


MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA DESPACHAR VEÍCULOS DE EMERGÊNCIA COM NÍVEIS DE PRIORIDADE PARA RESPONDER ÀS FALHAS DE ENERGIA ELÉTRICA

HEURISTIC METHODS TO DISPATCH EMERGENCY VEHICLES WITH PRIORITY LEVELS TO RESPOND TO THE ELECTRICAL POWER FAILURES

Gabriel Rafalski Breda*  E-mail: gabrielrafalski10@gmail.com

Mário Mestria*  E-mail: mmestria@uol.com.br

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

Resumo: A energia elétrica é um bem essencial para a população, devido a isso, há uma grande exigência por parte da sociedade em manter o seu fornecimento em tempo integral. Além disso, é interessante para as concessionárias de distribuição de energia elétrica evitar possíveis falhas, ao passo que essas interrupções causam penalização como custos de reparo, insatisfação do cliente e energia não faturada. Portanto, este trabalho apresenta estratégias para despachar veículos de emergência para os consumidores com falta de energia elétrica estabelecendo rotas. As rotas estabelecidas irão considerar níveis de prioridade e demandas estocásticas que podem ocorrer durante o atendimento nos atuais desligamentos. O objetivo nesse estudo é melhorar a eficiência energética no sentido de diminuir o tempo nas falhas de energia elétrica, de forma a promover o uso racional. Para isso, o trabalho propõe um modelo matemático, atrelado ao uso de algoritmos heurísticos construtivos e busca local. Os resultados obtidos foram promissores nos quesitos de tempo de processamento e qualidade.

Palavras-chave: Otimização. Despacho de veículo de emergência. Níveis de prioridade. Falhas de energia elétrica. Demandas estocásticas.

Abstract: Electric Energy is an essential supply for the population, due to this, there is a big demand on the society to maintain its full-time supply. In addition, it is interesting for electricity distribution concessionaires to avoid possible failures, while these interruptions cause penalties such as repair costs, customer dissatisfaction and unbilled energy. Therefore, this work presents strategies to dispatch emergency vehicles to the costumers with lack of electricity, establishing routes. The determined routes will consider priority levels and stochastic demands that may occur during service in the current shutdowns. The objective of this study is to improve energy efficiency in order to decrease the time in the electrical power failures, in a way to promote the rational use. For this, the work proposes a mathematical model, linked to the use of constructive heuristic algorithms and local search. The results obtained were promising in terms of processing time and quality.

Keywords: Optimization. Emergency vehicle dispatch. Priority levels. Electrical power failures. Stochastic demands.

1 INTRODUÇÃO

Conforme EPE (2020) há uma previsão de crescimento entre 2015 até 2050 de cerca 3,3 vezes no consumo de energia elétrica. Portanto, os ambientes comerciais, industriais, residenciais, educacionais e de setores de serviços necessitam cada vez mais do uso ininterrupto da energia elétrica. Isso se torna um desafio ao passo que mudanças no clima têm ocorrido ultimamente e eventos como ventos fortes, chuva intensa e queda de granizo podem prejudicar o fornecimento de energia elétrica.

Equipamentos sem manutenção na rede elétrica, equipamentos ineficientes, materiais e dispositivos ultrapassados, transformadores obsoletos, dentre outros fatores, estão ocorrendo na malha elétrica brasileira.

Falhas na rede elétrica decorrente de mudanças climáticas, equipamentos sem manutenção ou ineficientes, materiais e dispositivos ultrapassados precisam ser rapidamente solucionadas a fim de minimizar o impacto financeiro, tanto para as empresas de energia, assim como para os consumidores.

Aliando ambas as questões anteriores abordadas, podemos verificar que isto implica no impacto da interrupção da energia elétrica, seja isto acontecendo numa determinada região, seja de forma nacional abrangendo todo o país.

Companhias elétricas têm métodos para auxiliar nas tomadas de decisões relacionadas à designação e roteamento de veículos e equipes que atendam regiões com interrupções de energia. Muitas destas soluções incorporam a experiência dos profissionais das companhias e às vezes decisões são realizadas de forma manual.

Um sistema computadorizado baseado em um algoritmo heurístico é proposto para roteamento de veículo com demanda aleatória nos quais representam os desligamentos ocorridos em eletricidade que requerem uma equipe de reparos (WEINTRAUB *et al.*, 1999).

O conhecimento da probabilidade de desligamentos no sistema elétrico é necessário para tomada de decisão. Um modelo de previsão das demandas dos desligamentos é necessário e utilizará abordagens estatísticas documentadas anteriormente ao longo de um horizonte de manutenção da malha de energia elétrica.

Uma estratégia para solucionar o problema de despacho de veículos de emergência para atendimento aos clientes com falta de energia elétrica, pode ser determinada incorporando agrupamento das chamadas de desligamento em regiões disjuntas e modelando-a através do Problema do Caixeiro Viajante com Grupamento (MESTRIA; OCHI; MARTINS, 2012). Além disso, incorporar a estratégia de prever futuras demandas estocásticas na modelagem, para resolver o problema de desligamentos, pode ser introduzido (MENDOZA; VILLEGAS, 2013).

A Agência Nacional de Energia Elétrica no Brasil (ANEEL, 2012) prevê multa para a concessionária de energia pelo tempo de interrupção da energia elétrica que sofre os consumidores na região de sua responsabilidade. Assim, empresas de fornecimento de energia elétrica têm interesse em manter seus clientes 24 horas por dia, sete dias por semana, com fornecimento ininterrupto de energia elétrica.

Os clientes por sua vez recorrem aos órgãos de defesas do consumidor quando seus equipamentos sofrem defeitos decorrentes desta interrupção de energia. Desta forma, impactos nos custos decorrentes da interrupção de fornecimento de energia elétrica são imputados à concessionária de energia. De maneira que tais custos podem ser convertidos em tarifações, impactando os consumidores, que são os clientes da concessionária.

Não somente a parte legal está sendo discutida neste trabalho, mas também o incentivo à pesquisa, desenvolvimento de tecnologias, aprimoramento do sistema elétrico, desenvolvimento de técnicas de otimização (GOLDBARG; LUNA, 2005) e de algoritmos heurísticos (MESTRIA, 2011).

O foco deste trabalho também apresenta formas que visam diminuir custos nos deslocamentos das equipes e veículos para atendimento aos consumidores, decorrentes da interrupção de energia elétrica e minimizar os impactos que atingem a eficiência energética (LAMBERTS, 1996).

Desta forma ressaltamos que esse trabalho irá apresentar uma pesquisa com os seguintes propósitos: incentivar o desenvolvimento de algoritmos voltados para o roteamento de veículos na região de interrupção de energia elétrica; estimular o desenvolvimento tecnológico em todas as áreas do conhecimento relacionadas com métodos de otimização aplicados ao despacho de veículo de emergência, para

atender aos consumidores que possam ter problemas no fornecimento de energia elétrica.

O objetivo desse trabalho é apresentar um modelo de otimização com níveis de prioridade para o despacho de veículos de emergência com a finalidade de atender consumidores com interrupção de energia elétrica. A partir do modelo, pode-se utilizar as técnicas de otimização heurísticas para calcular rotas dos veículos de emergência que possam atender consumidores de maior prioridade.

Nesse sentido foram propostas duas heurísticas como estratégias para solucionar o despacho de veículos de emergência com níveis de prioridade para atender falhas de energia elétrica de consumidores. Algoritmos heurísticos são métodos inspirados nos processos intuitivos que encontram soluções de qualidade boa com custos computacionais relativamente baixos, quiçá encontrar soluções ótimas (SOUZA *et al.*, 2022).

O trabalho propõe ainda, introduzir conceitos multidisciplinares tal como despacho de veículos, equipes de emergência, suprimento de energia elétrica, otimização, algoritmos heurísticos, inteligência computacional e eficiência energética (MORISHITA, *et al.*, 2013).

Ressaltamos que este artigo é uma extensão do trabalho de Campaneli e Mestria (2015), que apresentaram um modelo de otimização aplicada ao despacho de veículos de emergência para atendimento aos clientes com interrupção de energia elétrica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a pesquisa na otimização de despacho de veículos de emergência para atendimento aos clientes com interrupção de energia elétrica, foi realizado um levantamento da bibliografia referente ao assunto em bases bibliográficas como *Web of Science*, *Xplore IEEE* e *Scopus*. Nesta fase, uma abordagem sobre os conceitos de teoria de grafos, otimização, rotas de veículos, algoritmos aplicados à otimização e heurísticas foram introduzidos. Numa segunda fase, procurou-se por modelos matemáticos de otimização para encontrar as melhores rotas em despachar as equipes e os veículos de emergência.

Na terceira fase foi realizado o levantamento das regiões (unidades e setores) por onde poderá realizar rotas dos veículos e mapear esses pontos estabelecendo as prioridades, as regiões em questão estão apresentadas no Quadro 1, com os respectivos níveis de prioridade. Na quarta fase foram pensadas as possíveis mudanças a serem introduzidas nos pontos das regiões, num processo estocásticos, buscando minimizar tempos de deslocamento.

2.1 Modelo Matemático de Otimização

Para elaboração do algoritmo de otimização, a região em que uma determinada concessionária de energia elétrica atende é subdivida em regiões com vértices, onde cada vértice representa uma unidade ou setor onde possivelmente ocorrerá uma falha de energia.

Esses locais são classificados em diferentes níveis de prioridade enumerados de um a cinco, escala Likert, sendo o nível um o mais relevante. Um hospital, por exemplo, tem nível de prioridade um. Já uma residência comum possui nível de prioridade mínima, que é cinco. O Quadro 1 mostra as regiões com seus respectivos níveis de prioridade, de acordo ao trabalho de Campaneli e Mestria (2015).

Quadro 1 – Separação dos níveis de prioridade para abastecimento de energia elétrica.

Nível= n_i	Unidades e setores levados em consideração
1	Hospitais e assistências médicas; Armazenamento, uso e controle de substâncias radioativas, equipamentos e materiais nucleares; Produção e distribuição de energia elétrica, gás e combustíveis; Centros de controle público de tráfego aéreo, marítimo e urbano.
2	Tratamento e abastecimento de água; Unidades operacionais de segurança pública, tais como, polícia militar, polícia civil e corpo de bombeiros; Instalações que atendam a sistema rodoferroviário e metroviário; Unidade operacional de serviço público de telecomunicações.
3	Semáforos, radares e câmeras de monitoramento de trânsito; Rodovias (Iluminação); Captação e tratamento de esgoto e de lixo; Unidade operacional de transporte coletivo; Redes de ensino (escolas e universidades); Indústrias.
4	Entidades filantrópicas como templos religiosos, associações, centros de reabilitação, orfanatos, dentre outros; Bancos; Setores Comerciais (lojas, restaurantes, <i>shopping centers</i> , dentre outros); Condomínios (conjuntos de edificações).
5	Casas; Edifícios não comerciais.

Fonte: Autores (2023).

Havendo as coordenadas geográficas desses vértices, calcula-se o tempo requerido para o deslocamento do veículo até o local. Designa-se então a função objetivo do sistema, conforme Weintraub *et al.* (1999), como sendo:

$$\text{Min} (\alpha \sum_{i \in I} P_i \cdot T_i + \beta \sum_{\tau} \sum_{j \in J} F_j \cdot K_{j\tau}) \quad (1)$$

Onde α e β são parâmetros calculados levando em consideração o peso (ou custo) do serviço de colapsos de energia já ocorridos (α) e do serviço de falhas de energia elétrica que ainda poderão ocorrer (β), aplicando-se a probabilidade. A notação restante é definida a seguir:

I = conjunto de falhas de energia elétrica conhecidas, sendo cada falha identificada como i ;

J = conjunto representando as zonas, onde cada uma possui vários vértices, sendo cada elemento identificado como j , que poderá ter uma falha de energia;

P_i = peso do fator prioritário para o vértice i ;

T_i = tempo de serviço, que inclui o tempo que leva para um veículo chegar ao vértice i , sendo que o vértice é um cliente com falha de energia;

F_j = demanda esperada para zona j ;

K_{jt} = fator de multa, que depende da distância do veículo a ser percorrido na zona j no tempo t .

O conjunto I de falhas de energia elétrica já ocorrida será denominado de classe I e o conjunto de falhas que poderão ocorrer de classe J .

Na função objetivo, equação (1), as variáveis independentes são P_i , T_i , F_j e K_{jt} por não sofrerem ação de outras variáveis no sistema e serem dados de entrada para o problema. A variável dependente é o resultado da minimização dada pela equação (1), ou seja, a rota construída.

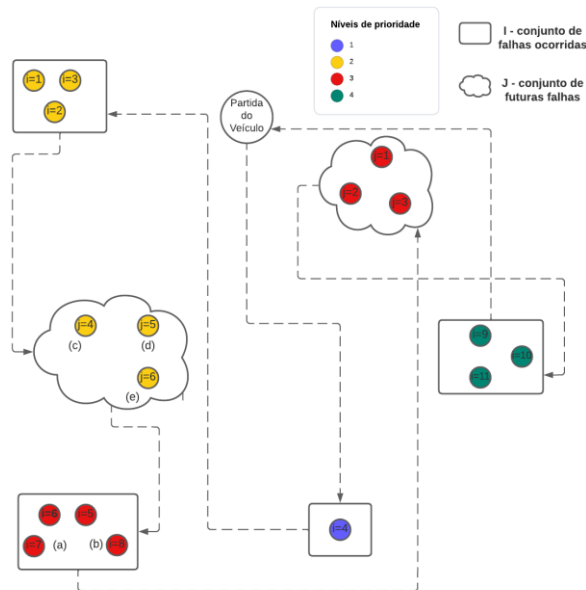
Alguns destes parâmetros são descobertos de forma empírica, outros são obtidos utilizando a proposta de (WEINTRAUB *et al.*, 1999). O propósito é minimizar a função objetivo, dada pela equação (1), utilizando um *solver* como *software* MATLAB (MATLAB, 2022) ou propostas heurísticas. E ainda necessita definir a rota

de menor custo, conforme Powel (1988), que o veículo de emergência deverá percorrer.

Além disso, vale ressaltar que as falhas previstas decorrem de um histórico registrado das ocorrências desses distúrbios no passado. Assim, dado que eventos climáticos, físicos e elétricos ocorrem de forma periódica, esses podem acarretar em falhas futuras e previstas nos sistemas elétricos. Desta forma, as falhas previstas têm caráter de demanda estocástica, pois é um processo aleatório, que acontece a partir de probabilidades de ocorrer essas falhas. Desta forma, o modelo matemático, além de considerar as certezas de falhas ocorridas num processo determinístico, também é incorporado uma parte estocástica.

A Figura 1 mostra um grafo com várias zonas contendo clientes numa concepção de quatro níveis de prioridades para atendimento de falhas de energia elétrica. Nessa mesma figura, há 6 grupos para atendimento, sendo 4 deles com falhas já ocorridas, (classe I) e 2 deles com futuras falhas que poderão ocorrer de acordo a demanda esperada (classe J). O cálculo de T_i que é proporcional à distância é realizado considerando os custos das arestas. Os vértices representam um ponto de falha que já ocorreu ou uma possível falha futura, irá depender de qual conjunto a falha faz parte, conforme legenda apresentada na Figura 1. Ainda, as arestas representam o caminho de atendimento que o veículo irá percorrer, começando pela zona I com prioridade 1, seguido para a zona I com prioridade 2, zona J com prioridade 2, e assim sucessivamente. Esse caminho representa a distância percorrida pelo veículo que irá atender as falhas. Nesse exemplo, foi considerado que a zona I com prioridade 1 não contém possíveis falhas futuras, portanto, o veículo se desloca para as regiões de prioridade 2 e assim sucessivamente. Portanto, o caminho sempre é construído respeitando o nível de prioridade.

Figura 1 – Um cenário com demandas para atendimento de clientes com falhas de energia elétrica



Fonte: Autores (2023).

Vale ressaltar que, os elementos dentro do mesmo grupo possuem a mesma prioridade, mas não estão necessariamente próximos geograficamente. Todavia, o algoritmo sempre irá finalizar os atendimentos de um mesmo grupo antes de se deslocar para o próximo. Por exemplo, para o cliente $i=8$, o custo de $T_8=c(a, b)$ é realizado como o custo (c) de transitar o veículo do cliente $i=7$ até chegar no cliente $i=8$, sendo o custo a distância entre as arestas (a) e (b). Para a zona $j=2$ com nível de prioridade n_2 , temos $K_{2t}=dist(c, e)$ que é distância ($dist$) do veículo a ser percorrido na zona 2 no tempo t , que representa a somatória das distâncias entre as arestas (c, d) mais (d, e).

Repare que na Figura 1, o veículo deverá percorrer primeiro os níveis de maior prioridade, para depois percorrer os de menor prioridade. Isso também vale mesmo se os pontos de atuação de maior prioridade estejam mais distantes do que do ponto de partida em relação ao de menor prioridade, conforme apresenta a linha tracejada. A rota definida para a equipe de trabalho que sai da concessionária já considera as futuras demandas estocásticas que poderão ocorrer como mostra a Figura 1.

Caso haja o surgimento de uma nova falha de energia de um cliente (um novo vértice) durante o percurso do veículo, esse vértice será adicionado na rota, através do algoritmo de otimização de roteamento de veículos, e a função objetivo é novamente aplicada e minimizada, para determinar qual o próximo trajeto. Assim como, caso as falhas previstas no modelo estocástico não ocorram no momento do atendimento, será criado um novo roteamento otimizado, desconsiderando essa falha futura.

Para tanto, é utilizado uma comunicação via rádio comunicador. Cada equipe somente irá saber os próximos atendimentos novos, caso surja uma demanda de novos atendimentos com falhas de energia elétrica, durante a manutenção das falhas em andamento.

2.2 Proposta de Solução para o Modelo Matemático com Níveis de Prioridade

Para aprimorar a eficiência no atendimento das falhas de energia elétrica, um sistema computadorizado baseado em um algoritmo de otimização é proposto para elaborar estratégias de despacho de veículos de emergência, reduzindo o tempo de deslocamento dos mesmos.

Como mencionado antes poderá ser resolvido o despacho de veículos de emergência por um *solver* desde que o número de vértices seja de porte pequeno e ainda com níveis de prioridades baixas. Para situações críticas com níveis de prioridades altas ou grande número de vértices, na ordem de centenas de clientes a serem atendidos, deverão ser usadas heurísticas.

Como proposta, será utilizado um algoritmo heurístico que constrói uma solução inicial utilizando a Heurística da Inserção mais Próxima e depois sobre essa solução inicial é realizada uma busca local através do método VND (*Variable Neighborhood Descent*) (DUARTE; SÁNCHEZ-ORO; MLADENVIĆ; TODOSIJEVIĆ, 2018). Essas estratégias podem ser determinadas incorporando agrupamento das chamadas de desligamento em regiões disjuntas e modelando-as através do Problema do Caixeiro Viajante com Grupamento (MESTRIA; OCHI; MARTINS, 2013). As regiões ora agrupadas por prioridade são necessárias para atender os diferentes níveis de prioridade e não necessariamente estas regiões são

próximas umas das outras. Além disso, o método de prever futuras demandas estocásticas na modelagem, utilizando abordagens estatísticas documentadas anteriormente, pode ser introduzido (MENDOZA; VILLEGAS, 2013). Desta forma, os resultados da proposta serão: mapeamento dos pontos das regiões contendo as coordenadas e os custos de deslocamentos entre os pontos visitados; e as rotas dos veículos junto às equipes para realizar os reparos nas regiões afetadas pela falta de energia elétrica.

3 COMPARAÇÕES ENTRE AS ESTRATÉGIAS PARA DESPACHO DE VEÍCULOS DE EMERGÊNCIA

A seguir são mostradas as estratégias descritas pela literatura, mas não exaustiva, para despacho de veículos de emergência. No Quadro 2, a primeira coluna mostra o título do trabalho, na segunda os autores e ano de publicação, na terceira coluna o tipo de problema tratado pelos autores e na quarta se o modelo contém elementos estocásticos a serem considerados e avaliados tais como: demandas, variáveis, função objetivo, históricos, dentre outros. Nas duas últimas colunas são mostradas se o modelo utilizou níveis de prioridades para atender os chamados de emergências e a metodologia escolhida para solucionar o modelo, respectivamente.

Dentre os 14 trabalhos apresentados, apenas 4 utilizaram elementos estocásticos e 6 deles utilizaram níveis de prioridade. Além disso, houveram pesquisas que fizeram o estudo do despacho de veículos de emergência e não utilizaram nenhum dos dois parâmetros. Por fim, nenhum trabalho utilizou de forma concomitante as variáveis de níveis de prioridade e elementos estocásticos na construção de rotas de veículo de emergência prevendo futuras falhas. Vale ressaltar que este trabalho utiliza ambas as variáveis para construir uma rota otimizada, de forma a se tornar inovador e contribuir para o desenvolvimento do conhecimento científico no assunto.

Quadro 2 – Estratégias para despacho de veículos de emergência

(continua)

Título do Trabalho	Autores (ano)	Tipo de Problema	Elementos estocásticos	Níveis de Prioridade	Metodologia adotada para solução
Simulation Model for Real-Time Emergency Vehicle Dispatching and Routing.	HAGHANI, A.; TIAN, Q.; HU, H. (2004)	Sistema de resposta de veículo de serviço médico de emergência em tempo real.	não	sim	Para a estratégia de atribuição flexível, o CPLEX foi usado para otimizar a atribuição em cada ponto de tempo de simulação.
Online-Optimization of Large-Scale Vehicle Dispatching Problems	SALIBA, S.; KRUMKE, S. O.; WESTPHAL, S. (2006)	Problema real de roteamento de veículos em grande escala para ajudar as pessoas cujos carros quebraram.	não	não	Geração de coluna usada para resolver o problema off-line.
Problema de roteamento de veículos para atendimento de ordens emergenciais em concessionária de distribuição de energia elétrica	GARCIA, V. J. <i>et al.</i> (2012)	Problema de roteamento de veículos para atendimentos de clientes comerciais e emergenciais em concessionária de distribuição de energia elétrica.	não	sim	Usou um solver comercial CPLEX 12.1 aplicado ao modelo.
A Novel Emergency Vehicle Dispatching System	CHEN, C. -Y.; CHEN, P. -Y. ; CHEN, W. -T. (2013)	Resolvem problemas de acidentes ou desastres, tendo o tempo de resposta a emergências como crucial.	sim	não	Estratégia utilizada consiste na atribuição de recursos de emergência, planejamento de caminho e planejamento de caminho reverso para os veículos de emergências.

Fonte: Autores (2023).

Quadro 2 – Estratégias para despacho de veículos de emergência

(continua)

Título do Trabalho	Autores (ano)	Tipo de Problema	Elementos estocásticos	Níveis de Prioridade	Metodologia adotada para solução
Modelo de apoio à decisão para um problema de posicionamento de bases, alocação e realocação de ambulâncias em centros urbanos: estudo de caso no município de São Paulo	ANDRADE, L. A.; CUNHA, C. B. (2014)	Localização de bases de atendimento emergencial, alocação de ambulâncias a essas bases em múltiplos períodos de tempo.	sim	não	Utilizou metaheurística de Colônia Artificial de Abelhas aplicada ao problema.
Emergency Vehicle Dispatching and Redistribution in Highway Network Based on Bilevel Programming	DUAN, X.; SONG, S.; ZHAO, J. (2015)	Veículos de emergência a serem despachados para atender as demandas num menor tempo de resgate ao acidente.	não	sim	Um algoritmo de salto de sapo embaralhado foi proposto para resolver o modelo de programação de dois níveis.
A Dynamic Programming Approach for Emergency Vehicle Dispatching Problems	CHOI, J. Y.; KIM, H.-K. (2016)	Trata dos problemas de despacho de veículos de emergência enfrentados na sequência de grandes desastres naturais.	sim	não	Usou uma abordagem de programação dinâmica no problema.
Emergency Vehicle Dispatching for Railway Dangerous Goods Accidents Based on the Cooperative Game Theory	JIA, X.; HE, R. (2016)	Despacho de forma eficaz em caso de acidente ferroviário de mercadorias perigosas, a fim de minimizar as perdas.	não	não	Resolveu o modelo de jogo cooperativo, que considerou o equilíbrio de lucro dos jogadores e um alto retorno geral.

Fonte: Autores (2023).

Quadro 2 – Estratégias para despacho de veículos de emergência

(continua)

Título do Trabalho	Autores (ano)	Tipo de Problema	Elementos estocásticos	Níveis de Prioridade	Metodologia adotada para solução
Reactive emergency vehicles dispatching based real-time information dissemination	YEDDER, H. B; BENYAHIA, I. (2017)	Alocar veículos de emergência para emergências urbanas e ajustar suas rotas de acordo com mudanças futuras e eventos imprevisíveis.	não	sim	Usou abordagem sensível ao contexto baseada em uma arquitetura reconfigurável composta por agentes.
An Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm and Its Application in Dynamic Emergency Vehicle Dispatching	DUAN, X.; NIU, T.; HUANG, Q. (2018)	Despachar veículos de emergência na rede de vias expressas urbanas que inclui roteamento dinâmico e seleção de veículos de emergência.	não	sim	O modelo dinâmico de despacho de veículos de emergência foi resolvido por um algoritmo de salto de sapo embaralhado aprimorado.
Online optimization with look-ahead for freeway emergency vehicle dispatching considering availability	PARK, H.; WADDELL, D.; HAGHANI, A. (2019)	Uma política de despacho online é introduzida para minimizar o tempo necessário para responder a uma sequência de solicitações de emergência em rodovias.	não	não	Utilizou a programação dinâmica.
A Metaheuristic Approach to Emergency Vehicle Dispatch and Routing	GIRI, A. R.; CHEN, T.; RAJENDRAN, V. P.; KHAMIS, A. (2022)	Acidentes e situações de emergência.	não	não	Foram utilizados três algoritmos bio-inspirados, a saber: (1) otimização de colônia de formigas, (2) otimização de colônia de formigas adaptativa e (3) algoritmo de vagalume.

Fonte: Autores (2023).

Quadro 2 – Estratégias para despacho de veículos de emergência

(conclusão)

Título do Trabalho	Autores (ano)	Tipo de Problema	Elementos estocásticos	Níveis de Prioridade	Metodologia adotada para solução
A predictive ambulance dispatch algorithm to the scene of a motor vehicle crash: the search for optimal over and under triage rates	CEKLIC, E.; et al.	O trabalho propõe resolver pedidos de assistência médica de emergência no local de um acidente de automóvel.	não	sim	Uma técnica de detecção automática de interação qui-quadrado foi usada para desenvolver árvores de decisão, com taxas de sobre/sub-triagem determinadas para cada árvore.
Dynamic Emergency Vehicle Path Planning and Traffic Evacuation Based on Salp Swarm Algorithm	DUAN, X. H.; WU, J. X.; XIONG, Y. L. (2022)	Resgate em rede viária urbana com controle de tráfego em tempo real com restrições de índice de congestionamento.	sim	não	Foi utilizado a algoritmo cardume de salpas que foi combinado com algoritmo de Dijkstra para obter os vários caminhos alternativos. Em seguida, um algoritmo de cardume de salpas obteve esquemas de evacuação e as rotas de resgate de veículos de emergência.

Fonte: Autores (2023).

4 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

A seguir, são apresentados testes computacionais sobre um conjunto de instâncias selecionadas para cada tipo de instância utilizando os algoritmos construtivos e de buscas locais. Cada instância é composta por números de grupos distintos que representam os níveis de prioridades em cada grupo.

Quando uma rota é definida entre dois clientes do mesmo grupo, a ligação (a aresta) entre esses é denominada intragrupos. No caso da rota definida entre dois clientes de grupo distintos, a ligação (a aresta) entre esses é denominada intergrupos.

Foi utilizada a heurística de inserção mais próxima com penalização nas arestas intergrupos (H1) e o método de descida em vizinhança variável combinado com essa H1 (VND+H1).

Além disso, usa-se também a heurística de inserção mais próxima sem penalização nas arestas intergrupos (H2) e a opção do uso do método de descida em vizinhança variável combinado com H2 (VND+H2).

O VND realiza a fase de busca local aplicado após a construção da solução via heurística construtiva. As implementações de H1, H2 e VND foram realizadas conforme Mestria (2018), cujos pseudocódigos podem ser encontrados na referência supracitada.

A Tabela 2 mostra a diferença percentual entre o valor obtido pelas heurísticas construtivas (H1 e H2) e pelos métodos VND combinado com essas heurísticas construtivas, em relação ao melhor valor encontrado, ou seja, o *gap*, conforme definido pela equação (2).

Foram escolhidas várias instâncias de diversos tipos nessa Tabela 2, conforme Mestria (2018), variando o número de vértices (clientes) entre 101 e 1000 e o tamanho do grupo entre cinco e 144 (com diferentes classes de falhas de energia: as já ocorridas e as futuras demandas).

Para as instâncias da Tabela 2 foi priorizado o conjunto de falhas de energia elétrica já conhecida tendo $\alpha=1$, assim como $\beta=1$. O serviço de falhas de energia elétrica poderá ocorrer com probabilidade maior do que zero.

Para cada instância os vértices são os clientes com falhas de energia elétrica e suas distâncias foram consideradas proporcionais aos tempos de serviço T_i , isto é, inclui os tempos que levam para um veículo chegar ao vértice i (cliente i a ser atendido), vindo do vértice $i-1$, (cliente anterior $i-1$ que foi atendido).

Os pesos P_i do fator prioritário para os vértices i são proporcionais aos níveis (n_i), quanto maior a relevância do local, maior o peso. Cada zona j é composta por vértices, sendo F_j a demanda esperada na zona j e foi modelada como $F_j = E_j/m$.

Temos que E_j é o valor esperado de clientes numa futura demanda e m o total de clientes nessa demanda. Portanto, o F_j acaba sendo uma constante de proporcionalidade ao fator K_{jt} .

Os tipos de instância descritas na Tabela 1 mostram vários níveis acima dos cinco níveis estabelecidos no Quadro 1.

Além disso, a Tabela 1 mostra o número de grupos de vértices (clientes) divididos entre os conjuntos com falhas de energia elétricas já ocorridas (classe I) e conjuntos de falhas que poderão ocorrer (classe J) conforme demanda esperada. Por exemplo, para as instâncias de tipo 1: a) 5 níveis para um conjunto de três instâncias (sendo 10 grupos com 5 conjuntos de falhas classe I e 5 conjunto de falhas classe J); b) 15 níveis para um conjunto de três instâncias (sendo 25 grupos com 15 conjuntos de falhas classe I e 10 conjunto de falhas classe J); c) 30 níveis para um conjunto de três instâncias (sendo 50 grupos com 30 conjuntos de falhas classe I e 20 conjunto de falhas classe J).

Para as instâncias de tipo 2, há 5 níveis para todas as instâncias, sendo 10 grupos divididos em 5 conjuntos a cada classe de falhas I e J . Para as instâncias de tipo 4, há cinco instâncias com granularidades diferentes com quatro níveis de prioridade (4 grupos com 4 conjuntos de falhas classe I e zero para classe J) e outras cinco instâncias também de diferentes granularidades com quatro níveis de prioridade (8 grupos com 4 conjuntos de falhas classe I e 4 para classe J).

Desta forma, as concessionárias podem estratificar mais níveis dos que estão descritos no Quadro 1. Os detalhes dos diversos níveis de prioridade para todas as instâncias da Tabela 2 estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Número de níveis de prioridades

Tipo de instâncias	Números de níveis de prioridades	Número de grupos	Conjunto de falhas de energia elétrica já conhecida (classe I)	Conjunto de zonas que poderão ter falhas de energia (classe J)
1	5, 15, 30	10, 25, 50	5,15,30	5,10, 20
2	5	10	5	5
3	5, 10, 15	6, 20, 25	5,10,15	1,10,10
4	4	4, 8	4, 4	0, 4
5	5, 5, 10, 10, 15	5, 10, 15, 20, 25	5, 5, 10,10,15	0, 5, 5,10,10
6	5, 15, 20, 30, 50, 100	9, 25, 36, 49, 100, 144	5, 15, 20, 30, 50, 100	4, 10, 16, 19, 50, 44

Fonte: Autores (2023).

Na primeira coluna da Tabela 2 são mostradas as instâncias, na segunda coluna o tipo, nas quatro colunas seguintes são apresentados os *gaps* dos melhores valores alcançados pelas heurísticas H1, H2, VND+H1 e VND+H2, respectivamente. Nas últimas colunas os *gaps* dos valores médios. O percentual de *gap* do melhor valor expresso na Tabela 2 é calculado conforme a equação (2):

$$gap = 100*(vh-mv)/mv \quad (2)$$

onde, *vh* é o melhor valor encontrado pela heurística mostrada na Tabela 2 e *mv* é o melhor valor alcançado entre as heurísticas H1, H2, VND+H1 e VND+H2. Para o percentual de *gap* do valor médio, *vh* é o valor médio encontrado pela heurística e *mv* é o melhor valor médio alcançado entre as heurísticas H1, H2, VND+H1 e VND+H2.

Cada instância da Tabela 2 contém número de grupos (que considera as classes I mais as classes J) e o número de vértices (clientes), conforme definidos na Tabela 1. Por exemplo, a instância `i-10-gi1262.tsp`, contém 10 grupos (5 da classe I e 5 da classe J), 5 níveis de prioridades e 262 vértices (262 clientes); instância `instanciaC1k.0`, contém 10 grupos (5 da classe I e 5 da classe J), 5 níveis de prioridades e 1000 vértices (1000 clientes); já a instância `instancia-550-20.tsp`, contém 20 grupos (10 da classe I e 10 da classe J), 10 níveis de

prioridades e 550 vértices (550 clientes); por fim, a instância **instanciaigual-200-4-a**, contém 4 grupos (4 da classe *I* e zero da classe *J*), 4 níveis de prioridades e 200 vértices (200 clientes).

Os algoritmos construtivos H1 e H2 usaram a heurística de inserção mais próxima com a estratégia da etapa construtiva do GRASP. Detalhes dessa estratégia podem ser encontrados no Algoritmo 2, em Mestria (2018), que utiliza uma Lista Restritiva de Candidatos (LRC).

Durante cada iteração da etapa construtiva, a LRC é construída usando a versão reativa para o parâmetro alfa (FESTA; RESENDE, 2011). Essa versão facilita as construções e testes das heurísticas, devido não necessitar de calibrar o parâmetro alfa, além de obterem melhor desempenho quando comparado às versões com valores fixos dos alfas, (BRUNI; BERALDI; KHODAPARASTI, 2020), (OVIEDO-SALAS, *et al.*, 2022) e (SOUZA, *et al.*, 2022).

Foi utilizado para cada execução das heurísticas H1 e H2, na etapa de construção, um total de 200 iterações aplicando o parâmetro alfa na versão reativa. Os valores de alfa variaram no intervalo de [0,1]. O valor para atualizar periodicamente as probabilidades dos alfas foi igual a 50.

Ressalta-se que os algoritmos H1, H2, VND+H1 e VND+H2 foram codificados em linguagem de programação C e executados sobre o sistema operacional Linux Ubuntu versão 4.3.2-1.

O computador utilizado foi Intel Core 2 Quad, 2.83 GHz com 8 GB de RAM, com quatro núcleos, mas somente utilizou-se um núcleo. As heurísticas H1, H2, VND+H1 e VND+H2 da Tabela 2 foram executadas dez vezes e seus tempos médios dados em segundos são mostrados na Tabela 3.

Tabela 2 – Valores alcançados pelas heurísticas

(continua)

Instâncias	Tipo	Melhores Valores				Valores Médios				Melhor Valor	Melhor Valor Médio
		H1	H2	VND +H1	VND +H2	H1	H2	VND +H1	VND +H2		
i-10-gil262.tsp	1	1,14	3,46	0,83	0,00	0,87	8,19	0,00	5,13	2544	2712,42
i-25-gil262.tsp	1	1,80	4,18	0,04	0,00	0,96	7,61	0,00	3,60	2562	2787,45
i-50-gil262.tsp	1	3,45	5,53	1,18	0,00	1,27	6,66	0,00	2,87	2550	2759,28
i-10-lin318.tsp	1	1,33	2,17	0,00	1,29	2,64	4,41	0,00	1,92	44915	48449,07
i-25-lin318.tsp	1	6,74	6,32	0,92	0,00	3,04	4,74	0,00	1,27	44950	50034,2
i-50-lin318.tsp	1	3,41	5,33	0,00	0,62	3,35	3,84	0,00	0,17	45073	49507,4
i-10-pcb442.tsp	1	2,70	3,07	0,47	0,00	1,53	2,72	0,00	0,12	56957	62415,23
i-25-pcb442.tsp	1	4,45	3,83	0,00	1,17	1,57	3,29	0,00	0,88	58371	64368,02
i-50-pcb442.tsp	1	2,69	3,74	0,09	0,00	1,98	3,14	0,00	0,89	57712	63350,63
gap médio		3,08	4,18	0,39	0,34	1,91	4,96	0,00	1,87		
instanciaC1k.0	2	2,19	3,27	0,00	0,81	0,22	4,61	0,00	2,78	12969177	13479021
instanciaC1k.1	2	2,66	4,07	0,00	1,46	0,17	6,06	0,00	2,52	12828555	13398596
instanciaC1k.2	2	2,27	2,70	0,80	0,00	0,64	3,67	0,00	1,23	13087267	13758260
instanciaC1k.3	2	1,95	3,02	0,00	0,27	0,52	6,72	0,00	2,96	12712863	13201605
instanciaC1k.4	2	2,05	3,03	0,00	0,25	0,32	5,70	0,00	2,54	13233349	13746680
gap médio		2,23	3,22	0,16	0,56	0,37	5,35	0,00	2,41		
instancia-300-6.tsp	3	1,48	3,45	0,00	0,49	0,87	5,88	0,00	3,34	811	850,51
instancia-350-6.tsp	3	1,25	0,00	0,10	0,10	0,35	4,58	0,00	3,40	959	1002,07
instancia-400-6.tsp	3	1,05	2,53	0,00	0,11	1,07	3,45	0,00	1,83	949	995,91
instancia-450-6.tsp	3	2,37	2,96	0,79	0,00	0,90	3,39	0,00	1,26	1014	1071,29
instancia-500-6.tsp	3	3,44	3,61	0,00	0,70	1,11	3,43	0,00	1,35	1135	1207,11
instancia-550-20.tsp	3	2,41	3,61	1,07	0,00	0,67	6,60	0,00	3,05	1495	1571,92
instancia-600-20.tsp	3	1,34	3,06	0,00	0,26	0,62	6,19	0,00	3,23	1568	1632,89
instancia-650-20.tsp	3	1,64	4,08	0,91	0,00	0,82	5,89	0,00	2,49	1642	1726,67
instancia-700-20.tsp	3	2,43	4,22	0,00	0,81	0,78	6,42	0,00	3,46	1728	1808,75
instancia-750-25.tsp	3	2,93	4,37	1,60	0,00	0,76	4,94	0,00	2,01	1807	1925,95
gap médio		2,03	3,19	0,45	0,25	0,80	5,08	0,00	2,54		
instanciaigual-200-4-a	4	1,32	1,97	0,13	0,00	0,64	2,29	0,00	2,02	22921	24366,76
instanciaigual-200-4-h	4	2,42	1,01	0,90	0,00	1,17	2,98	0,00	1,59	11327	12292,57
instanciaigual-200-4-z	4	0,79	2,17	0,00	0,41	0,95	3,30	0,00	1,64	11449	12419,75
instanciaigual-200-4-x1	4	1,88	1,84	0,60	0,00	1,10	2,84	0,00	1,32	11412	12428,08
instanciaigual-200-4-x2	4	0,93	0,63	0,00	0,69	1,21	2,61	0,00	1,57	11458	12430,81
instanciaigual-600-8-a	4	1,56	1,78	0,00	0,71	0,30	2,19	0,00	1,76	56269	59062,11
instanciaigual-600-8-h	4	2,08	2,53	0,00	0,96	1,27	1,55	0,23	0,00	19717	21410,85
instanciaigual-600-8-z	4	4,49	2,84	0,93	0,00	2,21	2,38	0,84	0,00	20191	21895,59
instanciaigual-600-8-x1	4	3,14	2,02	0,37	0,00	1,71	1,90	0,67	0,00	20280	21977,84
instanciaigual-600-8-x2	4	4,94	3,04	0,83	0,00	2,00	2,09	0,66	0,00	20174	21932,43
gap médio		2,35	1,98	0,38	0,28	1,26	2,41	0,24	0,99		
instancia-300-5-108	5	1,26	2,62	0,92	0,00	0,23	5,15	0,00	2,64	8826	9302,29

Tabela 2 – Valores alcançados pelas heurísticas (conclusão)

Instâncias	Tipo	Melhores Valores				Valores Médios				Melhor Valor	Melhor Valor Médio
		H1	H2	VND +H1	VND +H2	H1	H2	VND +H1	VND +H2		
instancia-300-10-109	5	3,28	3,33	1,76	0,00	0,35	3,94	0,00	2,00	10079	11004,87
instancia-300-15-110	5	2,21	4,25	0,00	0,08	0,60	7,43	0,00	5,31	12295	13069,38
instancia-300-20-111	5	0,97	3,54	0,00	0,01	0,64	7,29	0,00	4,49	14128	15011,31
instancia-300-25-112	5	2,62	4,11	0,54	0,00	0,61	5,19	0,00	3,53	15269	16400,6
instancia-500-5-304	5	0,57	3,39	0,00	0,02	0,56	5,14	0,00	3,13	8455	8916,46
instancia-500-10-305	5	2,74	2,51	1,60	0,00	0,31	5,87	0,00	3,22	11918	12624,27
instancia-500-15-306	5	1,99	4,12	0,00	0,32	0,55	7,57	0,00	4,98	13695	14472,96
instancia-500-20-307	5	1,98	4,77	0,00	0,32	0,41	4,90	0,00	2,58	15175	16245,3
instancia-500-25-308	5	2,54	2,56	0,92	0,00	0,74	5,37	0,00	3,14	16863	17948,92
gap médio		2,02	3,52	0,57	0,07	0,50	5,78	0,00	3,50		
i-9-eil101.tsp-3x3	6	3,15	5,26	0,00	1,65	0,67	7,92	0,00	5,12	666	723,81
i-25-eil101.tsp-5x5	6	3,22	4,98	0,00	0,44	2,03	7,09	0,00	1,87	683	745,79
i-36-eil101.tsp-6x6	6	4,93	2,99	1,49	0,00	3,23	5,53	0,18	0,00	670	734,71
i-9-a280.tsp-3x3	6	3,40	4,97	1,84	0,00	1,84	4,77	0,00	1,61	2939	3209,32
i-25-a280.tsp-5x5	6	4,24	4,91	0,06	0,00	2,93	4,50	0,00	1,45	3139	3468,08
i-42-a280.tsp-6x7	6	6,03	6,94	0,00	3,00	2,55	4,88	0,00	1,36	2967	3336,48
i-49-rat783.tsp-7x7	6	4,36	3,20	0,00	1,21	3,55	2,15	0,37	0,00	10255	11226,39
i-100-rat783.tsp-10x10	6	6,38	8,15	0,00	0,56	3,10	4,70	0,00	1,37	10783	11818,6
i-144-rat783.tsp-12x12	6	6,87	10,58	0,00	1,57	3,18	5,50	0,00	2,52	10666	11680,63
gap médio		4,73	5,77	0,38	0,94	2,56	5,23	0,06	1,70		
gap médio total		2,74	3,63	0,41	0,38	1,28	4,74	0,06	2,16		

Fonte: Autores (2023).

Na primeira coluna da Tabela 3 é mostrado o tipo de instância, na segunda coluna as instâncias e nas quatro últimas colunas os tempos médios medidos em segundos alcançados pelas heurísticas H1, H2, VND+H1 e VND+H2, respectivamente.

Tabela 3 – Tempos médios das heurísticas. (continua)

Tipo	Métodos	H1	H2	VND+H1	VND+H2
	Instâncias				
1	i-10-gil262.tsp	10,6	10,0	18,2	25,9
1	i-25-gil262.tsp	10,6	11,1	19,8	30,3
1	i-50-gil262.tsp	10,6	13,5	22,1	36,6
1	i-10-lin318.tsp	23,8	14,2	45,6	45,3
1	i-25-lin318.tsp	16,9	16,1	52,5	57,1

Fonte: Autores (2023).

Tabela 3 – Tempos médios das heurísticas

(conclusão)

Tipo	Métodos	H1	H2	VND+H1	VND+H2
	Instâncias				
1	i-50-lin318.tsp	16,7	19,6	60,3	66,9
1	i-10-pcb442.tsp	45,2	39,6	125,9	132,2
1	i-25-pcb442.tsp	45,2	43,0	128,1	172,9
1	i-50-pcb442.tsp	45,2	49,8	135,0	191,3
2	instanciaC1k.0	1097	1029	3335	5199
2	instanciaC1k.1	1107	1030	3273	8947
2	instanciaC1k.2	1126	1068	3146	7059
2	instanciaC1k.3	1134	1037	2670	7518
2	instanciaC1k.4	1096	1030	3202	6945
3	instancia-300-6.tsp	14,4	13,7	25,0	37,7
3	instancia-350-6.tsp	22,9	61,3	43,9	86,0
3	instancia-400-6.tsp	31,4	30,9	67,3	83,1
3	instancia-450-6.tsp	47,1	41,6	91,7	116,3
3	instancia-500-6.tsp	62,1	54,2	142,2	243,5
3	instancia-550-20.tsp	89,7	74,3	182,5	473,1
3	instancia-600-20.tsp	119,5	91,1	236,5	443,2
3	instancia-650-20.tsp	148,2	119,0	322,6	624,2
3	instancia-700-20.tsp	184,2	149,7	400,3	774,7
3	instancia-750-25.tsp	234,1	195,3	493,5	1002,8
4	instanciaigual-200-4-a	5,0	3,9	8,7	7,4
4	instanciaigual-200-4-h	4,5	4,1	7,8	8,6
4	instanciaigual-200-4-z	4,6	4,1	8,6	8,3
4	instanciaigual-200-4-x1	4,7	4,0	8,1	8,2
4	instanciaigual-200-4-x2	4,8	3,9	8,6	8,5
4	instanciaigual-600-8-a	121,9	87,3	247,8	211,4
4	instanciaigual-600-8-h	155,0	87,2	300,0	346,8
4	instanciaigual-600-8-z	111,2	87,2	310,1	327,7
4	instanciaigual-600-8-x1	111,2	90,8	307,9	281,0
4	instanciaigual-600-8-x2	111,3	86,7	316,4	314,6
5	instancia-300-5-108	15,8	15,4	26,8	42,6
5	instancia-300-10-109	16,3	15,0	28,6	37,3
5	instancia-300-15-110	16,0	15,2	32,8	46,1
5	instancia-300-20-111	16,3	15,8	31,3	46,4
5	instancia-300-25-112	15,9	16,3	30,8	43,6
5	instancia-500-5-304	70,5	72,8	162,6	249,9
5	instancia-500-10-305	72,7	67,1	142,8	283,9
5	instancia-500-15-306	73,5	67,7	150,0	249,7
5	instancia-500-20-307	70,3	70,9	152,7	259,9
5	instancia-500-25-308	70,1	71,9	155,4	234,9
6	i-9-eil101.tsp-3x3	0,7	0,7	1,1	1,2
6	i-25-eil101.tsp-5x5	0,8	1,1	1,4	2,1
6	i-36-eil101.tsp-6x6	0,7	0,9	1,8	2,7
6	i-9-a280.tsp-3x3	12,2	9,6	23,5	27,2
6	i-25-a280.tsp-5x5	12,2	11,7	30,2	30,7
6	i-42-a280.tsp-6x7	12,2	12,8	31,7	36,9
6	i-49-rat783.tsp-7x7	220,9	369,3	1328,2	1361,6
6	i-100-rat783.tsp-10x10	311,7	436,6	2130,2	2490,2
6	i-144-rat783.tsp-12x12	237,3	474,0	1935,9	2934,8
	Tempos médios totais	162,62	159,36	493,60	947,46

Fonte: Autores (2023).

Os métodos VND+H1 e VND+H2 alcançaram melhores resultados do que os algoritmos construtivos H1 e H2, dado que realiza mais iterações para buscar soluções de boa qualidade. No entanto, os tempos computacionais dos métodos VND foram maiores do que os algoritmos construtivos. Observe na Tabela 3 que é possível traçar uma rota de atendimento aos clientes de forma rápida usando as heurísticas H1 ou H2.

A partir da análise dos resultados apresentados pelos métodos heurísticos foi possível observar a robustez desses algoritmos em relação à qualidade das soluções encontradas para as rotas e os tempos computacionais depreendidos por esses métodos. Dessa forma, a metodologia e os resultados computacionais apresentados são validados com êxito.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma estratégia para o despacho de veículos de emergência considerando níveis de prioridade para atender consumidores com falhas de energia elétrica por meio de um modelo matemático.

O trabalho propôs algoritmos heurísticos que permite despachar veículos de emergência em tempo hábil, levando sua equipe de reparo, para atender os desligamentos de energia elétrica ocorridos numa determinada região. Os resultados computacionais mostram que em poucos segundos é possível estabelecer uma rota para despachar uma equipe de manutenção nos locais onde ocorrem as falhas de energia elétrica.

No modelo matemático apresentado na seção 2.1, é possível estabelecer novas rotas com futuras demandas estocásticas que poderão ocorrer durante os atendimentos das falhas de energia elétrica em andamento.

Observando a literatura apresentada, nenhum modelo propôs considerar ao mesmo tempo as demandas estocásticas e os níveis de prioridade de cada cliente que necessita de veículo de emergência. E ainda, o trabalho proporciona a integração de áreas multidisciplinares como otimização, algoritmos heurísticos e conteúdos específicos do setor elétrico como, por exemplo, eficiência energética.

Por meio do modelo matemático apresentado, os resultados mostraram que se podem minimizar impactos nos custos financeiros e nos operacionais para as concessionárias de energia elétrica, que ocorrerão advindos da interrupção no fornecimento de energia elétrica. Nesse sentido, o consumidor também obtém ganho devido ser atendido de forma mais rápida e dinâmica, principalmente os de maiores prioridades.

O trabalho contempla ainda, melhorar a qualidade da energia elétrica decorrente da diminuição do tempo na interrupção de energia elétrica promovendo o uso racional dessa nos diversos setores como: educacionais, comerciais, industriais e de serviços.

Por fim, algumas limitações do modelo podem ser usadas para trabalhos futuros. A primeira limitação foi o uso de distâncias euclidianas para definir as rotas no algoritmo, portanto uma sugestão é definir estratégias para criação de rotas entre cada ponto de atuação utilizando uma integração com, por exemplo, o Google Maps (2023). Assim, o algoritmo pode ser mais assertivo no cálculo de distâncias, pois dessa forma, estará considerando distâncias reais, envolvendo variáveis como curvas, trânsito, dentre outros fatores. Como segundo ponto, este trabalho considerou o estudo de rotas para apenas um veículo, portanto também é possível realizar a expansão da análise considerando vários veículos para atender os mesmos pontos de atuação, de forma a possibilitar dividir as ordens emergenciais entre eles.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho teve apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), através do edital PRPPG 02/2019, projeto “Desenvolvimento de Métodos Computacionais Aplicados aos Sistemas de Engenharia Elétrica”, número PJ00004373 (IFES).

REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. A.; CUNHA, C. B. Modelo de apoio à decisão para um problema de posicionamento de bases, alocação e realocação de ambulâncias em centros

urbanos: estudo de caso no município de São Paulo. **TRANSPORTES**, v. 22, n. 2, p. 34-50, 2014. DOI:

<https://doi.org/10.14295/transportes.v22i2.730>

ANEEL. **Resolução Normativa 414/2010: atualizada até a REN 499/2012.**

Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, p. 202, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil), 2012.

CAMPANELI, H. C.; MESTRIA, M. Modelo de Otimização Aplicada ao Despacho de Veículos de Emergência para Atendimento aos Clientes com Interrupção de Energia Elétrica. *In: Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, 35, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo, v. 3, n.1, 010447-1, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.5540/03.2015.003.01.0447>

CEKLIC, E.; *et al.* A predictive ambulance dispatch algorithm to the scene of a motor vehicle crash: the search for optimal over and under triage rates. **BMC Emergency Medicine**. v. 22, n. 74, p. 1-11, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.1186/s12873-022-00609-5>

CHEN, C. -Y.; CHEN, P. -Y. ; CHEN, W. -T. A Novel Emergency Vehicle Dispatching System. *In: IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013, Alemanha. **Anais [...]** p. 1-5, 2013.

DOI: [10.1109/VTCSpring.2013.6691836](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2013.6691836)

CHOI, J. Y.; KIM, H.-K. A Dynamic Programming Approach for Emergency Vehicle Dispatching Problems. **Journal of the Korea Society of Computer and Information**, v. 21, n. 9, p. 91-100, 2016. DOI:

<https://doi.org/10.9708/JKSCI.2016.21.9.091>

DUAN, X.; SONG, S.; ZHAO, J. Emergency Vehicle Dispatching and Redistribution in Highway Network Based on Bilevel Programming. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, article ID 731492, p. 1-12, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/731492>

DUAN, X.; NIU, T.; HUANG, Q. An Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm and Its Application in Dynamic Emergency Vehicle Dispatching. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2018, article ID 7896926, p. 1-34, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1155/2018/7896926>

DUAN, X. H.; WU, J. X.; XIONG, Y. L. Dynamic Emergency Vehicle Path Planning and Traffic Evacuation Based on Salp Swarm Algorithm. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2022, article ID 7862746, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1155/2022/7862746>

DUARTE, A.; SÁNCHEZ-ORO, J.; MLADENVIĆ, N.; TODOSIJEVIĆ, R. Variable Neighborhood Descent. *In: Martí, R., Pardalos, P., Resende, M. (eds) Handbook of*

Heuristics. **Springer International Publishing**, Cham (Switzerland), p. 341-367, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07124-4_9

EPE. **Plano Nacional de Energia 2050**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf> . Acesso em: 25 mar. 2023.

FESTA, P.; RESENDE, M. G. C. GRASP: basic components and enhancements. **Telecommunication Systems**. v. 46, n. 3, p. 253–271, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11235-010-9289-z>

GARCIA, V. J. *et al.* Problema de roteamento de veículos para atendimento de ordens emergenciais em concessionária de distribuição de energia elétrica. *In*: 44th Brazilian Operations Research Symposium/16th Latin Ibero American Conference on Operations Research (XLIV SBPO/XVI CLAIO), Rio de Janeiro, Brasil. **Anais [...]**, 2012, p. 1222-1231. DOI: <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2012/pdf/arg0270.pdf>

GIRI, A. R.; CHEN, T.; RAJENDRAN, V. P.; KHAMIS, A. A Metaheuristic Approach to Emergency Vehicle Dispatch and Routing. *In*: IEEE International Conference on Smart Mobility (SM). **Anais [...]**, p. 27-31, 2022. DOI: [10.1109/SM55505.2022.9758285](https://doi.org/10.1109/SM55505.2022.9758285)

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2005.

GOOGLE MAPS. **MY MAPS**. 2023. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps>. Acesso em: 28 mar. 2023.

HAGHANI, A.; TIAN, Q.; HU, H. Simulation Model for Real-Time Emergency Vehicle Dispatching and Routing. **Transportation Research Record**, v. 1882, n. 1, p. 176-183, 2004. DOI: <https://doi.org/10.3141/1882-21>

JIA, X.; HE, R. Emergency Vehicle Dispatching for Railway Dangerous Goods Accidents Based on the Cooperative Game Theory. *In*: CICTP 2016: Green and Multimodal Transportation and Logistics, 16, China. **Anais [...]**, p.1591-1597, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784479896.145>

LAMBERTS, R. Electricity efficiency in commercial and public buildings. **Energy for Sustainable Development**, v. 2, n. 6, p. 49-52, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60170-2](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60170-2)

MATLAB R2013a. **MathWorks, Documentation Center**. Disponível em: DOI: <http://www.mathworks.com/help/matlab/optimization.html>. Acesso em: 12 ago. 2022.

MENDOZA, J. E.; VILLEGAS, J. G. A multi-space sampling heuristic for the vehicle routing problem with stochastic demands. **Optimization Letters**, v. 7, p. 1503-1516, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11590-012-0555-8>

MESTRIA, M. Proposta e Avaliação de Heurísticas GRASP para o Problema do Caixeiro Viajante Com Grupamentos. *In: X Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional*. Fortaleza, CE: Anais do X CBIC, SBRN, RJ (CD-ROM). **Anais[...]**, v. 1, p. 1-7, 2011. DOI: [10.21528/CBIC2011-11.1](https://doi.org/10.21528/CBIC2011-11.1)

MESTRIA, M.; OCHI, L. S.; MARTINS, S. L. Grasp with path relinking for the symmetric Euclidean clustered traveling salesman problem. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 12, p. 3218-3229, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.10.001>

MESTRIA, M. New hybrid heuristic algorithm for the clustered traveling salesman problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 116, p. 1-12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.018>

MORISHITA, C.; FOSSATI, M.; ORDENES, M.; SORGATO, M.; VERSAGE, R.; LAMBERTS R. **Regulation for energy efficiency labeling of residential buildings of Brazil**. UFSC. Disponível em: http://www.academia.edu/298035/Regulation_for_energy_efficiency_labeling_of_residential_buildings_of_Brazil. Acesso em: 24 dez. 2022.

OVIEDO-SALAS, E. *et al.* GRASP Optimization for the Strip Packing Problem with Flags, Waste Functions, and an Improved Restricted Candidate List. **Applied Sciences**. v. 12, n. 4, p. 1-18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12041965>

PARK, H.; WADDELL, D.; HAGHANI, A. Online optimization with look-ahead for freeway emergency vehicle dispatching considering availability. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v.109, p. 95-116, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.09.016>

POWEL, W. B. A comparative review of alternative algorithms for the dynamic vehicle allocation problem. *In: Golden B.L. and Assad A. A. (eds). Vehicle Routing: Methods and Studies*. North Holland: Amsterdam. **Anais[...]**, p. 249-291, 1988.

SALIBA, S.; KRUMKE, S. O.; WESTPHAL, S. Online-Optimization of Large-Scale Vehicle Dispatching Problems. **Electronic Notes in Discrete Mathematics**, v. 25, p. 145-146, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.endm.2006.06.077>

SOUZA, I. P. *et al.* A Reactive GRASP Algorithm for the Multi-depot Vehicle Routing Problem. *In: Computational Science and Its Applications – ICCSA 2022 Workshops: Malaga, Spain, Proceedings, Part II*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. **Anais[...]**, v. 13378, p. 81-96, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-10562-3_7

SOUZA, F. H. B. de; RODRIGUES, D. de S. e S.; ROCHA, V. A. R.; MELLIM, R. D.; MARCATTI, L. A. Q.; SANTOS, D. F. dos; FERREIRA, A. G. F. Estudo experimental dos pontos de aleatoriedade como estratégia para melhoria de ótimos locais em metaheurística. **Revista Produção Online**, v. 21, n. 4, p. 2185-2208, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v21i4.4398>

WEINTRAUB, A.; ABOUD, J.; FERNANDEZ, C.; LAPORTE, G.; RAMIRE, E. An Emergency Vehicle Dispatching System for an Electric Utility in Chile. **The Journal of the Operational Research Society**, v. 50, n. 7, p. 690-696, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600746>

YEDDER, H. B; BENYAHIA, I. Reactive emergency vehicles dispatching based real-time information dissemination. *In*: 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), 8, Canada. **Anais[...]**, p. 471-477, 2017. DOI: [10.1109/IEMCON.2017.8117208](https://doi.org/10.1109/IEMCON.2017.8117208)

Informações dos autores

Gabriel Rafalski Breda

Técnico em Eletrotécnica formado pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES). Atualmente graduando em Engenharia Elétrica pelo IFES. Tem interesse em otimização aplicada em redes de distribuição de energia elétrica.

Mário Mestria

Doutor em Computação pela Universidade Federal Fluminense. Atualmente é professor titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo lecionando nas Coordenadorias do Curso de Eletrotécnica e do Curso Superior em Engenharia Elétrica e no Mestrado Profissional em Tecnologias Sustentáveis.



Artigo recebido em: 07/03/2023 e aceito para publicação em: 04/04/2023
DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i1.4860>