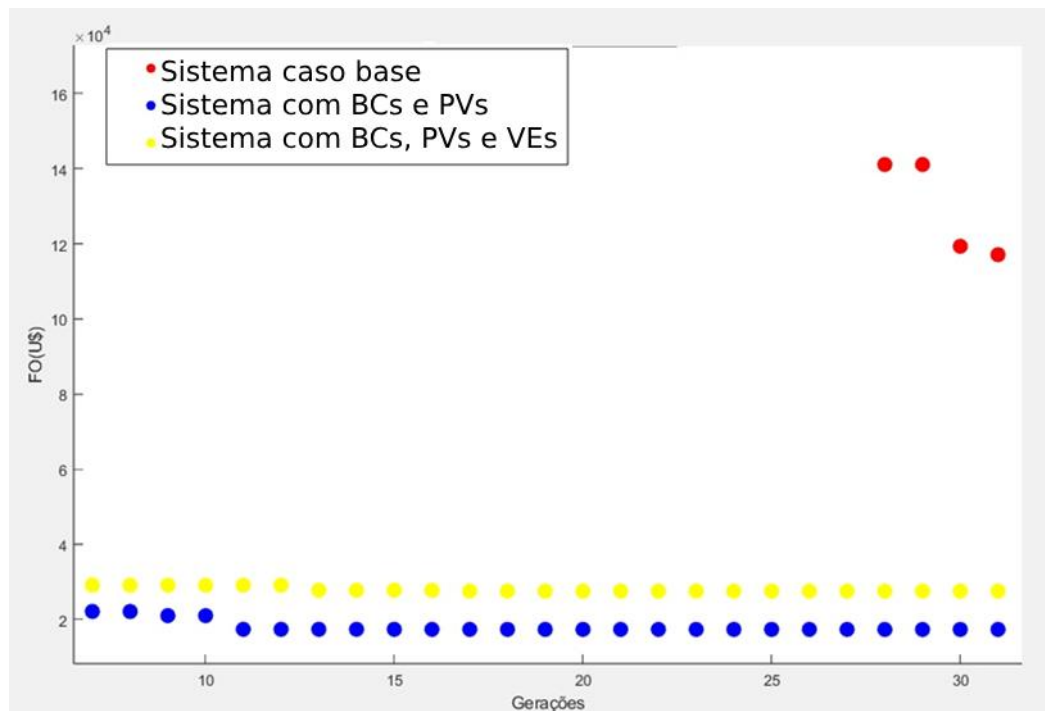
Com a recarga de carros elétricos, em compensação, pode-se observar um aumento nas perdas de energia, já que os eletros postos representam uma carga na rede, aumentando a demanda. A modelagem do posto elétrico foi feita de maneira que respeite a sua demanda na rede, durante o dia, mas devido a sua complexidade e as limitações do AG, ela foi executada de forma similar à geração solar. Analisando os resultados com o sistema completo verificam-se que os valores finais das perdas ficaram próximos ao do sistema sem PHEVs e PV, com um equipamento “equilibrando” o outro. Nas Figuras 6 e 7, ilustram-se os resultados obtidos.

Figura 6 – Evolução inicial do AG vs. Número de gerações - 33 barras



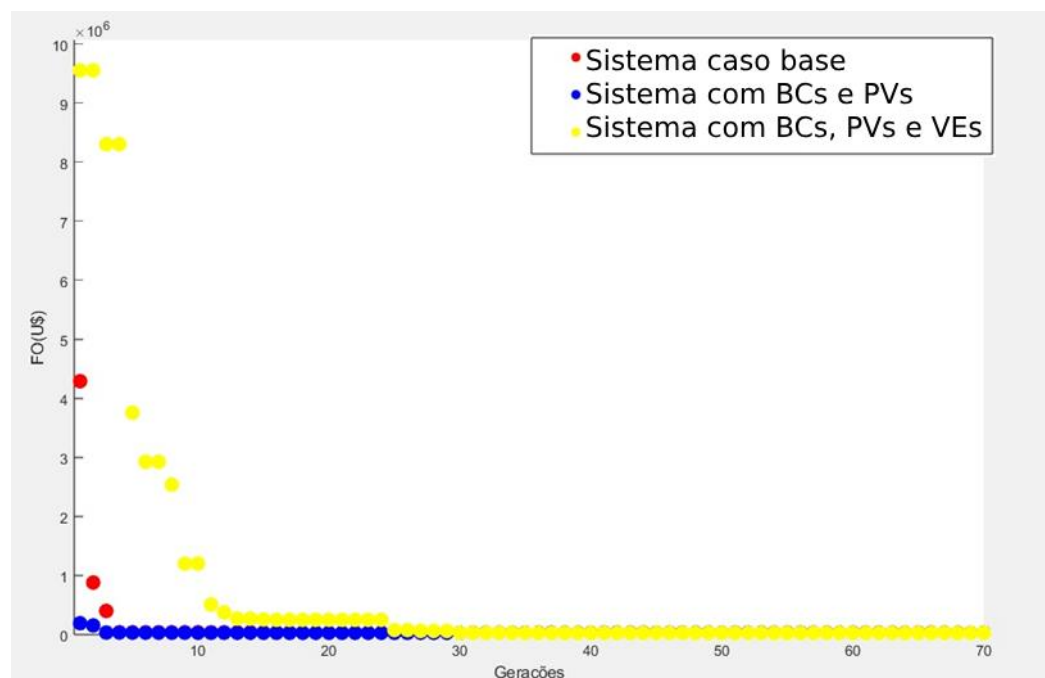
Fonte: Próprio autor.

Figura 7 – Evolução convergida do AG vs. Número de gerações - 33 barras



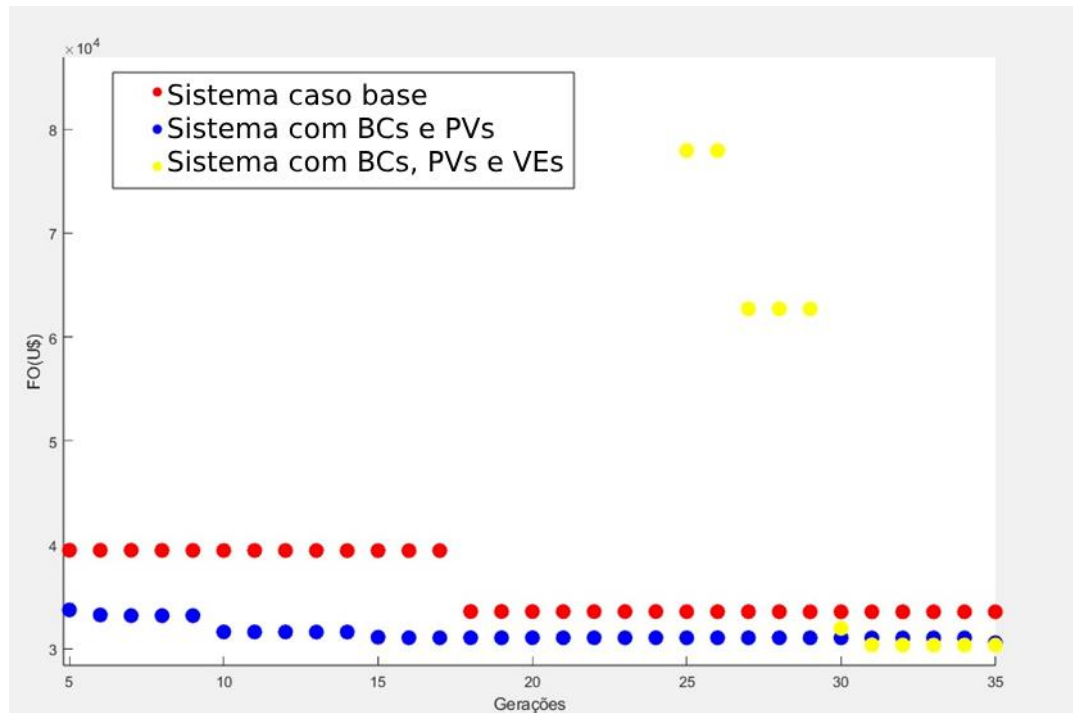
Fonte: Próprio autor.

Figura 8 – Evolução inicial do AG vs. Número de gerações - 134 barras



Fonte: Próprio autor.

Figura 9 – Evolução convergida do AG vs. Número de gerações - 134 barras



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Os AGs, embora sejam importantes técnicas de otimização, apresentam um nível médio de complexidade devido à necessidade de ajustar diversos parâmetros, como tamanho da população, taxas de mutação e cruzamento, e a definição da técnica de seleção de operadores genéticos adequados para cada problema diferente estudado. Além disso, a convergência para a solução ótima global não é garantida, o que significa que a obtenção de resultados satisfatórios pode depender da escolha adequada dos parâmetros e de convergências prematuras. Por outro lado, a utilização de ferramentas como o MATLAB e o *MATPOWER* oferece vantagens, o MATLAB fornece uma plataforma versátil para implementar algoritmos complexos, permitindo a manipulação eficiente de matrizes, a criação de interfaces amigáveis e a visualização de resultados. O *MATPOWER*, com sua capacidade de análise de fluxo de potência em sistemas elétricos, oferece precisão e robustez para avaliar o impacto da geração fotovoltaica e dos carros híbridos nas redes de distribuição.

O AG desenvolvido para esta pesquisa é abrangente e atende a todos os objetivos propostos. Na sua implementação consideram-se a representação adequada das soluções, definição de funções de aptidão e ajuste criterioso de parâmetros como tamanho da população, taxas de mutação e cruzamento. Isso garante a eficácia e confiabilidade na exploração do espaço de soluções, mesmo em problemas complexos, como a avaliação do impacto da geração fotovoltaica e carros híbridos no planejamento de curto prazo de redes de distribuição. Na especificação criteriosa de operadores genéticos, como cruzamento e mutação, pode-se explorar os mecanismos naturais de recombinação genética e variação para diversificar o espaço de busca das soluções. Além disso, ao ajustar parâmetros como o tamanho da população, taxas de mutação e critérios de parada, obteve-se uma compreensão sensível da necessidade de equilibrar a exploração do espaço de busca do problema para alcançar resultados otimizados de boa qualidade. Foram incorporados elementos aleatórios para introduzir diversidade e evitar convergir prematuramente para uma solução sub ótima, além da flexibilidade entre sua utilização para outros sistemas, sendo adaptadas as taxas e parâmetros em função da complexidade da rede a ser estudada. Adotando-se os princípios da metas-heurística, onde a adaptação

progressiva e a busca por ótimos de boa qualidade podem ser alcançadas por meio da evolução iterativa da população.

Sobre os resultados obtido, as perdas iniciais sem submeter os casos estudados ao algoritmo, apresentados nas tabelas 5 e 6, estão de acordo com o valor teórico. Através do AG dedicado, os valores encontrados também são satisfatórios considerando-se toda a complexidade do problema e quantidades de variáveis de decisão envolvidas. A taxa de mutação é mantida ajustada em todos os testes no valor estipulado de 1%, e as soluções obtidas são factíveis.

O resultado da avaliação do funcionamento do AG para o sistema de 33 barras, quando inseridos os bancos de capacitores, a energia solar e com custos financeiros de operação baixo, foram satisfatórios e obtiveram erros médio de 2,31%, tendo um dos resultados apresentado um erro de apenas 1,1%, conforme a tabela 7.

Com o aumento dos custos dos bancos de capacitores, a função objetivo muda completamente e acaba alterando-se com relação à resposta anterior. As perdas seguem o mesmo comportamento e convergem para os valores próximos à etapa anterior, porém com o aumento dos custos financeiros, esse parâmetro é predominante para modificação da função objetivo. Com a ligação das cargas dos carros elétricos, pelo método proposto de modelagem, os resultados não apresentam diferenças significativas, retornando e equilibrando o valor da função objetivo e das perdas para os sistemas quando ligados apenas com bancos de capacitores e a geração fotovoltaica. Os PV, por sua vez, quando instalados sem os PHEVs apresentam uma redução das perdas do sistema e da função objetivo, como já era esperado e representado nas tabelas 8 e 9.

Nos dois sistemas, a solução incumbente apresenta um comportamento decrescente em função do número de gerações, havendo nas primeiras iterações uma busca global, e nas demais uma busca local. Para o sistema de 134 barras, devido ser um sistema maior e mais complexo, com mais nós candidatos para os capacitores e os PV, e maiores influências dos eletros postos, os resultados também apresentam uma diferença maior. A complexidade inerente ao sistema resulta em um espaço de busca maior, com mais oportunidades para a instalação de capacitores e, consequentemente, um maior potencial local de otimização da função objetivo. O aumento na complexidade também implica em mais interações e interdependências

entre as variáveis, o que pode resultar em mudanças mais amplas e diferenciadas nos resultados.

Os resultados obtidos são apenas números ou métricas. Eles representam uma avaliação abrangente do problema sob análise e refletem o estudo minucioso dos impactos da geração fotovoltaica e carros híbridos nas redes de distribuição em curto prazo. Esses resultados vão além de uma simples função objetivo; eles fornecem uma avaliação e compreensão das implicações técnicas, econômicas e operacionais dessas tecnologias emergentes.

O algoritmo genético é uma ferramenta muito interessante para problemas de otimização, utilizando os princípios das metas-heurísticas, seu processo computacional e os seus recursos de implementação, auxiliam significativamente em processos que são necessários tempo, agilidade e confiabilidade, ainda mais quando se trata de planejamento de sistemas de distribuição, que precisam ser reavaliados e estudados junto com todo o avanço científico da área, tanto a longo prazo, mas também a curto prazo. Quando submetido a cromossomos menos complexos, que contenham genes menos dinâmicos e que influenciam menos a busca local e convergência da população, os resultados encontrados são bem próximos do esperado. Os AGs são poderosos para encontrar soluções próximas do ideal em uma ampla variedade de problemas. No entanto, a capacidade de encontrar uma resposta "otimizada de excelente qualidade" depende de vários fatores, sendo além da complexidade, também a definição da função de aptidão e os ajustes dos parâmetros do algoritmo. Os estudos e artigos sobre o tema frequentemente indicam que, para muitos problemas práticos, os algoritmos genéticos conseguem encontrar soluções que estão muito próximas do ideal, mas a precisão exata pode variar conforme os problemas sob análise. Por isso é importante compreender o problema analisado e a precisão e eficiência esperada da resposta.

Mesmo com essas restrições, ele continua sendo um método que pode ser importante e auxiliar na tomada de decisões e previsões futuras, de longo e curto prazo, para o planejamento de redes elétricas e seus desafios.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL, 2012. Resolução Normativa Nº 48

Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL, 2012. Resolução Normativa Nº 482

BAYKASOGLU, A.; OWEN, S.; GINDY, N. **Solution of goal programming models using a basic taboo search algorithm.** Journal of Operational Research Society, Nottingham, v.50, n.9, p.960-973, 1999.

BAYKASOGLU, A.; OWEN, S.; GINDY, N. **A taboo search-based approach to find the pareto optimal set in multiple objective optimizations.** Overseas Publishers Association, Nottingham, v.31, n.6, p.731-748, 1999.

BAZAN, L. F. A. **Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmo busca tabu.** 2003. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

BERNAL AGUSTÍN, J. L.; RAMIREZ ROSADO, I. J. **Genetic algorithm applied to the design of large power distribution systems.** IEEE Transactions on Power Systems, New York, v.13, n.2, p.696-703, 1998.

BLICKLE, T., **“Theory of Evolutionary Algorithms and Application to System Synthesis”**, dissertação de doutorado, Swiss Federal Institute of Technology, Zurique, 1996.

COLQUI J. S. (2017). **Controle de tensão em redes de baixa tensão com alta penetração de geração fotovoltaica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Ilha Solteira, Brasil, 2017.

“Como funciona o sistema fotovoltaico?”, Publicação, Luz Solar, 2021

COSSI, Antonio M., **“Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão”**, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira – SP, 2008.

COSSI, A. M.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. **Planning of secondary distribution circuits through evolutionary algorithms**. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v.20, n.1, p.205-213, 2005.

ELGERD, O. I., **Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica**, McGraw-Hill, São Paulo-SP, 1981.

“Especialistas apontam os desafios da geração distribuída.”, Redação, ENGIE Brasil, 2022. Acessado em: <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/especialistas-apontam-os-desafios-da-geracao-distribuida>.

“Estudos de fluxo de Potência”, Sistemas Elétricos, Pontifica Universidade Católica de Goiás, 2017.

Leonardo Machado de Brito et al. **Impactos da geração distribuída fotovoltaica na tensão elétrica de uma rede de distribuição em baixa tensão**. In: ANAIS DA XIV CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2021, Online. Anais eletrônicos..., Galoá, 2021.

MALAGUIAS, Neli Gomes Lisboa. **Uso dos Algoritmos Genéticos para a Otimização de Rotas de Distribuição**, Uberlândia, p. 43-53, dezembro 2006.

MICHALEWICZ, Z. **“Genetic Algorithm + Data Structures = Evolution Programs”**, 2nd ed., New York: Springer-Verlag. 1994.

NOGUEIRA, A.G., Rupolo, D., Chuma Cerbantes, M., Mantovani, J.R.S. (2018) **Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica com Fontes de Energia Fotovoltaicas e Cargas Especiais**. In: XXII Congresso Brasileiro

de Automática, 2018, João Pessoa. João Pessoa – PB. Sociedade Brasileira de Automática (SBA).

PACHECO, Marco A. C., “**Algoritmos genéticos: princípios e aplicações**”, Apostila do Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada (ICA), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1994.

PONNAVAIKKO, M.; RAO, P. **Distribution system planning through a quadratic mixed integer programming approach**. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v.2, n.4, p.1157- 1163, 1987.

PROENÇA, L. B. **Algoritmos genéticos no planejamento da expansão de distribuição de energia elétrica**. 1993. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 1993.

SHAFIEE, S., Fotuhi-Firuzabad, M., & Rastegar, M. (2013). **Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems**. IEEE Transactions On Smart Grid, 4(3), 1351-1360.

“**Tipos de Carros Elétricos - Veículos Elétricos (VE)**”, Publicação, Neocharge, (s.d.). Acessado em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>

TSAI-HSIANG CHEN; JENG-TYAN CHERNG. Optimal phase arrangement of distribution transformers connected to a primary feeder for system unbalance improvement and loss reduction using a genetic algorithm. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v.15, n.3, p.994-1000, 2000.

ZIMMERMAN, R. D., Murillo-Sanchez, C. E. and Thomas, R. J (2011). “**MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education**,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 12–19.