

Aplicação da técnica de algoritmo genético para otimização de custos de manutenção preventiva em equipamentos de climatização em uma empresa de telecomunicações

RESUMO

A empresa desse estudo é uma organização do setor de telecomunicações de médio porte situada na região nordeste do Brasil. A empresa enfrenta dificuldades na gestão de manutenções preventivas em suas estações espalhadas pela região devido à abordagem limitada na construção da previsão orçamentária, que se baseia exclusivamente em dados dos anos anteriores, desconsiderando desvios de execução devido a restrições orçamentárias e reajustando os valores por meio de decisões gerenciais sem considerar índices econômicos. Embora essa metodologia traga resultados financeiros a curto prazo, ela resulta em um aumento da necessidade de manutenções corretivas em médio e longo prazo, levando à redução da vida útil dos equipamentos de climatização. Assim, o objetivo deste estudo é otimizar a gestão de manutenções preventivas nos equipamentos de climatização da empresa, utilizando a metodologia de algoritmos genéticos. Os resultados encontrados apresentam diferenças significativas em relação ao que é orçado e o que seria efetivamente necessário para que a empresa realize a atividade, o que traz fortes indicativos de 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. Gestão estratégica. Planejamento.

Área Temática: Métodos quantitativos aplicados à gestão de custos.

1 INTRODUÇÃO

O cenário de telecomunicações no Brasil, especialmente no que se refere à Banda Larga Fixa, é dominado pela utilização da fibra óptica, que representa a principal tecnologia escolhida por 62% dos clientes nacionais, conforme o Infográfico Setorial de Telecomunicações da Anatel de fevereiro de 2022 (ANATEL, 2022).

De acordo com Pinheiro (2017), a fibra óptica emprega uma combinação de equipamentos ativos e passivos em sua infraestrutura para viabilizar o tráfego de sinais através de específicos comprimentos de onda. No entanto, essa tecnologia possui 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 conforme suas necessidades e seus projetos de rede, obedecendo às equações de dimensionamento dos enlaces ópticos.

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

Algumas empresas de telecomunicações optam por incorporar equipamentos de climatização em suas estações. Isso é necessário devido ao acúmulo de equipamentos de vários anéis de rede nas estações, incluindo as centralizadas que possuem outros tipos de equipamento para transmissão a longa distância. Tal medida é direcionada a prevenir que as OLTs instaladas ultrapassem suas temperaturas nominais de trabalho, bem como para otimizar o desempenho das baterias chumbo-ácidas do tipo estacionário que têm um desempenho ideal a 25 graus Celsius (MOURA, 2023).

A empresa de telecomunicações objeto desse estudo é uma empresa de médio porte situada no Nordeste do Brasil. A presença de baterias e equipamentos de climatização nas estações de telecomunicações exige que sejam realizados serviços como manutenções preventivas e corretivas. Devido à distribuição das estações da empresa para atendimento de clientes em diversas regiões, existe uma cadeia logística de serviços necessários para garantir a manutenção da conectividade oferecida pela empresa. A gestão das manutenções preventivas em suas estações é realizada de maneira empírica, baseando-se em dados dos anos anteriores. Assim, o problema a ser investigado está relacionado com a necessidade de aprimorar a tomada de decisão em relação à gestão das manutenções preventivas da empresa em questão.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é otimizar a gestão de 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.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Problemas de roteirização

Conforme Souto Maior et al. (2019), os problemas de roteirização podem ser de diferentes tipos:

- Problema com um ponto de origem diferente do ponto de destino: Neste tipo de problema, há mais de um ponto de origem e um ponto de destino. O objetivo é encontrar a rota mais curta entre os dois pontos. Um método comum para resolver este tipo de problema é o método do caminho mais curto.
- Problema com mais de um ponto de destino e de origem: Neste tipo de problema, temos mais de um ponto de origem e mais de um ponto de destino. O objetivo é encontrar a rota mais eficiente entre todos os pontos. Um método comum para resolver este tipo de problema é o método do transporte.
- Problema com pontos de destino e origem iguais: Neste tipo de problema, todos os pontos são de origem e destino. O objetivo é encontrar a rota mais eficiente para visitar todos os pontos exatamente uma vez. Um método comum para resolver este tipo de problema é o 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 Fávero e Belfiore (2012), o problema do caminho mais curto, também chamado de problema do caminho mínimo, determina o menor caminho entre dois nós de uma rede (pode-se minimizar, também, o custo total ou o tempo total) onde um dos nós se refere ao ponto de origem e o outro ao ponto de destino. Neste problema, é considerado apenas um 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 funciona da seguinte forma:

1. Comece no nó de origem.
2. Adicione o nó de origem à fila.
3. Enquanto a fila não estiver vazia:
 - Remova o primeiro nó da fila.
 - Se o nó removido for o nó de destino, termine o algoritmo.
 - Para cada vizinho do nó removido:
 - Adicione o vizinho à fila.

O algoritmo de busca em largura 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 um problema de aplicação de programação linear, tem o objetivo de determinar o menor custo para a realização do transporte de produtos partindo de grupos de origens a grupos de destinos. “Cada origem possui determinada oferta de unidades a serem distribuídas aos destinos, e cada destino tem certa demanda pelas unidades a serem recebidas das origens (HILLIER e LIEBERMAN, 2013, pág. 316). 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. O objetivo é minimizar a soma dos custos de transporte. Há diferentes métodos de resolução possíveis, entre eles, o algoritmo de transporte, o algoritmo de Dantzig-Wolfe e o algoritmo de Ford-Fulkerson (Dantzig, 1954; Ford e Fulkerson, 1956).

O problema do caixeiro viajante (Travelling Salesman Problem – TSP) é um problema clássico de otimização combinatória que busca determinar a rota com a menor distância (custo ou tempo) em que todos os nós serão visitados somente uma vez, tendo como ponto de partida e ponto de retorno um depósito (HILLIER e LIEBERMAN, 2013).

Gutin e Punnen (2009) destacam que o TSP é um problema importante em diversas áreas e seu estudo é um campo ativo de pesquisa em ciência da computação. Pode ser utilizado para encontrar a rota mais eficiente para entregar produtos entre diferentes pontos ou clientes e também para encontrar a melhor maneira de programar diferentes tarefas ou eventos.

Segundo Goldbarg e Luna (2005), o problema tem sua origem em um jogo proposto por William Rowan Hamilton denominado *Around the World* cujo intuito era descobrir uma rota por meio dos vértices de um dodecaedro em que todos os vértices deveriam ser visitados uma única vez sem que houvesse repetição de uma visita. Davendra (2010) dá a seguinte explicação a respeito do problema do caixeiro viajante: dado um conjunto de cidades e o custo de viagem (ou distância) entre cada par possível, o problema encontra a melhor maneira possível de visitar todas as cidades e regressar ao ponto de partida minimizando o custo da viagem (ou distância).

Segundo Hillier e Lieberman (2013), este tipo de problema se encaixa na classe de problemas NP-completos, ou seja, possuem alta complexidade computacional e, sendo assim, não são resolvidos em tempo polinomial. À medida em que o tamanho do problema aumenta, por um aumento do número de cidades, clientes ou nós, o tempo de execução para resolvê-lo aumenta de maneira polinomial não determinística.

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 e é necessário utilizar métodos heurísticos ou meta-heurísticos, como, por exemplo, 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 dessa 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 de 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 seriam importados para sistemas computacionais para que pudesse encontrar boas soluções a problemas de alta complexidade. O AG simula o processo evolutivo da natureza, 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, pág. 29) definem o algoritmo genético como “um método de resolução de problemas que usa genética como seu modelo de resolução de problemas. É uma técnica de busca para encontrar soluções aproximadas para problemas de otimização e busca”. Os sistemas evolutivos são uma ferramenta poderosa para a otimização de problemas de engenharia. Eles são capazes de encontrar soluções que são melhores do que as soluções encontradas por métodos tradicionais, e eles podem ser aplicados a uma variedade de problemas, incluindo o planejamento de rotas, o design de estruturas e o controle de processos.

De acordo com Sampaio (2018), os AGs se diferenciam dos demais métodos de busca e otimização nos seguintes aspectos:

- **Utilização de uma codificação do conjunto de parâmetros:** AGs não trabalham diretamente com os parâmetros do problema, mas sim com uma representação codificada desses parâmetros. Essa codificação pode ser binária, decimal ou outra representação qualquer.
- **Utilização de uma população de soluções:** AGs não trabalham com uma única solução para o problema, mas sim com uma população de soluções. Isso permite que AGs explorem um espaço de soluções maior e encontrem soluções melhores.
- **Utilização de regras probabilísticas:** AGs não trabalham com regras determinísticas, mas sim com regras probabilísticas. Isso permite que AGs sejam mais flexíveis e adaptáveis a diferentes problemas.
- **Não utilização de derivadas ou conhecimentos auxiliares:** AGs não utilizam derivadas ou conhecimentos auxiliares para encontrar soluções para o problema. Isso os torna mais generalizáveis e aplicáveis a uma ampla variedade de problemas.

Como os algoritmos genéticos são inspirados na genética e na seleção natural, verifica-se uma analogia entre termos biológicos e termos utilizados nos AGs. Sendo assim, para melhor compreensão, segue a definição de alguns termos utilizados, de acordo com Goldbarg e Luna (2005) e Linden (2012):

- Cromossomo: representa um indivíduo na população;
- Gene: simboliza um componente do cromossomo;
- População: agrupamento de indivíduos; representa um conjunto de soluções para o problema;
- Operadores genéticos: operações realizadas sobre cada cromossomo;
- Espaço de busca: espaço em que as possíveis soluções estão compreendidas.

Na Figura 1, tem-se uma representação geral do funcionamento dos Algoritmos Genéticos.

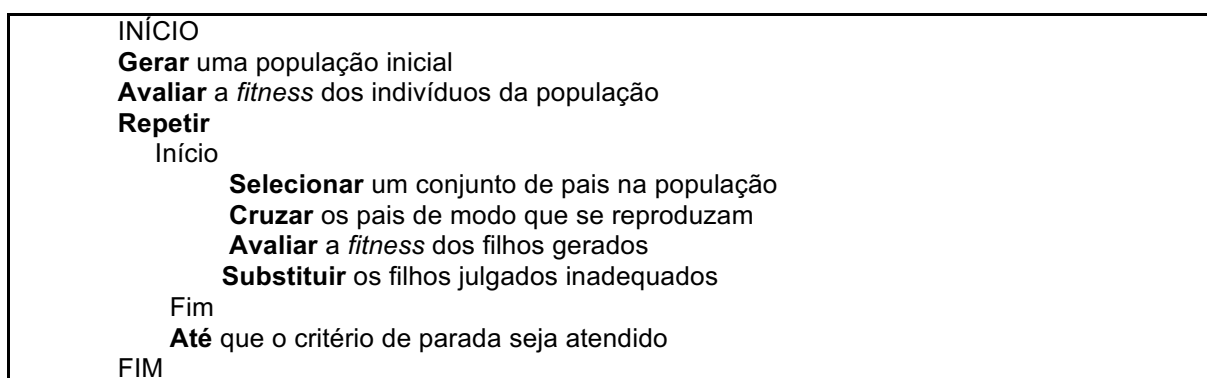


Figura 1. Representação do método de algoritmo genético.

Fonte: GOLDBARG e LUNA (2005).

Em cada iteração, dois pais são selecionados para o cruzamento. Neste processo, as informações dos pais são trocadas para gerar uma solução filho. Após o cruzamento, é realizada a mutação, na qual alguns genes do cromossomo da solução filho são modificados aleatoriamente. Em cada iteração, a solução obtida é comparada com os demais membros da população. Se esta solução for mais adequada em relação aos outros membros, ela irá substituir o membro que apresenta o pior desempenho. Se não, a solução será desprezada. Este processo continua sendo realizado até que o critério de parada seja atendido (CHAUDHRY e USMAN, 2017).

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

2.2.1 Componentes do Algoritmo Genético

- a. Representação ou Codificação: Segundo Eiben e Smith (2015), em um primeiro momento, o “mundo real” deve ser vinculado ao “mundo do algoritmo evolucionário”, ou seja, representar o problema em um formato que o computador consiga entender. Deve-se criar uma ponte entre o contexto original do problema e o espaço de soluções do problema, sendo necessário definir como as possíveis soluções serão especificadas e armazenadas de

maneira que o computador consiga manipulá-las. Atribui-se a terminologia de fenótipos para os objetos que formam possíveis soluções no contexto original e genótipos para a codificação das possíveis soluções. Existem muitos métodos diferentes de codificação, mas alguns dos mais comuns incluem representação binária, representação decimal e representação gramática.

- b. **Avaliação ou *fitness*:** Uma vez que as possíveis soluções estão codificadas, elas precisam ser avaliadas para determinar sua qualidade. De acordo com Linden (2012), no algoritmo genético, a função de avaliação tem o objetivo de determinar a qualidade de um indivíduo como solução para o problema analisado. Para isso, uma nota é atribuída ao indivíduo e utilizada para determinar o quão bom esse indivíduo é para a resolução do problema. Ademais, o processo de avaliação deve ser capaz de representar os requisitos necessários a que uma população deve se adaptar.
- c. **Seleção:** Ainda conforme Linden (2012), a escolha dos pais simula o mecanismo de seleção natural em que os indivíduos com as melhores notas são escolhidos para gerarem filhos. No entanto, indivíduos com menor pontuação também podem gerar filhos pois, se somente os melhores gerarem descendentes, a população tende a ser formada de indivíduos cada vez mais parecidos, faltando, assim, diversidade para a população. Para que essa escolha seja realizada existem diferentes métodos. Existem muitos métodos diferentes de seleção, mas alguns dos mais comuns incluem seleção por torneio, seleção por roleta e seleção por elitista. Neste trabalho, é utilizado o método da seleção por torneio. Conforme Baack; Fogel e Michalewicz (2018), neste método, um grupo de indivíduos é selecionado aleatoriamente para participar de uma competição (torneio), onde o vencedor é definido pelo seu valor de aptidão. Normalmente, os torneios são executados entre dois indivíduos (torneio binário).
- d. **Operadores Genéticos:** são usados para criar novas soluções a partir das soluções existentes. Segundo Larraiaga e Lozano (2002), o algoritmo busca criar melhores soluções a partir da realização de combinação do material genético dos pais selecionados. Os operadores genéticos mais comuns são o cruzamento, a mutação e a recombinação.

■ **Cruzamento ou Reprodução:** O cruzamento é um operador que troca partes de duas soluções para criar uma nova solução. Isso pode ajudar a melhorar a qualidade da solução, introduzindo novas características. Segundo Sivanandam e Deepa (2008), no processo de cruzamento de um ponto é realizado um corte nos cromossomos, separando-os em duas partes. Após os cortes, a troca é realizada. Já no cruzamento multipontos são escolhidos dois pontos de corte e o material localizado entre os pontos escolhidos é trocado. As Figuras 2 e 3 ilustram os dois tipos de cruzamento.

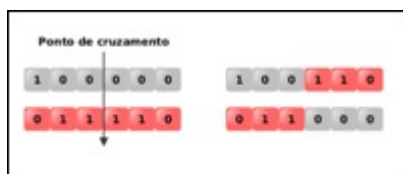


Figura 2. Cruzamento de um ponto.

Fonte: MARIANO et al. (2021).

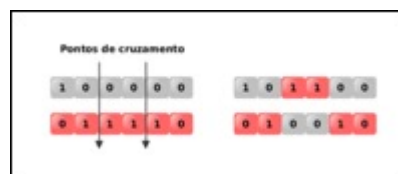


Figura 3. Cruzamento multipontos.

Fonte: MARIANO et al. (2021).

Mutação: no processo da mutação, há a modificação de um ou mais genes de indivíduos de forma aleatória (LARRAIIAGA e LOZANO, 2002). Segundo Sivanandam e Deepa (2008), o processo de mutação vai garantir que haja a diversidade genética na população, evitando que ela se torne muito homogênea. Mariano et al. (2021) destacam que na mutação de inserção são escolhidos, aleatoriamente, dois genes do indivíduo. O primeiro é movido, depois o segundo e assim sucessivamente. Neste processo a informação de ordem não é muito modificada. Já na mutação de inversão são escolhidos, aleatoriamente, dois genes do indivíduo e, posteriormente, há a inversão de todos os genes. Neste processo, a informação adjacente entre os genes é preservada e a informação de ordem é perdida. As Figuras 4 e 5 esquematizam a mutação de inserção e de inversão.

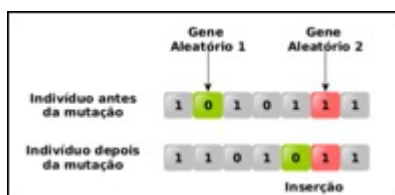


Figura 4. Mutação de inserção.

Fonte: MARIANO et al. (2021).

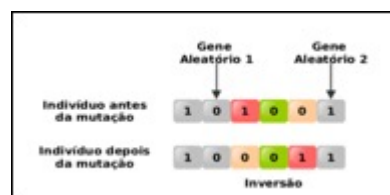


Figura 5. Mutação de inversão.

Fonte: MARIANO et al. (2021).

- Recombinação (vide Figura 6): Moreira (2020) destaca que a recombinação mais comum é a de sub-árvores, que consiste em selecionar, de forma randômica e independente, dois pontos (n_1 e n_2) de recombinação, um em cada pai (p_1 e p_2). Como resultado é gerado um único indivíduo, formado a partir de uma cópia de p_2 substituindo-se a sub-árvore enraizada no seu ponto de recombinação n_2 por uma cópia da sub-árvore enraizada no ponto n_1 escolhido em p_1 .

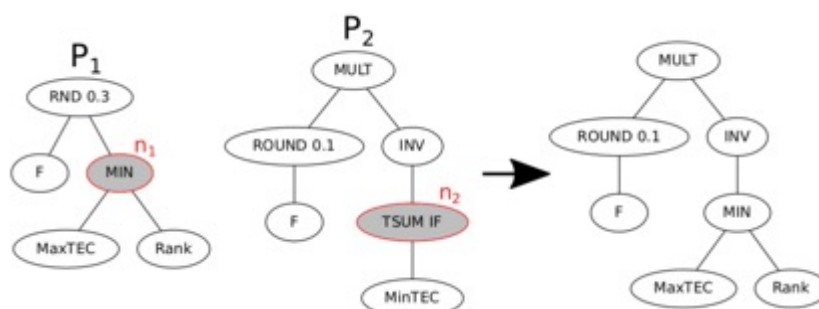


Figura 6: Recombinação de sub-árvores.

Fonte: Moreira (2020).

2.2.2 Parâmetros genéticos

Alguns parâmetros afetam diretamente o funcionamento dos algoritmos genéticos. Mariano et al. (2021) destacam alguns deles:

- **Tamanho da população:** O tamanho da população é o número de indivíduos que estão presentes em cada geração do algoritmo genético. Há um trade-off entre populações grandes e pequenas. Grandes populações costumam utilizar um maior tempo de execução e uma população pequena pode não fornecer uma boa cobertura de espaço do problema;
- **Taxa ou probabilidade de cruzamento:** A taxa de cruzamento é a probabilidade de dois indivíduos serem cruzados para gerar um novo indivíduo. Aqui também há um trade-off importante a ser considerado. Uma taxa de cruzamento costuma acrescentar mais rapidamente novas características à população, no entanto, pode levar a perda de bons indivíduos;
- **Taxa ou probabilidade de mutação:** A taxa de mutação é a probabilidade de um indivíduo sofrer alterações em suas características (mutações). É responsável pela diversificação da população no AG. Uma taxa de mutação maior pode levar a uma melhor exploração do espaço de busca, mas também pode levar a uma população muito heterogênea;
- **Número de gerações:** O critério de parada mais comum, usado para determinar quando o algoritmo genético deve ser interrompido, é o número máximo de gerações. Se for executado um pequeno número de iterações uma boa solução pode não ser encontrada e, um número alto de iterações pode aumentar o tempo gasto para se obter uma boa solução.

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 predefinidas, b) não verificar melhoras na população a x iterações, c) um indivíduo alcançar, na avaliação, a pontuação determinada anteriormente.

Eiben e Smith (2015) verificam duas principais formas para a finalização de um AG: a) quando é possível observar um padrão ótimo quanto aos indivíduos da população, b) quando não é possível observar um padrão quanto aos indivíduos. Nesta, os autores citam alguns motivos que podem levar finalização do AG, são eles:

- O limite determinado de avaliações de aptidão é obtido;
- A população não se aproxima do padrão ótimo após um número suficiente de gerações.
- A população não apresenta diversidade e se torna homogênea.
- O algoritmo gasta muito tempo para encontrar uma solução.

Eiben e Smith (2015) também destacam que não existe um critério de parada que funcione melhor 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 acerca dos 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 et al. (2012) destacam que a pesquisa aplicada resulta em uma solução para um problema específico e traz novos conhecimentos limitados a esse problema. Tanto a pesquisa básica quanto a pesquisa aplicada devem respeitar o rigor de pesquisas científicas.

O trabalho apresenta aspectos filosóficos voltados ao paradigma interpretativo. É interessante compreender o paradigma da pesquisa antes de definir a estratégia da pesquisa ou empregar um determinado método. O paradigma está relacionado a crenças e pressupostos sobre a realidade, ou seja, a ontologia, e sobre a forma como o pesquisador acredita que o conhecimento humano é construído, a epistemologia. Do ponto de vista ontológico, esta pesquisa considera a interação sujeito-objeto, ou seja, a realidade social é produto de negociação e compartilhamento de significados entre as pessoas, resultando de uma construção social. Esta ontologia de interação sujeito-objeto implica em uma epistemologia construtivista.

A pesquisa usa a estratégia de estudo de caso que, segundo Yin () é um estudo de natureza empírica que investiga um determinado fenômeno, geralmente contemporâneo, dentro de um contexto real de vida, quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto em que ele se insere não são claramente definidas. Trata-se de uma análise aprofundada de um ou mais objetos (casos), para que permita o seu amplo e detalhado conhecimento. Conforme destaca Mattar (1996), seu objetivo é aprofundar o conhecimento acerca de um problema não suficientemente definido, visando estimular a compreensão, sugerir hipóteses e questões ou desenvolver a teoria.

De acordo com os objetivos, esta pesquisa é exploratória-descritiva. Segundo Saunders et al. (2012), este tipo de pesquisa representa um meio de investigar um determinado assunto, podendo ser trabalhos precursores ou continuações de outros.

A coleta de dados primários para servirem de input deste trabalho deu-se por meio de consulta documental na empresa do estudo. Por fim, o processamento e análise dos dados coletados foram feitos por meio de métodos quantitativos, especificamente, por meio de algoritmo genético binário.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Contextualização

A empresa objeto de estudo dessa pesquisa é do ramo de telecomunicações e tem sede em Recife. É especializada em serviços utilizando fibra óptica e atende a região, dispondo de 48 estações estrategicamente localizadas em sete estados do Nordeste: Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará.

Essas estações, que abrigam os equipamentos de telecomunicações, precisam ser climatizadas devido à considerável geração de calor por parte dos equipamentos, o qual precisa ser eficazmente dissipado. A capacidade nominal dos equipamentos varia conforme a quantidade de equipamentos instalados na estação. Na empresa em questão, dos 93 equipamentos, 73 são do tipo *split inverter*, cujas capacidades variam de duas a cinco torres de refrigeração (TR). Embora haja diferenças nas capacidades dos equipamentos, os procedimentos e custos de manutenção preventiva permanecem os mesmos, o que possibilita a padronização do procedimento e do custo de manutenção. As outras 20 máquinas são do tipo *fan coil* e possuem itens específicos para a manutenção preventiva.

A equipe de operações é responsável pela gestão das manutenções preventivas e corretivas dos equipamentos instalados nas diversas estações. Dentre os equipamentos estão listados os de climatização, que exigem manutenções preventivas frequentes envolvendo limpeza e substituição de filtros.

Para a elaboração do orçamento anual de gastos com a manutenção preventiva destes equipamentos, a equipe administrativa se baseia no histórico de gastos do ano anterior. A aplicação de correções monetárias ou de aumento específico de valores dos serviços contratados depende de decisões gerenciais no fechamento do orçamento. O atual orçamento prevê um total de R\$180.000,00 para despesas com manutenções preventivas de climatização ao longo do ano.

Para viabilizar a execução das manutenções, a empresa utiliza contratos do tipo Lista de Preços Unitários (LPU) junto a dois fornecedores da região. Tais contratos possuem vigência de 36 meses, e próximo ao vencimento, o setor de compras realiza novas consultas ao mercado buscando obter os melhores valores disponíveis.

4.2 Situação e Problema

Das 93 máquinas instaladas nas estações da empresa, 20 recebem manutenção preventiva pelo fornecedor A, enquanto as 73 restantes, do tipo *split inverter*, são atendidas pelo fornecedor B. Cada um desses fornecedores possui seus custos de manutenção preventiva por serviço, bem como o custo por quilômetro rodado, ambos detalhados 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 contrato para um tipo específico de máquina (*fan coil*), a qual a empresa possui apenas em uma estação localizada nessa cidade. O contrato do fornecedor A não implica em acréscimos aos custos por quilômetro rodado ou diárias, já que tanto a cidade base quanto a cidade de execução do serviço são coincidentes. Vale ressaltar que esses equipamentos requerem manutenção preventiva mensal, conforme as recomendações do fabricante.

No que diz respeito aos 73 equipamentos atendidos pelo fornecedor B, é importante observar que esse fornecedor disponibiliza equipes estabelecidas em Salvador, Natal e Fortaleza. Portanto, os deslocamentos para as demais cidades podem partir de qualquer uma dessas três localidades, possibilitando a definição de rotas que permitam a otimização da quilometragem percorrida. A Figura 7 apresenta os custos, região de atendimento e cidade base de cada fornecedor.

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

Figura 7. Lista de fornecedores para realização da manutenção preventiva de equipamentos de climatização.

Fonte: Elaborada pelos autores.

É fundamental considerar que a frequência das manutenções dos equipamentos é variável de acordo com cada fabricante e cada capacidade, o que impacta diretamente as cidades e estações que o fornecedor precisa abranger em sua rota. A Figura 8 exhibe as cidades, a quantidade de equipamentos instalados em cada

uma, bem como a frequência de manutenção preventiva correspondente a esses equipamentos.

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

Figura 8. Equipamentos de climatização atendidos pelo Fornecedor B distribuídos por cidade e frequência de manutenção preventiva.

Fonte: Elaborada pelos autores.

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.

Neste trabalho é proposto o uso da técnica de algoritmos genéticos para definição das 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 algumas regiões de planaltos, como o 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. Destaca-se também que, conforme a pesquisa CNT (2022), 92,4% das rodovias do nordeste são do tipo pista simples. Esses são importantes fatores a serem considerados ao planejar as rotas de manutenção, uma vez que afetam o tempo de deslocamento e a eficiência das viagens.

Por meio da análise da Figura 9, é possível concluir que, para a região Nordeste, a velocidade média estimada é predominantemente influenciada por fatores como estradas em formato de tangente, pistas simples e relevo plano ou ondulado. Além disso, os veículos utilizados pelos fornecedores que prestam os serviços de manutenção são do tipo leve. Portanto, a velocidade média considerada neste estudo é de 85 km/h.

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

Figura 9. Velocidade média de rodovias brasileiras conforme características de pista, relevo e tipo de veículo.

Fonte: Labtrans (2008).

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 manutenção preventiva e à frequência dessa

manutenções. A partir dos dados fornecidos na Figura 7, é possível chegar aos valores apresentados na Equação 1 (foram consideradas 12 manutenções ao ano e 20 equipamentos).

$$R\$84,63 * 12 * 20 = R\$20.311,20 \quad \text{Eq. (1)}$$

Para apurar os custos relacionados ao fornecedor B, uma análise abrangente se faz necessária, visto que esse fornecedor presta serviços em 34 cidades por meio de três bases operacionais: Salvador, Natal e Fortaleza. Em um primeiro momento, é necessário determinar a melhor base disponível para atender cada cidade. Esta seleção foi conduzida construindo uma tabela que compara a distância entre cada base e todas as cidades, optando pela base mais próxima em cada caso. A Figura 10 exemplifica o processo de tomada de decisão e a Figura 11 exibe a lista de cidades atendidas por cada uma das bases.

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

Figura 10. Exemplo do processo de escolha aplicado para definir qual base atenderá quais cidades.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Base Salvador	Base Natal	Base Fortaleza
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	
	Custodia – 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	

Figura 11. Distribuição de cidades atendidas por cada base após aplicação do critério de escolha.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Além da alocação de cidades entre as bases de atendimento, surge a necessidade de criar várias rotas, devido à distribuição das frequências nas quais os

equipamentos de climatização precisam receber a manutenção preventiva. Considerando que existem três frequências distintas apresentadas na Figura 8 (Mensal, Bimestral e Quadrimestral), é possível planejar a distribuição ao longo dos meses do ano e, assim, determinar quantas rotas são necessárias para atender a essa demanda (vide Figura 12).

	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

Figura 12. Distribuição das frequências de manutenção preventiva dos equipamentos de climatização ao longo do tempo.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com a distribuição das frequências de manutenção, é possível concluir que são necessárias três rotas a partir de cada base:

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

Essa construção de rotas é aplicável a cada uma das três bases, resultando em um total de nove rotas a serem planejadas.

4.2.1 Base Salvador

Para a base localizada em Salvador, a alocação das cidades em cada rota, com base na periodicidade das manutenções, é apresentada na Figura 13.

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	Ubatuba – BA	Aracaju – SE
	Salvador – BA	Ubatuba – BA
		Salvador – BA

Figura 13. Distribuição de cidades atendidas por cada rota para a base de Salvador.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para cada uma das rotas, 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 14.

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

Figura 14. Matriz exemplo com distâncias entre cidades para a rota 1 da base Salvador.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tal matriz é construída para possibilitar que a ferramenta *Solver* do Microsoft Excel (que será utilizada para realizar a otimização por meio da metodologia de Algoritmo Genético) identifique, dentre todas as possibilidades, a que melhor atende à necessidade.

Uma vez montada a matriz, são configuradas as células na mesma planilha que fazem referências à essa matriz. Estas células serão as que o *solver* irá ajustar após consultar a matriz e aplicar o algoritmo genético para encontrar a melhor rota. A Figura 15 exibe um exemplo de como organizar essas células, onde as células com números de referência em para cada cidade devem ser indicadas nas configurações do Solver como as células que o algoritmo ajustará para otimizar a busca da rota mais curta possível.

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

Figura 15. Estrutura associada à matriz de distâncias para utilização do algoritmo genético pela função *solver* no Microsoft Excel.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Importante destacar que para as demais rotas, deve-se seguir o mesmo procedimento ilustrado nas Figuras 14 e 15.

4.2.2 Base Natal

Para a Base de Natal, a quantidade de cidades atendidas ficou significativamente maior, o que resultou na configuração para a construção das rotas apresentada na Figura 16.

Vale lembrar que o procedimento ilustrado nas Figuras 14 e 15 deve ser feito para todas as rotas dessa base.

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

Figura 16. Distribuição de cidades atendidas por cada rota para a base de Natal.

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.2.3 Base Fortaleza

É possível observar que a base de Fortaleza se limitou exclusivamente às cidades da região metropolitana da capital (vide Figura 17).

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

Figura 17. Distribuição de cidades atendidas por cada rota para a base de Fortaleza.

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 14 e 15.

Feito isso, é possível usar o *Solver* 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, levando em consideração a quilometragem total, a velocidade média de 85 km/h e as cidades atendidas, permitindo determinar se há a necessidade de incluir o custo das diárias.

Deve-se então somar os custos de deslocamento, manutenção preventiva e diárias, multiplicando pela quantidade de vezes que aquela rota ocorrerá durante o

ano, e posteriormente, somando os valores de todas as rotas e bases para obter o valor total para o fornecedor B. Ao adicionar também os custos já levantados para o fornecedor A, é possível, então, obter os custos totais.

4.3 Resultados

Ao aplicar o algoritmo genético para as três cidades bases e suas rotas, os resultados com os custos mínimos podem ser agrupados conforme apresentado nas Figuras 18, 19 e 20.

4.3.1 Base Salvador

	Rota 1	Rota 2	Rota 3
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		

Figura 18. Custos da base Salvador.

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.3.2 Base Natal

	Rota 1	Rota 2	Rota 3
Custo de deslocamento	R\$3.425,00	R\$5.080,00	R\$5.262,50
Custo de preventivas	R\$6.551,10	R\$7002,90	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		

Figura 19. Custos da base Natal.

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.3.3 Base Fortaleza

	Rota 1	Rota 2	Rota 3
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		

Figura 20. Custos da base Fortaleza.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Por fim é possível calcular os custos totais somando os custos de cada base juntamente com os custos do fornecedor A (vide Figura 21).

	Valor
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

Figura 21. Custo anual total de manutenção de equipamentos de climatização.

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 da técnica de algoritmo genético revelou um déficit de aproximadamente 52% entre o valor necessário e o valor orçado, o que indica fortemente que a manutenção preventiva dos equipamentos não está sendo realizada nos intervalos especificados pelos fabricantes.

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

Adicionalmente, a empresa possui uma forte concentração de estações em Pernambuco, porém o fornecedor que atende as máquinas do tipo *split inverter* não possui uma base no estado, resultando em custos adicionais com deslocamento e sobrecarga na base de Natal. A introdução de um fornecedor adicional ou o estabelecimento de uma base do fornecedor atual em Pernambuco poderiam contribuir para a redução dos custos de deslocamento.

Por fim, ao operar com um orçamento consideravelmente inferior ao necessário para realizar as manutenções preventivas em seus equipamentos de climatização, a empresa de telecomunicações pode economizar a curto prazo, mas a negligência com essas máquinas inevitavelmente levará a uma redução significativa em sua vida útil, um aumento da frequência das manutenções corretivas e a necessidade de reinvestimento a médio prazo.

A pesquisa realizada atingiu plenamente seu objetivo principal que era 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 ferramental científico apropriado pode ser útil para identificar lacunas nos processos empresariais, contribuindo para a promoção de uma gestão mais eficiente. Por conseguinte, essa abordagem oferece oportunidades concretas para a melhoria das tomadas de decisões, baseando-se em princípios objetivos e racionais.

REFERÊNCIAS

Almeida, F. R. de. (2022). *Estudos e soluções para provimento de uma infraestrutura de Rede FTTH em uma Área Residencial Multicondominial*. Natal, RN. Trabalho

de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRGN, 20 p.

- Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL. (2022). *Infográfico setorial de telecomunicações*. Disponível em: https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?eEPwgk1skrd8hSlk5Z3rN4EVg9uLJqrLYJw_9INcO47apD83dF28kxmXvBG0Se3BkmePIJxRkSvu0TtBAAgHMGcDroTWLpVeS5GRa11Wc_Bo4dK9_olywQeezXovdPNW, Acesso em: 10/08/2023.
- Baeck, T., Fogel, D. B., & Michalewicz, Z. (2018). *Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators*. New York, Taylor & Francis Group.
- Chaudhry, I. A., & Usman, M. (2017). Integracija projektiranja tehnoloških procesa i planiranja primjenom genetičkih algoritama. *Tehnički vjesnik*, 24(5), 1401-1409.
- Confederação Nacional de Transportes - CNT. (2022). Pesquisa CNT de Rodovias. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/6b24f1b4-9081-485d-835d-c8aafac2b708>, Acesso em: 12/07/2023.
- Dantzig, G. B. (1954). A simplified primal algorithm for linear programming. *The Journal of the Operations Research Society of America*, 2(1), 23-31.
- Davendra, D. (2010). *Traveling salesman problem, theory and applications*. Rijeka, InTech.
- Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to Evolutionary Computing*. 2. ed. Amsterdam, Springer.
- Fávero, L. P., & Belfiore, P. (2012). *Pesquisa Operacional: para cursos de administração, contabilidade e economia*. Rio de Janeiro, Elsevier.
- Ford, Jr. L. R., & Fulkerson, D. (1956). Flow in networks. *The Canadian Journal of Mathematics*, 8(3), 399-407.
- Goldberg, M. C., & Luna, H. P. L. (2005). *Otimização combinatória e programação linear: Modelos e algoritmos*. 2. ed. Rio de Janeiro, Elsevier.
- Gutin, G., & Punnen, A. P. (2009). *The traveling salesman problem and its variations*. London, Kluwer Academic Publishers.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2013). *Introduction to Operations Research*. 10th ed. McGraw-Hill Education.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, The University of Michigan Press.
- Laboratório de Transportes - LABTRANS. (2008). Listagem das velocidades médias de operação. Disponível em: <https://www.labtrans.ufsc.br>, Acesso em: 12/06/2023.

- Larraiaaga, P., & Lozano, J. (2002). *A. Estimation of Distribution Algorithms: A New Tool for Evolutionary Computation*. New York, Springer Sciencce + Business Media.
- Lin, S., & Kernighan, B. (1973). An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem. *Operations Research*, 21, 498-516.
- Linden, R. (2012). *Algoritmos Genéticos*. 3. ed. Rio de Janeiro, Ciência Moderna.
- Mariano, D. C. B. (org.) et al. (2021). *BIOINFO - Revista Brasileira de Bioinformática e Biologia Computacional*. Vol 1. Lagoa Santa, Alfahelix. Disponível em: <https://bioinfo.com.br/bioinfo-01/>, Acesso em: 14/07/2022.
- Matos, M. D. dos S. (2018). *Aplicação de Algoritmos Genéticos para a Mineração de Regras SE-ENTÃO em Conjuntos de Dados com Distribuição Não-Linear*. Uberlândia, MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 148 p.
- Mattar, F. N. (1996). *Pesquisa de Marketing: Metodologia e Planejamento*. São Paulo, Atlas
- Mitchell, M. (1998). *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge, Copyright.
- Moreira, J. P. G. (2020). *Balanceamento de linhas de produção usando regras de seleção descobertas por Genetic Programming*. Porto Alegre, RS. Monografia de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 60 p.
- Moura. (2023). *A bateria ideal para ambientes controlados*. Disponível em: https://www.moura.com.br/produtos/estacionarias/mouravrla/?utm_campaign=raacon_rsm_search&utm_content=rsm_vrla&gclid=CjwKCAjwxOymBhAFEiwAno_dBLG5LqUBMEinwzw5RUtTS52JUX8JrmLmTDrMXXLK7ADFH5YFy2vxbxoCzGgQAvD_BwE, Acesso em: 10/08/2023.
- Pinheiro, J.M.S. (2017) *Redes ópticas de acesso em telecomunicações*. 1.ed. Rio de Janeiro, Elsevier.
- Sampaio, A. S. (2018). *Avaliação do operador elitismo na detecção de vazamentos em rede de distribuição de água utilizando o método transiente inverso e algoritmo genético*. Fortaleza, CE. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará – UFC, 145 p.
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2012). *Research methods for business studies*. 6th ed. England, Pearson Education Limited.
- Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2008). *Introduction to Genetic Algorithms*. New York, Springer Sciencce + Business Media.
- Souto Maior, C. B., Lins, I. D., Moura, M. das C., & Santana, D. M. (2019). Roteirização de veículos para transporte de funcionários. *Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Yin, R. K. (2015). *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 5^a ed. Porto Alegre, Bookman.