



APLICAÇÃO DA PESQUISA OPERACIONAL PARA A MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE MOVIMENTAÇÃO DE VEÍCULOS DE EQUIPES MULTITAREFA EM UMA DISTRIBUIDORA DE ENERGIA ELÉTRICA

Tiago dos Santos Antunes (UNISINOS)
tsantunes@gmail.com

Fabio Antonio Sartori Piran (UNISINOS)
fabiosartoripiran@gmail.com

Jaqueline Lilge Abreu (UNISINOS)
jaquelinelilgeabreu@outlook.com

Daniel Pacheco Lacerda (UNISINOS)
dlacerda@unisin.br

O presente trabalho se propõe a analisar o resultado financeiro de um projeto de rodízio de veículos tipo cesto aéreo utilizado pelas equipes multitarefa de uma distribuidora de energia elétrica localizada no estado do Rio Grande do Sul. Para tanto, utilizou-se dos conceitos de Pesquisa Operacional, Custos logísticos, Roteamento de Veículo e Modelagem Matemática, a fim de propor um modelo que minimize o deslocamento global entre as unidades de serviço campo. O estudo considerou 54 veículos distribuídos entre quatro coordenações operacionais, Fronteira, Central, Vales e Metropolitana em um problema de transporte balanceado. Como resultado da aplicação do modelo proposto, obteve-se 21.869,12 Km de deslocamento total e o custo total da operação de R\$ 8.636,34.

Palavras-chave: Distribuidora de Energia Elétrica, Equipe Multitarefa, Pesquisa Operacional, Transporte, Roteamento de Veículos.

1. Introdução

A distribuição da energia elétrica é um serviço essencial e fundamental para a sociedade brasileira. Em 2021, a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), registrou que as unidades consumidoras chegaram à marca de 84,4 milhões de clientes, onde 86% correspondiam a residências (ABRADEE, 2021). Visando manter a qualidade na prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) exige que as concessionárias mantenham um padrão de continuidade no fornecimento de energia (ANEEL, 2021).

A continuidade expressa o grau de disponibilidade do serviço prestado pela concessionária sendo apurada por dois indicadores, o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) (ANEEL, 2021). O DEC relaciona-se com a gestão do sistema de distribuição, enquanto o FEC mede a fragilidade do sistema frente ao meio ambiente, o envelhecimento da rede ou a falta de manutenção adequada (PESSANHA; SOUZA; DA COSTA LAURENCEL, 2007).

Uma série de fatores impactam nestes indicadores, tais como a disponibilidade de equipes multitarefas para manutenções leves e o pronto atendimento das ocorrências de falta de energia. As equipes multitarefas são compostas por dois colaboradores e um veículo, podendo este ser um caminhão cesto ou uma camionete com escada metropolitana (ANTUNES et al., 2021).

Com a intensificação no uso dos veículos de atendimento, observa-se um crescimento no índice de paradas e uma elevada frequência de manutenções, gerando custos com trocas de peças, mão-de-obra especializada e, por fim, a indisponibilidade do veículo para o atendimento das interrupções de energia. Esses problemas impactam direta e negativamente os indicadores de DEC e FEC.

Este cenário torna-se explícito para as unidades de serviço de campo distantes dos principais centros urbanos, onde os tempos de atendimento, devido a característica geográfica e de infraestrutura, são mais elevados. Além disso, em função da gravidade da manutenção, os veículos devem ser direcionados para oficinas especializadas em outros municípios agregando tempo adicional na indisponibilidade da equipe multitarefa para atendimento às faltas de energia.

Para mitigar e equilibrar o desgaste dos veículos entre as unidades de serviço de campo, a concessionária em estudo utiliza a estratégia de rodízio de veículos na sua área de concessão. Sendo assim, surgem ofertas de veículos em melhores condições em determinadas localidades e demandas em outras. Para a seleção dos veículos que compõem o rodízio são utilizados

parâmetros como, por exemplo, a quantidade e a frequência das paradas para manutenção, os custos de cada manutenção, os tipos de veículos e entre outros indicadores de gestão de frotas. Posto isto, essa pesquisa almeja avaliar o impacto financeiro de um projeto de rodízio dos veículos do processo de atendimento emergencial de uma distribuidora de energia elétrica utilizando a Programação Linear (PL) para resolver o Problema Clássico de Transporte em Pesquisa Operacional (PO). Nesse sentido, a Pesquisa Operacional é uma área que pode contribuir para que os gestores tomem melhores decisões e com reduzidos custos, dado que ela modela a realidade e permite a criação de cenários possíveis, aumentando a eficiência do serviço e a confiabilidade da decisão no momento de movimentar os veículos entre as unidades.

2. Referencial Teórico

2.1. Distribuição de Energia Elétrica

Tanto no âmbito técnico como regulatório, o setor elétrico de distribuição de energia pode ser considerado um sistema complexo com o Governo Federal regulamentando a utilização e exploração dos serviços de energia elétrica pelos agentes do setor, pelos consumidores cativos e livres, produtores independentes e autoprodutores (ANEEL, 2021). A abrangência de interação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) abrange três modalidades de regulação, a saber: i) a regulação técnica de padrões de serviço (geração, transmissão, distribuição e comercialização); ii) a regulação econômica (tarifas e mercado); e, iii) a dos projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e eficiência energética. Este estudo terá como pano de fundo a distribuição de energia elétrica realizada pelas Distribuidoras de Energia (ANEEL, 2021).

A empresa que detém a concessão ou permissão de distribuir energia elétrica para o consumidor final é a Distribuidora de Energia Elétrica. O processo de conexão, atendimento e a entrega efetiva de energia elétrica ao consumidor ocorrem por parte das distribuidoras de energia (ABRADEE, 2021). Esse sistema de distribuição é composto por condutores, transformadores e equipamentos diversos de medição, controle e proteção das redes elétricas e principalmente pelas equipes multitarefas de campo, responsáveis pelos atendimentos aos clientes em campo (ANEEL, 2021).

2.2. Otimização em Sistemas de Transporte

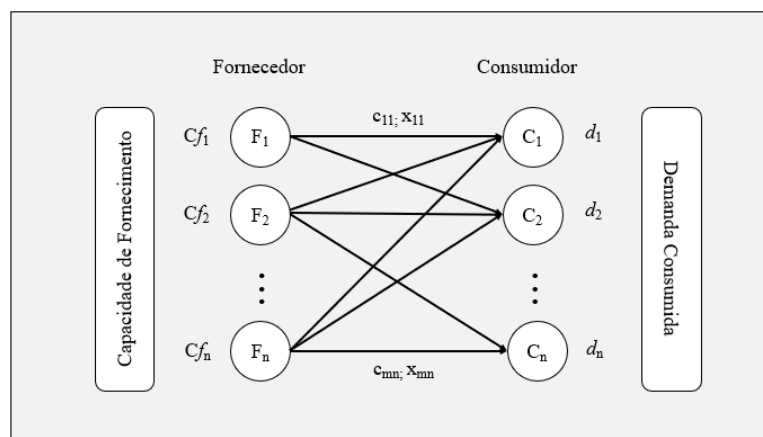
A Pesquisa Operacional (PO) consiste na utilização de um método científico (modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais) para a tomada de decisões (RODRIGUES et al., 2014). Dessa forma, a PO atua cada vez mais em um ramo

multidisciplinar, envolvendo áreas de engenharia de produção, matemática aplicada, ciência da computação e gestão de negócios (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

A pesquisa operacional envolve "pesquisa sobre operações". Portanto, a pesquisa operacional é aplicada a problemas envolvendo como conduzir e coordenar as operações (isto é, as atividades) em uma organização (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Deste modo, a PO baseia-se na criação de modelos matemáticos para resolução de problemas reais tendo como técnica amplamente aplicada a Programação Linear (PL) (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

A Programação Linear (PL) é um método matemático para a tomada de decisão que consiste na representação das características de um problema em forma de um conjunto de equações lineares. Portanto, a modelagem deve seguir três etapas básicas: a) definição da função objetivo do problema, ou seja, o resultado que se deseja alcançar com a otimização, podendo ser de maximização ou minimização; b) definição das variáveis de decisão, que representam as possíveis alternativas para a ocorrência da otimização; c) definição das restrições do problema, ou seja, as limitações às quais as variáveis de decisão estão sujeitas (BELFIORE; FÁVERO, 2012; HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Figura 1: Problema de transporte em rede



Fonte: Adaptado de Belfiore e Fávero (2012).

Em um problema de programação linear (PL), a função objetivo e todas as restrições do modelo serão representadas por funções lineares das variáveis de decisão. Uma função é dita linear quando envolve apenas constantes e termos com variáveis de primeira ordem. Caso contrário, a função é dita não linear (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

O problema de transporte busca determinar o menor custo ou o maior lucro para se transportar produtos de diversas origens para diversos destinos, ou seja, pode ser descrito como sendo

relativo ao transporte de um único produto de várias origens, onde é fabricado, para muitos destinos, onde é consumido (BELFIORE; FÁVERO, 2012). Além disso, o problema de transporte se refere a distribuir qualquer *comodity* de centros de fornecimento (origens) a centros de recepção (destinos), de modo a minimizar o custo total de distribuição (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). A Figura 1 exibe a representação em redes do problema clássico de transporte.

De acordo com Hillier e Lieberman (2013), levando-se em consideração todos os aspectos que tornam o problema de roteamento de veículos complexo de ser resolvido, é possível delinear metas para solucionar o problema. A primeira consiste na minimização do custo de transporte global, que depende da distância global viajada, ou do tempo total viajado, além dos custos associados com os veículos usados para o transporte, assim como o custo do motorista (LACHTERMACHER, 2016).

3. Procedimentos Metodológicos

O estudo de caso foi escolhido para a condução da pesquisa, pois se caracteriza pelo aspecto empírico que investiga um determinado fenômeno em um contexto real, por meio de uma investigação dos objetos de estudo (MIGUEL et al., 2012). O foco deste método é o de relatar, descrever situações e fatos e proporcionar conhecimento acerca do fenômeno estudado e verificar efeitos ou relações presentes no caso (MIGUEL et al., 2012; VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002).

Como ferramentas de investigação, utilizou-se a pesquisa bibliográfica e documental. A pesquisa bibliográfica é caracterizada por abranger estudos já tornados públicos em relação ao tema, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e com material disponibilizado na Internet (YIN, 2001). A pesquisa documental é caracterizada por ser feita com base na análise de documentos conservados dentro das organizações de qualquer natureza (MIGUEL et al., 2012).

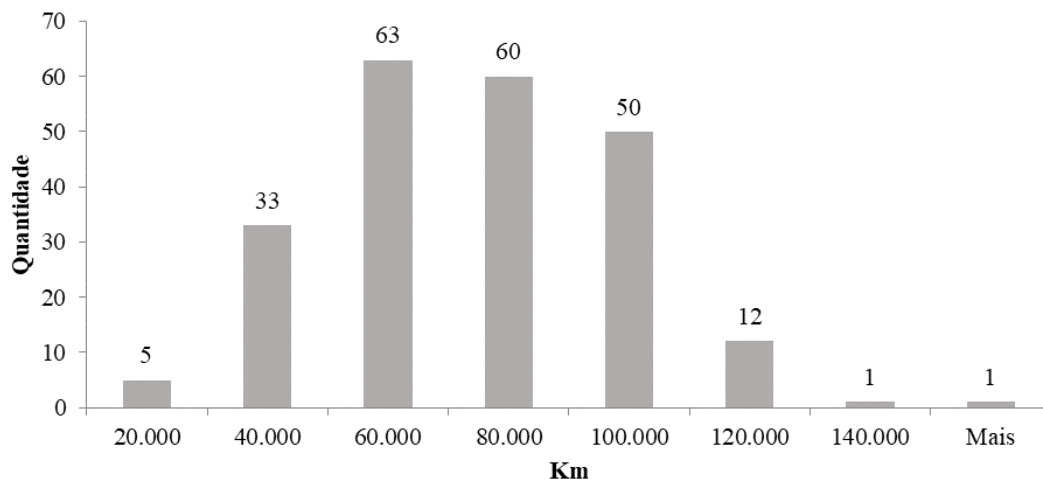
3.1 Descrição da Unidade de Contexto

A distribuidora de energia elétrica em estudo está localizada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, tem mais de 99 mil km² de área de concessão, aproximadamente 2 mil colaboradores e próximo de 1.300.000 clientes e se caracteriza por possuir 17 unidades de serviço de campo distribuídas estrategicamente em sua área concessão. Cada unidade de serviço de campo é responsável por prestar integralmente a manutenção da rede elétrica e atender as solicitações

dos clientes. A empresa distribuiu energia para 118 municípios, fornecendo mais de 30,4% da energia consumida no estado.

A coleta de dados foi realizada por meio do ERP (*Enterprise Resource Planning*) da empresa, através de observação direta dos processos e de entrevistas semiestruturadas, com três profissionais especialistas da empresa, a saber: i) Coordenador de Operações; ii) Analista de Operações, e; iii) Técnico de operações, ocorrendo durante o mês de setembro do ano de 2017, período anterior às ações de movimentação dos veículos e contemplou as 17 unidades de serviço de campo. O Gráfico 1 apresenta o histograma com as quantidades e a distribuição de frequência dos veículos avaliados por quilometragem. Foram identificados no estudo 225 veículos, entre próprios e locados, do tipo cesto aéreo, distribuídos em quatro coordenadas, a saber: i) Metropolitana; ii) Vales; iii) Central, e; iv) Fronteira.

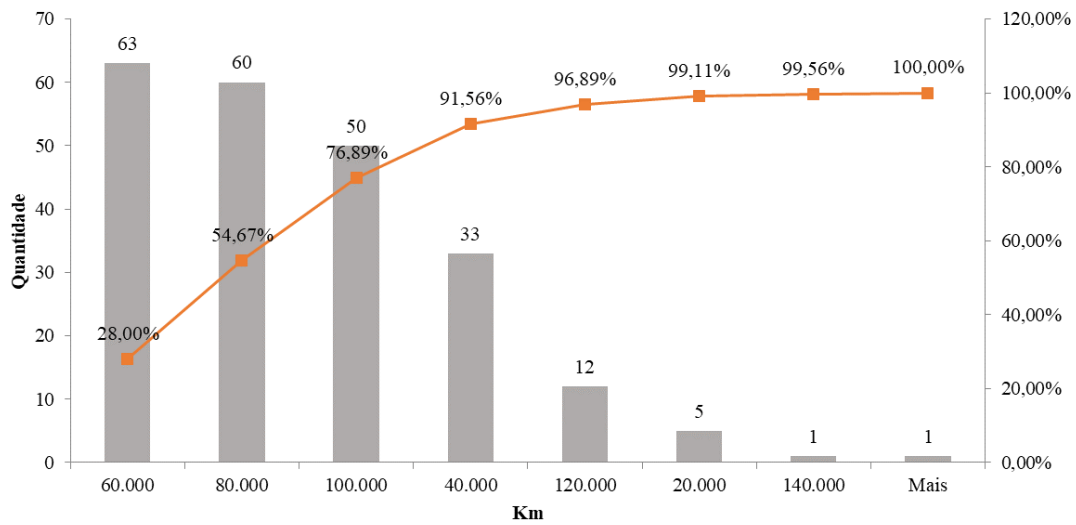
Gráfico 1: Quantidade de veículos por raio de atuação (km)



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Para a seleção dos veículos foram utilizados como parâmetros as condições dos veículos, os custos com manutenção, a frequência de paradas não programadas e a quilometragem total do veículo. Observa-se que 76,89% da frota de veículos analisada no período está com quilometragem acima de 60.000 km. O Gráfico 2 apresenta a distribuição cumulativa da quilometragem dos veículos.

Gráfico 2: Quantidade cumulativa de veículos por km

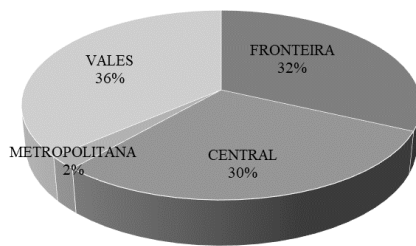


Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

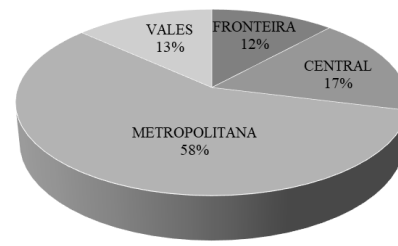
Posteriormente, foi realizada a estratificação da distribuição dos veículos entre as quatro coordenações da empresa e a segmentação entre veículos de reduzida e elevada rodagem. Como parâmetro, os especialistas da empresa sugeriram utilizar a quilometragem de 50.000 Km, em que, veículos com quilometragem abaixo desse parâmetro foram considerados de reduzida rodagem e acima deste, elevada rodagem.

Gráfico 3: Distribuição de veículos > 50 mil Km

Gráfico 4: Distribuição de veículos < 50 mil Km



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

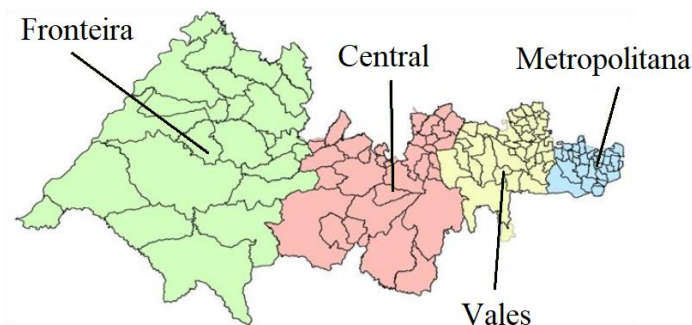


Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Os Gráficos 3 e 4 apresentam a distribuição dos veículos entre as coordenações. Observa-se por meio do Gráfico 3, que os veículos de elevada rodagem estão localizados na abrangência das coordenações Central e Fronteira, 62%. O Gráfico 4 apresenta que, em relação aos veículos de reduzida rodagem, a coordenação Metropolitana detém o maior volume de veículos, 58%. Os especialistas da empresa comentam que os dados retratam a realidade da distribuição geográfica dos atendimentos, visto que, devido à proximidade dos municípios na região Metropolitana, os deslocamentos para atendimento são reduzidos em relação aos municípios da região Central e

Fronteira, por exemplo, fazendo com que os veículos tenham reduzida quilometragem acumulada. Tal fato, pode ser observado através da Figura 1 onde é apresentada divisão da área de concessão nas quatro coordenções em que se pode notar também a dimensão dos municípios.

Figura 1: Distribuição geográfica das coordenções



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Em seguida, com o auxílio do grupo de especialistas buscou-se identificar entre as 17 unidades de serviço de campo a oferta e a demanda de veículos do tipo cesto aéreo em condições para movimentação. Uma vez que, cada unidade tem sua dinâmica de atendimento aos serviços solicitados pelos clientes, tanto emergenciais, quanto programados, e que esse agendamento tem custos de operação elevados, com o envolvimento de equipes serviço pesado (trocas de postes) e interrupções programadas na rede, obteve-se um total de 54 veículos aptos a participarem do rodízio proposto. A Tabela 1 apresenta a distribuição de oferta e demanda de veículos entre as unidades. Como a capacidade total de fornecimento é exatamente igual à demanda total consumida, tem-se um problema de transporte balanceado.

Tabela 1: Oferta e demanda de veículos entre as unidades

Unidade de Serviço de Campo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	Q	R	Total
Oferta	-	-	10	9	-	-	-	-	-	6	-	2	-	-	-	-	-	27
Demanda	2	4	-	-	-	9	2	3	3	-	-	-	1	3	-	-	-	27

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Em seguida, com base na localização geográfica de cada unidade de serviço de campo foi elaborada a matriz de deslocamento com as distâncias entre cada uma das unidades de atendimento. A Tabela 2 apresenta a matriz de deslocamento entre unidades.

Tabela 2: Matriz de deslocamento entre unidades

Unidade de Serviço de Campo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	Q	R
A	0	286	517	544	527	259	221	175	205	535	561	531	408	141	626	299	658
B	286	0	268	295	299	98	271	263	392	286	311	281	217	410	544	399	297
C	517	268	0	28	33	278	501	444	573	19	45	15	221	640	695	338	345
D	544	295	28	0	18	284	527	450	579	8	16	20	227	666	291	452	283
E	527	299	33	18	0	271	531	435	564	14	34	25	213	670	233	237	249
F	259	98	278	284	271	0	243	165	295	291	300	286	149	382	280	641	84
G	221	271	501	527	531	243	0	293	372	520	545	515	392	226	551	693	210
H	175	263	444	450	435	165	293	0	136	455	466	450	315	298	569	470	407
I	205	392	573	579	564	295	372	136	0	584	595	579	380	181	397	652	646
J	535	286	19	8	14	291	520	455	584	0	26	12	232	658	501	579	143
L	561	311	45	16	34	300	545	466	595	26	0	37	244	683	68	240	682
M	531	281	15	20	25	286	515	450	579	12	37	0	227	656	77	135	259
N	408	217	221	227	213	149	392	315	380	232	244	227	0	531	348	391	112
O	141	410	640	666	670	382	226	298	181	658	683	656	531	0	389	150	187
P	626	544	695	291	233	280	551	569	397	501	68	77	348	389	0	525	134
Q	299	399	338	452	237	641	693	470	652	579	240	135	391	150	525	0	621
R	658	297	345	283	249	84	210	407	646	143	682	259	112	187	134	621	0

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A partir da matriz de deslocamento e da oferta e demanda de veículos entre as unidades foi elaborada a formulação matemática do problema clássico de transporte. Os parâmetros do modelo, as variáveis de decisão e a formulação matemática é apresentada pela Equação 1.

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = C f_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_j \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Onde:

c_{ij} = distância em quilômetros do fornecedor i ($i = 1, \dots, m$) para o consumidor j ($j = 1, \dots, n$)

Cf_i = oferta de veículos da unidade fornecedora i ($i = 1, \dots, m$)

d_j = demanda do consumidor j ($j = 1, \dots, n$)

x_{ij} = veículos movimentados do fornecedor i ($i = 1, \dots, m$) para o consumidor j ($j = 1, \dots, n$)

Após a modelagem, foi realizada a otimização utilizando a ferramenta Solver do Excel. No próximo capítulo são apresentados os resultados do estudo.

4. Resultados

Os resultados do processo de otimização para a movimentação dos veículos entre as unidades de serviço de campo são apresentados na Tabela 3. Observa-se que a demanda apresentada na Tabela 1, para cada unidade, foi atendida completamente. Como resultado da função objetivo, obteve-se o valor de 10.934,56 Km que minimiza o deslocamento total dos veículos entre as unidades de serviço de campo.

Tabela 3: Resultado da otimização

Unidade de Serviço de Campo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	Q	R
C	2	4	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-
D	-	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J	-	-	-	-	-	-	-	3	1	-	-	-	1	1	-	-	-
M	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	2	4	-	-	-	9	2	3	3	-	-	-	1	3	-	-	-

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Além disso, a Tabela 3 apresenta a combinação ótima para a distribuição dos veículos entre as unidades de serviço de campo tendo como origem as unidades C, D, J e M para os destinos A, B, F, G, H, I, N e O. De acordo com Lachtermacher (2016), a solução ótima pode ser definida como uma solução viável que tem o valor mais favorável da função objetivo, que neste estudo, busca minimizar o deslocamento total.

Em seguida, os resultados foram expostos ao grupo de especialistas da empresa e com base na proposta de distribuição dos veículos foi elaborado o plano de ação para o deslocamento e movimentações entre as unidades de serviço de campo. Cabe notar que, por se tratar de um rodízio, a quantidade de veículos movimentados entre as unidades é de 54 ao total, visto que,

são enviados 27 veículos com reduzida rodagem e recebidos na origem a mesma quantidade de veículos com elevada rodagem.

Tabela 4: Descrição dos custos da operação

Descrição	Item
Número de veículos	54
Deslocamento total em Km	21.869,12
Média Km/Litro	12,00
Litros de combustível	1.822
Custo do litro de diesel	3,85
Custo Total com Veículos	R\$ 7.016,34
Custo diário da refeição	R\$ 30,00
Custo Total Com Refeições	R\$ 1.620,00
Custo Total Final	R\$ 8.636,34

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Por fim, foram estimados os custos totais da operação considerando o deslocamento dos 54 veículos entre as unidades de serviço de campo e o custo diário com refeições do colaborador em trânsito. A Tabela 4 apresenta o custo total de R\$ 8.636,34 para a operação de movimentação dos veículos entre as unidades.

5. Conclusão

As distribuidoras de energia elétrica apresentam um elevado volume de atividades que estão relacionados com os deslocamentos de equipes multitarefas até as unidades consumidoras, subestações de energia ou manutenção das redes elétricas. Além disso, tais atividades são fundamentais para garantir a continuidade e manutenção dos indicadores de DEC e FEC.

O presente trabalho teve como objetivo principal propor um modelo de otimização para o rodízio de veículos do tipo cesto das equipes multitarefas em uma distribuidora de energia elétrica localizada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. No presente estudo, foi possível utilizar Programação Linear para solucionar um problema real de logística, destacando a importância da Pesquisa Operacional para o auxílio na tomada de decisão.

Como principal resultado da aplicação do modelo proposto, obteve-se 21.869,12 Km de deslocamento total para o rodízio de 54 veículos entre as unidades de serviço de campo e custo total da operação de R\$ 8.636,34. Outro ponto a ser destacado é o potencial da aplicação de um método estruturado para a movimentação de veículos que até o momento não havia sido

aplicado na empresa. Por fim, a sistemática utilizada e apresentada neste artigo pode ser amplamente utilizada para a redução de custos nas distribuidoras de energia elétrica.

Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização do método proposto com incremento de novas restrições, como a lista de prioridade de movimentação, a aplicação dos custos gerais do veículo incluindo desgastes e por fim, a utilização da dimensão tempo. Além disso, sugere-se a utilização do método proposto para resolver outros problemas da família dos problemas de roteamento de veículos mais complexos, como exemplo o problema de roteamento com entrega seguido de coleta, coleta e entrega simultânea, entre outros.

REFERÊNCIAS

- ABRADEE. Associação Brasileira das Distribuidoras de Energia Elétrica. **A distribuição de energia**. Disponível em: <www.abradee.com.br>. Acesso em: 22 mar 2021.
- ANEEL. Agência Nacional De Energia Elétrica. **Regulação do Setor Elétrico**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/regulacao-do-setor-eletrico>>. Acesso em: 22 mar 2021.
- ANTUNES, T. S. et al. An Internal Benchmarking Efficiency Evaluation of a Brazilian Electrical Distributor Using Data Envelopment Analysis (DEA): A Case of Study. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 3, p. 437–445, 2021.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de administração, contabilidade e economia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9. ed. São Paulo: Bookman, 2013.
- LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2012.
- PESSANHA, J. F. M.; SOUZA, R. C.; DA COSTA LAURENCEL, L. Um modelo de análise envoltória de dados para o estabelecimento de metas de continuidade do fornecimento de energia elétrica. **Pesquisa Operacional**, v. 27, n. 1, p. 51–83, 2007.
- RODRIGUES, L. H. et al. **Pesquisa operacional : programação linear passo a passo : do entendimento do problema à interpretação da solução**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2014.
- VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 195–219, 2002.
- YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.