

# APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ALGORITMO GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM EQUIPAMENTOS DE CLIMATIZAÇÃO EM UMA EMPRESA DE TELECOMUNICAÇÕES

## GENETIC ALGORITHM TECHNIQUE APPLICATION FOR OPTIMIZING PREVENTIVE MAINTENANCE COSTS IN AIR CONDITIONING EQUIPMENT IN A TELECOMMUNICATIONS COMPANY

**Fabrcio Montes Silva**

Mestre em Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Elétrica  
[fabrciomontes.silva@gmail.com](mailto:fabrciomontes.silva@gmail.com)

**Valeriana Cunha**

Doutora em Administração  
Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Gestão e Negócios  
[valeriana@ufu.br](mailto:valeriana@ufu.br)

### Resumo:

A empresa deste estudo é uma organização de médio porte do setor de telecomunicações, situada na região Nordeste do Brasil. A empresa enfrenta dificuldades na gestão de manutenções preventivas em suas estações distribuídas pela região devido a uma abordagem limitada na elaboração da previsão orçamentária. Essa abordagem baseia-se exclusivamente em dados de anos anteriores, desconsiderando desvios de execução devido a restrições orçamentárias e reajustando valores por meio de decisões gerenciais sem levar em conta índices econômicos. Embora essa metodologia proporcione resultados financeiros a curto prazo, ela acarreta um aumento na necessidade de manutenções corretivas em médio e longo prazos, reduzindo a vida útil dos equipamentos de climatização. Portanto, o objetivo deste estudo é otimizar a gestão de manutenções preventivas nos equipamentos de climatização da empresa. A pesquisa aplica algoritmos genéticos e adota a estratégia de estudo de caso. É uma pesquisa de cunho exploratório-descritivo e a coleta de dados foi realizada por meio de consulta documental. Os resultados encontrados mostram diferenças significativas entre o que é orçado e o que seria efetivamente necessário para a realização da atividade, indicando fortemente que a manutenção preventiva dos equipamentos não está sendo realizada nos períodos especificados pelos fabricantes.

**Palavras-chave:** gestão da manutenção; otimização de rotas; algoritmo genético.

### Abstract:

The company in this study is a medium-sized telecommunications organization located in the Northeast region of Brazil. The company faces difficulties in managing preventive maintenance at its stations spread across the region due to a limited approach in budget forecasting. This approach relies solely on previous years' data, disregarding execution deviations due to budgetary constraints and adjusting values through managerial decisions without considering economic indices. Although this methodology provides short-term financial results, it leads to an increased need for corrective maintenance in the medium and long term, reducing the

- a) Submissão em: 15/07/2024.
- b) Envio para avaliação em: 13/08/2024.
- c) Término da avaliação em: 14/08/2024.
- d) Correções solicitadas em: 14/08/2024.
- e) Recebimento da versão ajustada em: 02/09/2024.
- f) Aprovação final em: 09/09/2024.

lifespan of the air conditioning equipment. Therefore, the objective of this study is to optimize the management of preventive maintenance on the company's air conditioning equipment. The research employs genetic algorithms and adopts a case study strategy. It is an exploratory-descriptive study, and the data collection was conducted through document analysis. The results reveal significant differences between the budgeted amounts and what would actually be necessary to carry out the activity, strongly indicating that the preventive maintenance of the equipment is not being performed in the periods specified by the manufacturers.

**Keywords:** maintenance management; route optimization; genetic algorithm.

## 1 Introdução

O cenário de telecomunicações no Brasil, especialmente no que diz respeito à Banda Larga Fixa, é dominado pelo uso da fibra óptica, que é a principal tecnologia escolhida por 62,9% dos clientes nacionais, conforme o Infográfico Setorial de Telecomunicações da Anatel de fevereiro de 2022 (Agência Nacional de Telecomunicações, 2022).

Segundo Pinheiro (2016), a fibra óptica utiliza uma combinação de equipamentos ativos e passivos em sua infraestrutura para possibilitar o tráfego de sinais por meio de comprimentos de onda específicos. No entanto, essa tecnologia tem limitações de alcance devido à atenuação do sinal, o que restringe o alcance dos equipamentos ativos na rede. Para atender seus clientes através da rede de fibra óptica, as empresas de telecomunicações devem implementar estações de acordo com suas necessidades e projetos de rede, respeitando as equações de dimensionamento dos enlaces ópticos.

Almeida (2022) ressalta que uma estação de telecomunicações local pode ser equipada com um retificador, uma vez que os equipamentos de telecomunicação são comumente projetados para operar a -48 Volts em regime constante. Além disso, são dotados de baterias para fornecer energia em caso de interrupções no fornecimento da concessionária, incluem terminais de linha óptica (*optical line terminal* - OLT) e possuem um distribuidor interno óptico.

Algumas empresas de telecomunicações optam por incorporar equipamentos de climatização em suas estações. Isso se faz necessário devido ao acúmulo de equipamentos de vários anéis de rede nas estações, incluindo as centralizadas, que abrigam outros tipos de equipamento para transmissão de longa distância. Essa medida visa prevenir que as OLTs instaladas excedam suas temperaturas nominais de trabalho e otimizar o desempenho das baterias chumbo-ácidas do tipo estacionário, que apresentam desempenho ideal a 25 graus Celsius (Tipos [...], 2021).

A empresa de telecomunicações objeto deste estudo é uma organização de médio porte localizada no Nordeste do Brasil. A presença de baterias e equipamentos de climatização nas estações de telecomunicações demanda a realização de serviços como manutenções preventivas e corretivas. Devido à distribuição das estações da empresa para atender clientes em diversas regiões, há uma cadeia logística de serviços necessários para garantir a manutenção da conectividade oferecida pela empresa. A gestão das manutenções preventivas nas estações é conduzida de forma empírica, baseando-se em dados de anos anteriores. Assim, o problema a ser investigado relaciona-se com a necessidade de aprimorar a tomada de decisão em relação à gestão das manutenções preventivas da empresa.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é otimizar a gestão de manutenções preventivas nos equipamentos de climatização da empresa, utilizando a metodologia de algoritmos genéticos.

## 2 Fundamentação Teórica

Nesta seção, serão abordados os conceitos gerais de roteirização e, de forma mais específica, a aplicação de algoritmos genéticos.

### 2.1 Problemas de roteirização

Conforme Maior *et al.* (2020), os problemas de roteirização podem ser de diferentes tipos:

- a) múltiplos pontos de origem e um único destino: o objetivo é determinar a rota mais curta. O método do caminho mais curto é comumente aplicado;
- b) vários pontos de origem e destino: o objetivo é conectar todos os pontos de maneira eficiente, geralmente resolvido pelo método do transporte;
- c) cada ponto é tanto origem quanto destino: o objetivo é visitar todos os pontos uma vez da maneira mais eficiente (problema do caixeiro viajante).

A escolha do método mais adequado para resolver um problema de roteirização depende do tipo de problema e das restrições específicas. De acordo com Belfiore e Fávero (2012), o problema do caminho mais curto, também conhecido como problema do caminho mínimo, busca determinar o menor caminho entre dois nós em uma rede, minimizando também o custo total ou o tempo total. Este problema considera um único nó de oferta (ponto de origem) e um nó de demanda (ponto de destino). O problema do caminho mais curto pode ser resolvido de forma eficiente utilizando um algoritmo simples chamado de algoritmo de busca em largura. Este algoritmo sempre encontra o caminho mais curto entre dois nós de uma rede. No entanto, sua eficiência pode ser reduzida se o número de nós na rede for grande.

O problema de transporte é uma aplicação de programação linear que visa determinar o menor custo para o transporte de produtos entre grupos de origens e grupos de destinos. Conforme Hillier e Lieberman (2015), cada origem possui uma oferta determinada de unidades a serem distribuídas aos destinos, enquanto cada destino tem uma demanda específica pelas unidades recebidas das origens. Esse tipo de problema pode ser modelado como um sistema de equações lineares, em que cada variável representa a quantidade de unidades transportadas de uma origem para um destino, com o objetivo de minimizar a soma dos custos de transporte. Existem diferentes métodos de resolução, incluindo o algoritmo de transporte, o algoritmo de Dantzig-Wolfe e o algoritmo de Ford-Fulkerson (Dantzig; Ford; Fulkerson, 1957).

O problema do caixeiro viajante (*Travelling Salesman Problem* – TSP) é um problema clássico de otimização combinatória que busca determinar a rota de menor distância, custo ou tempo, onde todos os nós serão visitados somente uma vez, com o ponto de partida e retorno sendo um único depósito (Hillier; Lieberman, 2015).

Gutin e Punnen (2009) destacam que o TSP é um problema significativo em diversas áreas e continua sendo um campo ativo de pesquisa em ciência da computação. Ele pode ser utilizado para encontrar a rota mais eficiente para a entrega de produtos entre diferentes pontos ou clientes e também para programar de maneira ótima diferentes tarefas ou eventos.

Segundo Goldbarg e Luna (2005), o problema do caixeiro viajante teve sua origem em um jogo proposto por William Rowan Hamilton chamado *Around the World*. O objetivo do jogo era descobrir uma rota através dos vértices de um dodecaedro, onde todos os vértices deveriam ser visitados uma única vez sem repetição. Davendra (2010) explica que, no problema do caixeiro viajante, dado um conjunto de cidades e o custo de viagem (ou distância) entre cada par possível, o desafio é encontrar a melhor maneira de visitar todas as cidades e retornar ao ponto de partida, minimizando o custo da viagem (ou distância).

Hillier e Lieberman (2015) classificam este tipo de problema como pertencente à classe dos problemas NP-completos, que são conhecidos por sua alta complexidade computacional e, portanto, não são solucionáveis em tempo polinomial. À medida que o tamanho do problema aumenta, seja pelo acréscimo no número de cidades, clientes ou nós, o tempo de execução para resolvê-lo cresce de maneira exponencial e não polinomial.

Sendo assim, Lin e Kernighan (1973) alertam que, se a instância do problema for grande, não é possível resolvê-lo de forma exata em tempo hábil, sendo necessário recorrer a métodos heurísticos ou meta-heurísticos, como o algoritmo genético (AG). O AG é utilizado para resolver problemas de otimização que são difíceis ou impossíveis de serem resolvidos com métodos tradicionais, como o problema do caixeiro viajante. Assim, serão apresentados tópicos importantes sobre o método para o desenvolvimento desta pesquisa.

## 2.2 Algoritmos Genéticos

Nas décadas de 1950 e 1960, diversos cientistas do ramo da computação estudaram, de forma autônoma, sistemas evolutivos com o intuito de utilizá-los como uma ferramenta para a otimização de problemas de engenharia. A intenção era desenvolver uma população de possíveis soluções para a otimização de problemas, por meio do uso de operadores inspirados na variação genética e na seleção natural (Mitchell, 1998; Holland, 1975).

Um dos primeiros trabalhos sobre o uso de sistemas evolutivos em engenharia foi realizado por John Holland, que desenvolveu o algoritmo genético (AG) em 1965. Seu objetivo era compreender o fenômeno da adaptação ocorrido na natureza e, a partir deste conhecimento, desenvolver formas em que os mecanismos da adaptação fossem aplicados a sistemas computacionais para encontrar boas soluções para problemas de alta complexidade. O AG simula o processo evolutivo natural, utilizando operadores de recombinação, mutação e seleção natural para gerar uma população de soluções para um problema (Mitchell, 1998; Linden, 2012).

De forma complementar, Sivanandam e Deepa (2008) definem o algoritmo genético como um método de resolução de problemas que utiliza a genética como modelo. É uma técnica de busca que visa encontrar soluções aproximadas para problemas de otimização e busca. Os sistemas evolutivos são ferramentas poderosas para a otimização de problemas de engenharia. Eles são capazes de encontrar soluções superiores às obtidas por métodos tradicionais e podem ser aplicados a uma ampla de problemas, incluindo o planejamento de rotas, o design de estruturas e o controle de processos.

De acordo com Sampaio e Araújo (2019), os AGs se diferenciam dos demais métodos de busca e otimização nos seguintes aspectos:

- a) codificação dos parâmetros: usam uma representação codificada dos parâmetros do problema, que pode ser binária, decimal ou outra;
- b) população de soluções: eles operam com múltiplas soluções simultaneamente, permitindo explorar um espaço maior de soluções e encontrar resultados mais eficazes;
- c) regras probabilísticas: os algoritmos genéticos utilizam regras probabilísticas para maior flexibilidade e adaptabilidade a diversos problemas;
- d) independência de derivadas: não requerem derivadas ou conhecimentos específicos auxiliares, o que os torna aplicáveis a uma ampla variedade de problemas.

Como os algoritmos genéticos são inspirados na genética e na seleção natural, há uma analogia entre termos biológicos e os termos utilizados nos AGs. Para uma melhor compreensão, segue a definição de alguns termos usados, conforme Goldberg e Luna (2005) e Linden (2012):

- a) cromossomo: representa um indivíduo na população;
- b) gene: simboliza um componente do cromossomo;
- c) população: agrupamento de indivíduos, representa um conjunto de soluções para o problema;
- d) operadores genéticos: operações realizadas sobre cada cromossomo para simular processos naturais como mutação e cruzamento;
- e) espaço de busca: espaço que compreende todas as possíveis soluções.

Na Figura 1, apresenta-se uma visão geral do funcionamento dos Algoritmos Genéticos. Em cada iteração, dois pais são selecionados para o cruzamento. Neste processo, as informações genéticas dos pais são combinadas para gerar uma solução filha. Após o cruzamento, ocorre a mutação, onde alguns genes do cromossomo da solução filha são alterados aleatoriamente. A solução resultante é então comparada com os demais membros da população. Se for mais adequada do que os outros membros, substituirá o membro com o pior desempenho. Caso contrário, a solução será descartada. Este processo é repetido até que o critério de parada seja atendido (Chaudhry; Usman, 2017).

No contexto dos algoritmos genéticos, em uma pesquisa como esta que envolve roteirização, onde o objetivo é encontrar o menor caminho entre um conjunto de pontos, cada ponto é representado por um gene e cada cromossomo por uma sequência de genes. A população consiste em um conjunto de cromossomos e o espaço de busca compreende todas as possíveis sequências de genes. Os operadores genéticos são então utilizados para gerar novos cromossomos a partir dos existentes.

**Figura 1 - Representação do método de algoritmo genético.**

INÍCIO
Gerar uma população inicial.
Avaliar a aptidão ( <i>fitness</i> ) dos indivíduos da população.
Repetir:
Início:
Selecionar um conjunto de pais na população.
Cruzar os pais de modo que se reproduzam.
Avaliar a aptidão ( <i>fitness</i> ) dos filhos gerados.
Substituir os filhos julgados inadequados.
Fim
Continuar até que o critério de parada seja atendido.
FIM

Fonte: Goldberg e Luna (2005).

### 2.2.1 Componentes do Algoritmo Genético

Os componentes de um algoritmo genético são:

- a) representação ou codificação: segundo Eiben e Smith (2015), inicialmente, é necessário vincular o “mundo real” ao “mundo do algoritmo evolucionário”, ou seja, representar o problema de maneira que o computador possa compreendê-lo. Isso envolve definir como as soluções possíveis serão especificadas e armazenadas. Os objetos que formam possíveis soluções no contexto original são chamados de fenótipos, e sua codificação no algoritmo, de genótipos. Existem vários métodos de codificação, como representação binária, decimal e gramatical;
- b) avaliação ou fitness: conforme Linden (2012), uma vez que as soluções estão codificadas, elas precisam ser avaliadas para determinar sua qualidade. Isso é feito atribuindo uma pontuação a cada indivíduo, que ajuda a identificar quão adequado

- ele é para resolver o problema. O processo de avaliação deve refletir os requisitos necessários para a adaptação da população;
- c) seleção: ainda conforme Linden (2012), a seleção simula o mecanismo de seleção natural, escolhendo os indivíduos com as melhores pontuações para reprodução. Contudo, indivíduos com pontuações mais baixas também podem gerar descendentes, pois uma seleção exclusiva dos melhores reduziria a diversidade genética da população. Um método comum é a seleção por torneio, onde, segundo Bäck, Fogel e Michalewicz (2000), um grupo de indivíduos é escolhido aleatoriamente para uma competição (torneio) e o vencedor é determinado pelo seu valor de aptidão;
  - d) operadores genéticos: conforme Larrañaga e Lozano (2002), estes operadores, como cruzamento, mutação e recombinação, são usados para criar novas soluções a partir do material genético dos pais selecionados.

### 2.2.2 Parâmetros genéticos

Alguns parâmetros afetam diretamente o funcionamento dos algoritmos genéticos. Mariano (2022) destacam alguns deles:

- a) tamanho da população: o tamanho da população refere-se ao número de indivíduos presentes em cada geração do algoritmo genético. Existe um *trade-off* entre populações grandes e pequenas. Populações maiores tendem a demandar mais tempo de execução, enquanto populações menores podem não oferecer uma cobertura adequada do espaço do problema;
- b) taxa (probabilidade) de cruzamento: a taxa de cruzamento é a probabilidade de dois indivíduos serem cruzados para gerar um novo indivíduo. Aqui, também existe um *trade-off* importante. Uma taxa de cruzamento alta pode introduzir rapidamente novas características na população, mas também pode resultar na perda de bons indivíduos;
- c) taxa (probabilidade) de mutação: a taxa de mutação é a probabilidade de um indivíduo sofrer alterações em suas características (mutações), sendo crucial para a diversificação da população no AG. Uma taxa de mutação alta pode promover uma melhor exploração do espaço de busca, mas também pode resultar em uma população excessivamente heterogênea;
- d) número de gerações: o número de gerações é o critério de parada mais comum e é usado para determinar quando o algoritmo genético deve ser interrompido. Um número insuficiente de iterações pode impedir a descoberta de boas soluções, enquanto um número excessivo de iterações pode prolongar desnecessariamente o tempo para alcançar uma solução eficaz.

### 2.2.3 Critérios de parada

O critério de parada indica o momento em que se deve finalizar a execução do algoritmo genético. Matos (2018) aponta alguns dos motivos que levam a essa finalização: a) alcançar o número de gerações predefinido, b) não verificar melhorias na população após  $x$  iterações, c) um indivíduo alcançar a pontuação determinada anteriormente na avaliação.

Eiben e Smith (2015) identificam duas principais formas para a finalização de um AG: a) quando é possível observar um padrão ótimo nos indivíduos da população; b) quando não é possível observar um padrão nos indivíduos. Os autores citam alguns motivos que podem levar à finalização do AG, são eles:

- a) o limite determinado de avaliações de aptidão é alcançado;

- b) a população não se aproxima do padrão ótimo após um número suficiente de gerações;
- c) a população não apresenta diversidade e se torna homogênea;
- d) o algoritmo gasta muito tempo para encontrar uma solução.

Eiben e Smith (2015) também destacam que não existe um critério de parada universalmente superior para todos os problemas. O critério deve ser escolhido de acordo com o problema específico que está sendo solucionado.

### 3 Metodologia

A pesquisa em questão é de natureza aplicada, pois utiliza conhecimentos já estabelecidos sobre algoritmos genéticos para propor um modelo de rotas para a realização de manutenções preventivas nos equipamentos de climatização de uma empresa de telecomunicações localizada no Nordeste do Brasil. Saunders, Lewis e Thornhill (2012) destacam que a pesquisa aplicada visa solucionar um problema específico, contribuindo com novos conhecimentos que são geralmente limitados a esse contexto. Tanto a pesquisa básica quanto a aplicada devem respeitar o rigor de pesquisas científicas.

O trabalho adota uma perspectiva filosófica alinhada ao paradigma interpretativo. É crucial entender o paradigma da pesquisa antes de definir a estratégia da pesquisa ou selecionar um determinado método. O paradigma relaciona-se a crenças e pressupostos sobre a realidade (ontologia) e sobre como o conhecimento humano é construído (epistemologia). Nesta pesquisa, do ponto de vista ontológico, considera-se que a realidade social é o resultado de negociações e compartilhamento de significados entre indivíduos, configurando-se como uma construção social. Essa ontologia implica em uma epistemologia construtivista.

A estratégia empregada é o estudo de caso que, segundo Yin (2015), é um estudo empírico que explora um fenômeno, geralmente contemporâneo, dentro de seu contexto real, especialmente quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não são claramente evidentes. Envolve uma análise detalhada de um ou mais objetos (casos), permitindo um entendimento profundo do objeto estudado. Mattar (2013) ressalta que o objetivo é aprofundar o conhecimento sobre um problema ainda não totalmente elucidado, visando estimular a compreensão, sugerir hipóteses e questões ou desenvolver teorias.

De acordo com os objetivos, esta pesquisa é exploratória-descritiva. Saunders, Lewis e Thornhill (2012) afirmam que este tipo de pesquisa serve para investigar um determinado assunto e pode constituir trabalhos precursores ou continuidades de estudos anteriores.

A coleta de dados primários para servirem de input deste trabalho foi realizada por meio de consulta documental na empresa estudada. Por fim, o processamento e análise dos dados coletados foram executados utilizando métodos quantitativos, especificamente através de algoritmo genético binário.

### 4 Estudo de caso

Nesta seção, será detalhado o estudo de caso realizado, começando pela contextualização da empresa e do ambiente em que o problema de roteirização foi identificado. A seguir, será descrita a situação específica que levou à necessidade de otimização e, finalmente, serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos algoritmos genéticos.

#### 4.1 Contextualização

A empresa objeto de estudo dessa pesquisa, situada em Recife, atua no ramo de telecomunicações e é especializada em serviços que utilizam fibra óptica. Ela opera em sete

estados no Nordeste - Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará – com um total de 48 estações estrategicamente distribuídas pela região.

Essas estações abrigam equipamentos de telecomunicações que geram calor significativo, necessitando de climatização eficaz. Na empresa, dos 93 equipamentos de climatização, 73 são do tipo *split inverter*, com capacidades variando de duas a cinco torres de refrigeração (TR). Os outros 20 equipamentos são do tipo *fan coil*, que possuem requisitos específicos para manutenção preventiva. Embora as capacidades dos equipamentos variem, os procedimentos e custos de manutenção preventiva são padronizados, facilitando a uniformização dos processos e dos custos associados.

A equipe de operações é encarregada de gerir as manutenções preventivas e corretivas dos equipamentos em todas as estações. As manutenções preventivas dos equipamentos de climatização, que incluem a limpeza e substituição de filtros, são realizadas frequentemente.

Para elaborar o orçamento anual destinado à manutenção preventiva destes equipamentos, a equipe administrativa baseia-se nos gastos histórico do ano anterior. Ajustes no orçamento, incluindo correções monetárias ou aumentos específicos nos valores dos serviços, são determinados por decisões gerenciais no momento do fechamento do orçamento. O orçamento de 2023 foi de R\$180.000,00 para despesas com manutenção preventiva de climatização ao longo do ano.

Para garantir a execução das manutenções, a empresa mantém contratos do tipo Lista de Preços Unitários (LPU) com dois fornecedores da região. Esses contratos têm duração de 36 meses, e próximo ao vencimento, o setor de compras realiza pesquisas de mercado para assegurar os melhores preços disponíveis.

## 4.2 Situação e Problema

Das 93 máquinas instaladas nas estações da empresa, 20 recebem manutenção preventiva pelo fornecedor A e as 73 restantes, do tipo *split inverter*, são atendidas pelo fornecedor B. Cada fornecedor tem seus próprios custos de manutenção preventiva por serviço, bem como custos por quilômetro rodado, ambos especificados em seus respectivos contratos de Lista de Preços Unitários (LPU).

O fornecedor A realiza seus serviços de manutenção preventiva exclusivamente na cidade de Recife, pois possui um contrato para manutenção de máquinas do tipo *fan coil*, que a empresa possui apenas em uma estação nessa cidade. O contrato do fornecedor A não inclui acréscimos nos custos por quilômetro rodado ou diárias, já que a cidade base e a cidade de execução do serviço são as mesmas. É importante ressaltar que esses equipamentos requerem manutenção preventiva mensal, de acordo com as recomendações do fabricante.

Quanto aos 73 equipamentos atendidos pelo fornecedor B, é relevante notar que este fornecedor tem equipes baseadas em Salvador, Natal e Fortaleza. Assim, os deslocamentos para outras cidades podem ser iniciados a partir de qualquer uma dessas localidades, o que possibilita uma otimização da quilometragem percorrida. A Figura 2 ilustra os custos, regiões de atendimento e cidades base de cada fornecedor.

**Figura 2 – Dados dos fornecedores para realização da manutenção preventiva de equipamentos de climatização.**

Fornecedor	Custo de Preventiva	Custo por km rodado	Custo por diária	Região de atendimento	Cidade Base
A	R\$84,63	Não se aplica	Não se aplica	Recife	Recife
B	R\$225,90	R\$2,50	R\$300,00	Nordeste	Salvador, Natal e Fortaleza

Fonte: dados internos da empresa.



É fundamental considerar que a frequência das manutenções dos equipamentos varia conforme o fabricante e a capacidade de cada um, impactando diretamente as cidades e as estações que o fornecedor precisa incluir em sua rota. A Figura 3 mostra as cidades, a quantidade de equipamentos instalados em cada uma e a frequência de manutenção preventiva correspondente a esses equipamentos.

Conforme descrito, os 73 equipamentos a serem atendidos estão distribuídos por 34 cidades e abrangem sete estados da região Nordeste do Brasil. Nesse contexto, os custos relacionados ao quilômetro rodado e às diárias podem impactar significativamente nos custos totais do serviço prestado.

Este trabalho propõe o uso da técnica de algoritmos genéticos para definir as rotas mais eficientes para a execução das manutenções, respeitando a frequência de manutenção de cada máquina, os tempos de deslocamento e as janelas de acesso permitidas nas estações da empresa. O objetivo é minimizar os custos anuais para a empresa, ao mesmo tempo em que garante o funcionamento adequado de seus equipamentos de climatização.

O relevo da região Nordeste apresenta características como planaltos, exemplificado pelo Planalto da Borborema no leste, a depressão sertaneja na região central e as planícies no litoral. No entanto, esse relevo não apresenta um gradiente significativo de altitude, o que contribui para uma maior velocidade média de trânsito nas rodovias da região. É importante destacar que, conforme pesquisa da Confederação Nacional de Transportes (2022), 92,4% das rodovias do Nordeste são de pista simples. Esses são fatores cruciais ao planejar as rotas de manutenção, uma vez que influenciam o tempo de deslocamento e a eficiência das viagens.

**Figura 3 - Equipamentos de climatização atendidos pelo Fornecedor B distribuídos por cidade e frequência de manutenção preventiva.**

Cidade - Estado	Quant Equipamentos	Frequência Manutenção	Cidade - Estado	Quant Equipamentos	Frequência Manutenção
Aracaju – SE	2	Mensal	Goiana – PE	1	Mensal
Caucaia – CE	1 / 1	Mensal / Quadrimestral	Jaboatão dos Guararapes – PE	2	Mensal
Fortaleza – CE	9 / 1	Mensal / Bimestral	Mirandiba – PE	1	Bimestral
João Pessoa – PB	4 / 4	Mensal / Quadrimestral	Palmares – PE	1	Quadrimestral
Maceió – AL	2	Mensal	Ribeirão – PE	1	Mensal
Natal – RN	6 / 1	Mensal / Quadrimestral	Recife – PE	4	Mensal
Parnamirim – RN	1	Bimestral	Rio Formoso – PE	1	Mensal
Abreu e Lima – PE	1	Quadrimestral	Surubim – PE	1	Mensal
Arcoverde – PE	1	Bimestral	Toritama – PE	1	Quadrimestral
Aliança – PE	1	Mensal	Vitória de Santo Antão – PE	2	Mensal
Barreiros – PE	1	Quadrimestral	Feira de Santana – BA	2	Mensal
Bezerros – PE	1	Mensal	Itabuna – BA	2	Quadrimestral
Carpina – PE	1	Mensal	Lauro de Freitas – BA	1	Mensal
Cabo de Santo Agostinho – PE	1	Mensal	Salvador – BA	5 / 1	Mensal / Quadrimestral

Caruaru – PE	1 / 1	Mensal / Quadrimestral	Ubaitaba – BA	2	Bimestral
Custodia – PE	1	Quadrimestral	Eusébio – CE	1	Bimestral
Cupira – PE	1	Quadrimestral	Maracanaú – CE	1	Bimestral

Fonte: dados internos da empresa.

A análise da Figura 4 indica que, para a região Nordeste, a velocidade média é predominantemente influenciada por fatores como estradas retas, pistas simples e relevo plano ou ondulado. Considerando que os veículos utilizados pelos fornecedores que prestam os serviços de manutenção são do tipo leve, a velocidade média adotada neste estudo é de 85 km/h.

No que diz respeito ao fornecedor A, os custos de manutenção preventiva dos equipamentos de climatização estão vinculados à quantidade de equipamentos, às taxas tabeladas para cada tipo de manutenção preventiva e à frequência dessas manutenções. A partir dos dados fornecidos na Figura 2, e considerando 12 manutenções ao ano para 20 equipamentos, foi possível calcular o valor apresentado na Equação 1.

$$R\$84,63 * 12 * 20 = R\$20.311,20 \quad (1)$$

**Figura 4 - Velocidade média de rodovias brasileiras conforme características de pista, relevo e tipo de veículo**

classe	tangente/curva	pista	relevo	veículo	velocidade de operação (km/h)	
					média	máxima
1	tangente	simples	plano	leve	85	100
2				pesado	75	85
3			ondulado	leve	85	90
4				pesado	65	80
5			montanhoso	leve	70	80
6				pesado	60	70
7		dupla	plano	leve	90	100
8				pesado	80	90
9			ondulado	leve	80	100
10				pesado	70	80
11			montanhoso	leve	70	80
12				pesado	55	60
13	curva	simples	plano	leve	80	90
14				pesado	70	80
15			ondulado	leve	70	80
16				pesado	65	70
17			montanhoso	leve	55	60
18				pesado	55	60
19		dupla	plano	leve	90	100
20				pesado	80	90
21			ondulado	leve	70	80
22				pesado	70	80
23			montanhoso	leve	55	60
24				pesado	55	60

Fonte: Labtrans (2008).

Para apurar os custos relacionados ao fornecedor B, é necessária uma análise abrangente, dado que este fornecedor atende 34 cidades a partir de três bases operacionais: Salvador, Natal e Fortaleza. Inicialmente, é essencial determinar a base mais adequada para servir cada cidade. Esse processo de seleção foi realizado através da construção de uma tabela

que compara as distâncias de cada base até todas as cidades, optando pela base mais próxima para cada uma. A Figura 5 ilustra o processo de tomada de decisão, enquanto a Figura 6 mostra a lista de cidades atendidas por cada base.

Além da alocação de cidades entre as bases de atendimento, surge a necessidade de criar várias rotas devido à variabilidade das frequências nas quais os equipamentos de climatização requerem manutenção preventiva. Considerando que existem três frequências distintas de manutenção - mensal, bimestral e quadrimestral (Figura 3) - é possível planejar a distribuição dessas manutenções ao longo dos meses do ano. Assim, pode-se determinar quantas rotas são necessárias para atender a essa demanda, conforme ilustrado na Figura 7.

**Figura 5 - Distâncias entre bases e cidades.**

	<b>Feira de Santana - BA</b>	<b>Maceió - AL</b>	<b>Caucaia - CE</b>
Salvador	<b>116km</b>	578km	1194km
Natal	1041km	<b>541km</b>	534km
Fortaleza	1066km	958km	<b>21km</b>

Fonte: elaborada pelos autores.

Com a distribuição das frequências de manutenção, conclui-se que são necessárias três rotas a partir de cada base (totalizando nove rotas a serem planejadas):

- rota 1: responsável pelos equipamentos de manutenção mensal, atendendo nos meses de janeiro, março, maio, julho, setembro e novembro;
- rota 2: abrange os equipamentos de manutenção mensal e bimestral, atendendo nos meses de fevereiro, junho e outubro;
- rota 3: encarregada dos equipamentos de manutenção mensal, bimestral e quadrimestral, atendendo nos meses de abril, agosto e dezembro.

#### 4.2.1 Base Salvador

Na base localizada em Salvador, a alocação das cidades em cada rota, com base na periodicidade das manutenções, é apresentada na Figura 8. Para cada rota, é necessário construir uma matriz cujo número de linhas e colunas corresponda ao número de cidades atendidas pela rota. Para ilustrar esse processo, foi estruturada a matriz referente à Rota 1 da base de Salvador, exibida na Figura 9.

**Figura 6 - Distribuição de cidades atendidas por cada base após aplicação do critério de escolha.**

<b>Base Salvador</b>	<b>Base Natal</b>	<b>Base Fortaleza</b>
Feira de Santana - BA	Maceió - AL	Caucaia - CE
Itabuna - BA	João Pessoa - PB	Eusébio - CE
Lauro de Freitas - BA	Parnamirim - RN	Maracanaú - CE
Aracaju - SE	Abreu e Lima - PE	Fortaleza - CE
Ubaitaba - BA	Arcoverde - PE	
Salvador - BA	Aliança - PE	
	Barreiros - PE	
	Bezerros - PE	
	Carpina - PE	
	Cabo de Santo Agostinho - PE	
	Caruaru - PE	
	Custódia - PE	
	Cupira - PE	
	Goiana - PE	
	Jaboatão dos Guararapes - PE	
	Mirandiba - PE	
	Palmares - PE	

	Ribeirão – PE	
	Recife – PE	
	Rio Formoso – PE	
	Surubim – PE	
	Toritama – PE	
	Vitória de Santo Antão – PE	
	Natal - RN	

Fonte: elaborada pelos autores.

**Figura 7 - Distribuição das frequências de manutenção preventiva dos equipamentos de climatização ao longo do tempo.**

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Mensal	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bimestral		X		X		X		X		X		X
Quadrimestral				X				X				X

Fonte: elaborada pelos autores.

**Figura 8 - Distribuição de cidades atendidas por cada rota para a base de Salvador.**

Rota 1	Rota 2	Rota 3
Feira de Santana – BA	Feira de Santana – BA	Feira de Santana – BA
Lauro de Freitas – BA	Lauro de Freitas – BA	Itabuna – BA
Aracaju – SE	Aracaju – SE	Lauro de Freitas – BA
Salvador – BA	Ubaitaba – BA	Aracaju – SE
	Salvador – BA	Ubaitaba – BA
		Salvador – BA

Fonte: elaborada pelos autores.

**Figura 9 - Matriz exemplo com distâncias entre cidades para a rota 1 da base Salvador.**

Rota 1	Feira de Santana	Lauro de Freitas	Aracaju	Salvador
Feira de Santana	0	131	310	116
Lauro de Freitas	131	0	292	28
Aracaju	310	292	0	324
Salvador	116	28	324	0

Fonte: elaborada pelos autores.

Essa matriz é construída para possibilitar que a ferramenta *Solver* do Microsoft Excel, que será utilizada para realizar a otimização por meio do algoritmo genético, identifique dentre todas as possibilidades aquela que melhor atende à necessidade.

Uma vez feita a matriz, as células na mesma planilha que fazem referência a essa matriz são configuradas. Essas serão as células que o *solver* ajustará após consultar a matriz e aplicar o algoritmo genético para encontrar a rota mais eficiente. A Figura 10 mostra um exemplo de como organizar essas células, indicando nas configurações do Solver quais células o algoritmo ajustará para otimizar a busca pela rota mais curta possível.

**Figura 10 - Estrutura associada à matriz de distâncias para utilização do algoritmo genético pela função *solver* no Microsoft Excel.**

Cidade	Salvador	Feira de Santana	Aracaju	Lauro de Freitas	Salvador	Total	Custo Total
Ref. Cidade	4	1	3	2	4		
Km Deslocado		116	310	292	28	746	R\$1.865,00

Fonte: elaborada pelos autores.

#### 4.2.2 Base Natal

Para a Base de Natal, a quantidade de cidades atendidas aumentou significativamente, o que influenciou na configuração para a construção das rotas, apresentadas na Figura 11. Deve-se seguir o mesmo procedimento ilustrado nas Figuras 9 e 10 para todas as rotas dessa base.

**Figura 11- Distribuição de cidades atendidas por cada rota para a base de Natal.**

Rota 1	Rota 2	Rota 3
Maceió – AL	Maceió – AL	Maceió – AL
João Pessoa – PB	João Pessoa – PB	João Pessoa – PB
Aliança – PE	Parnamirim – RN	Parnamirim – RN
Bezerros – PE	Arcoverde – PE	Abreu e Lima – PE
Carpina – PE	Aliança – PE	Arcoverde – PE
Cabo de Santo Agostinho – PE	Bezerros – PE	Aliança – PE
Caruaru – PE	Carpina – PE	Barreiros – PE
Goiana – PE	Cabo de Santo Agostinho – PE	Bezerros – PE
Jaboatão dos Guararapes – PE	Caruaru – PE	Carpina – PE
Ribeirão – PE	Goiana – PE	Cabo de Santo Agostinho – PE
Recife – PE	Jaboatão dos Guararapes – PE	Caruaru – PE
Rio Formoso – PE	Mirandiba – PE	Custodia – PE
Surubim – PE	Ribeirão – PE	Cupira – PE
Vitória de Santo Antão – PE	Recife – PE	Goiana – PE
Natal - RN	Rio Formoso – PE	Jaboatão dos Guararapes – PE
	Surubim – PE	Mirandiba – PE
	Vitória de Santo Antão – PE	Palmares – PE
	Natal - RN	Ribeirão – PE
		Recife – PE
		Rio Formoso – PE
		Surubim – PE
		Toritama – PE
		Vitória de Santo Antão – PE
		Natal - RN

Fonte: elaborada pelos autores.

#### 4.2.3 Base Fortaleza

É possível observar que a base de Fortaleza atende exclusivamente às cidades da região metropolitana da capital, conforme mostrado na Figura 12.

**Figura 12 - Distribuição de cidades atendidas por cada rota para a base de Fortaleza.**

Rota 1	Rota 2	Rota 3
Caucaia – CE	Caucaia – CE	Caucaia – CE
Fortaleza – CE	Eusébio – CE	Eusébio – CE
	Maracanaú – CE	Maracanaú – CE
	Fortaleza – CE	Fortaleza – CE

Fonte: elaborada pelos autores.

É importante notar que a Rota 1 para a base de Fortaleza não requer a utilização do *Solver*, pois abrange apenas duas cidades. No entanto, para as Rotas 2 e 3, deve-se seguir o mesmo procedimento ilustrado nas Figuras 9 e 10.

Após configurar as rotas, o *Solver* pode ser usado com o objetivo de encontrar o menor custo total possível. Uma vez que o *solver* determina as melhores rotas, é possível calcular o

tempo total gasto, considerando a quilometragem total, a velocidade média de 85 km/h, e as cidades atendidas, o que permite avaliar a necessidade de incluir o custo das diárias.

Os custos de deslocamento, manutenção preventiva e diárias devem ser somados, multiplicados pela quantidade de vezes que cada rota ocorrerá durante o ano. Posteriormente, os valores de todas as rotas e bases são somados para obter o valor total do fornecedor B. Incluindo também os custos previamente calculados para o fornecedor A, é possível obter o custo total.

### 4.3 Resultados

Ao aplicar o algoritmo genético às rotas das três cidades bases, os custos mínimos obtidos foram consolidados. A Figura 13 mostra os custos das três rotas para a base de Salvador. Na Figura 14, apresentam-se os custos para a base de Natal. Na Figura 15, são exibidos os custos para a base de Fortaleza. Por fim é possível calcular os custos totais ao somar os custos de cada base com os custos do fornecedor A, conforme ilustrado na Figura 16.

**Figura 13 - Custos da base Salvador.**

	<b>Rota 1</b>	<b>Rota 2</b>	<b>Rota 3</b>
Custo de deslocamento	R\$1.865,00	R\$3.237,50	R\$3.457,50
Custo de preventivas	R\$2.259,00	R\$2.710,80	R\$3.388,50
Custo de diárias	R\$300,00	R\$300,00	R\$600,00
Frequência anual	6	3	3
Total por rota	R\$26.544,00	R\$18.744,90	R\$22.608,00
Total anual	R\$67.896,90		

Fonte: elaborada pelos autores.

**Figura 14 - Custos da base Natal.**

	<b>Rota 1</b>	<b>Rota 2</b>	<b>Rota 3</b>
Custo de deslocamento	R\$3.425,00	R\$5.080,00	R\$5.262,50
Custo de preventivas	R\$6.551,10	R\$7.002,90	R\$9.939,60
Custo de diárias	R\$600,00	R\$900,00	R\$1.200,00
Frequência anual	6	3	3
Total por rota	R\$63.456,60	R\$38.948,70	R\$49.206,30
Total anual	R\$151.611,60		

Fonte: elaborada pelos autores.

**Figura 15 - Custos da base Fortaleza.**

	<b>Rota 1</b>	<b>Rota 2</b>	<b>Rota 3</b>
Custo de deslocamento	R\$105	R\$242,50	R\$242,50
Custo de preventivas	R\$2.259,00	R\$3.162,60	R\$3.162,60
Custo de diárias	-	-	-
Frequência anual	6	3	3
Total por rota	R\$14.184,00	R\$10.215,30	R\$10.215,30
Total anual	R\$34.614,60		

Fonte: elaborada pelos autores.

**Figura 16 - Custo anual total de manutenção de equipamentos de climatização.**

	<b>Valor</b>
Fornecedor A	R\$20.311,20
Fornecedor B – Base Salvador	R\$67.896,90
Fornecedor B – Base Natal	R\$151.611,60

Fornecedor B – Base Fortaleza	R\$34.614,60
Total	R\$274.434,30

Fonte: elaborada pelos autores.

## 5 Considerações Finais

Para executar a manutenção preventiva dos equipamentos de climatização da empresa conforme as recomendações dos fabricantes, foram calculados custos totais de R\$274.434,30 utilizando a técnica do algoritmo genético, considerando apenas os contratos de manutenção vigentes.

A aplicação desta técnica revelou um déficit de 52% entre o valor necessário e o valor orçado, indicando que a manutenção preventiva dos equipamentos não está sendo realizada nos intervalos especificados pelos fabricantes.

É preocupante que a empresa estruture seu orçamento anual baseando-se apenas em históricos, e ainda, sem levar em conta a correção monetária. Além disso, restrições impostas pela própria equipe de operações para não exceder o orçamento ao longo dos meses mascaram ainda mais a realidade da situação.

Adicionalmente, a empresa possui uma concentração significativa de estações em Pernambuco, mas o fornecedor que atende as máquinas do tipo *split inverter* não possui uma base neste estado, resultando em custos adicionais de deslocamento e sobrecarga na base de Natal. A introdução de um fornecedor adicional ou o estabelecimento de uma base do fornecedor atual em Pernambuco poderia ajudar a reduzir os custos de deslocamento.

Por fim, ao operar com um orçamento consideravelmente inferior ao necessário para a realização das manutenções preventivas em seus equipamentos de climatização, a empresa de telecomunicações pode economizar no curto prazo. No entanto, a negligência com essas máquinas inevitavelmente levará a uma redução significativa em sua vida útil, ao aumento da frequência das manutenções corretivas e à necessidade de reinvestimento a médio prazo.

A pesquisa realizada atingiu plenamente seu objetivo principal de otimizar a gestão das manutenções preventivas nos equipamentos de climatização de uma empresa de telecomunicações de médio porte, situada no Nordeste do Brasil, utilizando a metodologia de algoritmos genéticos. Adicionalmente, o estudo mostra como a incorporação de ferramentas científicas apropriadas pode ser útil para identificar lacunas nos processos empresariais, contribuindo para uma gestão mais eficiente. Essa abordagem oferece oportunidades concretas para melhorar as tomadas de decisão, baseando-se em princípios objetivos e racionais.

## Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Brasil). **Overview of telecommunications in Brazil**. Brasília: ANATEL, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/anatel/pt-br/dados/relatorios-de-acompanhamento/2022#R2022\\_6](https://www.gov.br/anatel/pt-br/dados/relatorios-de-acompanhamento/2022#R2022_6). Acesso em: 10 ago. 2023.

ALMEIDA, Fábio Rafael de. **Estudos e soluções para provimento de uma infraestrutura de rede FTTH em uma área residencial multicondominial**. 2022. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

BÄCK, Thomas; FOGEL, David Bruce; MICHALEWICZ, Zbigniew. **Evolutionary computation 1: basic algorithms and operators**. [s.l.]: CRC Press, 2000.

BELFIORE, Patrícia; FÁVERO, Luiz Paulo. **Pesquisa operacional**: para cursos de administração, contabilidade e economia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

CHAUDHRY, Imran Ali; USMAN, Muhammad. Integracija projektiranja tehnoloških procesa i planiranja primjenom genetičkih algoritama. **Tehnički vjesnik**, [s.l.], v. 24, n. 5, p. 1401-1409, 2017. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/188236>. Acesso em: 13 jul. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (Brasil). **Pesquisa CNT de rodovias**. Brasília: CNT, 2022. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/6b24f1b4-9081-485d-835dc8aafac2b708>. Acesso em: 12 jul. 2023.

DANTZIG, George Bernard; FORD, Lester Randolph; FULKERSON, Delbert Ray. A primal-dual algorithm for linear programs. In: KUHN, Harold W.; TUCKER, Albert William (org.). **Linear inequalities and related systems**. Princeton: Princeton University Press, 1957.

DAVENDRA, Donald. **Traveling salesman problem, theory and applications**. [s.l.]: InTech, 2010.

EIBEN, Ágoston Endre; SMITH, James Edward. **Introduction to evolutionary computing**. 2. ed. Amsterdam: Springer, 2015.

GOLDBARG, Marco César; LUNA, Henrique Pacca Loureiro. **Otimização combinatória e programação linear**: modelos e algoritmos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GUTIN, Gregory; PUNNEN, Abraham Punnappurath. **The traveling salesman problem and its variations**. [s.l.]: Springer, 2009.

HILLIER, Frederick Stanton; LIEBERMAN, Gerald Joseph. **Introduction to operations research**. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

HOLLAND, John Henry. **Adaptation in natural and artificial systems**: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.

LABORATÓRIO DE TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (Brasil). **Produto 6 – Listagem das velocidades médias de operação**. Florianópolis: LABTRANS, 2008. Disponível em: <https://www.labtrans.ufsc.br/wp-content/uploads/2020/12>. Acesso em: 11 ago. 2023.

LARRAÑAGA, Pedro; LOZANO, José Antonio. **Estimation of distribution algorithms**: a new tool for evolutionary computation. New York: Kluwer Academic, 2002.

LIN, Shen; KERNIGHAN, Brian Wilson. An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem. **Operations Research**, [s.l.], v. 21, n. 2, p. 498-516, 1973.

LINDEN, Ricardo. **Algoritmos genéticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012.

MAIOR, Caio Bezerra Souto; LINS, Isis Didier; MOURA, Márcio das Chagas; SANTANA, Débora Mendonça de. Roteirização de veículos para transporte de funcionários: estudo de caso em Pernambuco. In: 19. Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha, v.3,



n. 1, 2020, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SPOLM, 2020. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/roteirizacao-de-veiculos-para-transporte-de-funcionarios-estudo-de-caso-em-pernambuco-34596>. Acesso em: 12 ago. 2023.

MARIANO, Diego (org.). **BIOINFO - Revista Brasileira de Bioinformática e Biologia Computacional**. Campinas: Alfahelix, 2021. Disponível em: <https://bioinfo.com.br/bioinfo-01/>. Acesso em: 14 jul. 2022.

MATOS, Maicon Douglas dos Santos. **Aplicação de algoritmos genéticos para a mineração de regras SE-ENTÃO em conjuntos de dados com distribuição não-linear**. 2018. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MATTAR, Fauze Najib. **Pesquisa de marketing: metodologia, planejamento, execução e análise**. 7ª ed. São Paulo: Atlas, 2013.

MITCHELL, Melanie. **An introduction to genetic algorithms**. [s.l.]: The MIT Press, 1998.

PINHEIRO, José Maurício dos Santos. **Redes ópticas de acesso em telecomunicações**. Rio de Janeiro: Gen Ltc, 2016.

SAMPAIO, Amanda Sousa; ARAÚJO, John Kenedy. Avaliação dos parâmetros de calibração do algoritmo genético na detecção de vazamentos em rede de distribuição de água utilizando o método transiente inverso. **Revista DAE**, [s.l.], v. 67, n. 219, p. 159-175, 2019.

SAUNDERS, Mark Neil Ketteringham; LEWIS, Philip; THORNHILL, Adrian. **Research methods for business students**. 6th ed. England: Pearson Education Limited, 2012.

SIVANANDAM, Srinivasan Nandhan; DEEPA, S. N. **Introduction to genetic algorithms**. [s.l.]: Springer-Verlag, 2008.

TIPOS de baterias e o ambiente de instalação. **Saiba sobre os tipos de baterias e o ambiente de instalação**. [s.l.]: Logmaster, 2021. Disponível em: <https://www.logmaster.com.br/tipos-de-baterias-e-o-ambiente-de-instalacao>. Acesso em: 12 ago. 2022.

YIN, Robert King. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5a ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.