

O Boletim de Conjuntura (BOCA) publica ensaios, artigos de revisão, artigos teóricos e empíricos, resenhas e vídeos relacionados às temáticas de políticas públicas.

O periódico tem como escopo a publicação de trabalhos inéditos e originais, nacionais ou internacionais que versem sobre Políticas Públicas, resultantes de pesquisas científicas e reflexões teóricas e empíricas.

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratização mundial do conhecimento.



# BOLETIM DE CONJUNTURA

BOCA

Ano VI | Volume 18 | Nº 52 | Boa Vista | 2024

<http://www.ioles.com.br/boca>

ISSN: 2675-1488

<https://doi.org/10.5281/zenodo.11003159>

---



## OTIMIZAÇÃO DO ATENDIMENTO A EMERGÊNCIAS NO SETOR ELÉTRICO<sup>1</sup>

*Bianca Jupiará Fortes Schardong<sup>2</sup>*

*Vinícius Jacques Garcia<sup>3</sup>*

*Gabriela Sanson Kiefer<sup>4</sup>*

*Nelson Guilherme Machado Pinto<sup>5</sup>*

### Resumo

O setor de energia elétrica enfrenta desafios crescentes, levando as concessionárias a adotarem estratégias diversas para melhorar a eficiência dos serviços e atender aos requisitos regulatórios. Nesse contexto, destaca-se o setor de atendimento a ordens de serviço, especialmente as emergenciais, devido ao seu alto custo e à criticidade associada à natureza e às consequências desses serviços. Este estudo visa analisar os fatores críticos que influenciam a eficiência na execução desses serviços, utilizando técnicas de modelagem matemática, especificamente o Problema de Roteamento de Veículos (PRV). O objetivo foi elaborar uma representação que reproduzisse as características essenciais do processo de despacho, trabalhando com critérios de decisão no momento em que surgem chamadas de caráter emergencial para atendimento das equipes das concessionárias quando já existe uma rota pré-estabelecida com ordens comerciais programadas. O foco central do estudo reside na análise de dois critérios de decisão: o Tempo de Espera Emergencial ( $T^E$ ) e o Tempo de Espera Comercial ( $T^C$ ). A metodologia adotada envolve a aplicação da Análise Hierárquica de Processos (AHP) como uma abordagem multicritério para classificar as alternativas. A modelagem desenvolvida, juntamente com a classificação das soluções alternativas, destaca a importância de considerar o tempo de espera nas decisões de atendimento, por meio de estudos de caso em um cenário de emergência com dados reais de uma concessionária de energia elétrica. A partir dos resultados apresentados, foi possível vislumbrar um contexto de tomada de decisão que contemple um compromisso entre o impacto causado no atraso das ordens comerciais com a premência de atendimento dos serviços emergenciais, ambos mensurados com os custos de tempo de espera de cada tipo de atendimento. Os cálculos mostram que nem sempre priorizar a ordem emergencial será a escolha ideal, pois há situações em que a ponderação revela que o custo de adiar o atendimento da ordem comercial é maior do que o de atrasar a ordem emergencial. Assim, os resultados práticos indicam a eficácia da combinação da metodologia AHP com o PRV no setor de distribuição de energia elétrica. Desse modo, concluiu-se que a abordagem é bastante promissora para contextos práticos, permitindo possibilidades de análises ao decisor de modo a ponderar as suas escolhas subjetivas definidas a priori.

**Palavras-chave:** Análise Hierárquica de Processos; Emergências; Roteamento de Veículos; Setor Elétrico.

### Abstract

The electric power industry is facing increasing challenges, prompting utilities to adopt diverse strategies to improve service efficiencies and meet regulatory requirements. In this context, the service order service sector, especially emergency ones, stands out due to its high cost and the criticality associated with the nature and consequences of these services. This study aims to analyze the critical factors that influence the efficiency in the execution of these services, using mathematical modeling techniques, specifically the Vehicle Routing Problem (PRV). The objective was to prepare a representation that would reproduce the essential characteristics of the dispatch process, working with decision criteria at the moment when emergency calls arise to serve the concessionaires' teams when there is already a pre-established route with scheduled commercial orders. The central focus of the study lies in the analysis of two decision criteria: the Emergency Waiting Time ( $T^E$ ) and the Commercial Lead Time ( $T^C$ ). The methodology adopted involves the application of Hierarchical Process Analysis (AHP) as a multicriteria approach to classify the alternatives. The modeling developed, together with the classification of alternative solutions, highlights the importance of considering waiting time in service decisions, through case studies in an emergency scenario with real data from an electricity utility. From the results presented, it was possible to envision a decision-making context that includes a compromise between the impact caused by the delay in commercial orders and the urgency of providing emergency services, both measured with the waiting time costs of each type of service. The calculations show that prioritizing the emergency order is not always the ideal choice, as there are situations in which the weighting reveals that the cost of delaying the commercial order is greater than that of delaying the emergency order. Thus, the practical results indicate the effectiveness of combining the AHP methodology with PRV in the electricity distribution sector. In this way, it was concluded that the approach is very promising for practical contexts, allowing the decision-maker possibilities for analysis in order to weigh up their subjective choices defined a priori.

**Keywords:** Analytic Hierarchy Process; Electricity Sector; Emergencies; Vehicle Routing.

<sup>1</sup> O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

<sup>2</sup> Doutora em Administração pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). E-mail: [bifortes22@gmail.com](mailto:bifortes22@gmail.com)

<sup>3</sup> Professor da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Doutor em Engenharia Elétrica. E-mail: [viniciusjg@smail.ufsm.br](mailto:viniciusjg@smail.ufsm.br)

<sup>4</sup> Graduanda em Administração pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). E-mail: [gabriela.kiefer1608@gmail.com](mailto:gabriela.kiefer1608@gmail.com)

<sup>5</sup> Professor da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Doutor em Administração. E-mail: [nelson.pinto@ufsm.br](mailto:nelson.pinto@ufsm.br)



## INTRODUÇÃO

Os Problemas de Roteamento de Veículos (PRV) têm sido objeto de pesquisa devido à sua complexidade combinatória e amplas aplicações em diversas áreas do conhecimento. No caso deste estudo concentra-se na gestão de serviços emergenciais em empresas de distribuição de energia elétrica, dada a importância crescente do setor de serviços na economia e a necessidade de relacionamento eficiente com os clientes.

Para abordar a gestão eficiente de ordens emergenciais, é fundamental compreender as decisões práticas tomadas nos centros de operação das companhias de distribuição. Isso inclui a consideração de equipes multitarefa e a dinâmica do atendimento. Portanto, este estudo propõe uma análise das características desse cenário, das decisões cotidianas e da importância dos critérios envolvidos.

A justificativa para este estudo reside na importância do setor de distribuição de energia, na economia e na necessidade de otimizar custos e qualidade do serviço. Considerando a complexidade do atendimento de serviços de campo e a busca pelo equilíbrio entre regulação e custo, este trabalho busca contribuir para o avanço das técnicas de otimização no contexto do PRV.

Não obstante, as técnicas de programação e modelagem matemática representam uma boa alternativa de otimização. Dada a vasta literatura do PRV, a identificação de elementos fundamentais para as heurísticas é de interesse primordial, devendo-se pesquisá-los e analisá-los visando o progresso em direção ao desenvolvimento de algoritmos para o PRV que sejam generalistas e eficientes. Ademais, a realização deste trabalho apresenta relevância acadêmica por consistir em uma boa oportunidade de agregar os resultados científicos relacionados ao roteamento de veículos, com destaque para aqueles oriundos da sua aplicação em despacho de ordens de serviço.

Nesse sentido, o objetivo do trabalho consiste em descrever, modelar e comparar as características e os critérios de Tempo de espera Emergencial e Comercial para o cenário do problema de despacho quando já existem ordens comerciais programadas e surgem as ordens emergências, refletindo a interligação entre esses dois períodos das ordens de despachos das concessionárias, visando assim aplicar a metodologia AHP para escolha de uma dentre as várias soluções alternativas de rotas enumeradas com a resolução do PRV, de modo a facilitar a tarefa do decisor.

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos, adotou-se uma abordagem metodológica de pesquisa aplicada, utilizando uma abordagem quantitativa e procedimentos técnicos baseados na pesquisa experimental. Para tal, foram coletados dados primários e secundários, sendo os primeiros provenientes de uma concessionária de energia e os segundos de relatórios do setor elétrico, além de uma revisão bibliográfica abrangente.



Na análise dos dados, empregou-se a técnica de programação e modelagem matemática, com foco no Problema de Roteamento de Veículos (PRV), utilizando uma combinação de heurísticas e o método de tomada de decisão conhecido como Análise Hierárquica de Processos (AHP). Esta abordagem foi adotada para resolver um problema matematicamente definido, considerando múltiplos critérios. É a partir dessa metodologia aplicada ao problema de despacho de ordens emergenciais, utilizando o PRV, que se delinea o escopo deste estudo. Uma vez que visa melhorar a gestão de serviços emergenciais, buscando maior eficiência ao minimizar o tempo de resposta das concessionárias de energia elétrica.

Por fim, salienta-se que este trabalho está estruturado da seguinte forma. De maneira introdutória, apresenta-se os principais pontos a serem abordados, bem como o objetivo e a relevância do estudo. A segunda seção aborda a fundamentação teórica. Posteriormente, explica-se a metodologia utilizada e a descrição precisa do problema em questão. Na sequência, o modelo matemático adaptado para encontrar soluções, bem como o desenvolvimento da metodologia AHP, destacando sua eficácia na tomada de decisões. Em seguida, são apresentados os resultados práticos juntamente de sua discussão. Por fim, reflete-se sobre as principais conclusões e contribuições do estudo, e são apontadas oportunidades para futuras pesquisas, seguidas das referências.

## REVISÃO DA LITERATURA

Para nortear o desenvolvimento do estudo são necessários subsídios teóricos que proporcionem as direções de pesquisas realizadas e os critérios relacionados ao despacho de ordens de serviço que já foram contemplados. A fundamentação teórica se destina ao esclarecimento dos fatores, características e critérios de decisão inseridos no cenário do setor elétrico na elaboração de modelos já propostos referente ao problema do roteamento dinâmico de veículos, com destaque para aqueles aspectos relacionados aos atendimentos emergenciais. Aliado a esses temas, foram explorados também os conceitos da metodologia utilizada AHP utilizada para a tomada de decisão multicritério.

### Elementos relevantes do setor elétrico brasileiro

De acordo com Koval *et al.* (2023), as pesquisas no setor de energia elétrica têm sido extensivamente exploradas. Assim, nota-se que uma diversidade de questões tem despertado considerável interesse na área da economia. Estes estudos abordam temas que vão desde a sustentabilidade do desenvolvimento do setor elétrico (ROLDÁN-BLAY *et al.*, 2019; SILVA *et al.*,



2023), a liberalização dos mercados de eletricidade (AHLQVIST *et al.*, 2022; SEVILLA, 2023), até políticas de preços da eletricidade e suas flutuações (LAGO *et al.*, 2021), bem como previsões relacionadas ao mix energético e ao consumo de combustíveis (AUGUSTYN *et al.*, 2018; REIS *et al.*, 2024).

Dentro desse contexto, dada a ênfase da pesquisa atual, é essencial abordar nesta seção certos aspectos históricos e legislativos específicos do setor elétrico brasileiro, os quais fornecem a base para este estudo. A partir dos anos de 1980, ocorreram profundas transformações na economia em escala mundial, principalmente no setor elétrico. No Brasil, o regime de concessões públicas de bens e serviços vinculados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica teve significativo incremento nos anos 90. Conforme Di Pietro (2022), o processo de privatização ocorreu entre 1995 e 2000, com a maior parte sendo conduzida por meio de concessões, conforme estabelecido principalmente pela Lei 8.987/95, que regulamentava a prestação de serviços públicos.

Mediante este contexto histórico, é pertinente caracterizar alguns aspectos do órgão regulador das concessionárias, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Instituída pela Lei 9.427/96, “com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal, conforme disposto no seu artigo 2º”. Vale salientar ainda que além das incumbências prescritas na lei das concessões (8.987/95), a Lei 9.427/96 atribui competência à ANEEL para promover as licitações destinadas à contratação de concessionárias de serviços públicos de energia elétrica, conforme disposição do artigo 3º (BRASIL, 2009).

Dentro do escopo regulatório atinente à distribuição de energia elétrica, faz-se relevante falar dos Procedimentos da Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, setor que se encontra dentro do âmbito da ANEEL. Este órgão é conceituado como:

Os Procedimentos de Distribuição são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (PRODIST, 2008, p. 3).

No que se refere a este setor, é fundamental descrever a definição das distribuidoras de energia elétrica de acordo com a Resolução Normativa da ANEEL do Artigo 2º-XVI (2010): “Concessionária: agente titular de concessão federal para prestar o serviço público de distribuição de energia elétrica, doravante denominada distribuidora”. É importante destacar ainda que as concessionárias também possuem obrigações regulamentadas no PRODIST.

Considerando o foco deste estudo, é relevante abordar os despachos de ocorrências emergenciais para as equipes de campo, uma vez que constituem uma atividade crucial das empresas de distribuição



de energia elétrica. Esses despachos têm impacto direto na receita da empresa, no cumprimento das exigências regulatórias e na satisfação dos clientes. Portanto, a melhoria na execução dessas atividades, por meio da automação dos processos, pode resultar em ganhos significativos para as empresas (LAGO *et al.*, 2021).

Há uma sazonalidade no número de ocorrências. Muitas vezes o atendimento é baseado no fluxo diário, sendo que se deve levar em consideração variáveis como o tempo de duração dos atendimentos, a quantidade de quilômetros percorridos, o número de viagens necessárias, o número de veículos que se faz necessário e quantos funcionários que serão designados. A ANEEL, como órgão regulador, determina em suas “Normas e Indicadores de tempo de atendimento às ocorrências emergenciais”, que o atendimento às ocorrências emergenciais deverá ser supervisionado, avaliado e controlado por meio de indicadores que expressem os valores vinculados ao conjunto de unidades consumidoras. Onde será avaliado os tempos médios de preparação, deslocamento e execução (ANEEL, 2019).

Determina-se ainda que a distribuidora tem o dever de atender as ordens emergenciais de forma acessível para os consumidores (ANEEL, 2019). Além disso, para que se tenha o despacho ou distribuição adequada das ocorrências, é necessário que os profissionais que atuam no despacho tenham um conhecimento prévio da região geográfica onde estão atuando. Nesse contexto, para medir sua eficiência, a ANEEL estabelece indicadores para o acompanhamento e controle do desempenho das distribuidoras, em relação à qualidade dos serviços e atendimentos prestados de energia, tais como o TMAE (Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências Emergenciais), sendo este o indicador considerado na presente pesquisa (ANEEL, 2015; ANEEL, 2019).

Ademais, Schmitz *et al.* (2021) esclarecem que, para avaliar a qualidade do serviço prestado por uma concessionária de energia elétrica e mitigar danos a equipamentos e riscos à segurança decorrentes de interrupções, a ANEEL também impõe uma penalidade financeira à concessionária. Esta penalidade pode ser quitada tanto junto ao regulador quanto diretamente pelo consumidor. O montante da penalidade aumenta conforme a importância dos serviços de emergência, sendo regulado pela ANEEL com base na prioridade atribuída pelo consumidor (ANEEL, 2020).

Nessa linha, existem outros indicadores que são utilizados em alguns trabalhos, como no estudo de Schmitz *et al.* (2021), em que foi proposta a integração do reparo de ordens emergenciais ao problema de Fluxo de potência ótimo dinâmico baseado em preço (FPOD-BP), utilizando o custo associado ao indicador de Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC). É importante observar que, no Brasil, a continuidade do fornecimento de energia é avaliada pela ANEEL utilizando diversos indicadores, além do DIC, como FIC, FEC, DEC, DMIC e DICRI (ANEEL; 2020).



Por fim, vale destacar que a proposição de uma metodologia e a consequente adoção de uma ferramenta computacional que otimize as rotas das equipes de emergência indicando a sequência de atendimento pode influenciar diretamente o TMAE, indicador escolhido para o enfoque deste estudo, conforme já mencionado. Ressalta-se que o tema dessa pesquisa se refere à parte do atendimento dessas ordens emergências que envolvem a distribuição de energia, e com a aplicação de modelo de roteamento e uma metodologia de suporte para melhorar a tomada de decisão, com a priorização de atendimento, pretendendo-se melhorar a qualidade dos mesmos.

## Soluções de pesquisa operacional para atendimentos de emergência

O contexto de atendimento em tempo real envolve vários critérios, como rotas de atendimento, níveis de prioridade para atendimento, prazos de atendimento, localização e disponibilidade de equipes, indicadores, entre outros (LEI *et al.*, 2019; BAHRAMI *et al.*, 2021). No âmbito de serviços emergenciais deve se destacar que há um tratamento específico para aqueles casos que demandam atendimento com um atributo associado ao apoio à vida. Por outro lado, em casos que não se refiram a vidas humanas, uma ocorrência de uma interrupção no provimento de um serviço ou bem pode ter seu custo equiparado ao custo do atendimento. Este custo, por sua vez, consiste na soma dos custos de preparação, de deslocamento e do serviço de restauração ou de reparo da estabilidade (FORTES, 2015; GARCIA *et al.*, 2018)

Considerando este segundo cenário descrito sobre a comparação de fatores de decisão para execução de serviços, são encontrados diversos trabalhos na literatura que tratam da questão do atendimento em tempo real. Neles são considerados diferentes critérios para a tomada de decisão na resolução do problema dada as características de cada cenário, levados assim a diferentes resultados. A seguir no Quadro 1, serão apresentados alguns desses trabalhos, destacando-se as características que cada autor tratou na abordagem do atendimento para serviços emergenciais.



## Quadro 1- Trabalhos que tratam sobre tomada de decisão na resolução de problemas

AUTORES	ABORDAGEM	PROPOSTA
Weintraub <i>et al.</i> (1999)	Otimizar a qualidade do serviço medido em termos de tempo de resposta, quando são considerados níveis de prioridade.	A qualidade pode ser medida por meio da distância que os veículos têm a partir de uma determinada zona e do número de falhas previstas nesta zona. Esquemáticamente, tentou-se minimizar a função de custo para cada atribuição de veículo. Duas ferramentas foram desenvolvidas para determinar o envio dos veículos: um algoritmo de despacho e um desenho que representa a rede e os tempos de viagem.
Volpi <i>et al.</i> (2008)	Atender os defeitos nas redes de distribuição de energia elétrica.	Elaboraram uma ferramenta computacional, a qual emprega informações de banco de dados que gerenciam as solicitações como tipo de serviço solicitado, a localização geográfica e também dados das equipes disponíveis.
Raduan (2009)	Descrever um modelo de roteamento de veículos.	Descreveu um modelo de roteamento de veículos para atender dois tipos de demandas: as ordens programadas e aquelas que surgem no decorrer da jornada de trabalho. Como critério de decisão se baseia naqueles que demonstram o menor tempo de espera resultante desta combinação, onde calcula-se a distância euclidiana entre eles e a finalização prevista do serviço, despachando a ordem quando o servidor correspondente estiver disponível.
Ñahuis (2013)	Hierarquizar o conjunto de ordens de serviços e atribuí-las a todas as viaturas disponíveis, segundo os critérios considerados pela concessionária	Metodologia para a automação dos despachos dinâmicos com deslocamento de viaturas e suas equipes para o atendimento das ordens de serviços, no entanto, considerando a priori o atendimento das ordens comerciais.
Garcia <i>et al.</i> (2018)	Minimizar os custos de PLIM envolvendo uma heurística de construção que aborda até 3234 Ordens Emergenciais (OEs), considerando a latência das OEs, o número de equipes agendadas para o melhoramento e 23 equipes sem perturbação.	Foram propostas duas formulações para o problema de despacho de múltiplas equipes de reparo, abordando tanto cenários off-line (com rotas pré definidas para atender ordens comerciais) quanto cenários on-line (onde as ordens de serviço são atendidas conforme surgem). Para abordar essas formulações de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), foi sugerida uma heurística de três etapas - construção, melhoramento e perturbação - baseada na meta-heurística de Busca Local Iterada (BLI).
Lei <i>et al.</i> (2019)	Maximizar o restabelecimento das cargas e minimizar o número total de viagens das equipes de reparo e das Estações de Manutenção de Parada Programada (MPPs), são os objetivos. Isso é feito através do uso de PRV e PA, que incluem fluxo de potência e reconfiguração de rede.	Foi apresentado um modelo de co-otimização para a restauração do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), considerando o roteamento das equipes de reparo e das Fontes de Geração Móveis (Mobile Power Sources - MPSs), juntamente com o agendamento das MPSs no SDEE. Propõe-se um método heurístico para pré-designar Ordens de Emergência (OEs) aos postos de trabalho, visando a resolução posterior do Problema de Roteamento de Veículos (PRV) na co-otimização; além disso, é sugerido outro método para reduzir o número de nós candidatos para a conexão das MPSs, minimizando a distância percorrida. Por fim, o problema é resolvido por um método exato.
Yang <i>et al.</i> (2020)	Maximizar a carga total fornecida, reduzir o deslocamento das MPSs, minimizar os custos associados à degradação dos Sistemas de Alimentação de Emergência (SAEs) e aos geradores de emergência são os objetivos. Isso é realizado através do uso do PRV e PA, que incluem fluxo de potência e reconfiguração de rede.	Trabalham com a Alocação de Potência (PA) e o PRV no contexto de veículos elétricos, geradores de emergência móveis e Sistemas de Alimentação de Emergência (SAEs) móveis, considerando-os como MPSs, em um modelo destinado a responder a eventos sísmicos. Para isso, é proposto um modelo de dois estágios. O primeiro estágio emprega simulação de Monte Carlo. No segundo estágio, é formulada a co-otimização do roteamento e agendamento das MPSs, juntamente com a reconfiguração dinâmica da rede, como um Problema PLIM.
Bahrani <i>et al.</i> (2021)	Minimizar a distância percorrida pelas equipes, reduzir os danos sofridos pelas concessionárias e maximizar a energia fornecida às cargas críticas, além de promover a assistência mútua entre as concessionárias. Isso é realizado através do PRV com inclusão de fluxo de potência e reconfiguração da rede elétrica.	Exploram a resposta após desastres naturais, é sugerida uma estrutura de dois estágios: no Estágio I, coordena-se a assistência mútua entre concessionárias de energia, formulando o problema como Programação Linear Inteira Mista (PLIM). No Estágio II, a saída do primeiro estágio é empregada para co-otimizar os reparos no período atual (h) e a formação de ilhas no próximo período (h+1), também modelado como PLIM.
Schmitz <i>et al.</i> (2021)	Melhorar sistematicamente a solução, ajustando a rota conforme necessário e monitorando os resultados para acompanhar o progresso da solução. Os testes computacionais são conduzidos em sistemas de distribuição IEEE, estabelecendo os casos de referência com o algoritmo proposto e suas outras duas variantes.	É proposto um modelo matemático para a co-otimização dos problemas interdependentes de escalonamento PB-DOPF e Ordem de Emergência (EO), com o objetivo de minimizar o custo do PB-DOPF ao longo de um horizonte de tempo. O problema é formulado como um modelo de PLIM, incorporando fluxo de potência trifásico linearizado. Um algoritmo é desenvolvido para resolver o PB-DOPF e o despacho de equipes de reparo em um horizonte com múltiplas incidências de OEs, incluindo uma metodologia de pré-agendamento para tratar da complexidade computacional.
Xu <i>et al.</i> (2023)	Determinar trajetos para a distribuição de ajuda emergencial de Veículos Elétricos (VEs) de forma que todas as demandas de abrigo sejam atendidas dentro de suas janelas de tempo, ao mesmo tempo em que se minimiza o custo total percorrido pela frota.	Desenvolveram uma abordagem em dois estágios para resolver o PRV com Janelas de Tempo em um contexto pós-desastre. Primeiramente, utilizaram o algoritmo Floyd combinado com a lista vizinha para calcular o custo mínimo de viagem entre quaisquer dois vértices na rede de transporte. Em seguida, implementaram um algoritmo genético com busca em grandes vizinhanças para determinar o esquema de entrega dos abrigos. Os resultados mostram que o desempenho do algoritmo genético é superior à pesquisa tabu. O método foi testado em casos reais baseados em dados do OpenStreetMap na cidade de Ichihara, Japão, demonstrando sua eficácia.
Zhu <i>et al.</i> (2024)	Propor uma abordagem robusta de envio de equipes de reparo para sistemas de distribuição, considerando a incerteza dos interruptores controlados remotamente. Os testes de simulação realizados nos sistemas de distribuição demonstraram que a abordagem proposta é capaz de reduzir de forma eficaz a perda máxima do sistema. Isso é realizado através do uso de uma variação do PRV.	Propuseram um modelo de otimização robusta de três níveis, essencialmente um modelo de PLIM para determinar a estratégia de envio da equipe de reparo em diferentes cenários de falha. O operador do sistema decide o plano de envio da equipe de reparo no primeiro nível. No segundo nível, o pior cenário de falha é calculado considerando o status em tempo real dos interruptores sob várias combinações de falhas e processos de reparo. Com base nesse status, o operador utiliza geradores distribuídos e reconfiguração da rede para restaurar as cargas. Um algoritmo personalizado de geração de colunas e restrições aninhadas (NC&CG) é aplicado ao modelo robusto para encontrar a solução ideal. O algoritmo se mostrou capaz de reduzir consideravelmente o tempo de computação necessário.

Fonte: Elaboração própria.





## Método multicritério e a Análise Hierárquica de Processos (AHP)

Na sociedade atual, uma tendência é a constante medição e comparação de tudo. Os tomadores de decisão precisam de números e classificações para fundamentar suas estratégias ou acompanhar o "progresso" relativo (NEOFYTOU *et al.*, 2020). Nesse contexto, frequentemente um gestor está diante da necessidade da tomada de decisão, a qual encontra-se entre várias opções concorrentes e contraditórias, sugerindo duas alternativas principais: 1) Basear-se em seu conhecimento de gestor e 2) fazer um procedimento de modelagem do problema, simulando diversas situações, buscando com isso analisar de um modo mais detalhado o problema (LACHTERMACHER, 2016).

A tomada de decisão com base na segunda opção pode empregar várias metodologias já desenvolvidas, incluindo aquelas que consideram múltiplos critérios, como argumentado por Aubert *et al.* (2024). Frequentemente, esses tomadores de decisão buscam otimizar não apenas um único objetivo, mas também alcançar um resultado que satisfaça uma série de objetivos que podem ser conflitantes (AUBERT *et al.*, 2024). Nessa perspectiva, é notório que a maioria dos problemas reais na área de otimização envolve a otimização simultânea de vários objetivos (TICONA; 2003; LACHTERMACHER, 2016).

Esse processo de otimização requer a minimização (ou maximização) simultânea de um conjunto de objetivos, enquanto atende a um conjunto de restrições. Nessa situação, o tomador de decisão terá um conjunto de soluções eficientes à sua disposição e precisará compará-las com as metas gerais do problema para selecionar uma específica (AUDET *et al.*, 2021).

Há métodos para apoio à tomada de decisão multicritério, e eles se dividem em duas grandes linhas: Métodos da Escola Francesa e Métodos da Escola Americana. Os primeiros são fundamentados na teoria da dominância e nela se destacam os métodos ELECTRE e PROMETHEE (LOOTSMA, 1990). Já os Métodos da Escola Americana procuram reduzir os vários critérios a apenas um, frequentemente por meio de uma soma ponderada que emprega pesos atribuídos anteriormente. Nessa linha, são considerados como principais métodos AHP, MACBETH e UTA (LOOTSMA, 1990).

Um dos métodos mais antigos e amplamente utilizados para ambientes de tomada de decisão multicritério é o Método da Análise Hierárquica de Processos (Analytic Hierarchy Process - AHP), que foi empregado neste estudo. Sua relevância reside na capacidade de incorporar fatores subjetivos de julgamento na tomada de decisões (FENG *et al.*, 2024). De acordo com Feng *et al.* (2024), o método AHP permite a consideração simultânea de múltiplos critérios de avaliação e fornece uma estrutura organizada para avaliar e priorizar esses critérios de forma eficiente. Além disso, a lógica subjacente da AHP é integrar a avaliação objetiva no processo de tomada de decisão subjetiva. Este método pode ser



adaptado para atender aos requisitos específicos do ambiente de pesquisa, como no caso dos autores mencionados, que investigaram o ambiente da sala de aula universitária. Portanto, ele permite a inclusão de diversas perspectivas das partes interessadas, levando em consideração suas preferências e prioridades.

O conceito central da AHP consiste na subdivisão do problema em diferentes níveis hierárquicos, tornando-o mais acessível e simplificado para compreensão e análise. Raghav *et al.* (2022) observam que esse método é adotado por suas características distintas na abordagem de situações incertas, auxiliando os tomadores de decisão na seleção da melhor alternativa. Já Ortiz-Barrios *et al.* (2021) observam que o método da média geométrica do AHP é amplamente utilizado para determinar os pesos relativos normalizados dos critérios, devido à sua simplicidade, à facilidade de encontrar o autovalor máximo e à capacidade de reduzir a inconsistência nos julgamentos.

A metodologia determina os pesos relativos tal como as prioridades dos elementos de um nível da hierarquia em relação a cada um dos elementos do nível superior. Essa estrutura hierárquica da AHP emprega a estrutura de Árvore de Decisão (AD), na qual os critérios de julgamento encontram-se agrupados em variados níveis hierárquicos, linhas de ação, ou alternativas (SAATY; 1991).

Um trabalho de relevância que empregou AHP para a tomada de decisão é o de Durbach *et al.* (2014), com a proposição de uma metodologia AHP associada com o método de Análise Multicritério Estocástica de Aceitabilidade (SMAA), para permitir que as comparações de pares possam ser incertas. Um experimento de simulação é empregado para avaliar como a consistência das avaliações e a capacidade do modelo SMAA-AHP de identificar a melhor alternativa diminuem conforme a incerteza aumenta. Não obstante, na linha dos trabalhos citados acima, pode-se observar recentemente a pesquisa de Neofytou *et al.* (2020), esses autores investigaram o nível de prontidão para a transição energética na Europa, utilizando uma abordagem sinérgica que combinou os métodos AHP e PROMETHEE.

## MÉTODO

Para a consecução do objetivo proposto neste artigo, considerou-se como mais apropriada a metodologia de natureza aplicada, uma vez que se buscou gerar conhecimento para aplicação prática e dirigida à solução de problemas do cotidiano (VENANZI, 2016), nesse caso de um problema específico de ordens de despacho das concessionárias de energia elétrica. Assim, este estudo caracteriza-se como uma abordagem experimental e quantitativa, utilizando a técnica de modelagem matemática, especificamente o Problema de Roteamento de Veículos (PRV), com heurísticas e o método de tomada



de decisão conhecido como Análise Hierárquica de Processos (AHP), esses métodos evidenciam alguns dados tratados como informações para serem analisados na tomada de decisão.

Sampieri, Collado e Lucio (2006, p. 157) mencionam que o método experimental remete diretamente a uma abordagem quantitativa. Para os autores, uma pesquisa experimental refere-se a “[...] um estudo em que se manipulam intencionalmente uma ou mais variáveis independentes, para analisar as consequências da manipulação sobre uma ou mais variáveis dependentes, dentro de uma situação de controle do pesquisador”. Os procedimentos técnicos adotados neste trabalho são, portanto, caracterizados como pesquisa experimental.

Para alcançar os objetivos estabelecidos, a coleta de dados ocorreu em duas etapas: pesquisa bibliográfica e pesquisa de campo. A pesquisa bibliográfica envolveu a revisão de materiais já publicados, como livros, artigos de periódicos e recursos online (MARCONI; LAKATOS, 2010), fundamentando teoricamente o estudo e contribuindo para a elaboração do modelo matemático. Temas relevantes, como elementos do setor elétrico brasileiro, soluções de pesquisa operacional para atendimentos de emergência e a metodologia AHP, foram abordados.

Na segunda etapa, realizou-se a pesquisa de campo, coletando dados primários e secundários. Os dados primários consistiram em informações numéricas reais, fornecidas por uma concessionária de energia elétrica em Santa Maria, RS, baseados em instâncias reais de dois casos dessa concessionária. Os dados secundários foram obtidos por meio de pesquisa em literatura especializada e em bancos de dados, incluindo relatórios das principais fontes de referências ANEEL e do PRODIST.

Para análise dos dados, utilizou-se a técnica de modelagem matemática, focada no Problema de Roteamento de Veículos (PRV), visando minimizar o tempo e o custo dos atendimentos das ordens de serviço, especialmente as emergenciais. Destaca-se que o PRV é um problema de otimização combinatória (KRAMER *et al.*, 2016), frequentemente tratado por técnicas heurísticas, como o algoritmo multiobjetivo de Garcia *et al.* (2014), aplicado no presente estudo. Adicionalmente, foi empregada a metodologia multicritério denominada Análise Hierárquica de Processos – AHP, para classificar as soluções geradas pelo PRV, considerando múltiplos critérios de decisão. Isso possibilitou determinar a melhor alocação das ordens emergenciais nas rotas planejadas para as ordens comerciais, contribuindo para uma tomada de decisão mais fundamentada.

Elucida-se que nas próximas seções é apresentado o desenvolvimento da metodologia aplicada da Análise hierárquica de processos (AHP) de forma detalhada, com base na explicação dessa metodologia encontrada em Saaty (1980). Vale salientar também que os cálculos feitos para a aplicação da metodologia AHP para a tomada de decisão no roteamento de ordens emergenciais foram executados em planilha eletrônica e com o *software* Matlab. Já para os cálculos do estudo de caso com dados reais,



foi desenvolvida a modelagem algébrica com o uso do *software* Zimpl (2023), com a posterior obtenção da solução ótima do modelo a partir do pacote computacional Scip (2023).

Destarte, o percurso metodológico desta pesquisa, incluiu o estudo dos modelos existentes na literatura científica, a coleta de dados, a elaboração e implementação do modelo matemático, simulações, triangulação de dados e a garantia da validade interna da pesquisa.

Sob esse prisma, para garantir a validade interna desta pesquisa, foi adotada a estratégia de triangulação, que envolveu a utilização de diversas fontes de informação, incluindo tanto dados primários quanto secundários, além da revisão de literatura. Em paralelo, contou-se com a triangulação de métodos, que incluiu a modelagem matemática do modelo do PRV, sua resolução por meio de um algoritmo heurístico e a classificação das soluções usando a metodologia AHP. A confiabilidade foi assegurada ao estabelecer uma clara relação entre os resultados das simulações e as teorias revisadas na literatura, fundamentando-se em dados primários e secundários consistentes.

## Definição do problema

Ainda como parte da metodologia, faz-se necessário elucidar a definição do problema estudado. Desse modo, o escopo deste trabalho está na resolução do problema de tomada de decisão para definir a melhor designação entre as ordens emergenciais pendentes e as equipes disponíveis. Considera-se que essas equipes estarão ocupadas no atendimento de ordens programadas e terão o seu percurso alterado para completarem a execução dos serviços emergenciais pendentes. Neste instante, surge o problema abordado neste estudo, em que se busca modelar e comparar esse cenário, refletindo a relação de simultaneidade entre esses dois períodos das ordens de despacho: a ocorrência de emergências irá interferir na zona de abrangência das equipes no atendimento de ordens comerciais já programadas.

Conforme o enfoque deste estudo, já existem diferentes trabalhos vistos na literatura, em que foram utilizados variados critérios para o problema do atendimento de emergências. Este estudo busca justamente explorar qual o peso que estes diferentes critérios podem ter e como podem influenciar na decisão do despacho, quais são os mais indicados para serem usados e como classificá-los ao elaborar uma rota para cada equipe, na qual é preciso designar uma sequência de atendimento de clientes. Também deve ser decidido quais os atributos serão considerados, o quanto pode custar deixar de atender ou não uma ordem programada a priori para atender uma ordem emergencial.



## RESULTADOS

### O modelo matemático para o Problema de Roteamento de Veículos (PRV)

O problema de roteamento de veículos é utilizado para atender as ordens de despacho das equipes de campo das concessionárias, uma vez que auxilia na programação das rotas de serviço. Nesse contexto, buscou-se apresentar aqui o modelo tradicional do PRV, o qual é explorado e adaptado no estudo de Schardong *et al.* (2022) e Schardong e Garcia (2023), dessa forma, o mesmo serviu como modelo para o desenvolvimento deste estudo.

Eksioglu *et al.* (2009) descrevem o Problema do Roteamento de Veículos (PRV) como a busca por um conjunto de  $k$  circuitos simples, onde cada um representa um trajeto de veículos com custo mínimo (EKSIUGLU *et al.*, 2009; SCHARDONG *et al.*, 2022). Esse custo é determinado como a soma dos custos dos arcos dos circuitos, sujeito às seguintes condições:

- i. Cada rota inicia e termina no depósito.
- ii. Cada cidade, exceto o depósito, é visitada apenas uma vez e por apenas um veículo.
- iii. A demanda total em qualquer rota não excede a capacidade  $Q$  de um veículo.

Nessa linha, Fisher e Jaikumar (1981) apresentam uma das formulações mais empregadas para o PRV, cuja descrição é apresentada nas equações a seguir.

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i,j} (c_{ij} \sum_k x_{ijk}) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_k y_{ik} = 1, \quad i = 2, \dots, n \quad (1.1)$$

$$\sum_k y_{ik} = m, \quad i = 1 \quad (1.2)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k, \quad k = 1, \dots, m \quad (1.3)$$

$$\sum_j x_{ijk} = y_{ik}, \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m \quad (1.4)$$

$$\sum_i x_{ijk} = y_{jk}, \quad j = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m \quad (1.5)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad S \subseteq \{2, \dots, n\}; \quad k = 1, \dots, m \quad (1.6)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m \quad (1.7)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \quad i, j = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m \quad (1.8)$$



Considerando as seguintes variáveis:

$x_{ijk}$  = variável binária que assume valor de 1 quando o veículo  $k$  visita o cliente  $j$  imediatamente após o cliente  $i$ , 0 em caso contrário;

$y_{ik}$  = variável binária que assume o valor de 1 se o cliente  $i$  é visitado pelo veículo  $k$ , 0 em caso contrário;

$q_i$  = é a demanda do cliente  $i$ ;

$Q_k$  = é a capacidade do veículo  $k$ ;

$c_{ij}$  = é o custo de percorrer o trecho que vai do cliente  $i$  ao  $j$ .

Expressa na equação 1, a função objetivo visa minimizar o custo total de todas as viagens realizadas. As restrições definidas nas equações 1.1 a 1.6 desempenham papéis específicos no problema. A Equação 1.1 garante que um veículo não visite um cliente mais de uma vez. As restrições da Equação 1.2 asseguram que todos os veículos visitem o depósito. A Equação 1.3 impõe limites estritos nas capacidades dos veículos. Além disso, as restrições da Equação 1.4 e 1.5 garantem que os locais escolhidos para visitas tenham apenas um arco de chegada e um de saída, otimizando a rota. As restrições da Equação 1.6 têm a função de eliminar subtours ou sub-rotas indesejadas. Por fim, as restrições 1.7 e 1.8 definem o domínio das variáveis.

Ressalta-se que o PRV pode conter vários ciclos dirigidos, chamados caminhos pré-hamiltonianos. Já na Equação 2 apresenta uma opção de restrição que elimina esses subciclos que é aplicada à modelagem matemática anterior. Do mesmo modo, deve ser observado que o conjunto  $S$  representa o conjunto de todos os nós do problema, incluindo o nó que representa o depósito, ou ponto de partida para todos os  $k$  veículos.

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, S \subseteq \{2, \dots, n\}; k = 1, \dots, m \quad (2)$$

Além dessa, outra alternativa de excluir subciclos é a de acrescentar variáveis extras ( $i = 1, \dots, n$ ), pois elas representam uma tentativa de evitar um conjunto de restrições com cardinalidade dada a partir de uma função combinatória, através da formulação de Miller *et al.* (1960). Essas restrições são descritas conforme as Equações (3), (3.1) e (3.2), a seguir.



$$u_1 = 1, \quad (3)$$

$$2 \leq u_i \leq n, \quad \forall i \neq 1, \quad (3.1)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (n - 1)(1 - x_{ij}), \quad \forall i \neq 1, \forall j \neq 1 \quad (3.2)$$

No estudo de Vidal *et al.* (2013) sobre o Problema de Roteamento e Capacidade de Veículo, eles demonstram a formulação proposta por Fisher e Jaikumar (1981) para o PRV. Nessa formulação, o PCV é considerado um caso especial, ocorrendo quando  $m = 1$  e  $Q = +\infty$  e assim sendo NP-difícil. Os autores também mencionam uma restrição adicional comum na literatura, que define o comprimento máximo de cada rota (VIDAL *et al.*, 2013; SCHARDONG *et al.*, 2022). Cada cliente está associado a uma duração de serviço, representada pela soma dos tempos de serviço do cliente e o tempo de viagem da rota, limitada por  $T$ , conforme descrito na equação 4.

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (c_{ij} + \tau_i) x_{ijk} \leq T, \quad k = 1, \dots, m \quad (4)$$

Geralmente, esses problemas são considerados determinísticos, implicando que todos os clientes devem ser atendidos, e suas demandas são predefinidas. Em certos contextos, variações estocásticas dos problemas são vistas como mais realistas: Nem todos os clientes requerem atendimento diário, e as demandas costumam variar ao longo do tempo (FERNSTROM; STEINER, 2020).

Diante dessas premissas, no momento em que se relaciona o PRV ao presente estudo, a fim de definir a formação de rotas para o atendimento dos serviços de uma concessionária de distribuição de energia elétrica, é importante salientar que estas organizações estão sujeitas às regulamentações do órgão regulador do setor, a ANEEL é responsável por estabelecer os prazos para atender às várias solicitações dos consumidores. Essas demandas levam as concessionárias a contratar equipes de atendimento para cumprir os prazos definidos para atendimento são cumpridos tendo em vista o dimensionamento adequado da força de trabalho (CPFL, 2022), sabendo-se que também é necessário reduzir os custos envolvidos sem, no entanto, incorrer em penalizações por violação das metas.

Dessa forma, este estudo aborda os seguintes atributos considerados essenciais na realização dos serviços pelas equipes de atendimento: (i) localização do serviço, indicando onde está a demanda do cliente; (ii) prioridade, relacionada ao tipo de serviço e seu grau de importância; (iii) tempo de execução do serviço. Em paralelo, considera-se que a gestão dos serviços, incluindo a atribuição às equipes,



requer a consideração do tempo de deslocamento, pois a jornada de trabalho é composta tanto pelo tempo de deslocamento quanto pelo tempo de execução dos serviços (SCHARDONG; GARCIA, 2023).

Nesse escopo, a presente pesquisa apresenta-se em consonância com o trabalho de Weintraub *et al.* (1999), o qual teve como objetivo replicar o método interno utilizado pelos profissionais da concessionária para atribuir os serviços às equipes, levando em conta fatores como a distância mais curta e as prioridades no atendimento das ocorrências. Além disso, fundamentada nas premissas já estabelecidas e enumeradas em um estudo anterior por Schardong *et al.* (2022), esta pesquisa buscou identificar o problema da gestão dos atendimentos através da abordagem do problema de roteamento de veículos, com a meta de reduzir os tempos de deslocamento entre os atendimentos. Portanto, o modelo matemático apropriado para este estudo tem seus parâmetros diretamente ligados aos tempos de atendimento e aos tempos de percurso das rotas.

Destarte, demanda-se uma série de modificações na representação e no significado das variáveis contidas no modelo matemático delineado nesta seção, concentrando-se agora no aspecto primordial ligado à definição das variáveis consideradas: o tempo. Inicialmente, a função objetivo do modelo matemático é modificada, onde o somatório anterior representava o custo de deslocamento em distância, agora, trata-se da soma dos custos dos arcos dos circuitos percorridos ( $c_{ij}$ ).

Neste estágio, a função objetivo é agora a soma total dos tempos de deslocamento de cada arco dentro do circuito, além dos tempos de execução dos serviços em cada nó. Isso introduz um conceito chamado tempo de chegada no nó, o qual é definido como  $t_j$ . Mais especificamente, a variável  $t_j$  é definida como o tempo de chegada ao nó anterior a  $j$  na sequência de atendimento, somando o tempo de serviço no nó anterior e o tempo de deslocamento do nó anterior até o nó  $j$ . O nó anterior é denotado como  $i$ , e o tempo de deslocamento entre eles é identificado como  $c_{ij}$ . O tempo de chegada no nó anterior é definido como  $t_i$ , e o tempo de serviço no nó  $i$  é denominado  $ts_i$ . Dessa forma, o tempo  $t_j$  é calculado como  $t_j = t_i + ts_i + c_{ij}$ .

Dado esse somatório, é essencial considerar o tempo de chegada em cada nó devido à sua relação intrínseca com a definição das rotas, que por sua vez está ligada ao conceito das seguintes  $x_{ijk}$ . Portanto, uma restrição adicional será incluída no modelo, relacionando os tempos de chegada com as variáveis que determinam as rotas ( $x_{ijk}$ ). A variável  $x_{ijk}$ , se refere a visita (1) ou não (0) do nó  $j$  após o nó  $i$  pelo veículo  $k$ . A referida variável determina se o tempo de chegada no nó  $j$  deve ser ativado ou não, dependendo da existência da ligação  $i$ - $j$ . Caso contrário, o limite mínimo de  $t_j$  deve ser muito baixo para admitir  $t_j=0$ . Para tanto, um fator  $M$  multiplica a parcela  $(1 - x_{ijk})$  a fim de que ela torne o lado direito





da inequação a seguir significativamente menor que zero sempre que  $x_{ijk} = 0$ :  $t_j \geq t_i + ts_i + c_{ij} - (1 - x_{ijk})M$ . Dessa forma, o tempo em  $j$  deve ser maior que o tempo do nó anterior  $i$ , caso haja a ligação  $i$ - $j$  ( $x_{ijk} = 1$ ), acrescido do tempo de serviço do nó anterior ( $ts_i$ ) e o tempo de deslocamento de  $i$  para  $j$  ( $c_{ij}$ ).

No Quadro 2, são apresentados os parâmetros e as variáveis do modelo matemático com essas modificações mencionadas acima (Equações 5 a 5.14), juntamente com as definições correspondentes de cada um deles, desde os conjuntos dos nós considerados até às variáveis diferenciadas relacionadas ao tempo de espera inseridas.

**Quadro 2 – Dados e variáveis do modelo proposto**

Conjunto	Descrição
$V_s$	: Localização de cada equipe;
$V_c$	: Conjunto dos nós que correspondem aos clientes comerciais;
$V_e$	: Conjunto dos nós que correspondem aos clientes emergenciais;
$V_t$	: Conjunto dos nós terminais de cada rota, criados apenas para estimar o tempo total de cada rota;
$V$	: $V = V_s \cup V_c \cup V_e \cup V_t$ ;
$E$	: Conjunto dos veículos, ou rotas criadas;
Parâmetro	Descrição
$m$	: Número total de veículos disponíveis (neste caso são 2, $k_1$ e $k_2$ );
$n$	: Total de nós (clientes);
$T$	: Tempo máximo para cada rota;
$M$	: Um número grande, tipicamente 100T;
$c_{ij}$	: Tempo de percurso da rota de $i$ ao $j$ ;
$ts_i$	: Tempo de serviço realizado em cada nó $i$ ;
Variável	Tipo / Descrição
$u_i$	: Variável que define a ordem do nó $i$ e estará na rota;
$O_i$	: Custo de cada nó (peso);
$t_i$	: Tempo de chegada do nó $i$ ;
$x_{ijk}$	: Assume o valor 1 quando o veículo $k$ visita o nó $j$ após o nó $i$ , e 0, caso contrário;
$y_{ik}$	: Assume o valor 1 quando o nó $i$ pertence à rota do veículo $k$ , e 0, caso contrário.

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Schardong *et al.* (2022).

Sobre esse prisma, elucida-se que a função objetivo (5) minimiza a soma dos tempos de chegada, a fim de aumentar a produtividade das equipes e postergar serviços com tempos maiores. Essa função envolve a ponderação dos dois critérios por meio de uma combinação convexa entre o somatório do tempo de chegada para os nós comerciais e o somatório dos tempos de chegada para os nós emergenciais. Cada tempo de chegada é ponderado pela importância do respectivo nó, assumido neste modelo como o seu custo. Quando assume-se  $\alpha = 1$  atribui-se toda a importância para os tempos de



chegada nos nós comerciais, ao passo que quando  $\alpha = 0$  atribui-se a importância da função objetivo para minimizar os tempos de chegada nos nós emergenciais.

Nessa linha, a Equação (5.1) assegura que todos os nós estarão associados a apenas um veículo. As restrições (5.2) e (5.3) garantem que cada nó tenha apenas uma ligação de chegada e uma ligação de saída, respectivamente, enquanto a restrição (5.4) impede a existência de uma conexão que envolva o mesmo nó como origem e destino

$$\text{Minimizar } \alpha \sum_{i \in V_c} O_i t_i + (1 - \alpha) \sum_{j \in V_e} O_j t_j \quad (5)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in E} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in V \quad (5.1)$$

$$\sum_{j \in V, j \neq i} x_{ijk} = y_{ik}, \quad \forall i \in V, \forall k \in E \quad (5.2)$$

$$\sum_{j \in V, j \neq i} x_{jik} = y_{ik}, \quad \forall i \in V, \forall k \in E \quad (5.3)$$

$$x_{iik} = 0, \quad \forall i \in V, \forall k \in E \quad (5.4)$$

$$\sum_{i \in V_t} y_{ik} = 1, \quad \forall k \in E \quad (5.5)$$

$$\sum_{j \in V_c \cup V_t} x_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_t, \forall k \in E \quad (5.6)$$

$$u_i = 1, \quad \forall i \in V_s \quad (5.7)$$

$$2 \leq u_i \leq |V_c \cup V_t|, \quad \forall i \in V_c \cup V_t \quad (5.8)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (|V_c \cup V_t| - 1)(1 - x_{ijk}), \quad \forall i, j \in V_c \cup V_t \quad (5.9)$$

$$t_i = 0, \quad \forall i \in V_s \quad (5.10)$$

$$t_j \geq t_i + ts_i + c_{ij} - (1 - x_{ijk})M, \quad \forall i, j \in V_c \cup V_t, \forall k \in E \quad (5.11)$$

$$t_i \leq T, \quad \forall i \in V_t \quad (5.12)$$

$$x_{ijk}, y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, \forall k \in E \quad (5.13)$$

$$u_i, t_i \geq 0, \quad \forall i \in V \quad (5.14)$$

No que concerne às restrições (5.5), estas determinam que cada rota deve ter um e apenas um nó terminal. O conjunto de restrições (5.6) impede que os nós terminais estejam em qualquer posição que não seja a última em cada rota. A eliminação de subciclos é assegurada pelas restrições (5.7) a (5.9), como fora mencionado.

Quanto às restrições (5.10) e (5.11), estas definem o tempo de chegada em cada nó, atreladas às variáveis pertinentes  $x_{ijk}$ . Os tempos de chegada nos nós terminais se referem aos tempos de rota e são limites máximos que não podem ultrapassar T, assim como estipulado pelas restrições (5.12). Por sua vez, o domínio das variáveis  $x_{ijk}, y_{ik}, u_i$  e  $t_i$  é estabelecido de acordo com as restrições (5.13) e (5.14).



Diante o exposto, essa modelagem proposta demonstra ser compatível para resolver o problema de designação de ordens emergenciais para as equipes disponíveis.

## Aplicação da metodologia AHP para a tomada de decisão no roteamento de ordens emergenciais

O ajuste das prioridades no AHP fundamenta-se na habilidade do ser humano de perceber o relacionamento entre objetos e situações observadas, comparando pares à luz de um determinado foco ou critério (julgamentos paritários).

A priorização das alternativas é determinada através de respostas a perguntas do tipo: "qual a importância do critério 1 em relação ao critério 2?" Esse método é chamado de comparação par a par (*pairwise comparison*), e é utilizado para estimar a escala na qual os elementos de cada nível hierárquico são avaliados, e, por fim, para avaliar o desempenho de cada alternativa em relação aos critérios (ORTIZ-BARRIOS *et al.*, 2021; RAGHAV *et al.*, 2022).

Dessa forma, o método fundamenta-se na comparação entre pares de critérios e subcritérios, envolvendo a construção de diversas matrizes quadradas. Raghav *et al.* (2022) explicam que, para cada critério, é avaliada uma matriz de comparação pareada em relação aos pesos. As comparações entre pares, expressas verbalmente, são convertidas em valores numéricos utilizando a Escala Fundamental de Saaty para julgamentos comparativos. Essa escala de valores, variando de 1 a 9, é demonstrada no Quadro 3. Em seguida, mensura-se o grau de importância de um elemento em um determinado nível sobre os elementos de um nível inferior.

**Quadro 3 - Escala Fundamental de Saaty**

Intensidade da Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra, sua demonstração de importância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	Quando se procura uma relação de compromisso entre duas definições
2,4,6,8	Valores Intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição entre duas definições.

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Saaty (1991).

O objetivo que se busca com a metodologia AHP está na possibilidade de calcular os pesos dos critérios envolvidos na tomada de decisão de um gestor de despacho de equipes de atendimentos, de modo a indicar a classificação mais adequada às ponderações subjetivas definidas a priori.



Tendo em vista o objetivo de explorar e classificar casos segundo a importância dada para os critérios de tempo de espera para atendimento das ordens emergenciais e o critério de tempo de espera para atendimento das ordens comerciais. Salienta-se que para o desenvolvimento do presente estudo, os cálculos foram executados em planilha eletrônica e também executados e recalculados a fim de confiabilidade com o *software* Matlab.

No entanto, para compreender a origem dos cálculos a serem apresentados posteriormente, apresenta-se a seguir uma sequência de passos para desenvolver e aplicar a metodologia:

- Primeiramente é formada uma Matriz de comparação das hierarquias de cada valor dos dois critérios (Tempo Emergencial-Ci e Tempo Comercial-Cj), fazendo a comparação de pesos para estes dois critérios.
- A comparação par a par gera matrizes quadradas, onde o número na linha  $i$  e na coluna  $j$  dá a importância do critério  $C_i$  em relação ao critério  $C_j$ .
- Os elementos  $a_{ij}$  indicam o julgamento do par de critérios ( $C_i, C_j$ ) e  $\alpha$  o valor da intensidade de importância. Saaty (1991) define as seguintes regras para cada elemento  $a_{ij}$  da matriz:
  - Se  $a_{ij} = \alpha$ , então  $a_{ji} = 1/\alpha$ ,  $\alpha \neq 0$ .
  - Se  $C_i$  é julgado como de igual importância relativa a  $C_j$ , então  $a_{ij} = 1$  e  $a_{ji} = 1$ .
  - $a_{ij} = 1$ , para todo  $i$ .
- No cálculo para obter a matriz divide-se, por exemplo: o segundo elemento pelo primeiro elemento da coluna. O resultado dessa divisão procura evidenciar quantas vezes um é menor que outro.
- Calcula-se os demais elementos da matriz da mesma forma, visando obter a relação de quantas vezes um número é menor que o outro, destacando positivamente essa diferença entre eles, sendo considerado que os menores resultados são os melhores, pois eles representam os menores tempos e o problema objetiva a minimização desses tempos.
- A partir dessa etapa, obtemos a matriz de julgamentos normalizados. O cálculo compreende o somatório dos elementos de cada coluna e a divisão de cada elemento da coluna pelo respectivo somatório. A matriz resultante é chamada de matriz normalizada.
- A partir das matrizes normalizadas, procede-se com o cálculo das médias das linhas.
- Cumprida a fase de coleta dos julgamentos de valor, e conseqüente formação das matrizes de comparação para cada nó de julgamento dos níveis hierárquicos, a fase que segue é o momento de associação de prioridades às alternativas viáveis.

## Estudo de casos com instâncias reais

Após a definição da abordagem para tratamento da metodologia AHP na tomada de decisão para o problema de despacho de ordens de serviço emergenciais, são apresentados os resultados da resolução de duas instâncias práticas, oriundas de cenários reais de despacho colhidos em uma concessionária de distribuição de energia elétrica.



Nos dois cenários de simulação, considera-se que as equipes de atendimento das concessionárias serão previamente alocadas para o cumprimento de ordens agendadas quando ocorrerem as emergências. Isso evidencia a relação simultânea entre esses dois períodos de despacho: as emergências influenciarão na área de cobertura das equipes durante o atendimento das ordens comerciais já planejadas.

É demonstrado o desafio enfrentado pelo gestor de despacho ao lidar com ordens emergenciais, tendo que decidir rapidamente a rota e a localização específica para atender cada emergência. Com diversas opções disponíveis, o gestor enfrenta uma tarefa árdua ao comparar as alternativas entre si, buscando selecionar a mais adequada. A complexidade aumenta quando há múltiplos objetivos a serem alcançados, pois a escolha de uma alternativa que pareça a melhor para um determinado objetivo pode prejudicar significativamente o cumprimento de outro. Esse cenário é característico de um processo decisório multicritério.

Nesse sentido, foram considerados dois critérios: a minimização do tempo de espera para atendimento das ordens emergenciais e a minimização do tempo de espera para atendimento das ordens comerciais. Assim, fica evidente a natureza conflitante entre os dois critérios, o que sugere o emprego de um algoritmo baseado na obtenção de um conjunto de soluções eficientes.

Nos dois estudos de caso apresentados a seguir foram considerados os custos em Reais (R\$) para os tempos de espera das ordens emergenciais e comerciais. Este custo é obtido por meio do produto entre o tempo de espera de cada ordem e o respectivo custo em R\$/hora. As subseções a seguir referenciam o estudo de caso 1 e o estudo de caso 2, respectivamente.

## Estudo de caso 1

Neste estudo de caso foi contemplada uma instância com os seguintes dados: 30 ordens comerciais; 6 ordens emergenciais; 3 equipes.

Há que se decidir qual será a rota e a posição relativa para cada uma das 6 ordens emergenciais nas 3 rotas existentes, uma para cada equipe disponível.

O algoritmo (GARCIA *et al.*, 2014) utilizado fornece um conjunto de soluções não dominadas que representam o resultado de um processo de otimização baseado no conceito de otimização de Pareto. Baseou-se em considerar os pontos de partida, os tempos de deslocamento  $c_{ij}$  e os tempos de serviço  $t_{si}$  para cada cliente.

A Tabela 1 apresenta as soluções não-dominadas encontradas pelo algoritmo adotado, que promove a solução do problema de roteamento de veículos quando consideradas as 3 rotas e as 36



ordens da instância. São apresentados os valores de cada um dos dois critérios considerados para as soluções: o custo do tempo de espera das ordens emergenciais (CTe) e o custo do tempo de espera para as ordens comerciais (CTc).

**Tabela 1 – Custos para os tempos de espera das ordens emergenciais e comerciais de cada solução alternativa para o estudo de caso 1**

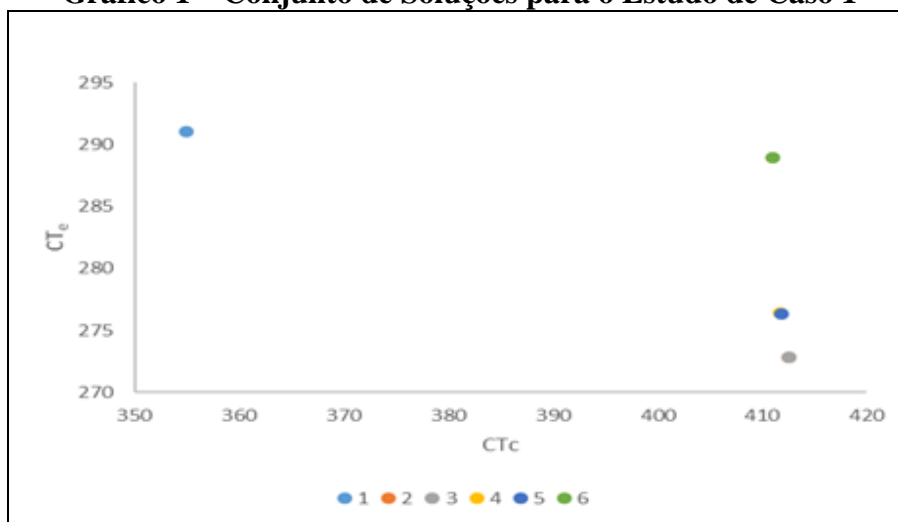
SOLUÇÃO	CT <sub>e</sub> (R\$)	CT <sub>c</sub> (R\$)
1	291,0148734	354,975792
2	272,8561448	412,5623969
3	272,8507388	412,5804728
4	276,3997586	411,6803824
5	276,3314765	411,805271
6	288,9123292	410,9723627

Fonte: Elaboração própria.

A partir desse resultado foi possível obter o Gráfico 1, que demonstra a dispersão destas soluções no espaço CTe x CTc. Não há como definir uma melhor solução entre as 6 apresentadas que seja melhor que todas as outras, assumindo os dois critérios simultaneamente.

No entanto, o tomador de decisões deve optar por uma delas como resolução para o despacho. Nesse ínterim, quando a solução final precisa ser encontrada dentro do conjunto, muitas vezes extenso, de soluções não dominadas, faz-se necessário empregar técnicas de cálculo que garantam a obtenção de soluções verdadeiramente não dominadas. Além disso, é essencial considerar as preferências do tomador de decisões, pois estas podem desempenhar um papel fundamental na avaliação do mérito das soluções (ANTUNES; ALVES, 2012; AUDET *et al.*, 2021). Nesse contexto, a tomada de decisão apoiada pela metodologia AHP desempenha um papel importante, como será discutido a seguir.

**Gráfico 1 – Conjunto de Soluções para o Estudo de Caso 1**



Fonte: Elaboração própria.



Dessa forma, foram consideradas as mesmas premissas da metodologia AHP para obtenção da matriz de julgamentos normalizada descrita na metodologia. Para cada nó de julgamento da hierarquia calculou-se a matriz normalizada para os dois critérios analisados ( $CT_E$ ,  $CT_C$ ) para as 6 soluções alternativas encontradas. Por fim, realizou-se a normalização da matriz, com a divisão pelas colunas e o somatório das médias das linhas, resultando na matriz apresentada a seguir.

$$\begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \begin{pmatrix} \mathbf{0,10673} & \mathbf{0,12558} \\ \mathbf{0,11383} & \mathbf{0,10805} \\ \mathbf{0,11383} & \mathbf{0,10804} \\ \mathbf{0,11237} & \mathbf{0,10828} \\ \mathbf{0,1124} & \mathbf{0,10825} \\ \mathbf{0,1075} & \mathbf{0,10847} \end{pmatrix}$$

Dada a obtenção desses valores, elaborou-se então a Tabela 2, como comparação para todos os critérios em relação às alternativas e em relação ao objetivo principal. Cumprida a fase de coleta dos julgamentos de valor, e conseqüente formação das matrizes de comparação para cada nó de julgamento dos níveis hierárquicos, foi então feita a associação de prioridades às alternativas viáveis com os seguintes valores que hipoteticamente o gestor atribuiria a cada critério considerando sua subjetividade:  $CT_E$ : 0,75 e o  $CT_C$ : 0,25, isto é, dando maior importância para o cálculo ao critério de emergência, como observa-se a seguir, tanto na Tabela 2, bem como no Gráfico 2.

**Tabela 2 – Classificação dos Pesos priorizando o critério  $CT_E$  para o estudo de caso 1**

Classificação dos pesos	Critério $CT_E$ :0,75	Critério $CT_C$ :0,25	Valores	Número da solução
1º	0,10673	0,12558	0,11238	1
2º	0,11383	0,10805	0,1121	2
3º	0,11383	0,10804	0,1121	3
4º	0,1124	0,10825	0,11115	4
5º	0,11237	0,10828	0,11114	5
6º	0,1075	0,10847	0,10779	6

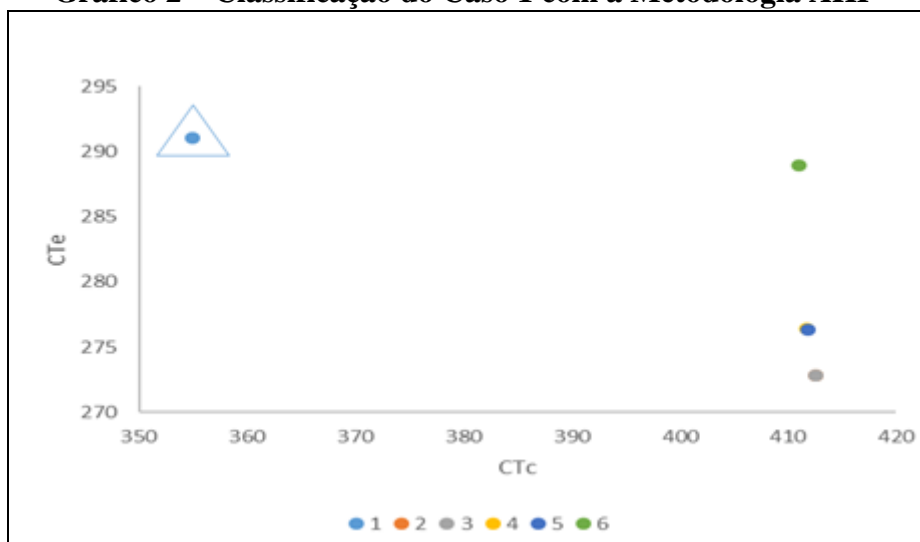
Fonte: Elaboração própria.

A partir dos resultados observados na Tabela 2 e no Gráfico 2, entende-se que a melhor alternativa corresponde à solução 1, pois a partir da aplicação da metodologia AHP ela foi elencada como a de maior peso na classificação, com o valor de 0,11238. Ao analisar os valores apresentados na Tabela 1, percebe-se que uma solução pode se destacar em um critério enquanto apresenta uma desvantagem em outro, evidenciando o conceito de não-dominância na otimização multiobjetivo (AUDET *et al.*, 2021). Isso leva a uma reflexão: embora o caso 3 possua um custo de espera (em



R\$/hora) comercialmente mais elevado, alcançando R\$ 412,5804728, a escolha do caso 1 se torna mais vantajosa quando se considera o tempo de espera para ordens emergenciais, em que o custo de espera é de R\$ 291,0148734.

**Gráfico 2 – Classificação do Caso 1 com a Metodologia AHP**



Fonte: Elaboração própria.

Isso ocorre diante de que se considerou que o gestor em sua decisão atribuiria pesos hipotéticos de  $CT_E:0,75$  e o  $CT_C: 0,25$ , assim, compreende-se a maior relevância do critério de emergência e a solução 1 emergindo como a preferida para ser escolhida pelo analista responsável entre as ordens de despacho. A ordenação das soluções de acordo com esses pesos coloca a solução 1 em primeiro lugar, seguida pelo caso 2 e, por último, o caso 3.

Essa classificação reflete coerentemente o processo decisório prático da metodologia AHP, como exemplificado pela posição da solução 6. Embora a solução 6 seja a segunda maior em custo de espera (R\$/hora) de ordem emergencial e possua o critério de maior peso (0,75), ela fica apenas em sexto lugar. Isso porque o cálculo da AHP envolve uma comparação par a par entre os pesos dos critérios na busca de um equilíbrio para encontrar a melhor solução (ORTIZ-BARRIOS *et al.*, 2021; RAGHAV *et al.*, 2022). Entende-se assim, que ela não é classificada entre as três primeiras, pois as soluções 2 e 3 têm tempos de espera comercial significativamente maiores do que ela, logo elas têm prioridades no despacho. Destaca-se ainda que, como se trata de custos, a prioridade de atendimento é dada às ordens que apresentam os maiores custos de tempo de espera, ou seja, ao atendê-las primeiro, visa-se minimizar os tempos de espera, o que impacta na minimização destes custos para a concessionária.





## Estudo de caso 2

Neste estudo de caso foi contemplada uma instância com os seguintes dados: 18 ordens comerciais; 9 ordens emergenciais; 3 equipes.

Há que se decidir qual será a rota e a posição relativa para cada uma das 9 ordens emergenciais nas 3 rotas existentes, uma para cada equipe disponível.

Novamente foi utilizado o algoritmo multiobjetivo de Garcia *et al.* (2014) para o PRV, a fim de obter um conjunto de soluções não-dominadas que representam o resultado de um processo de otimização baseado no conceito de otimização de Pareto. Foram considerados os pontos de partida, os tempos de deslocamento  $c_{ij}$  e os tempos de serviço  $t_{si}$  para cada cliente.

A Tabela 3 apresenta as soluções não-dominadas encontradas pelo algoritmo adotado, que promove a solução do problema de roteamento de veículos quando consideradas as 3 rotas e as 27 ordens da instância. São apresentados os valores de cada um dos dois critérios considerados para as soluções: o custo do tempo de espera das ordens emergenciais ( $CT_e$ ) e o custo do tempo de espera para as ordens comerciais ( $CT_c$ ).

**Tabela 3 – Custos para os tempos de espera das ordens emergenciais e comerciais de cada solução alternativa para o estudo de caso 1**

Solução	$CT_e$ (R\$)	$CT_c$ (R\$)
1	118,0555146	649,42989
2	133,7629204	633,2183099
3	129,0640375	636,5967231
4	128,1442119	637,2549955
5	127,2275338	638,001387
6	125,6229874	640,1326011
7	126,8941634	638,7695152
8	126,5570099	639,5267523
9	133,4293799	633,9115981
10	129,579072	634,1011507

Fonte: Elaboração própria.

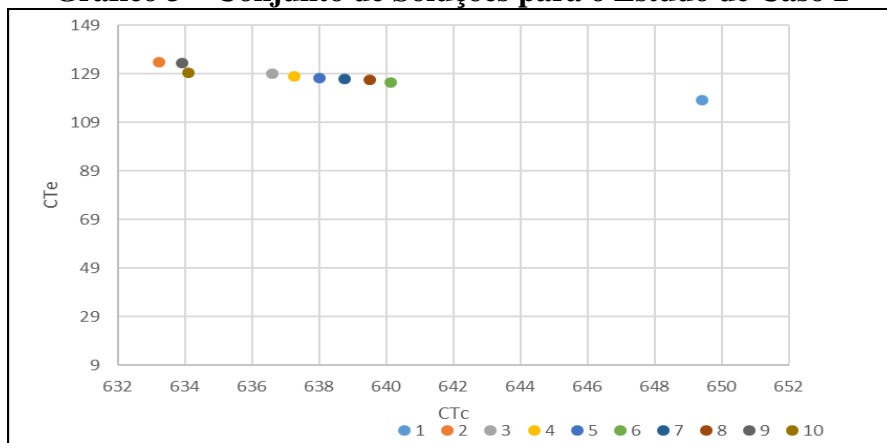
A partir do resultado da Tabela 3 foi possível obter o gráfico de dispersão (Gráfico 3), evidenciando que não há uma dominância de melhor valor de uma solução sobre a outra, dessa forma, não há um resultado final para ser elencado como ideal nestes parâmetros.

Nesse sentido, novamente, ao concluir-se a simulação, é possível constatar que não há como escolher uma solução como a melhor de todas, assumindo os dois critérios simultaneamente: elas são alternativas. Para a resolução dessa tomada de decisão, evidencia-se assim a pertinência da aplicação da metodologia AHP para um contexto de tomada de decisão multicritério, pois em consonância com Feng *et al.* (2024), essa metodologia irá incluir a subjetividade do gestor na quantificação da importância



relativa entre os critérios envolvidos a fim de propiciar uma ponderação única a ser aplicada para todas as alternativas disponíveis, como pode ser visto a seguir.

**Gráfico 3 – Conjunto de Soluções para o Estudo de Caso 2**



Fonte: Elaboração própria.

Assim como no estudo de caso 1, aplicou-se então a metodologia AHP, foram efetuados os cálculos necessários oriundos do modelo matemático apresentado e posteriormente obtida a matriz de julgamentos normalizada. Em seguida, realizou-se para cada nó de julgamento da hierarquia o cálculo da matriz normalizada para os dois critérios analisados ( $CT_E$  ;  $CT_C$ ) agora para os 9 casos gerados pelos resultados do PRV. A matriz normalizada com os valores para cada critério é apresentada a seguir.

	$CT_E$	$CT_C$
1	0,120182	0,109167
2	0,106069	0,111961
3	0,109931	0,111367
4	0,110720	0,111252
5	0,111518	0,111122
6	0,112942	0,110752
7	0,111811	0,110988
8	0,112109	0,110857
9	0,106335	0,111839
9	0,109494	0,111806

A partir da matriz de julgamentos acima foi elaborada a Tabela 4, para a determinação dos pesos com a comparação para todos os critérios em relação às alternativas e referente ao seu objetivo maior.

Nesse sentido, a partir do momento de coleta dos julgamentos de valor, e conseqüente formação das matrizes de comparação para cada nó de julgamento dos níveis hierárquicos, procedeu-se da mesma forma que no estudo de caso 1: associando as prioridades às alternativas viáveis com valores que



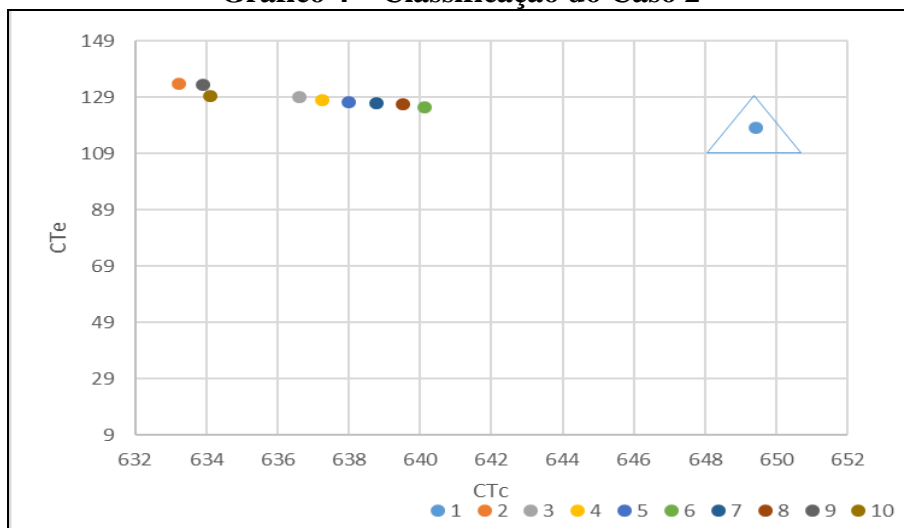
hipoteticamente o gestor atribuiria a cada critério:  $CT_E:0,70$  e o  $CT_C:0,30$ , isto é, dando maior importância para o cálculo ao critério de emergência, como observa-se na tabela abaixo:

**Tabela 4 – Classificação dos Pesos priorizando o critério  $T \cdot E$  para o estudo de caso 2**

Classificação dos pesos	Critério $CT_E:0,70$	Critério $CT_C:0,30$	Valores	Número da solução
1°	0,12018201	0,10916651	0,116877358	1
2°	0,1129423	0,11075205	0,112285221	6
3°	0,11210875	0,11085697	0,111733218	8
4°	0,11181088	0,11098839	0,111564134	7
5°	0,11151791	0,11112201	0,11139914	5
6°	0,11072017	0,11125216	0,110879766	4
7°	0,10993108	0,1113672	0,110361914	3
8°	0,10949414	0,1118055	0,110187546	10
9°	0,10633452	0,11183893	0,107985841	9
10°	0,10606937	0,11196138	0,107836973	2

Fonte: Elaboração própria.

**Gráfico 4 – Classificação do Caso 2**



Fonte: Elaboração própria.

A partir da Tabela 4 e do Gráfico 4, é possível identificar a solução melhor classificada segundo a metodologia AHP. A alternativa 1 (0,116877358) representa a melhor solução, aquela que será empregada como solução do despacho. Percebe-se que dados os altos custos de espera da ordem comercial da solução 1, sendo de R\$ 649,42989, ela foi determinada como prioridade de atendimento, ainda que o custo de espera emergencial dessa solução seja o menor dentre todas as ordens emergenciais



do problema, sendo de R\$ 118,0555146 e que tenham sido estabelecidos os pesos dos critérios:  $CT_E:0,70$  e o  $CT_C:0,30$ .

Da mesma forma, embora o peso da ordem comercial seja de apenas 30% de importância em relação às emergenciais, o custo significativamente mais elevado de postergar essas ordens comerciais para as soluções 6 e 8, as classificaram como 2º e 3º na ordem de prioridades, ainda que não tenham os maiores custos dentre as ordens emergenciais.

Nessa perspectiva, destaca-se a relevância da aplicação da metodologia AHP, pois mesmo que a priorização inicial possa favorecer as ordens emergenciais, os cálculos demonstram que essa nem sempre será a opção mais apropriada. Em certas circunstâncias, a análise ponderada indica que o custo associado ao adiamento do atendimento da ordem comercial supera o de atrasar a ordem emergencial.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos cenários apresentados, nos quais foram simuladas alternativas para a alocação de 6 e 9 emergências, distribuídas entre os clientes de três rotas distintas, torna-se evidente o impacto das ordens de emergência nas operações diárias. Essas demandas não programadas podem significativamente alterar o tempo de deslocamento das equipes e o tempo de atendimento. Conseqüentemente, isso resulta em um aumento nos custos para a concessionária, sendo este último considerado na análise dos dois casos estudados, incluindo o custo associado ao tempo de espera das ordens comerciais e emergenciais. Além disso, é perceptível que o não atendimento de uma ordem emergencial pode acarretar custos substanciais para a concessionária.

É importante enfatizar que quando uma ordem emergencial é incorporada a uma das rotas de atendimento, ela não modifica a sequência original da rota predefinida para as ordens comerciais. Em vez disso, é alocada entre os segmentos que conectam dois pontos (clientes) da rota original. Além disso, ao ser inserida em uma rota específica, conforme ilustrado nos casos discutidos, a outra rota permanece inalterada, mantendo-se a elaboração prévia das rotas comerciais e os custos associados ao tempo de espera.

Diante desse cenário, a concessionária busca decidir pela melhor alternativa, onde seja capaz de satisfazer todas as demandas, mas ao mesmo tempo em que esse atendimento represente o menor custo possível dentro da realidade que está trabalhando. Assim, quanto maior for a capacidade do gestor de contemplar dados da realidade na sua análise para a tomada de decisão, melhores serão as chances de uma decisão mais assertiva, conforme demonstrado nos resultados do presente estudo. Nesse sentido, é possível constatar pelos casos apresentados que minimizar tempo de espera, neste caso se referindo a



custos, é diferente de minimizar tempo de rota, dado que o tempo de espera retrata de forma mais própria o esforço de aumentar a produtividade das equipes envolvidas. Isso ocorre porque tempos maiores de atendimento são propagados para aquelas ordens que restam à frente da rota.

Desse modo, a partir dos resultados apresentados, foi possível vislumbrar um contexto de tomada de decisão que contemple um compromisso entre o impacto causado no atraso das ordens comerciais com a premência de atendimento dos serviços emergenciais, ambos mensurados com os custos de tempo de espera de cada tipo de atendimento. Não obstante, ao analisar especificamente os resultados do algoritmo para o PRV, inicialmente através das Tabelas 1 e 3, correspondentes aos casos 1 e 2, torna-se evidente que não é possível determinar uma solução superior entre elas quando ambos os critérios - tempo de espera para as ordens comerciais e tempo de espera para as ordens emergenciais - são considerados simultaneamente. Uma solução pode se destacar em um critério enquanto apresenta desvantagem em relação ao outro, refletindo assim a não-dominância na otimização multiobjetivo (AUDET *et al.*, 2021).

Diante dessa constatação, tornou-se claro que selecionar uma única alternativa levando em conta ambos os critérios, simultaneamente é impraticável. Isso apontou para a necessidade de uma metodologia mais abrangente do que a simples comparação demonstrada inicialmente nos dois estudos de caso. Assim, a metodologia AHP emergiu como uma solução viável para superar essa dificuldade na tomada de decisão. A abordagem envolveu a definição prévia de ponderações para cada critério considerado, as quais foram posteriormente aplicadas às alternativas de solução (conforme apresentado nas Tabelas 2 e 4).

Nesse contexto, ao aplicar a metodologia AHP, observou-se o quanto ela melhora a qualidade da tomada de decisão, é mais objetiva e cria um cenário que retrata melhor os pesos de cada alternativa para a tomada de decisão, indo ao encontro dos trabalhos citados no referencial (ORTIZ-BARRIOS *et al.*, 2021; RAGHAV *et al.*, 2022; FENG *et al.*, 2024), os quais tratam dessa abordagem de multicritérios.

Por fim, pode-se dizer que é comum que as ordens comerciais sejam deixadas em segundo plano quando surgem emergências, levando as equipes a ajustarem suas rotas para priorizar o atendimento das emergências, mas sem negligenciar as ordens programadas. No entanto, essa nem sempre é a melhor decisão, pois às vezes o custo de postergar o atendimento das ordens comerciais pode ser maior do que o de atrasar as emergenciais. Isso é evidenciado nos exemplos mencionados: no primeiro caso, as soluções 2 e 3 foram classificadas como segunda e terceira prioridades devido ao alto custo de espera das ordens comerciais. Da mesma forma, no segundo estudo de caso, as três primeiras ordens foram escolhidas com base no seu tempo de espera comercial mais elevado, confirmando essa premissa.



Portanto, os resultados deste estudo estão em consonância com as pesquisas de Schmitz *et al.* (2016), Garcia *et al.* (2018), Schmitz *et al.* (2021) e Bahrami *et al.* (2021), que destacaram uma relação direta entre a seleção dos critérios e seus respectivos pesos, e a estratégia adotada pela concessionária. Essa relação permite à empresa tomar decisões específicas, como priorizar a redução do tempo médio de atendimento para aumentar o volume de ordens atendidas. Alternativamente, a empresa pode optar por focar no atendimento de ordens mais críticas, dando preferência às emergenciais, mesmo que isso signifique não otimizar as distâncias percorridas, com o objetivo de seguir uma estratégia menos dispendiosa e, com isso, alcançar um melhor desempenho.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo tratou do problema de atendimento de ordens emergenciais das concessionárias de energia elétrica, considerando características práticas que permitem resguardar a vinculação com situações reais de despacho enfrentadas nessas empresas. Foi possível identificar a relevância do problema quando se observa os paradigmas regulatórios e a premissa cada vez mais representativa quanto à redução de custos de manutenção.

O objetivo maior deste trabalho foi descrever as características mais representativas que mantêm correspondência com cenários reais vivenciados nos centros de operação das concessionárias, incorporando-as na forma de um modelo matemático que permita identificar a natureza do problema e relacionar os modelos correlatos que sugiram abordagens baseadas em soluções computacionais. O problema de roteamento de veículos (PRV) foi o problema de otimização combinatória identificado como correlato ao problema de despacho e a partir dele foi empregada uma metodologia para tomada de decisão que envolve a enumeração de soluções não-dominadas para posterior classificação mediante o processo analítico hierárquico de análise (AHP).

Inicialmente procedeu-se com a análise do processo de atendimento de ordens de serviço das concessionárias, com especial atenção para o processo relacionado com o atendimento de ordens emergenciais. Posteriormente buscou-se no referencial teórico as direções que apoiassem o estudo proposto, momento no qual foi considerado que o tempo de espera representaria o aspecto mais representativo para nortear as decisões relacionadas com o despacho de ordens emergenciais. A seguir foi elaborado o modelo matemático que representa o referido problema de despacho para a seguir detalhar a abordagem baseada na metodologia AHP para tomada de decisão. Finalmente foram elaborados dois estudos de caso para verificar o desempenho da abordagem proposta nestes casos reais obtidos de uma concessionária de energia elétrica.



Nessa linha, ficou bem destacada a conveniência em considerar um processo de tomada de decisão com o apoio da metodologia AHP. A inclusão dos aspectos subjetivos para classificar soluções não-dominadas representa uma abordagem simples e eficaz para representar as imprecisões e as comparações entre as soluções alternativas encontradas.

Ademais, foi possível constatar que as ordens de serviço emergenciais promovem uma perturbação significativa nas rotas construídas a priori para as equipes, requisitando um compromisso bastante crítico entre menor tempo de espera e menor perturbação das rotas existentes. É preciso salientar ainda que minimizar o tempo de espera promove resultados consideravelmente diferentes daqueles obtidos quando se quer minimizar o tempo total das rotas, justamente pela forma cumulativa com que os tempos de serviço são considerados.

Por fim, ao se observar os resultados obtidos a partir da enumeração das soluções alternativas proporcionadas pelo algoritmo de Garcia *et al.* (2014), verifica-se que a abordagem é bastante promissora para contextos práticos, permitindo possibilidades de análises ao decisor de modo a ponderar as suas escolhas subjetivas definidas a priori. Como sugestões para trabalhos futuros, vislumbra-se que sejam elaborados estudos com maior número de critérios na função objetivo e elaboração de um maior número de estudos de caso com instâncias reais.

## REFERÊNCIAS

AHLQVIST, V. *et al.* “A survey comparing centralized and decentralized electricity markets”. **Energy Strategy Reviews**, vol. 40, n. 100812, 2022.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília: ANEEL, 2019. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 23/01/2024.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Aplicações: tempos médios de atendimento**. Brasília: ANEEL, 2015. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 23/01/2024.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Limites dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI**. Brasília: ANEEL, 2020. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 23/01/2024.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos da Distribuição**. Brasília: ANEEL, 2008. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 23/01/2024.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa n. 414, 09 de setembro de 2010**. Brasília: ANEEL, 2010. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 23/01/2024.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tempo de Atendimento às Ocorrências Emergenciais**. Brasília: ANEEL, 2019. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 23/01/2024.



ANTUNES, C.; ALVES, M. “Programação linear multiobjetivo-métodos interativos e software”. **Anais do XVI Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa**. Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2012.

AUBERT, H. *et al.* “Can online interfaces enhance learning for public decision-making? Eliciting citizens’ preferences for multicriteria decision analysis”. **European Journal of Operational Research**, vol. 314, n. 2, 2024.

AUDET, C. *et al.* “Performance indicators in multiobjective optimization”. **European Journal of Operational Research**, vol. 292, n. 2, 2021.

AUGUSTYN, A. *et al.* “A review of methods applied for wind power generation forecasting”. **Polityka Energetyczna Energy Policy**, vol. 21, n. 2, 2018.

BAHRAMI, M. *et al.* “Multi-step island formation and repair dispatch reinforced by mutual assistance after natural disasters.” **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, vol. 126, 2021.

BRASIL. **Lei n. 8.987, de 13 de fevereiro de 1995**. Brasília: Planalto, 1995. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 23/01/2024.

CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz. **Mercado de energia elétrica: tudo o que você precisa saber**. São Paulo: CPFL, 2022. Disponível em: <www.cpfisolucoes.com.br>. Acesso em: 12/12/2023.

DI PIETRO, M. S. Z. **Direito Administrativo**. São Paulo: Editora Atlas, 2022.

DURBACH, I. *et al.* “The analytic hierarchy process with stochastic judgements”. **European Journal of Operational Research**, vol. 238, n.2, 2014.

EKSIOGLU, B. *et al.* “The vehicle routing problem: a taxonomia review”. **Computers e Industrial Engineering**, vol. 57, n. 4, 2009.

FENG, Z. *et al.* “Understanding university students’ perceptions of classroom environment: A synergistic approach integrating grounded theory (GT) and analytic hierarchy process (AHP)”, **Journal of Building Engineering**, vol. 83, n. 108446, 2024.

FERNSTROM, F.; STEINER, T. A. “A constant approximation algorithm for the uniform a priori capacitated vehicle routing problem with unit demands.” **Information Processing Letters**, vol. 159, n.105960, 2020.

FISHER, M. L.; JAIKUMAR, R. “A generalized assignment heuristic for vehicle routing”. **Networks**, vol. 11, n. 2, 1981.

FORTES, B. J. **Análise e modelagem do atendimento de ordens de serviço emergenciais em concessionárias de energia elétrica** (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção). Santa Maria: UFSM, 2015.

GARCIA, V. J. *et al.* “A computational intelligence approach to improve the efficiency of repair services in the smart grid context”. **Computers and Electrical Engineering**, vol. 70, n. 1, 2018.





GARCIA, V. J. *et al.* “Multi-Criteria Approach For Emergency Service Orders In Electric Utilities”. **Anais do XXVIII European Conference on Modelling and Simulation -Electric Utilities**. Brescia: UNIBS, 2014.

KOVAL, V. *et al.* “Fundamental Shifts in the EU’s Electric Power Sector Development: LMDI Decomposition Analysis”. **Energies**, vol. 16, n. 14, 2023.

KRAMER, R. H. F. R. *et al.* “Problema de roteamento de veículos assimétrico com frota heterogênea limitada: um estudo de caso em uma indústria de bebidas”. **Gestão e Produção**, vol. 23, n. 1, 2016.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. Barueri: Editora LTC, 2016.

LAGO, J. *et al.* “Forecasting day-ahead electricity prices: A review of state-of-the-art algorithms, best practices and an open-access benchmark”. **Applied Energy**, vol. 293, n. 116983, 2021.

LEI, S. *et al.* “Resilient Disaster Recovery Logistics of Distribution Systems: Co-Optimize Service Restoration with Repair Crew and Mobile Power Source Dispatch”. **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 10, n. 6, 2019.

LOOTSMA, F. A. “The French and American School in Multi-Criteria Decision Analysis”. **Operations Research**, vol. 24, n. 3, 1990.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Editora Atlas, 2010

ÑAHUIS, F. V. C. **Automação do despacho dinâmico de viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de distribuição de energia elétrica** (Dissertação de Mestrado em Engenharia). Ilha Solteira: UNESP, 2013.

NEOFYTOU, H. *et al.* “Sustainable energy transition readiness: A multicriteria assessment index.” **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 131, n. 109988, 2020.

ORTIZ-BARRIOS, M. *et al.* “A multiple criteria decision-making approach for increasing the preparedness level of sales departments against COVID-19 and future pandemics: A ambreal-world case”. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, vol. 62, n. 102411, 2021.

PARETO, V. **Cours d'Economie Politique**. Lausanne: Editora Rouge, 1896.

RADUAN, A. C. **Roteirização parcialmente dinâmica aplicada a serviços de campo** (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos). São Paulo: USP, 2009.

RAGHAV, P. L. *et al.* “Analytic Hierarchy Process (AHP) – Swarm intelligence based flexible demand response management of grid-connected microgrid”. **Applied Energy**, vol. 306, 2022.

REIS, T. N. F. *et al.* “Uma Proposta de Classificação para Rotular a Eficiência Energética na Computação em Nuvem Verde”. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 17, n. 49, 2024.

ROLDÁN-BLAY, C. *et al.* “Optimal Generation Scheduling with Dynamic Profiles for the Sustainable Development of Electricity Grids”. **Sustainability**, vol. 11, n. 24, 2019.

SAATY, T. L. **Decision Making for Leaders**. Pittsburg: RWS Publications, 1991.



SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. B. **Metodologia de pesquisa**. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 2006.

SCHARDONG, B. F. *et al.* “O problema de roteamento de veículos: um estudo de caso para o atendimento de serviços em concessionárias de distribuição de energia elétrica”. **Revista Gestão e Tecnologia**, vol. 22, n. 2, 2022.

SCHARDONG, B. F.; GARCIA, V. J. **Análise e modelagem do atendimento de ordens de serviço emergenciais em concessionárias de energia elétrica**. São Paulo: Editora Dialética, 2023.

SCHMITZ, M. *et al.* “Análise Multicritério no Atendimento de Ordens Emergenciais em Redes de Distribuição de Energia Elétrica”. **Anais do X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**. Gramado: CBPE, 2016.

SCHMITZ, M. *et al.* “Price-Based Dynamic Optimal Power Flow With Emergency Repair.” **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 12, n. 1, 2021.

SCIP - Solving Constraint Integer Programs. “About SCIP”. **SCIP** [2023]. Disponível em: <www.scipopt.org>. Acesso em: 10/01/2024.

SEVILLA, J. C. “Do Neoliberalismo na América Latina ao Kirchnerismo: Novos Ventos Continentais?”. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 13, n. 39, 2023.

SILVA, B. P. *et al.* “Recuperação de Energia como Alternativa Sustentável”. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 14, n. 41, 2023.

TICONA, W. G. C. **Aplicação de algoritmos genéticos multi-objetivo para alinhamento de sequências biológicas** (Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação e Matemática Computacional). São Carlos: USP, 2003.

VENANZI, O. S. D. **Introdução à engenharia de produção: conceitos e casos práticos**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2016.

VIDAL, T. *et al.* “Heuristics for Multi-attribute vehicle routing problems: a survey and synthesis”. **European Journal of Operational Research**, vol. 231, n. 1, 2013.

VOLPI, N. M. P. *et al.* “Logística de atendimento aos usuários de energia elétrica via simulação”. **Anais do XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Rio de Janeiro: ENEGEP, 2008.

WEINTRAUB, A. *et al.* “An emergency vehicle dispatching system for an electric utility in Chile”. **Journal of the Operational Research Society**, vol. 50, n. 7, 1999.

XU, P. *et al.* “Energy Saving-Oriented Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows in Disaster Relief.” **Energies**, vol. 16, n. 4, 2023.

YANG, Z. *et al.* “Seismic-Resilient Electric Power Distribution Systems: Harnessing the Mobility of Power Sources”. **IEEE Transactions On Industry Applications**, vol. 56, n. 3, 2020.



ZHU, H. *et al.* “Robust post-disaster repair crew dispatch for distribution systems considering the uncertainty of switches”. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, vol.155, 2024.

ZIMPL - Zuse Institut Mathematical Programming Language. “About ZIMPL”. **ZIMPL** [2023]. Disponível em: <[www.zimpl.zib.de](http://www.zimpl.zib.de)>. Acesso em: 05/01/2024.



## **BOLETIM DE CONJUNTURA (BOCA)**

Ano VI | Volume 18 | Nº 52 | Boa Vista | 2024

<http://www.ioles.com.br/boca>

### **Editor chefe:**

Elói Martins Senhoras

### **Conselho Editorial**

Antonio Ozai da Silva, Universidade Estadual de Maringá

Vitor Stuart Gabriel de Pieri, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Charles Pennaforte, Universidade Federal de Pelotas

Elói Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima

Julio Burdman, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Patrícia Nasser de Carvalho, Universidade Federal de Minas Gerais

### **Conselho Científico**

Claudete de Castro Silva Vitte, Universidade Estadual de Campinas

Fabiano de Araújo Moreira, Universidade de São Paulo

Flávia Carolina de Resende Fagundes, Universidade Feevale

Hudson do Vale de Oliveira, Instituto Federal de Roraima

Laodicéia Amorim Weersma, Universidade de Fortaleza

Marcos Antônio Fávaro Martins, Universidade Paulista

Marcos Leandro Mondardo, Universidade Federal da Grande Dourados

Reinaldo Miranda de Sá Teles, Universidade de São Paulo

Rozane Pereira Ignácio, Universidade Estadual de Roraima