

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

EDUARDO CASARIN

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DE
ROTAS PARA MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO CAMINHÃO ELÉTRICO**

Curitiba

2022

EDUARDO CASARIN

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DE
ROTAS PARA MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO CAMINHÃO ELÉTRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof.^a Dra. Ana Paula Oening

Coorientador: Prof.^a Dra. Signie Laureano
França Santos

Curitiba

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Casarin, Eduardo.

Desenvolvimento de metodologia de otimização de rotas para manutenção de redes de distribuição de energia elétrica utilizando caminhão elétrico. / Eduardo Casarin. – Curitiba: LACTEC: IEP, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de concentração – Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP).

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Oening.

Coorientador: Profa. Dra. Signie Laureano França Santos.

1. Energia elétrica. 2. Redes elétricas – distribuição. 3. Veículos elétricos. 4. Metodologia de roteirização. I. Oening, Ana Paula. II. Santos, Signie Laureano França. III. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. IV. Instituto de Engenharia do Paraná. V. Título.

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Júnior CRB-9/1797

TERMO DE APROVAÇÃO

EDUARDO CASARIN

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DE ROTAS PARA MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO CAMINHÃO ELÉTRICO

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:


Ana Paula Oening

Ana Paula Oening (24 de February de 2022 08:08) (SPT-0)

ORIENTADOR (A): Prof.ª Dr.ª Ana Paula Oening
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)


Lúcio de Medeiros

Lúcio de Medeiros (24 de February de 2022 08:07) (SPT-0)

Prof. Dr. Lúcio de Medeiros
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)


Lutz Felipe Ribeiro Barrozo Toledo

Prof. Dr. Lutz Felipe Ribeiro Barrozo Toledo
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)


Marilena Klein

Marilena Klein (24 de February de 2022 08:17) (SPT-0)

Prof.ª Dr.ª Marilena Klein
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 22 de fevereiro de 2022.

Dedico este trabalho a todos que me ajudaram ao longo dessa caminhada.

RESUMO

As atividades de manutenções das redes de distribuição de energia elétrica constituem-se como uma ferramenta na busca pelo atendimento dos anseios da sociedade por um sistema de fornecimento de eletricidade cada vez mais robusto. Os indicadores regulados impõem às concessionárias de distribuição de energia elétrica a frequente manutenção em suas redes e investimentos nas manutenções. Atualmente as manutenções são realizadas utilizando-se caminhões equipados com cestas aéreas e alimentados com combustível fóssil e sem uma roteirização visando o menor deslocamento e o menor custo possível para atender na íntegra as atividades de manutenções necessárias. A inserção de novas tecnologias como os caminhões elétricos traz questionamentos acerca da viabilidade da substituição dos caminhões movidos à combustível fóssil por modelos movidos a energia elétrica. Neste trabalho é desenvolvida uma metodologia de roteirização aplicada a um caminhão elétrico equipado com cesta aérea em atividades de manutenções de redes de distribuição de energia elétrica nas cidades de Mairiporã e Atibaia, ambas do Estado de São Paulo. O trabalho visa analisar os limites de deslocamentos do caminhão elétrico diante da autonomia da bateria e se existe ou não a necessidade de recargas intermediárias. A metodologia proposta atende aos objetivos uma vez que com sua aplicação obtém-se a menor rota possível, realizando todas as atividades previstas e identificando a necessidade ou não de recargas intermediárias.

Palavras-chave: Roteirização; Caminhão elétrico; Otimização de rotas; Manutenção; Redes de distribuição de energia elétrica.

ABSTRACT

The maintenance activities of the electricity distribution networks constitute a tool in the search for meeting the desires of society for an increasingly robust electricity supply system. The regulated indicators require electricity distribution concessionaires to frequently maintain their networks and invest in maintenance. Currently, maintenance is carried out using trucks equipped with aerial baskets and fed with fossil fuel and without routing, aiming at the smallest displacement and the lowest possible cost to fully meet the necessary maintenance activities. The insertion of new technologies such as electric trucks raises questions about the feasibility of replacing fossil fuel-powered trucks with electric-powered models. This work develops a routing methodology applied to an electric truck equipped with an aerial basket in maintenance activities of electricity distribution networks in the cities of Mairiporã and Atibaia, both in the State of São Paulo. The work aims to analyze the limits of displacements of the electric truck in the face of battery autonomy and whether or not there is a need for intermediate recharges. The proposed methodology meets the objectives since, with its application, the shortest possible route is obtained, carrying out all the planned activities and identifying the need or not for intermediate recharges.

Keywords: Scripting; Electric Truck; Route Optimization; Maintenance; Electric Power Distribution Networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – SISTEMA DE GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	14
Figura 2 – RELAÇÃO ENTRE FROTA CIRCULANTE E IDADE MÉDIA DE CAMINHÕES NO BRASIL.....	16
Figura 3 – CONTRIBUIÇÃO POR CATEGORIA DE VEÍCULOS NAS EMISSÕES DE GEE EM CO _{2eq} NO ESTADO DE SÃO PAULO EM 2019.....	16
Figura 4 – EMISSÕES TOTAIS DE CO ₂ EM MILHARES DE TONELADAS POR SETOR.....	17
Figura 6 – EXEMPLO DE PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE.....	29
Figura 7 – SOLUÇÃO DO EXEMPLO DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE .	32
Figura 8 – EXEMPLO DE ROTA DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE ELÉTRICO	35
Figura 9 – FLUXOGRAMA DE ENCADEAMENTO DO MÉTODO	51
Figura 10 – LAYOUT GERAL DO CONJUNTO CAMINHÃO À DIESEL, CESTA AÉREA E CARROCERIA ATUALMENTE ATUALIZADO.....	59
Figura 11 – LAYOUT GERAL DO CONJUNTO CAMINHÃO ELÉTRICO, CESTA AÉREA E CARROCERIA	62
Figura 12 – DIVISÃO DAS EQUIPES NA CIDADE DE MAIRIPORÃ (POLIGONAIS)	64
Figura 13 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE MAI-01	65
Figura 14 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE MAI-02	66
Figura 15 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE MAI-03	67
Figura 16 – TRAJETO OTIMIZADO PARA MAIRIPORÃ – EQUIPE MAI-01, 03/11/2020	69
Figura 17 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE ATI-01	70
Figura 18 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE ATI-02	72
Figura 19 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE ATI-03	73
Figura 20 – TRAJETO OTIMIZADO PARA ATIBAIA – ATI-02, 03/11/2020	75
Figura 21 – TRAJETO OTIMIZADO PARA ATIBAIA – ATI-02, 06/11/2020	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – EIXOS E PALAVRAS-CHAVE PESQUISADOS.....	41
Tabela 2 – RESULTADO DA PESQUISA NO GOOGLE SCHOLAR, SCOPUS E CROSSREF	42
Tabela 3 – RESUMO DOS TRABALHOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS A COMBUSTÃO DOS PRINCIPAIS AUTORES	44
Tabela 4 – RESUMO DOS TRABALHOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS DOS PRINCIPAIS AUTORES.....	49
Tabela 5 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO .	63
Tabela 6 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE MAI-01 DE 03/11/2020 A 06/11/2020	65
Tabela 7 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE MAI-02 DE 03/11/2020 A 06/11/2020	66
Tabela 8 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE MAI-03 DE 03/11/2020 A 06/11/2020	67
Tabela 9 – RESUMOS DOS DESLOCAMENTOS DAS TRÊS EQUIPES DE MAIRIPORÃ NO PERÍODO DE 03/11/2020 A 06/11/2020 COM CAMINHÃO ELÉTRICO	68
Tabela 10 – RESUMOS DOS DESLOCAMENTOS DAS TRÊS EQUIPES DE MAIRIPORÃ NO PERÍODO DE 03/11/2020 A 06/11/2020 COM CAMINHÃO À COMBUSTÃO	68
Tabela 11 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE ATI-01 DE 03/11/2020 A 06/11/2020	70
Tabela 12 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE ATI-02 DE 03/11/2020 A 06/11/2020	71
Tabela 13 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE ATI-03 DE 03/11/2020 A 06/11/2020	72
Tabela 14 – RESUMOS DOS DESLOCAMENTOS DAS TRÊS EQUIPES DE ATIBAIA NO PERÍODO DE 03/11/2020 A 06/11/2020 COM CAMINHÃO ELÉTRICO	73
Tabela 15 – RESUMOS DOS DESLOCAMENTOS DAS TRÊS EQUIPES DE ATIBAIA NO PERÍODO DE 03/11/2020 A 06/11/2020 COM CAMINHÃO À COMBUSTÃO ...	74
Tabela 16 – CUSTOS DE AQUISIÇÃO DE CAMINHÕES À COMBUSTÃO E ELÉTRICO	77

Tabela 17 – CUSTOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE CAMINHÕES À COMBUSTÃO E ELÉTRICO	78
Tabela 18 – ESTIMATIVA DE CUSTO ANUAL COM COMBUSTÍVEL FÓSSIL E ELETRICIDADE	78
Tabela 19 – COMPARATIVO ENTRE CUSTOS DE AQUISIÇÃO, MANUTENÇÃO PREVENTIVA E COMBUSTÍVEL DE CAMINHÕES ELÉTRICOS E À COMBUSTÃO	79
Tabela 20 – EQUIDADE DE CUSTOS DO CAMINHÃO À COMBUSTÃO E CAMINHÃO ELÉTRICO	80
Tabela 21 – PLANEJAMENTO MAI-01, DIA 03/11/2020	95
Tabela 22 – PLANEJAMENTO MAI-01, DIA 04/11/2020	95
Tabela 23 – PLANEJAMENTO MAI-01, DIA 05/11/2020	96
Tabela 24 – PLANEJAMENTO MAI-01, DIA 06/11/2020	96
Tabela 25 – PLANEJAMENTO MAI-02, DIA 03/11/2020	97
Tabela 26 – PLANEJAMENTO MAI-02, DIA 04/11/2020	97
Tabela 27 – PLANEJAMENTO MAI-02, DIA 05/11/2020	98
Tabela 28 – PLANEJAMENTO MAI-02, DIA 06/11/2020	98
Tabela 29 – PLANEJAMENTO MAI-03, DIA 03/11/2020	99
Tabela 30 – PLANEJAMENTO MAI-03, DIA 04/11/2020	99
Tabela 31 – PLANEJAMENTO MAI-03, DIA 05/11/2020	100
Tabela 32 – PLANEJAMENTO MAI-03, DIA 06/11/2020	100
Tabela 33 – PLANEJAMENTO ATI-01, DIA 03/11/2020	102
Tabela 34 – PLANEJAMENTO ATI-01, DIA 04/11/2020	102
Tabela 35 – PLANEJAMENTO ATI-01, DIA 05/11/2020	103
Tabela 36 – PLANEJAMENTO ATI-01, DIA 06/11/2020	103
Tabela 37 – PLANEJAMENTO ATI-02, DIA 03/11/2020	104
Tabela 38– PLANEJAMENTO ATI-02, DIA 04/11/2020	104
Tabela 39 – PLANEJAMENTO ATI-02, DIA 05/11/2020	105
Tabela 40 – PLANEJAMENTO ATI-02, DIA 06/11/2020	105
Tabela 41 – PLANEJAMENTO ATI-03, DIA 03/11/2020	106
Tabela 42 – PLANEJAMENTO ATI-03, DIA 04/11/2020	106
Tabela 43 – PLANEJAMENTO ATI-03, DIA 05/11/2020	107
Tabela 44 – PLANEJAMENTO ATI-03, DIA 06/11/2020	107

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	– Alta Tensão
BT	– Baixa Tensão
DEC	– Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
EDC	– Estado de Carga
FEC	– Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
MT	– Média Tensão
OMS	– Organização Mundial da Saúde
PCV	– Problema do Caixeiro Viajante
PCVE	– Problema do Caixeiro Viajante Elétrico
PRODIST Nacional	– Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PRV	– Problema de Roteirização de Veículos
PRVE	– Problema de Roteirização de Veículos Elétricos
VCI	– Veículo de Combustão Interna
VE	– Veículo Elétrico
VCA	– Veículos com Combustíveis Alternativos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTO	14
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Objetivos Específicos	20
1.3	JUSTIFICATIVA	20
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Manutenção de redes de distribuição de energia elétrica	23
2.2	Veículos elétricos	24
2.3	Métodos de roteirização	28
2.3.1	Problema do Caixeiro Viajante (PCV).....	28
2.3.2	Problema do Caixeiro Viajante Elétrico (PCVE)	34
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	41
3.1	Metodologia de pesquisa	41
3.1.1	Aplicações de problemas de roteirização na literatura	43
3.1.2	Problema de roteirização utilizando veículos elétricos	44
4	MATERIAIS E MÉTODO	50
4.1	MATERIAIS.....	50
4.2	MÉTODO.....	50
4.2.1	Levantamento dos dados.....	51
4.2.2	Modelagem do problema de roteirização.....	51
4.2.3	Testes e validação do modelo	56
4.2.4	Viabilidade de implementação do caminhão elétrico	57
5	RESULTADOS	58
5.1	LEVANTAMENTO DOS DADOS.....	58
5.2	PARÂMETRO UTILIZADOS NA MODELAGEM DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO.....	62

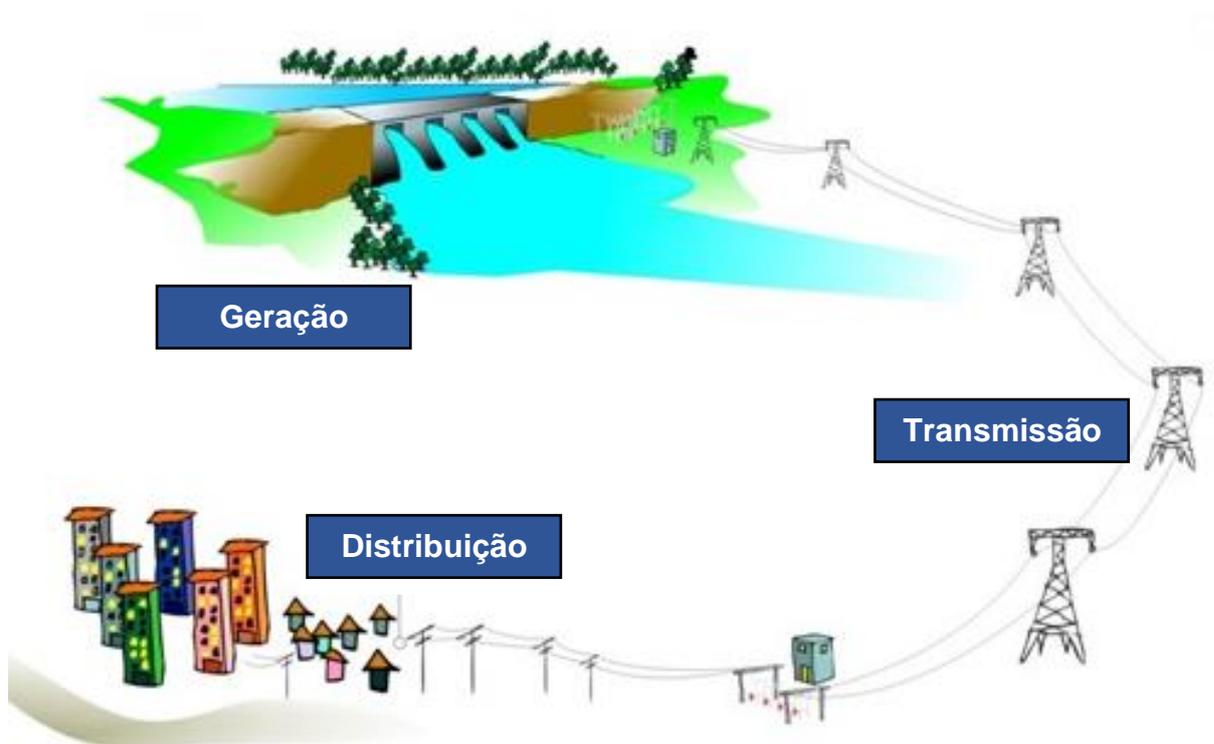
5.3	TESTES E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	63
5.3.1	Resultados relativos à Mairiporã.....	63
5.3.2	Resultados relacionados à Atibaia.....	69
5.4	Análise comparativa de custos do caminhão elétrico e caminhão a combustão 77	
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	82
6.1	TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE 1 – Planejamento da roteirização para as cidades de Mairiporã e Atibaia.....	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Segundo a ABRADEE (2018), o sistema de distribuição de energia elétrica é composto por redes que se fundem à topografia das áreas urbanas e rurais, para que possam conectar fisicamente o sistema com os consumidores, que podem ser residenciais, comerciais, industriais e serviços públicos. Tais redes necessitam de manutenção constante, sendo estas preventivas ou corretivas, uma vez que o fornecimento ininterrupto e de qualidade é fundamental. A Figura 1 ilustra o sistema de geração, transmissão e distribuição.

FIGURA 1 – SISTEMA DE GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA



FONTE: Adaptado de ANEEL (2018)

De forma a atender os parâmetros de qualidade e continuidade de energia elétrica necessários à sociedade, porém sem onerar significativamente as empresas de distribuição de energia elétrica, o manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (ANEEL, 2018), em seu

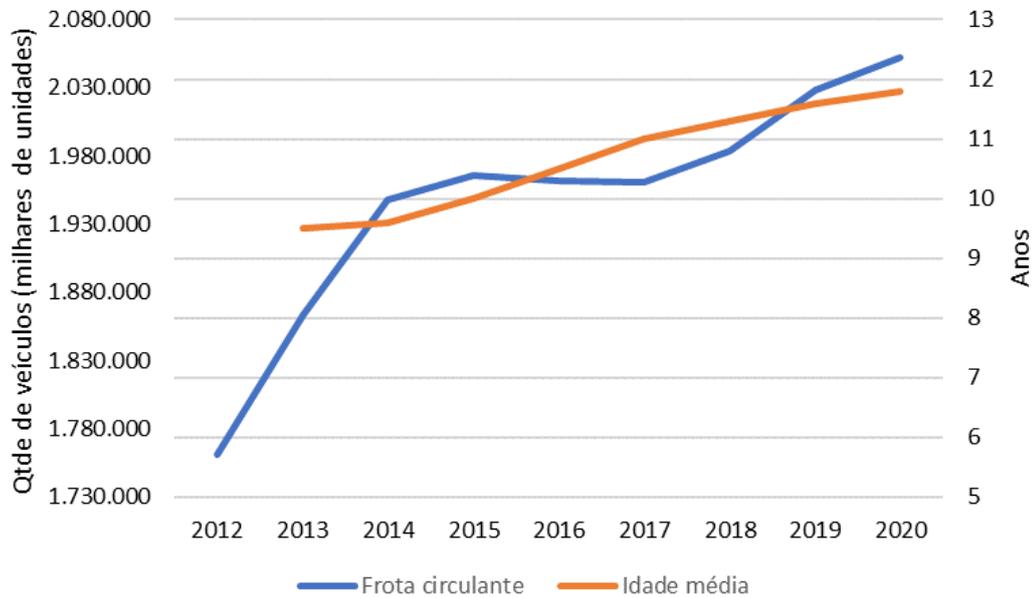
módulo 8 define a qualidade dos serviços prestados e do produto distribuído por operadores e fornecedores de energia elétrica. Este módulo apresenta alguns parâmetros que balizam os critérios, sendo eles o DEC (duração equivalente de interrupção por unidade consumidora) e FEC (frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora). Tais parâmetros regulamentam o setor de distribuição de energia elétrica bem como impõem às concessionárias de distribuição de energia elétrica a necessidade constante de investimentos em manutenção e melhoria contínua de seus sistemas de distribuição.

Para realizar as manutenções em seus sistemas de distribuição de energia elétrica as concessionárias utilizam de modo geral e abrangente veículos à combustão normalmente movidos à diesel, dotados de equipamentos hidráulicos instalados sobre os mesmos. Porém tais veículos trazem consigo os rotineiros problemas relacionados à poluição do meio ambiente, frente ao combustível que utilizam e o alto custo de manutenção preventiva e corretiva.

É indiscutível que estamos inseridos numa sociedade cada vez mais preocupada com a sustentabilidade, na qual as discussões acerca da poluição do ar em grandes centros urbanos, as emissões de efeito estufa, o aquecimento global e a segurança energética cada vez mais se tornam relevantes em políticas públicas (BOON & BAKKER, 2016; NYKVIST & NILSSON, 2015a).

Neste cenário relacionado a emissão de gases poluentes estão os caminhões os quais são grandes emissores, principalmente pelo combustível que utilizam. A Figura 2 ilustra a relação entre a quantidade da frota circulante de caminhões no Brasil e a idade média dessa mesma frota, onde nota-se que a idade média varia de 9,5 anos à pouco mais de 11 anos, considerada alta e, portanto, uma grande fonte de emissão de gases poluentes.

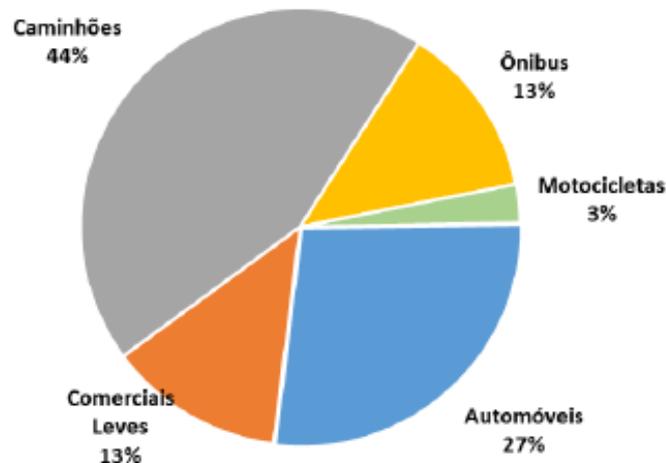
FIGURA 2 – RELAÇÃO ENTRE FROTA CIRCULANTE E IDADE MÉDIA DE CAMINHÕES NO BRASIL



FONTE: Adaptado de SINDIPEÇAS (2021)

De acordo com o relatório de emissões veiculares no Estado de São Paulo, emitido pela CETESB em 2019, a participação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem como maior contribuinte os caminhões que respondem por 44% das emissões, conforme apresentado na Figura 3.

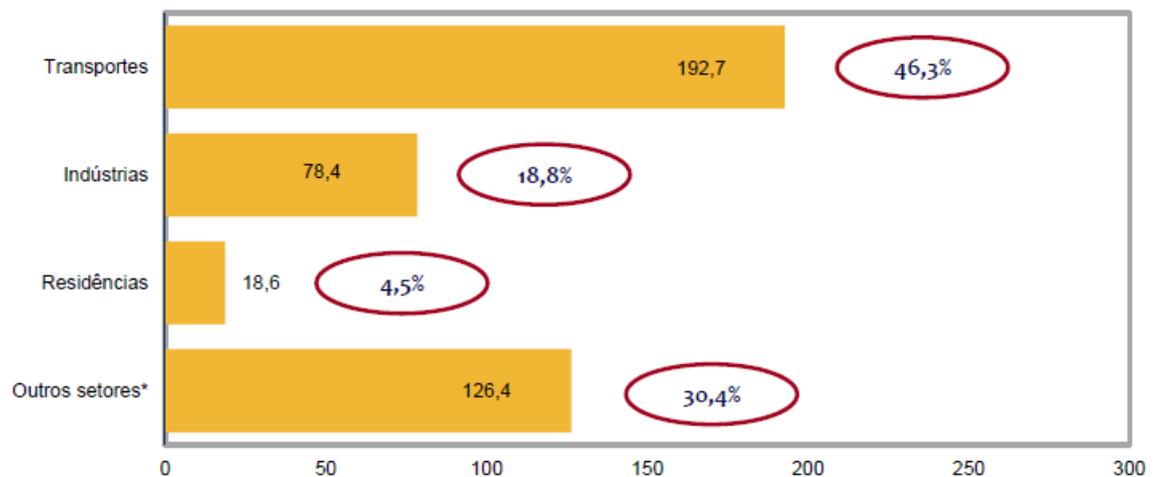
FIGURA 3 – CONTRIBUIÇÃO POR CATEGORIA DE VEÍCULOS NAS EMISSÕES DE GEE EM CO₂EQ NO ESTADO DE SÃO PAULO EM 2019



FONTE: CETESB (2019)

Consoante com o relatório emitido pela CETESB, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) apresentou em seu relatório síntese o balanço energético nacional de 2019 e, como apresentado na Figura 4, o setor de transportes é o que mais contribui para as emissões totais de CO₂, em milhares de toneladas.

FIGURA 4 – EMISSÕES TOTAIS DE CO₂ EM MILHARES DE TONELADAS POR SETOR



* inclui os setores agropecuário, serviços, energético, elétrico e as emissões fugitivas

FONTE: EPE (2019)

Dentro deste contexto é notório que o ar que 95% da população mundial respira atualmente é considerado de má qualidade (HEI, 2018) e além disso, mais da metade da população que habita regiões ou grandes centros urbanos, está exposta à níveis de poluição 2,5 vezes maiores do que àqueles recomendados pela OMS – Organização Mundial de Saúde (WHO, 2018).

Segundo Struben & Sterman (2008), uma das maneiras de minimizar tais impactos e reduzi-los à níveis aceitáveis é através das inovações tecnológicas com viés sustentável, como os veículos elétricos, por exemplo. Porém no caminho desta tentativa de criação, desenvolvimento e difusão de modelos tecnológicos sustentáveis, surgem as dificuldades, não somente de cunho tecnológico ou técnico, mas principalmente as barreiras e restrições sociais, institucionais e governamentais.

De acordo com Smith, Voß & Grin (2010), a introdução de veículos elétricos, não esbarra somente na fronteira tecnológica em si (veículo propriamente dito), mas também em tudo aquilo que circunda este universo, como as infraestruturas físicas e

sociais. Para que estes veículos, os mesmos necessitam de estradas e rodovias adequadas, postos de abastecimento (no caso os carregadores), adequação das leis de trânsito, políticas públicas, infraestrutura de manutenção e reparo, concessionárias e assistência técnica.

Neste cenário no qual os grandes setores da economia tais como os de suprimentos de águas, suprimentos de energia e transportes, Geels (2002) e Markard et al. (2012) conceitualizam os mesmos como os setores sócio-técnicos (indivíduos, empresas, entre outros), instituições (normas, regulações e padrões sociais e técnicos), artefatos materiais (produtos, infraestruturas, entre outros) e conhecimento, os quais estão se adaptando e reinventando à medida que as evoluções tecnológicas os enquadram.

Os principais *frameworks* que conceituam esta ótica são os Sistemas Tecnológicos de Inovação (TIS, do inglês *Technological Innovation System*) e a Perspectiva de Multiníveis (MLP, do inglês *Multilevel Perspective*) (MARKARD et al., 2012), onde a TIS tem uma maior preocupação com o funcionamento do sistema e para que a mesma obtenha sucesso são necessários: (1) atividades empreendedoras, (2) desenvolvimento de conhecimento, (3) difusão de conhecimento pelas redes, (4) orientação de pesquisa, (5) formação de mercado, (6) mobilização de recursos e (7) criação de legitimidade (HEKKERT, SUURS, NEGRO, KUHLMANN & SMITS, 2007) e por outro lado, a MLP apresenta uma visão mais abrangente, visando compreender como uma transição ocorre, segregando o framework de transições em três níveis: ambiente sócio-técnico, regime e nicho (GEELS, 2002).

No ambiente sociotécnico, os fatores externos e os de nível macro tais como mudanças demográficas, novos paradigmas científicos, reestruturação econômica e desenvolvimentos culturais, são os que geram as maiores pressões para que o regime se altere (SMITH, et al., 2010) que, neste caso de mobilidade, seriam os veículos como motor à combustão interna e todo o sistema que o permeia, fazendo que o mesmo opere de forma satisfatória.

Já os regimes sociotécnicos, criam e recriam condições para que continuem dominando, se estabilizando através de economia de escala e escopo, aprendizado social e custos afundados em infraestrutura (DJIK, 2016). Ou seja, após uma dada tecnologia ser escolhida, alguns fatores como economia de escala e costumes dos

usuários o “prendem” na utilização desta tecnologia, pois o custo envolvido para a mudança de tecnologia é muito alto.

E por último os nichos, os quais são conceitualizados como espaços protegidos, ou seja, com mercados e aplicações específicas em alguns domínios, no qual as inovações radicais podem se desenvolverem sem estarem sujeitas à pressão de seleção do regime prevalente (KEMP, SCHOT, & HOOGMA, 1998), no qual se encaixam os veículos elétricos.

Dentro deste cenário de inovação, a inserção de caminhões movidos a eletricidade para a manutenção das redes de distribuição de energia elétrica torna-se uma opção. Além da inovação que trazem por si só, também contribuem para a redução das emissões de gases tóxicos, bem como apresentam oportunidades a serem exploradas, tais como a recarga de oportunidade na própria rede de distribuição de energia elétrica da Neoenergia Elektro e também como uma fonte móvel de energia elétrica, podendo atuar em momentos emergenciais como fornecedores de energia elétrica para a própria rede de distribuição ou consumidores com necessidades pontuais e específicas.

Sabe-se que os caminhões elétricos ainda apresentam uma autonomia reduzida quando comparada com modelos movidos à combustível fóssil, porém à medida em que as tecnologias avançam e ocorrem novos desenvolvimentos de baterias, a tendência é que num futuro próximo os caminhões elétricos possam ter autonomia muito próximas dos caminhões movidos à combustível fóssil.

Neste sentido, o desenvolvimento de soluções em mobilidade elétrica vem sendo almejado. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) lançou a chamada estratégica intitulada P&D nº 22: “Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica Eficiente” como forma de incentivar a eletromobilidade. Neste contexto, este trabalho é relacionado ao PD-00385-0069 – “Desenvolvimento de caminhão elétrico para manutenção de redes de distribuição”, com conjunto inteligente para o gerenciamento de recarga e sistema seguro e eficiente para recargas do veículo na própria rede da Neoenergia Elektro.

A inserção de caminhões elétricos para a manutenção de redes de distribuição demanda planejamento em busca da rota ótima para a realização de tais atividades uma vez que esse tipo de veículo possui restrições quanto à autonomia e disponibilidade de pontos de recarga, diferentemente do modelo atual o qual utiliza

modelos de caminhões movidos à combustão. Dentro desse cenário esse trabalho se propõe a desenvolver uma metodologia de roteirização utilizando caminhão elétrico para a manutenção de redes de distribuição de energia elétrica.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia de otimização de rotas aplicada a caminhões elétricos na manutenção de redes de distribuição de energia elétrica visando a redução nos custos operacionais.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- Analisar os métodos do Problema do Caixeiro Viajante e Problema do Caixeiro Viajante Elétrico de otimização de roteirização aplicados em frotas.
- Selecionar o método de otimização de roteirização mais adequado ao problema proposto.
- Modelar matematicamente o problema de roteirização, com base em um modelo selecionado, de acordo as premissas técnicas do caminhão elétrico objeto do P&D.
- Aplicar a metodologia de roteirização indicada neste trabalho para os caminhões elétricos na manutenção de redes de distribuição de energia elétrica.
- Realizar uma análise comparativa de custos entre o caminhão à combustão fóssil e o caminhão elétrico, visando a inserção de caminhões elétricos na manutenção de redes de distribuição de energia elétrica.

1.3 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho tem por base a distribuidora de energia elétrica Neoenergia Elektro, a qual dentre suas inúmeras atividades, realiza a manutenção

das redes de distribuição de energia elétrica utilizando caminhões à combustão e não aplica nenhuma metodologia de roteirização para que os caminhões possam seguir o caminho mais eficiente para realizar as manutenções da rede de distribuição de energia elétrica.

Os colaboradores após receberem as atividades a serem executadas durante um dia de trabalho iniciam o deslocamento, porém não tem explícito o caminho ótimo a ser seguido visando otimizar o deslocamento, reduzir os tempos e os custos associados.

Isso ocorre devido ao fato de o caminhão à combustão não apresentar restrições quanto aos pontos de abastecimentos que são fartos e de fácil obtenção caso haja necessidade de reabastecimento. Além disso, o caminhão à combustão apresenta autonomia suficiente para realização das atividades propostas para o dia de trabalho, na maioria das vezes, sem a necessidade de reabastecimento intermediário.

O caminhão elétrico apresenta como limitantes sua autonomia em relação a um caminhão à combustão de mesma categoria e também o tempo de recarga da bateria, sendo este maior que no modelo à combustão.

No entanto, existem diversas vantagens a serem exploradas como o planejamento da roteirização para o máximo aproveitamento da autonomia do caminhão elétrico, assim como a recarga de oportunidade durante o próprio deslocamento e a recarga completa nos períodos em que o caminhão elétrico estiver fora de serviço, além do alinhamento com as tendências de mercado voltadas às tecnologias de veículos elétricos e redução da poluição ambiental.

Dentro deste cenário este trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia de otimização de roteirização para a manutenção de rede de distribuição de energia elétrica e uma análise comparativa de custos visando a inserção de caminhões elétricos equipados com cesta aérea, sendo estas duas lacunas de oportunidades identificadas para o estudo.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1 foram apresentados o contexto da problematização, os objetivos do trabalho e a justificativa do mesmo.

No Capítulo 2 são apresentadas as classificações dos tipos de manutenção aplicadas em redes de distribuição de energia, tanto em redes energizadas quanto desenergizadas, a segregação dos tipos de veículos elétricos através de suas configurações principais e também os problemas de roteirização como o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e o Problema do Caixeiro Viajante Elétrico (PCVE), procurando nivelar os conhecimentos necessários para a compreensão deste trabalho.

No Capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica deste trabalho, onde são apresentadas e analisadas as publicações relevantes e inerentes ao tema.

O Capítulo 4 apresenta os materiais e métodos incluindo o fluxograma da metodologia da análise desenvolvida, o modelo matemático adotado para a roteirização, os detalhes da base de dados e suas considerações, a definição dos parâmetros e os experimentos numéricos.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados da aplicação da metodologia de roteirização em um caso prático e uma análise comparativa de custos para a inserção de caminhões elétricos na manutenção de redes de distribuição de energia elétrica.

No Capítulo 6 disserta-se sobre as conclusões da aplicação da metodologia de roteirização, sobre a análise comparativa dos custos de inserção de caminhões elétricos para a manutenção de redes de distribuição de energia elétrica e propõem-se os trabalhos futuros visando atualização com relação à novas tecnologias e, portanto, novas oportunidades relativas à roteirização e inserção de caminhões elétricos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Tomou-se como bases teóricas para as análises desenvolvidas neste trabalho primeiramente as definições que auxiliam no entendimento da conceituação das manutenções aplicadas nas redes de distribuição de energia elétrica, suas classificações e abordagens correlacionadas. Em um segundo momento apresenta-se uma breve introdução aos veículos elétricos e suas principais classificações. A última abordagem teórica apresenta os problemas de roteirização como o Problema do Caixeiro Viajante e o Problema do Caixeiro Viajante Elétrico.

2.1 Manutenção de redes de distribuição de energia elétrica

De acordo com Melo (2003) a energia elétrica produzida na usina geradora é transmitida às subestações abaixadoras através das linhas de transmissão, em Alta Tensão (AT – tensões acima de 69 kV). As subestações abaixadoras transformam a energia de Alta para Média Tensão (MT – normalmente tensões de 7 kV a 69 kV). A energia é então conduzida aos diversos bairros através das linhas de distribuição primárias (em MT) até os transformadores de distribuição, instalados nos postes. Dos transformadores de distribuição para os consumidores industriais e comerciais de pequeno porte e grupos residenciais, a energia é conduzida pelas linhas de distribuição secundárias, em Baixa Tensão (BT – normalmente tensões entre 127 V a 440 V).

Segundo Dhillon (2006), a manutenção pode ser conceituada como sendo as ações necessárias para manter um sistema operante ou restaurá-lo, para uma condição que seja satisfatória capaz de executar sua função e pode ser classificada em três tipos básicos que são a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva, onde cada uma delas possui uma forma de aplicação e um momento certo para ser realizada.

As manutenções corretivas podem ser classificadas em dois tipos distintos: manutenção corretiva não planejada e manutenção corretiva planejada.

Para Nascif (2009), a manutenção preventiva é caracterizada pela ação para reduzir ou evitar falhas ou queda no desempenho do sistema, tomando por base um

plano previamente elaborado, baseado em intervalos de tempo pré-definidos, sendo que o foco principal desse tipo de manutenção visa a prevenção.

Segundo Nascif (2009) a manutenção preditiva tem como principal ação prever uma vez que a atuação é realizada com base em modificações e/ou alterações nos parâmetros de condição/controle ou desempenho e cujo acompanhamento obedece a uma sistemática.

A manutenção de redes elétrica de distribuição de média e baixa tensão e em linhas de transmissão pode ser realizada com a rede desenergizada (linha morta), porém também pode ser realizado com a rede energizada (linha viva).

De acordo com a NR 18 – Condições de Segurança e Saúde no Trabalho na Indústria da Construção - os trabalhos executados em linhas energizadas, ou seja, linha viva, somente devem ser realizados mediante a adoção de procedimentos e metodologias que garantam a segurança dos trabalhadores e estão associados às atividades realizadas na rede de alta tensão energizada mediante os métodos ao contato, à distância e ao potencial.

2.2 Veículos elétricos

De acordo com Khaligh & Li (2010) os veículos elétricos podem ser divididos em quatro tipos diferentes, conforme segue:

- a) Veículos elétricos à bateria: funcionam através de um motor elétrico o qual obtém energia diretamente de uma bateria, atualmente de lítio, chamados de BEVs (do inglês, Battery Electric Vehicles);
- b) Veículos elétricos de células de combustível: é um veículo elétrico com uma extensão alimentada por hidrogênio, o qual possui uma pequena bateria com capacidade de recarga rápida, pois a fonte primária é o hidrogênio. O hidrogênio ao entrar em contato com o gás oxigênio (O₂), gera uma corrente elétrica a qual carrega a bateria que fornece energia elétrica para o motor. Estes veículos são chamados de FCEVs (do inglês, Fuel Cell Electric Vehicles);
- c) Veículos híbridos: caracterizados por possuírem um tanque de combustível e um motor à combustão o qual serve como gerador de energia elétrica ao recarregar uma bateria de lítio, a qual fornecerá energia

elétrica para o motor elétrico. Estes veículos são chamados de HEVs (do inglês, Hybrid Electric Vehicles);

- d) Veículos híbridos plug-in: possuem as mesmas características dos veículos híbridos, porém podem ter suas baterias de lítio carregadas em uma tomada. Estes veículos são chamados de PHEVs (do inglês, Plug-in Hybrid Electric Vehicles).

De acordo com WWF (2017) os veículos elétricos apresentam vários benefícios tal como a diminuição dos custos de manutenção uma vez que possuem menos partes móveis e não há desgaste proveniente do sistema de combustão.

Os custos de reabastecimento também são menores podendo chegar à metade do gasto com um veículo abastecido com gasolina ou etanol.

Os veículos elétricos também são mais silenciosos e possuem mais torque que um veículo convencional, especialmente nas arrancadas e retomadas, além de benefícios adicionais como a redução de ou isenção de imposto sobre a propriedade de veículos automotores e isenção de rodízios.

A sociedade em geral também é beneficiada com a utilização de veículos elétricos uma vez que não há emissões de gases de efeito estufa, nem de outro gás poluente, o que contribui com a qualidade do ar nos grandes centros urbanos, uma vez que a poluição do ar agrava os problemas respiratórios, aumenta os riscos de doenças do coração, câncer, acidente vascular cerebral e infertilidade. No ano de 2015 as emissões provenientes do setor de transporte representaram mais de 10% do total das emissões brasileiras de gases de efeito estufa de acordo com WWF (2017).

Já os caminhões elétricos são uma realidade e estão cada vez mais presentes principalmente na Europa e Estados Unidos e grandes fabricantes mundiais já tem pelo menos um modelo em seu portfólio. Mesmo com um preço de aquisição podendo chegar a 3 ou 4 vezes maior que um modelo similar movido a combustível fóssil, o custo operacional dos caminhões elétricos pode chegar a ser em torno de até 65% a menos, segundo Myers (2021). A fabricante francesa Renault Trucks foi a primeira a lançar veículos elétricos para transporte de cargas em 2009, sendo que a gama inclui o Furgão Máster Z.E. e os caminhões D Z.E. e D Wide Z.E. com capacidades de 3,5 a 26 toneladas de Peso Bruto Total (P.B.T.), respectivamente.

De acordo com Myers (2021), a sueca Volvo apresentou durante o Salão de Hanover na Alemanha dois modelos de semipesados, o FE e o FL, com capacidades de 16 e 27 toneladas de Peso Bruto Total, respectivamente. A Tesla em 2017 também lançou o caminhão elétrico Tesla Semi, porém nesse caso trata-se de um cavalo mecânico. E outras montadoras também apresentam em seus portfólios caminhões elétricos como é o caso da Mercedes Benz com o Urban e-Truck, a chinesa Jac Motors com o iEV1200T e a também chinesa BYD com os modelos eT7 e eT8.

Segundo Franceschini (2021), no cenário nacional recentemente a Volkswagen lançou o e-Delivery sendo o primeiro caminhão nacional 100% elétrico plug-in de 10,7 toneladas de Peso Bruto Total, totalmente desenvolvido no Brasil, utilizando a engenharia local da empresa e também peças e componentes brasileiros. O veículo também foi apresentado no México e num evento de inovação global do Grupo Volkswagen na Europa.

Conforme Franceschini (2021), a inserção de caminhões elétricos no mercado nacional pode contribuir para alguns aspectos, tais como:

- A redução significativa das emissões de CO₂ e a conseqüente redução nos efeitos das mudanças climáticas;
- Possibilidade de desenvolvimento de novos modelos de negócios para o setor de energia elétrica;
- Avanços nas tecnologias de baterias, sistemas eletrônicos embarcados, telecomunicações, *smart grid* e produção de energia por fontes renováveis;
- Desenvolvimento das indústrias de motores, inversores de frequência e demais insumos da área de mobilidade elétrica;
- Contribuição na redução nas despesas com saúde e óbitos decorrentes da poluição por gases, redução nas emissões sonoras e melhoria na qualidade de vida das pessoas, e;
- Geração de emprego e renda.

Algumas barreiras ainda precisam ser vencidas com relação aos veículos elétricos, sendo uma das principais relacionadas ao barateamento das baterias e da capacidade de produzi-las em larga escala, que se desdobram também na redução de seu peso e aumento de sua autonomia, melhorando a eficiência dos veículos elétricos.

Porém o uso das baterias em larga escala de forma sustentável ainda esbarra em duas questões: a demanda por matéria-prima em sua produção e o descarte ao final de sua vida útil.

A principal e mais usual bateria de veículos elétricos tem como base o lítio, que é um metal alcalino cuja demanda pode superar a capacidade de oferta com o crescimento da produção de veículos elétricos o que estimula o desenvolvimento de outras tecnologias aplicáveis a baterias, segundo EPE (2018).

De acordo com EPE (2018), em contrapartida, as baterias e o lítio contido nelas podem ser reciclados o que reduz a necessidade de exploração contínua do metal. Outro fator positivo é que as baterias, após o fim de seu uso veicular, retem entre 70% e 80% da carga o que permitem que sejam em sistemas de backup ou geração distribuída, diminuindo o seu impacto sobre o ambiente.

Atualmente os grandes desafios para a adoção de veículos elétricos no Brasil está relacionada ao alto custo de aquisição e a ausência de infraestrutura de recarga capaz de atender as necessidades dos usuários.

A ausência da produção nacional de veículos elétricos em larga escala e de uma política pública de incentivo relacionada a redução de impostos faz com que mesmos os veículos elétricos mais baratos ainda estejam bem acima das condições de aquisição da maioria dos usuários.

Segundo EPE (2018), a disponibilidade de infraestrutura de recarga de veículos elétricos também é fator fundamental para a escalabilidade da difusão do modelo, havendo a necessidade de pontos de recarga em áreas públicas e privadas nos destinos e rotas de maior movimento, além de políticas públicas de incentivo e custos de reabastecimento acessíveis.

Via de regra os investimentos para o desenvolvimento do mercado de veículos elétricos e de infraestrutura de recarga são oriundos da iniciativa privada, sejam estes fabricantes, consumidores ou prestadores de serviços associados e, por isso, dependem da criação de modelos regulatórios e institucionais que incentivem e massifiquem esses investimentos.

2.3 Métodos de roteirização

A seguir é apresentada uma revisão sobre os problemas de roteirização como o Problema do Caixeiro Viajante e o Problema do Caixeiro Viajante Elétrico.

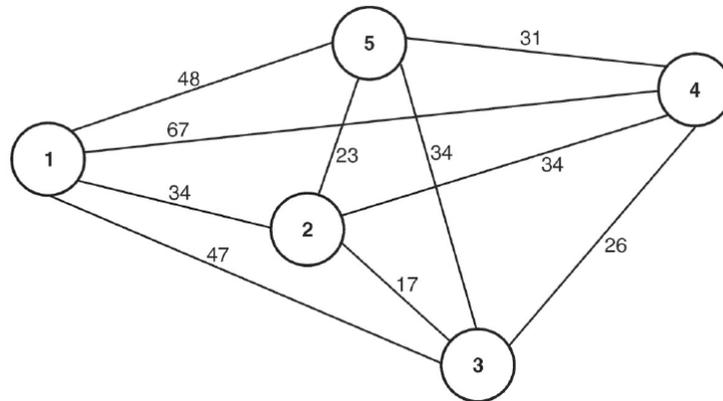
2.3.1 Problema do Caixeiro Viajante (PCV)

A formulação mais clássica do problema de roteirização consiste em definir rotas a serem seguidas de acordo com localizações pré-definidas, as quais são estudadas desde o século XVIII por Sir William Rowan Hamilton e Thomas Penyngton Kirkman e o problema carrega essa nomenclatura uma vez que em tempos passados existiam vendedores ambulantes de iguarias que passavam em cidades da região vendendo seus produtos.

O Problema do Caixeiro Viajante tem por objetivo encontrar o melhor caminho possível de visitar todas as cidades uma única vez e retornar para o ponto de partida de modo que o custo da viagem seja o menor possível, sendo o custo representado por tempo ou distância ou outra variável que vise a minimização. Sendo assim, para um conjunto que considera n cidades para serem visitadas, a quantidade total de possibilidades que para cobrir todas as cidades resulta em $(n - 1)!/2$ possibilidades, de acordo com Davendra (2010). Porém para problemas de grandes dimensões, ou seja, com maior quantidade de cidades, aumenta-se a dificuldade computacional para obtenção de uma solução viável ao problema.

Com a finalidade de ilustrar o Problema do Caixeiro Viajante, considere a Figura 5, na qual os círculos representam as cidades e as linhas sólidas são as rotas e/ou as ligações entre as cidades. Neste exemplo temos $n = 5$ cidades sendo que todas estão conectadas entre si, o que pode ser considerado um problema simétrico, devido ao fato de as rotas poderem ter duplo sentido.

FIGURA 5 – EXEMPLO DE PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE



FONTE: LACTEC et al. (2021)

No caso simétrico do Problema do Caixeiro Viajante, dado um conjunto de $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ de cidades, $A = \{(i, j): i, j \in V, i \neq j\}$ o conjunto de arestas e $c_{ij} = c_{ji}$ a métrica de custo associado a viagem (deslocamento) da cidade i até a cidade j . Assim, buscamos encontrar o caminho mais curto visitando cada cidade uma única vez, formando um único ciclo fechado. Desta forma, por exemplo, podemos considerar as $v_k \in V$ cidades dadas pelas suas coordenadas (x_k, y_k) e c_{ij} como a distância euclidiana entre as cidades, obtendo assim um Problema do Caixeiro Viajante Euclidiano.

Buscando obter uma solução viável, o problema simétrico pode ser formulado como um problema de programação linear inteira e para isso, deve-se garantir uma função objetivo a ser minimizada, assim como as restrições consideradas no Problema do Caixeiro Viajante. Dessa forma, sendo a variável binária x_{ij} , representando a escolha de uma rota da cidade i para a cidade j , temos:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{caso a rota } i \text{ para } j \text{ for escolhida} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3)$$

A seguir a matriz que representa os custos de viagem referente à Figura 5.

Cidade	1	2	3	4	5
1	–	34	47	67	48
2	34	–	17	34	23
3	47	17	–	26	34
4	67	34	26	–	31
5	48	23	34	31	–

Na sequência, a minimização da função objetivo com base na matriz de custos e de acordo com a variável de interesse como definida na Equação 3.

$$34x_{12} + 47x_{13} + 67x_{14} + 48x_{15} + 34x_{21} + 17x_{23} + 34x_{24} + 23x_{25} + 47x_{31} + 17x_{32} + 26x_{34} \\ + 34x_{35} + 67x_{41} + 34x_{42} + 26x_{43} + 31x_{45} + 48x_{51} + 23x_{52} + 34x_{53} + 31x_{54},$$

considerando que cada nó só pode ter apenas um antecessor,

Cidade	
1	$\left\{ \begin{array}{l} x_{21} + x_{31} + x_{41} + x_{51} = 1 \\ x_{12} + x_{32} + x_{42} + x_{52} = 1 \\ x_{13} + x_{23} + x_{43} + x_{53} = 1 \\ x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{54} = 1 \\ x_{15} + x_{25} + x_{35} + x_{45} = 1 \end{array} \right.$
2	
3	
4	
5	

de forma que cada nó só pode ter apenas um sucessor,

Cidade	
1	$\left\{ \begin{array}{l} x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} = 1 \\ x_{21} + x_{23} + x_{24} + x_{25} = 1 \\ x_{31} + x_{32} + x_{34} + x_{35} = 1 \\ x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{45} = 1 \\ x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} = 1 \end{array} \right.$
2	
3	
4	
5	

e as restrições de eliminação de subrotas para subrotas de duas e três cidades (considera-se subrotas as rotas secundárias derivadas das rotas principais), isto é,

Subrotas de 2 cidades	Cidades 1 e 2	$x_{12} + x_{21} \leq 1$
	Cidades 1 e 3	$x_{13} + x_{31} \leq 1$
	Cidades 1 e 4	$x_{14} + x_{41} \leq 1$
	Cidades 1 e 5	$x_{15} + x_{51} \leq 1$
	Cidades 2 e 3	$x_{23} + x_{32} \leq 1$
	Cidades 2 e 4	$x_{24} + x_{42} \leq 1$
	Cidades 2 e 5	$x_{25} + x_{52} \leq 1$
	Cidades 3 e 4	$x_{34} + x_{43} \leq 1$
	Cidades 3 e 5	$x_{35} + x_{53} \leq 1$
	Cidades 4 e 5	$x_{45} + x_{54} \leq 1$
Subrotas de 3 cidades	Cidades 1, 2 e 3	$x_{12} + x_{21} + x_{13} + x_{31} + x_{23} + x_{32} \leq 2$
	Cidades 1, 2 e 4	$x_{12} + x_{21} + x_{14} + x_{41} + x_{24} + x_{42} \leq 2$
	Cidades 1, 2 e 5	$x_{12} + x_{21} + x_{15} + x_{51} + x_{25} + x_{52} \leq 2$
	Cidades 2, 3 e 4	$x_{23} + x_{32} + x_{24} + x_{42} + x_{34} + x_{43} \leq 2$
	Cidades 2, 3 e 5	$x_{23} + x_{32} + x_{25} + x_{52} + x_{35} + x_{53} \leq 2$
	Cidades 3, 4 e 5	$x_{34} + x_{43} + x_{35} + x_{53} + x_{45} + x_{54} \leq 2$

Dessa forma, é possível generalizar as restrições descritas de acordo com o exemplo acima, conforme segue:

- custo do PVC, sendo

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

- garantia de que cada nó terá somente um antecessor,

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n x_{ij} = 1, \text{ para todo } j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

- garantia de que cada nó terá somente um sucessor,

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ij} = 1, \text{ para todo } i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

- garantia de inexistência de subrotas para as cidades consideradas. A formulação apresentada no exemplo é a de Dantzig (1998) a qual não cria novas variáveis, porém a outra formulação conhecida, a de Tucker (1960), considera variáveis de folga no problema, aumentando assim a sua dimensão. De acordo com Davendra (2010), a primeira formulação citada é mais adequada a problemas de grande porte. A seguir destaca-se a generalização das formulações das restrições.

<i>Formulação de Dantzig-Fulkerson- Johnson</i>	$\sum_{i \in Q} \sum_{\substack{j \in Q \\ j \neq i}} x_{ij} \leq Q - 1, \text{ para todo } Q \subseteq \{1, \dots, n\}, Q \geq 2$	(7)
<i>Formulação de Miller- Tucker-Zemlin</i>	$\begin{cases} u_i - u_j + n \cdot x_{ij} \leq n - 1, \text{ para todo } 2 \leq i \neq j \leq n \\ 0 \leq u_i \leq n - 1, \text{ para todo } 2 \leq i \leq n \end{cases}$	(8)

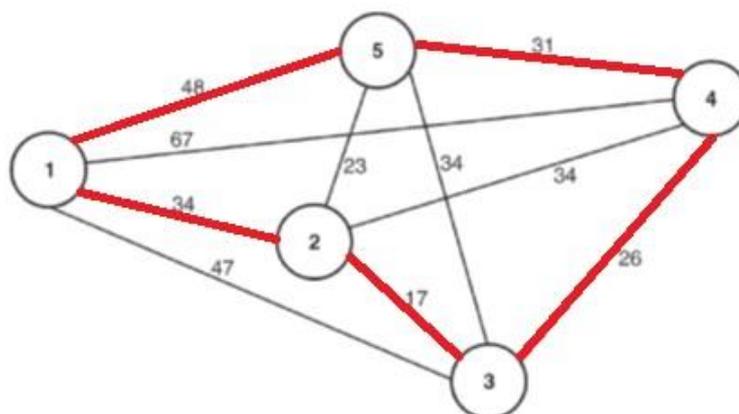
Assim, um PCV básico com as equações (4) a (7) pode ser otimizada da seguinte maneira.

$$\begin{aligned}
 &\text{minimizar} && \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\
 &\text{sujeito a} && \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n x_{ij} = 1, \forall j = 1, 2, \dots, n \\
 &&& \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ij} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, n \\
 &&& \sum_{i \in Q} \sum_{\substack{j \in Q \\ j \neq i}} x_{ij} \leq |Q| - 1, \forall Q \\
 &&& \subseteq \{1, \dots, n\}, |Q| \geq 2 \\
 &&& x_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Para solucionar o conjunto de Equação 9 existem duas abordagens metodológicas que são através dos métodos exatos ou os métodos heurísticos, sendo que a principal diferença está no método heurístico que encontra soluções viáveis subótimas, mas não necessariamente a melhor solução viável possível, sem a garantia de encontrar a solução ótima do problema.

Aplicando o método para solucionar o exemplo da Figura 5, obtemos a seguinte solução na Figura 6.

FIGURA 6 – SOLUÇÃO DO EXEMPLO DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE



FONTE: LACTEC et al. (2021)

Sendo assim, o PCV pode ser generalizado como o Problema de Roteirização de Veículos (PRV) objetivando encontrar a rota otimizada para que um ou mais veículos possam realizar atendimentos e/ou entregas para um conjunto de clientes. Desta forma, um PRV pode ser considerado como um PCV múltiplo, onde o objetivo é encontrar uma rota de mínima distância, seguindo o conjunto de restrições e critérios.

Um PRV pode ser desenvolvido seguindo algumas abordagens, conforme segue.

- Formulação de fluxo de veículos: utiliza variáveis inteiras associadas com cada rota para contabilizar quantas vezes um veículo passou por determinada rota, sendo essa a formulação mais básica, uma vez que o custo pode ser expresso como a soma de qualquer custo relacionado a rota, porém essa formulação não é robusta para todos os problemas práticos.
- Formulação de fluxo de mercadorias: considera mais variáveis inteiras associadas às rotas representando assim o fluxo das mercadorias no trajeto dos veículos.
- Problema de particionamento de conjunto: aumenta consideravelmente o número de variáveis binárias a fim de associá-las a uma rota viável diferente, portanto o PRV é formulado como um problema de particionar um conjunto de nós encontrando qual é o conjunto de pontos do circuito que forma o menor custo satisfazendo as restrições do PRV.

Dessa forma, o PRV básico pode ser modelado em comparação ao modelo de PCV apresentado na Equação 9, no qual a variável de decisão continua sendo a mesma,

$$\begin{array}{ll}
 \text{minimizar} & \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} \\
 \text{sujeito a} & \sum_{i \in V} x_{ij} = 1, \forall j \in V \setminus \{0\} \\
 & \sum_{j \in V} x_{ij} = 1, \forall i \in V \setminus \{0\}
 \end{array} \tag{10}$$

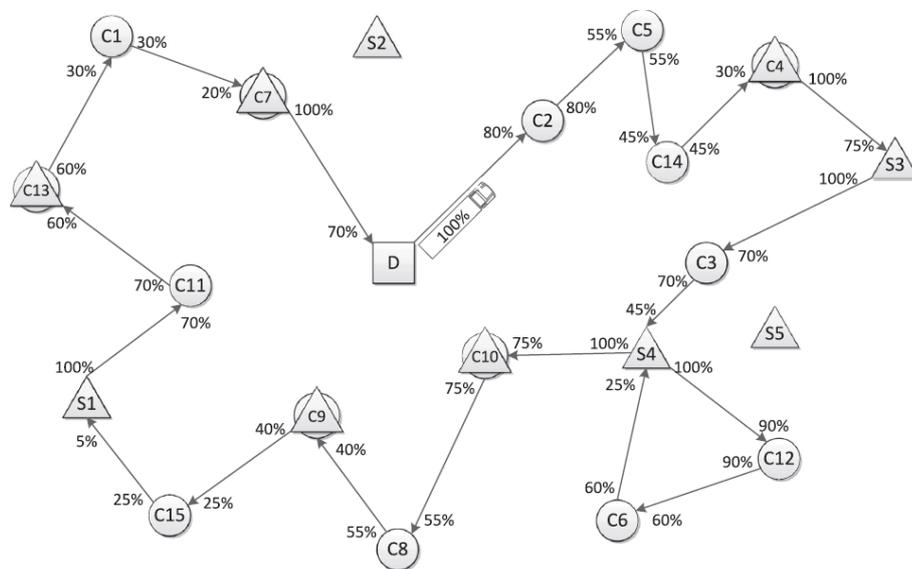
$$\begin{aligned}
\sum_{i \in V} x_{i0} &= K, \\
\sum_{j \in V} x_{i0} &= K, \\
\sum_{i \in Q} \sum_{\substack{j \in Q \\ j \neq i}} x_{ij} &\leq |Q| - r(Q), \quad \forall Q \\
&\subseteq \{1, \dots, n\}, |Q| \geq 2 \\
x_{ij} &\in \{0,1\}
\end{aligned}$$

onde k é a quantidade de veículos disponíveis e $r(Q)$ corresponde ao valor mínimo de veículos para satisfazer o conjunto Q e assume-se que $\{0\}$ é o nó reservado ao local onde os veículos ficam alojados.

2.3.2 Problema do Caixeiro Viajante Elétrico (PCVE)

Um PRV pode ser descrito como uma generalização do PCV pois possuem uma ligação próxima salvo a quantidade de caixeiros/veículos, assim como um PRVE também pode ser relacionado a um Problema do Caixeiro Viajante Elétrico (PCVE), isto porque num PRVE existem vários veículos considerados para um conjunto de clientes, enquanto num PCVE existe somente um e, no caso, sendo um VE. A Figura 7 abaixo ilustra um exemplo de planejamento de rotas para um PCVE, onde o quadrado indica o depósito, as circunferências são os clientes, os triângulos são os eletropostos e os triângulo-circunferência são os clientes que possuem locais para recarga, os eletropostos públicos (triângulos) e privados (triângulo-circunferência).

FIGURA 7 – EXEMPLO DE ROTA DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE ELÉTRICO



FONTE: Küçükoglu et al. (2019)

Na resolução de um PCV ou PRV, normalmente os pesos dos arcos que ligam os nós são valores positivos, sendo estes relacionados a métricas tais como distância, tempo de viagem entre outros e os algoritmos mais comuns são construídos quando essas métricas são positivas. Os introduzir um VE no problema, não necessariamente existe um valor positivo para determinar o peso no arco o que reduz a aplicabilidade dos algoritmos mais conhecidos num PCV e PRV. Além disso, é importante ressaltar que os problemas tratados (PCV, PRV, PCVE e PRVE) são problemas de alta complexidade computacional o que torna inviável a aplicação de métodos exatos, dependendo da configuração de alguns computadores.

Na literatura, percebe-se poucos trabalhos que tratam especificamente de PCVE, mesmo que o PCVE seja um caso específico de PRVE com um único veículo, porém Roberti (2016) formula um PCVE com janela de tempo como um problema de programação linear inteira-mista e, a partir disto, outros autores descreveram dois modelos de acordo com as políticas de recarregamento de bateria, sendo parcial ou completa, e os resolveram aplicando heurísticas em três fases.

Em seu trabalho, Doppstadt et al. (2016) propõem um modelo de PCV considerando um veículo híbrido, o qual utiliza combustível fóssil e energia elétrica e os autores consideram apenas 4 nós para serem atendidos, mas também propõem

novas instâncias para testes, além disso, consideram uma função de carregamento constante em adesão à política de carregamento completo da bateria.

Küçükoglu et al. (2019) consideram a janela de tempo dos clientes na qual é possível carregar as baterias nas localidades dos clientes e um dos diferenciais do trabalho desses autores é que consideram que os clientes possuem diferentes tipos/taxas/funções de recarregamento da bateria. Os autores apresentam uma formulação de programação linear inteira-mista ao qual aplicam duas heurísticas, de forma híbrida, para solucionar o problema, sendo que um dos resultados encontrados é de que para o PCVE com janela de tempo, a formulação proposta demonstra uma significativa redução de custos em grande parte das instâncias considerando o carregamento nos locais dos clientes, além do algoritmo ser capaz de encontrar uma solução eficiente e mais realística para o VE.

A seguir é descrito o modelo matemático proposto por Küçükoglu et al. (2019), iniciando pelas notações onde o modelo leva em conta os nós depósitos, que ambos correspondem ao mesmo local. A ideia de considerar separados os conjuntos de nó depósito inicial e final é de garantir que a roteirização terá seu início e término sempre no depósito, representado pelo símbolo $\{0\}, \{N + 1\}$.

Os conjuntos de estações de recargas ou eletropostos são representados pela sigla F e o conjunto de nós fictícios representados pela sigla F' os quais permitem várias visitas a cada um deles.

O conjunto de clientes varia de 1 até N e é representado pela sigla V .

O conjunto de clientes e nós depósitos são representados pela simbologia $V_0 = V \cup \{0\}$ e $V_{N+1} = V \cup \{N + 1\}$, visando que partindo de um nó depósito, o deslocamento passe por todos os clientes e retorno ao nó depósito de origem.

O conjunto de clientes e eletropostos é representado por $V' = V \cup F'$, onde considera-se que todo cliente possui um eletroposto.

O conjunto de clientes, eletropostos e nós depósitos são representados pela simbologia $V'_0 = V' \cup \{0\}$ e $V'_{N+1} = V' \cup \{N + 1\}$.

Os parâmetros adotados visam garantir as restrições mínimas para que o modelo matemático pode ser aplicado visando atingir o resultado da função objetivo.

A distância percorrida do nó i até o nó j , $\forall i \in V'_0, j \in V'_{N+1}, i \neq j$, é representada por d_{ij} [km].

O tempo de trajeto percorrido do nó i até o nó j , $\forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N+1\}$ é representado por t_{ij} [minutos].

A taxa de recarga de um veículo elétrico no nó i , $\forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N+1\}$ é representada por g_i , sendo expressa em kWh, considerando a capacidade máxima do carregador.

A taxa de consumo de energia do veículo elétrico por unidade de distância é representada por h [kWh/km].

A variável e_{eu} representa a hora mais próxima para iniciar o serviço permitido no nó i , $\forall e \in V \cup \{0\} \cup \{N+1\}$. A variável eu_{eu} representa a última hora para iniciar o serviço permitido no nó i , $\forall e \in V \cup \{0\} \cup \{N+1\}$.

A capacidade da bateria do veículo elétrico é representada por Q [kWh].

Tendo os conjuntos e parâmetros definidos no problema, as variáveis de decisão do modelo de otimização são descritas a seguir.

A variável x é relacionada a escolha do trajeto a ser definido, enquanto a variável r definirá se a bateria do veículo elétrico será recarregada no local.

- $x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo elétrico percorre do nó } i \rightarrow j, \forall i \in V'_0, j \in V'_{N+1}, i \neq j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $r_i = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo elétrico é recarregado no nó } i, \forall i \in V' \cup \{N+1\} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

A variável p_i representa a rastreabilidade da hora de início do serviço no nó eu ; $\forall i \in V \cup \{0\} \cup \{N+1\}$.

A variável y é necessária para identificar o nível da carga na bateria quando o veículo elétrico chega no local do atendimento, determinando se o veículo fará alguma recarga de acordo com a variável r .

- y_i , variável de decisão para identificar o nível da bateria na chegada no nó i , $\forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N+1\}$

As variáveis w e w' são referentes ao estado da carga da bateria. São elas que determinarão o planejamento da rota do veículo elétrico.

- w_i , variável de decisão não negativa para identificar o estado da carga da bateria carregada do veículo elétrico no nó i , $\forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N+1\}$
- w'_i , variável de decisão não negativa para identificar a carga da bateria gasta no trajeto entre o nó antecessor do trajeto até o nó i , $\forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N+1\}$

O modelo exato para a roteirização é descrito a seguir.

$$\text{minimizar } \sum_{i \in V'_0} \sum_{j \in V'_{N+1}} d_{ij} x_{ij} \quad (11)$$

x, r, y, w, w', p

A função objetivo (11) visa minimizar a distância a ser percorrida.

Os conjuntos de restrições (12)-(19) são responsáveis por montar uma rota no qual satisfaz as condições do PCV: construir um circuito Hamiltoniano.

$$\text{sujeito a } \sum_{j \in V'_{N+1}} x_{ij} = 1, \forall i \in V_0 \quad (12)$$

A restrição (12) assegura que cada cliente será visitado exatamente uma única vez, além de garantir que o circuito inicia no nó depósito.

$$\sum_{j \in V'_{N+1}} x_{ij} \leq r_i, \forall i \in F' \quad (13)$$

A restrição (13) garante que cada eletroposto privado é visitado no máximo uma vez se for usado pelo veículo elétrico para uma operação de recarga.

$$\sum_{i \in V'_0} x_{ij} = \sum_{i \in V'_{N+1}} x_{ji}, \forall j \in V' \quad (14)$$

A restrição (14) mantém a continuidade de fluxo do roteamento.

$$p_0 = e_0 \quad (15)$$

A restrição (15) define a hora de início do serviço em um depósito e é igual ao limite da janela de tempo mais antiga.

$$e_i \leq p_i \leq l_i, \forall i \in V_{N+1} \quad (16)$$

A restrição (16) garante que cada nó cliente e cada nó depósito tem que ser visitados dentro de suas janelas de tempo.

$$p_i + t_{ij} x_{ij} + w_j g_j \leq p_j + l_0 (1 - x_{ij}), \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_{N+1} \quad (17)$$

A restrição (17) rastreia o serviço-horário de início no cliente, estação de carregamento e nós depósito considerando os tempos de carregamento.

$$y_0 = Q \quad (18)$$

Restrição (18) determina que o veículo elétrico inicia o circuito com a bateria completa.

$$y_j + hd_{ij}x_{ij} \leq y_i + w_i + Q(1 - x_{ij}) \quad , \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_{N+1} \quad (19)$$

Restrição (19) determina o nível de bateria na chegada e a possível operação de recarga no nó antecessor do circuito.

As restrições (20)-(23) determinam a quantidade de recarga do veículo elétrico nos nós clientes ou nó depósito de acordo com uma política de recarregamento parcial. Para essas estações, assume-se que seja conhecido pelo vetor s quais clientes possuem eletropostos disponíveis. No caso do projeto, este vetor sempre será composto por valores iguais a 1, uma vez que todos os pontos a serem visitados são possíveis de serem utilizados (mesmo que uma taxa de recarga mais baixa).

$$w_i + y_i \leq Q \quad , \forall i \in F \quad (20)$$

$$w_i + w'_i + y_i = Q \quad , \forall i \in V_{N+1} \quad (21)$$

$$w_i \leq Qs_i r_i \quad , \forall i \in V \quad (22)$$

$$w'_i \leq Q(1 - r_i) \quad , \forall i \in V \quad (23)$$

A seguir é apresentada na Equação 24 o modelo exato desenvolvido por Küçükoglu et al. (2019).

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i \in V'_0} \sum_{j \in V'_{N+1}} d_{ij} x_{ij} \quad (24)$$

$$\text{sujeito a} \quad \sum_{j \in V'_{N+1}} x_{ij} = 1 \quad , \forall i \in V_0$$

$$\sum_{j \in V'_{N+1}} x_{ij} \leq r_i \quad , \forall i \in F'$$

$$\sum_{i \in V'_0} x_{ij} = \sum_{i \in V'_{N+1}} x_{ji} \quad , \forall j \in V'$$

$$p_0 = e_0$$

$$e_i \leq p_i \leq l_i \quad , \forall i \in V_{N+1}$$

$$p_i + t_{ij}x_{ij} + w_j g_j \leq p_j + l_0(1 - x_{ij}) \quad , \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_{N+1}$$

$$y_0 = Q$$

$$y_j + hd_{ij}x_{ij} \leq y_i + w_i + Q(1 - x_{ij}) \quad , \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_{N+1}$$

$$w_i + y_i \leq Qr_i \quad , \forall i \in F'$$

$$w_i + w'_i + y_i = Q \quad , \forall i \in V$$

$$w_i \leq Qr_i \quad , \forall i \in V$$

$$w'_i \leq Q(1 - r_i) \quad , \forall i \in V$$

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica referente as publicações mais relevantes de artigos científicos sobre o tema da otimização de rotas, sendo o processo utilizado para selecionar os artigos para formar o portfólio bibliográfico conforme Ensslin et al. (2010).

3.1 Metodologia de pesquisa

Visando cumprir o objetivo desta seção, considera-se dois pontos específicos: uma compilação dos trabalhos que podem estar ligados ao tema dessa dissertação no banco de dados de artigos científicos e, posteriormente, uma análise da relevância dos assuntos e dos autores, com análise bibliométrica do portfólio bibliográfico compilado.

Para a elaboração desse trabalho tomou-se por base a análise bibliométrica utilizando-se da metodologia proposta por Ensslin et al. (2010) na qual a pesquisa aborda dois eixos e oito palavras-chave vinculadas ao eixo da pesquisa, conforme a Tabela 1 a seguir.

TABELA 1 – EIXOS E PALAVRAS-CHAVE PESQUISADOS

Eixo 1	Eixo II
Electric truck	Aerial lift truck
Electric mobility	Grid maintenance
Optimization route	Electric vehicle
Bucket truck	Dissemination of EVs

FONTE: O autor (2020)

Os quatro termos dos Eixo I e os quatro termos do Eixo II foram inseridos no software Publish or Perish e a busca fora feita na base de dados do Google Scholar, Scopus e Crossref em combinações utilizando o conector AND, resultando em dezesseis combinações possíveis.

O resultado da pesquisa foi exportado no formato .RIS para o software de gerenciamento de referências Mendeley, através do qual foram extraídas as bases de dados em MS Excel. Na Tabela 2 são apresentados os resultados das buscas

combinadas dos termos do Eixo I e Eixo II utilizando o software Harzing's Publish or Perish por base de dados, sendo que as combinações com maior relevância estão ligadas aos termos "electric mobility" e "electric vehicle" e aos termos "optimization route" e "electric vehicle".

TABELA 2 – RESULTADO DA PESQUISA NO GOOGLE SCHOLAR, SCOPUS E CROSSREF

RIS	Eixo I	Eixo II	Scopus	Google Scholar	Crossref
1	electric truck	aerial lift truck	0	0	24
2	electric truck	grid maintenance	2	0	17
3	electric truck	electric vehicle	0	4	61
4	electric truck	dissemination of EVs	0	0	47
5	electric mobility	aerial lift truck	0	0	25
6	electric mobility	grid maintenance	8	0	43
7	electric mobility	electric vehicle	13	49	25
8	electric mobility	dissemination of EVs	8	0	0
9	optimization route	aerial lift truck	0	0	36
10	optimization route	grid maintenance	2	0	31
11	optimization route	electric vehicle	158	0	45
12	optimization route	dissemination of EVs	0	0	35
13	bucket truck	aerial lift truck	0	0	16
14	bucket truck	grid maintenance	0	0	20
15	bucket truck	electric vehicle	0	0	52
16	bucket truck	dissemination of EVs	0	0	8

FONTE: O autor (2021)

Analisando a relevância dos periódicos no portfólio bibliográfico notou-se que a grande maioria está concentrada nos artigos, sendo que esse mesmo grupo apresenta o maior número de citações e com base nessa pesquisa foram selecionados os artigos utilizados como base e referência para o trabalho de dissertação, sendo utilizadas as obras mais recentes de autores que abordam temas que vão desde a introdução de veículos elétricos no mercado, passando pela roteirização dos mesmos, até eletromobilidade que também aborda as questões dos impactos ambientais.

3.1.1 Aplicações de problemas de roteirização na literatura

No trabalho de Sarmah (2019) o autor aplica o algoritmo Clarke e Wright para encontrar a rota ideal para veículos que realizam a coleta de resíduos sólidos urbanos em 15 enfermarias na cidade de Bilaspur na Índia, levando em conta as restrições dos veículos, rotas e capacidade de carga dos mesmos. Durante o estudo os autores perceberam que nesse caso específico vários parâmetros de incerteza tais como a taxa de geração dos resíduos, custo fixo e variável do veículo, custos de transporte e receitas influenciam diretamente na análise e tornam os modelos matemáticos mais complexos. Com a aplicação do algoritmo Clarke e Wright os autores conseguiram identificar 5 pontos de clusters durante a semana e 6 pontos durante os finais de semana, o que facilita trabalhos futuros uma vez que atribuem que o modelo proposto é altamente flexível e pode ser usado para diferentes cenários que podem ser estendidos ao número máximo de enfermarias com um mínimo de erro em comparação com outros métodos.

Jeong (2019) estuda um problema típico de roteirização com sistema de entrega híbrido de uma transportadora, sendo que os veículos além de prestarem serviços diretamente aos clientes também atuam como depósitos móveis, com o objetivo de minimizar o tempo de entrega e o custo operacional e fazendo um comparativo com os modelos tradicionais existentes. Como resultado observaram que o modelo proposto apresenta vantagem comparativa sobre outros modelos com a função objetivo baseada em tempo e custo e deixam uma abertura para estudos futuros abordarem soluções mais complexas buscando a maximização em modelos computacionais.

No trabalho de Simsir (2019) o autor propõe uma solução para o Problema de Roteamento de Veículos com Entrega Simultânea e Pick-up (VRPSDP) apoiados no método do algoritmo da Colônia de Abelhas Artificial (ABC) onde afirmam que a maioria dos problemas de roteirização estão associados à rota com o menor custo e esta, por sua vez, a menor distância percorrida. Ao aplicar o método ao problema fictício proposto identificam que a rota de menor custo é comparável com as soluções propostas em literaturas sobre o tema, porém apresentam poucos parâmetros comparáveis com casos práticos. Para casos de aplicações reais ou práticos Simsir (2019) recomenda que o método deva ser melhorado usando dados práticos obtidos,

por exemplo, de empresas de logística, ou seja, o método proposto vai de encontro a algumas soluções lúdicas propostas na literatura sobre a temática, porém não convergem diretamente para casos com dados reais e aplicáveis na prática.

Os problemas apontados pelos autores acima descritos destacam de maneira geral a roteirização de veículos considerando as janelas de tempo de clientes, quantidade de frota, carga que o veículo possui dentre outros aspectos, sendo que para o contexto dessa dissertação, posteriormente é descrito o estudo de caso que envolve a otimização de rotas para a manutenção de redes de distribuição de energia elétrica considerando a aplicação de um caminhão elétrico equipado com cesta aérea e carroceria. A Tabela 3 apresenta um resumo dos trabalhos dos três principais autores citados com relação à trabalho de roteirização de veículos à combustão.

TABELA 3 – RESUMO DOS TRABALHOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS A COMBUSTÃO DOS PRINCIPAIS AUTORES

Autor/Ano	Problema/Método	Resultados
Sarmah (2019)	Algoritmo Clarke e Wright. Coleta de resíduos sólidos em enfermarias na Índia.	Restrições dos veículos, rotas, capacidade de carga, taxa de geração de resíduos, custo fixo e variável do veículo, custos de transportes e receitas. Identificou pontos de clusters durante a semana e finais de semana.
Jeong (2019)	Problema típico de roteirização de sistema híbrido: veículos prestam serviços aos clientes e atuam como depósitos móveis.	Redução do tempo de entrega e custo operacional em relação com os modelos tradicionais. Modelo proposto apresenta vantagem comparativa sobre outros modelos com a função objetivo baseada em tempo e custo.
Simsir (2019)	Algoritmo da Colônia de Abelhas Artificial (ABC). Aplica método em modelo fictício.	Rota com menor custo está associada à menor distância percorrida. Identifica que os resultados são comparáveis com soluções propostas na literatura, mas apresentam poucos parâmetros comparáveis com casos práticos.

FONTE: O autor (2021)

3.1.2 Problema de roteirização utilizando veículos elétricos

Com as recentes ações governamentais voltadas à redução de emissões de gases poluentes na atmosfera, nos últimos anos nota-se um aumento de pesquisas quanto a veículos elétricos (VE) e assim, por consequência, empresas globais estão no processo de testes e implementações de VE em suas frotas e nesse contexto uma nova área de pesquisa tem se destacado para essa demanda, a de planejamento de

rotas para VE, uma vez que é preciso considerar as novas nuances que este problema trás.

Em problemas que envolvem a aplicação de VE os quais possuem uma bateria com capacidade de carga limitada e o seu estado de carga (EDC) diminui à medida que o veículo é utilizado, é fundamental que haja um planejamento otimizado de rota a fim de evitar imprevistos, como por exemplo, a energia da bateria se esgotar no meio de um trajeto. Feng (2013) em um problema de roteamento de veículos elétricos (PRVE) exemplifica a operação de VE de entregas com limite de distância entre 160-240 km de operação, enquanto um veículo de combustão interna (VCI) possui um limite de 480-650 km.

No caso de um VE apresentar um EDC baixo o mesmo deve visitar uma estação de recarga para que possa continuar sua rota e para recarregar uma bateria, atualmente existem duas maneiras mais comuns: (i) substituir a bateria com pouca ou nenhuma energia por outra totalmente carregada ou (ii) recarregar num eletroposto na estação. No processo (i) a troca reflete-se num tempo semelhante ou até mesmo comparável ao reabastecimento de um VCI, porém no processo (ii), as baterias são recarregadas após estarem conectadas num eletroposto, cujo tempo de recarga depende do EDC antes de iniciar o processo e da função de recarga do eletroposto.

Erdelic (2019) ressalta que a aplicação de VE são mais recomendadas para distâncias curtas ou áreas urbanas e isso é válido pois um VCI em áreas urbanas perde eficiência por conta da baixa velocidade desenvolvida, alta produção de ruído e paradas frequentes, enquanto o VE leva vantagem nesses aspectos além do incentivo financeiro. Portanto, dedicar um VE para entregas atualmente pode não ser tão vantajoso, porém em contrapartida, as mudanças que a sociedade sofrerá principalmente com relação a redução na emissão de gases poluentes e desenvolvimentos tecnológicos, são pontos favoráveis aos VE.

No caso de PRVE, os autores comumente tratam a função a ser minimizada como multiobjetivo buscando uma solução viável ao seu problema de acordo com o conjunto de restrições adotadas que vão desde a quantidade de veículos utilizados (no caso de uma frota), distância a ser percorrida, custos totais de roteamento, custo de aquisição do veículo, manutenção do veículo, custos da energia elétrica no eletroposto, custo de substituição da bateria após sua vida útil, dentre outros Os trabalhos da literatura consideram como restrições a capacidade de carga do veículo,

a janela de tempo dos clientes, e as horas de trabalho e, além disso, um veículo necessita maior frequência de visitas em eletropostos, a necessidade de se conhecer a localização destes pois impactam diretamente no planejamento da rota, ainda mais se um modelo considerar a janela de tempo dos clientes.

Conrad e Figliozzi (2011) realizaram uma das primeiras pesquisas voltadas a solucionar um PRVE, considerando que o reabastecimento das baterias seria nos locais onde os clientes estão durante sua rota, limitando a recarga no mínimo até 80% da capacidade da bateria. Para isso, os autores consideram um modelo de PRV com diferentes distâncias limites de rotas e incrementaram restrições específicas de recarregamento de bateria, sendo um valor constante de tempo de recarga das baterias e janela de tempo para rotas do VE e os resultados sinalizaram que a janela de tempo dos clientes influencia na distância da rota a ser percorrida quando o tempo de recarga é longo.

Posteriormente, Erdogan e Miller-Hooks (2012), estudaram a roteirização de veículos com combustíveis alternativos (VCA), ou seja, veículos movidos à biodiesel, etanol, hidrogênio, gás natural, eletricidade, dentre outros. No estudo, os autores consideram que os VCA são recarregados até a sua capacidade máxima nas estações para cada tipo de combustível com um tempo de recarga fixo, não sendo considerada a capacidade do veículo e nem a janela de tempo dos clientes. Propuseram a utilização de duas heurísticas, ao qual resultaram em que a limitação da distância para direção aumenta drasticamente a quantidade de estações de reabastecimento e o total de distância viajadas na solução. Na sequência, Schneider (2014) considerou em seu modelo a janela de tempo do cliente em função do recarregamento linear, assumindo que a bateria é recarregada completamente, ou seja, o tempo de carregamento do VE depende do nível do EDC ao chegar neste posto. Esse PRVE considera a carga da caçamba, bateria e as restrições de janelas de tempo e o modelo é formulado como um problema de programação linear inteira-mista em um grafo direcionado, sendo os clientes modelados como nós e os trajetos os arcos que os ligam.

A partir do trabalho de Schneider (2014), começam a surgir variações de formulações, relaxando ou não algumas restrições dentro do problema, como por exemplo, Keskin e Çatay (2016) relaxam a hipótese que a bateria deveria ser completamente recarregada, permitindo assim recargas parciais, bem como Felipe et

al. (2014), Sassi et al. (2014) e Keskin e Çatay (2018) inserem em seus trabalhos com eletropostos, diferentes tipos de carregadores. Outros trabalhos, como o de Desaulniers (2016), consideram a análise de uma frota heterogênea (VE, VCI e VCA) assim como consideram frotas com VE com diferentes características. Paz et al. (2018), Schiffer e Walther (2017) e Yang e Sun (2015), abordam a localização dos eletropostos e a rota a ser percorrida como sendo variáveis de decisão em sua formulação, bem como a forma que o carregamento será realizado, sejam estes em eletropostos ou substituição de baterias descarregadas por carregadas.

Liimatainen (2019) realiza um estudo de uma metodologia que possa ser aplicada e estimar o potencial de caminhões elétricos na Suíça e Finlândia, uma vez que as baterias tem evoluído, possibilitando a aplicação nesses veículos pesados. Os estudos da infraestrutura e da malha rodoviária apontam que a Suíça tem um potencial de 71% de adoção de caminhões elétricos, porém na Finlândia o potencial é limitado a 35% devido à grande utilização de combinações de caminhões pesados, o que reduz muito o custo dos fretes e inviabiliza os caminhões elétricos. Outra abordagem que os autores apresentam é com relação às commodities que são restringidas pelo volume de carga útil e são em grande parte transportados em caminhões com carga média superior à 26 toneladas. Por fim observam que melhorias na capacidade de carga das baterias, na infraestrutura de recarga e em adoção de políticas públicas podem ser significativas para a ampliação da utilização de caminhões elétricos, porém existe uma limitação quanto ao uso de combinações de veículos com o uso de baterias pois ainda são pesadas e diminuem a capacidade total de transporte de carga útil dos caminhões, mas sugerem que a adoção das baterias como uma commodity pode facilitar e acelerar o processo de eletrificação da frota de caminhões.

Em sua obra, Keskin (2018) observa que o problema de roteirização de veículos elétricos com janelas de tempo é uma extensão ou variante do clássico estudo do caixeiro viajante onde são utilizados veículos elétricos em vez de veículo com motor de combustão interna. E acrescenta que um veículo elétrico tem autonomia limitada devido à capacidade da bateria o que requer recargas intermediárias durante o percurso, sendo que essa recarga pode ser realizada com qualquer nível de bateria e em qualquer quantidade até a capacidade limite da bateria. No estudo o autor desenvolve um modelo que permite a recarga parcial com três configurações que são definidas como normal, rápida e super-rápidas, onde nas duas opções mais rápidas a

bateria é carregada com a mesma energia em um mesmo tempo, porém a um custo mais alto. O objetivo do trabalho é minimizar o custo total da recarga durante a operação e para isso utiliza o CPLEX para resolver problemas lineares inteiros mistos, porém para problemas maiores e mais complexos utiliza o ALNS (Adaptive Large Neighbourhood Search) como um método mais exato. Após aplicar os modelos e as ferramentas conclui a eficiência matemática proposta e os benefícios dos carregadores rápidos aplicados aos veículos e nos custos de energia.

Erdoğan (2019) estuda uma otimização de rota para caminhões elétricos de coleta de lixo baseada em Programação Linear Inteira Mista (MILP) sendo essa a primeira aplicação orientada para caminhões elétricos de coleta de lixo, sendo que para a modelagem utilizaram dados reais coletados no município de Bakirkoy em Istambul na Turquia. Como restrições apresentaram a variação no consumo de energia do caminhão elétrico que é afetada pela forma de condução, carga do caminhão e condições do terreno. Utilizando um GPS os autores coletaram dados das posições das lixeiras e também os pesos médios das mesmas com a finalidade de buscar entender qual a pior condição de localização das lixeiras mediante o trajeto a ser realizado pelo caminhão elétrico para sua coleta e complementam sua análise com base em dois modelos sendo que o primeiro não considera a mudança de peso do caminhão ao longo do trajeto e o segundo considera a mudança de peso do caminhão ao longo do trajeto com a incorporação do lixo transportado. Observaram que o caminhão elétrico carregado consome menos energia devido à inércia do mesmo além de usufruir do sistema de frenagem regenerativo. Inserindo os dados coletados no software CPLEX v.12 buscou-se a melhor rota possível considerando a posição das lixeiras e as condições do terreno, variáveis essas que influenciam diretamente no consumo de energia do caminhão elétrico.

Na obra de Küçükoglu et al. (2019) o autor realiza um estudo onde tomando por base o clássico problema do caixeiro viajante para roteirização de veículos elétricos, introduz a análise com operações de recarregamento dos veículos elétricos ao longo da rota, com janelas de tempo entre as recargas e observa também que existem variações nas tarifas cobradas em recargas públicas e privadas. Dentro de seu estudo o autor desenvolve um algoritmo para resolver o problema da recarga de veículos elétricos durante o trajeto utilizando carregadores públicos e privados com tarifas diferentes, tratando-se assim de um modelo híbrido. O objetivo do trabalho é

que o algoritmo proposto identifique qual é o melhor momento para recarregar os veículos utilizando as menores tarifas e faz o comparativo dos resultados obtidos com outros métodos de roteirização e conclui que o modelo proposto apresenta resultados significativos em termos de menor distâncias percorridas com as menores tarifas de recarga.

De uma forma mais abrangente, alguns trabalhos envolvendo PRVE são direcionados a solucionar problemas específicos que os autores propõem, sendo importante ressaltar que as pesquisas envolvendo VE se encontram em constante evolução, principalmente pela busca incessante na redução da emissão de gases poluentes, fortemente instigadas pelos governos mundiais.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos trabalhos dos três principais autores citados com relação à roteirização de veículos elétricos, pois esses autores desenvolveram trabalhos relevantes e congruentes com o tema dessa dissertação, sendo a metodologia de Küçükoglu et al. (2019) adotada como referencial para a dissertação.

TABELA 4 – RESUMO DOS TRABALHOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS DOS PRINCIPAIS AUTORES

Autor/Ano	Problema/Método	Resultados
Keskin (2018)	Modelo com recarga parcial normal, rápida e super-rápidas. Nas opções mais rápidas a bateria é carregada com a mesma energia em um mesmo tempo, porém a um custo mais alto.	Minimizar o custo total da recarga. CPLEX (problemas lineares inteiros mistos) e ALNS (Adaptive Large Neighbourhood Search). Conclusão: eficiência matemática proposta com benefícios dos carregadores rápidos aplicados aos veículos e redução nos custos de energia.
Erdinç (2019)	Otimização de rota para caminhões elétricos de coleta de lixo baseada em Programação Linear Inteira Mista (MILP) com dados reais. Restrições: forma de condução, carga do caminhão e condições do terreno.	Caminhão carregado consome menos energia devido à inércia. CPLEX: melhor rota considerando a posição das lixeiras e as condições do terreno. Futuro: desenvolver um software que faça a busca dinamicamente e atualização contínua das informações.
Küçükoglu (2019)	PCVE: introduz recarregamento dos veículos elétricos ao longo da rota, janelas de tempo entre as recargas e variações nas tarifas cobradas em recargas públicas e privadas. Desenvolve um algoritmo visando a melhor rota com base na recarga e tarifas.	Algoritmo proposto identifica qual é o melhor momento para recarregar os veículos utilizando as menores tarifas e compara os resultados obtidos com outros métodos de roteirização. Conclusão: resultados significativos com menor distâncias percorridas com as menores tarifas de recarga.

FONTE: O autor (2021)

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 MATERIAIS

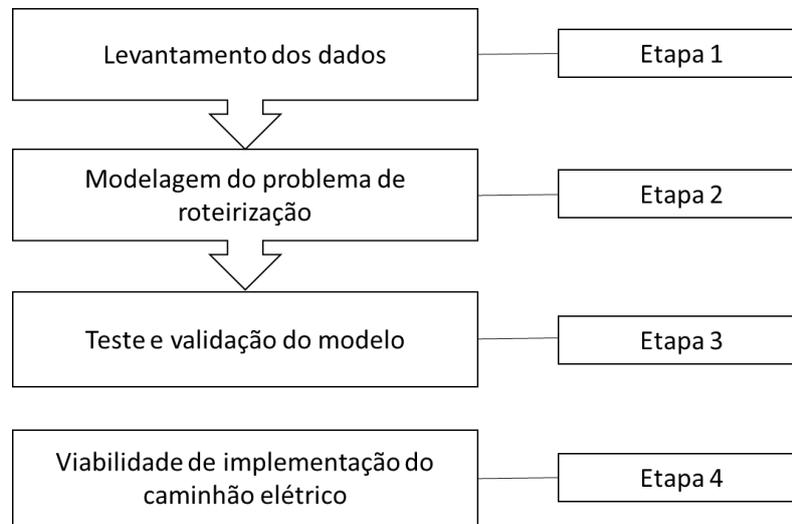
Os materiais utilizados e aplicados neste trabalho estão descritos a seguir:

- Base de dados da concessionária de distribuição de energia elétrica contendo informações relativas à identificação de cada equipe de trabalho, localidade das bases operacionais consideradas como ponto de partida e retorno ao final do trabalho e latitude e longitude de cada ponto a ser atendido ou então o endereço do mesmo.
- Informações técnicas relativas ao caminhão à combustão atualmente utilizado pela distribuidora de energia elétrica bem como do modelo de caminhão elétrico adotado no estudo, sendo as principais a autonomia e capacidade de carga da bateria.
- Informações técnicas sobre a rede de distribuição de energia das localidades onde o caminhão elétrico ficará lotado para estudo da roteirização.
- Mapeamento dos pontos de oportunidade de recarga do caminhão elétrico utilizando a rede de distribuição da própria distribuidora de energia elétrica.
- Computador portátil com sistema operacional mínimo com Windows 10 e o software de programação linear e inteira mista.

4.2 MÉTODO

O fluxograma da Figura 8 seguir apresenta o método utilizado nesta dissertação.

FIGURA 8 – FLUXOGRAMA DE ENCADEAMENTO DO MÉTODO



FONTE: O autor (2021)

4.2.1 Levantamento dos dados

Na etapa 1 são levantados os dados relativos aos caminhões movidos a combustão fóssil para um período pré determinado contemplando para as localidades escolhidas e suas respectivas equipes de trabalho. Essas informações visam a elaboração do planejamento da operação considerando um caminhão elétrico.

Para a metodologia de otimização, as informações necessárias são: as equipes de trabalho, localidade da base operacional que será o ponto de partida e retorno, os dias da programação, latitude e longitude de cada ponto a ser atendido.

Levanta-se também dados básicos referentes à rede de energia onde serão realizadas as manutenções, sendo as mesmas de média tensão (11,9 kV, 13,8 kV, 23 kV, 34,5 kV) ou de baixa tensão (100 V, 127 V, 220 V, 254 V e 380 V), com a rede desligada ou com a rede energizada.

4.2.2 Modelagem do problema de roteirização

Na etapa 2 ocorre a definição do problema de roteirização, cujo principal objetivo é realizar todas as atividades previstas para o dia de trabalho, ou seja, atender todos os pontos mapeados percorrendo a menor distância possível, diminuindo a necessidade de recargas intermediárias e retornando ao ponto de origem, visitando

apenas uma única vez cada ponto de interesse (ponto de manutenção) e cada ponto de recarga. Para tal, são inseridas as particularidades da roteirização para um caminhão elétrico, que consistem, basicamente, em sua autonomia, os pontos de recarga e o tempo de recarga.

Neste trabalho foi adotada a metodologia de Küçükoglu et al. (2019) que consta no Capítulo 2, tratando-se de um problema do caixeiro viajante elétrico. A seguir é apresentada uma breve retórica sobre o tema e em seguida é descrito o modelo desenvolvido nesta dissertação.

Os principais trabalhos observados, levam em consideração a modelagem apresentada por Küçükoglu et al. (2019), que por sua vez é baseado nos modelos de Roberti et al. (2016) e Schneider et al. (2014), onde os mesmos descrevem modelos de otimização de rotas destinados somente para um veículo elétrico, podendo ser possível a realização de recargas parciais ou completas, bem como realizar a recarga em eletropostos públicos ou privados e, além disso, os três trabalhos consideram as funções de carregamento linear. O trabalho de Küçükoglu et al (2019) é adotado como principal referência, pois além das características citadas anteriormente, o modelo matemático apresentado considera a possibilidade de diferentes tecnologias de recarga entre os locais considerados para roteamento, o que implica em diferentes tempos de recarga em diferentes pontos e é baseado no Problema do Caixeiro Viajante Elétrico (PCVE).

Com base nas características apresentadas, o modelo matemático de Küçükoglu et al (2019) foi implementado para que possa ser obtido um planejamento da operação do veículo elétrico a cada dia, para cada equipe de trabalho. Porém, deve ser observado, com relação ao modelo de Küçükoglu et al (2019), que o modelo exato apresentado segue uma política de carregamento completo, além de possuir uma restrição destinada a janela de tempo para serviço, considerando que o modelo criado visa atender a necessidade de entregadores/motoristas que possuem veículo elétrico. No modelo implementado para essa dissertação adotou-se uma política de carregamento parcial, retirando-se os nós fictícios e também desconsiderando a restrição de janela de tempo, tendo em vista que os locais a serem visitados no dia serão separados antes por um responsável, respeitando o horário comum de serviço.

A seguir é apresentado o modelo descrito na dissertação, onde vale ressaltar que a discretização de tempo considerada é em minuto e para uma melhor

compreensão, inicialmente são apresentadas as nomenclaturas, conjuntos e parâmetros que o problema em questão exige.

O conjunto de informações necessárias e consideradas para o modelo levam em conta os nós depósitos, que ambos correspondem ao mesmo local. A ideia de considerar separados os conjuntos de nó depósito inicial e final é de garantir que a roteirização terá seu início e término sempre no depósito, representado pelo símbolo $\{0\}, \{N + 1\}$, onde N representa o número de clientes a serem visitados.

O conjunto de clientes é representado pela sigla V , $V_0 = V \cup \{0\}$ representa o conjunto de clientes mais o depósito inicial e $V_{N+1} = V \cup \{N + 1\}$ o conjunto de clientes mais o depósito final.

O conjunto de estações de recarga (ou eletropostos) é representado pela sigla F . Já o conjunto de clientes e eletropostos é representado por $V' = V \cup F$, onde considera-se que todo cliente possui um eletroposto.

As variáveis de decisão do problema são dadas por x , r , y e w . A variável x representa a escolha do trajeto a ser definido, sendo:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo elétrico percorre do nó } i \rightarrow j, \forall i \in V'_0, j \in V'_{N+1}, i \neq j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde i e j representam os nós do problema.

A variável r define se a bateria do veículo elétrico será recarregada no ponto i :

$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo elétrico é recarregado no nó } i, \forall i \in V' \cup \{N + 1\} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A variável y_i identifica o nível de carga da bateria na chegada do veículo no nó i , $\forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N + 1\}$.

As variáveis w e w' são referentes ao estado da carga da bateria, sendo w_i , a variável de decisão não negativa para identificar o estado da carga da bateria carregada do veículo elétrico no nó i , $\forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N + 1\}$ e w'_i a variável de decisão não negativa para identificar a carga da bateria gasta no trajeto entre o nó antecessor do trajeto até o nó i , $\forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N + 1\}$

A função objetivo do problema dada em (25) visa minimizar a distância a ser percorrida pelo veículo e também evitar carregamentos desnecessários.

$$\text{minimizar}_{x,r,y,w,w',p} \sum_{i \in V'_0} \sum_{j \in V'_{N+1}} d_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in V' \cup \{0\} \cup \{N+1\}} (Pen_1 \cdot w_i + Pen_2 \cdot w'_i) \quad (25)$$

onde os valores Pen_1 e Pen_2 são penalidades para as variáveis de estado de carga, sendo $Pen_1 > Pen_2$, e d_{ij} [km] representa a distância percorrida do nó i até o nó j , $\forall i \in V'_0, j \in V'_{N+1}, i \neq j$.

A seguir são apresentadas as restrições do problema. As restrições (26)-(30) são responsáveis por garantir que a rota satisfaz as condições do PCV de construir um circuito Hamiltoniano.

A restrição (26) assegura que cada cliente será visitado exatamente uma única vez, além de garantir que o circuito inicia no nó depósito:

$$\sum_{j \in V'_{N+1}} x_{ij} = 1, \forall i \in V_0 \quad (26)$$

A restrição (27) garante que cada eletroposto privado é visitado exatamente uma vez:

$$\sum_{j \in V'_{N+1}} x_{ij} \leq 1, \forall i \in F \quad (27)$$

A restrição (28) mantém a continuidade de fluxo do roteamento:

$$\sum_{i \in V'_0} x_{ij} = \sum_{i \in V'_{N+1}} x_{ji}, \forall j \in V' \quad (28)$$

As restrições (29) e (30) são restrições para evitar subrotas baseadas na metodologia de Miller-Tucker-Zemlin, por isso considera-se a variável p no modelo, sendo que $p_i \leq p_j$ indica que a cidade i será visita primeiro que a j .

$$p_i + g_i w_i \leq p_j + M(1 - x_{ij}), \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_{N+1} \quad (29)$$

$$0 \leq p_i \leq M, \forall i \in V_{N+1} \quad (30)$$

O valor M é um parâmetro utilizado na literatura denominado big-M, para garantir a condição quando necessário (este valor é predefinido na implementação). A taxa de recarga de um veículo elétrico no nó i , $\forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N+1\}$ é representada por g_i , sendo expressa em kWh, considerando a capacidade máxima

do carregador, e é definida como $g_i = \frac{60}{\text{capacidade}_{\text{carregador}}}$, onde o fator 60 no numerador é indicador da conversão de horas para minutos.

As restrições (31)-(33) determinam os níveis de bateria do veículo elétrico em cada nó. A restrição (31) determina que o veículo elétrico inicia o circuito com a bateria completa:

$$y_0 = Q \quad (31)$$

onde Q [kWh] representa a capacidade da bateria do veículo elétrico.

A restrição (32) garante que o nível da bateria na chegada a qualquer nó seja no mínimo 10% da capacidade total da bateria:

$$y_i \geq 0,1 \cdot Q \quad , \forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N+1\} \quad (32)$$

A restrição (33) determina o nível de bateria na chegada e a possível operação de recarga no nó antecessor do circuito:

$$y_j + hd_{ij} \leq y_i + w_i + Q(1 - x_{ij}) \quad , \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_{N+1} \quad (33)$$

onde h [kWh/km] representa a taxa de consumo de energia do veículo elétrico por unidade de distância.

As restrições (34)-(37) determinam a quantidade de recarga do veículo elétrico nos nós clientes ou nó depósito de acordo com uma política de recarregamento parcial.

$$w_i + y_i \leq Q \quad , \forall i \in F \quad (34)$$

$$w_i + w'_i + y_i = Q \quad , \forall i \in V_{N+1} \quad (35)$$

$$w_i \leq Qs_i r_i \quad , \forall i \in V \quad (36)$$

$$w'_i \leq Q(1 - r_i) \quad , \forall i \in V \quad (37)$$

O parâmetro s_i considera que um dado cliente pode ou não possuir um eletroposto e é definida por:

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{se o cliente } i \text{ possui eletroposto} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad , \forall i \in V.$$

Para essas estações, assume-se que seja conhecido pelo vetor s quais clientes possuem eletropostos disponíveis. No caso deste trabalho, este vetor sempre será composto por valores iguais a 1, uma vez que todos os pontos a serem visitados são possíveis de serem utilizados (mesmo que uma taxa de recarga mais baixa).

A seguir é apresentado o equacionamento completo adotado para esta dissertação.

$$\begin{aligned}
 & \text{minimizar} \quad \sum_{i \in V'_0} \sum_{j \in V'_{N+1}} d_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in V' \cup \{0\} \cup \{N+1\}} (Pen_1 \cdot w_i + Pen_2 \cdot w'_i) & (39) \\
 & \text{sujeito a} \quad \sum_{j \in V'_{N+1}} x_{ij} = 1 & , \forall i \in V_0 \\
 & \quad \quad \quad \sum_{j \in V'_{N+1}} x_{ij} \leq 1 & , \forall i \in F \\
 & \quad \quad \quad \sum_{i \in V'_0} x_{ij} = \sum_{i \in V'_{N+1}} x_{ji} & , \forall j \in V' \\
 & \quad \quad \quad p_i + g_i w_i \leq p_j + M(1 - x_{ij}) & , \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_{N+1} \\
 & \quad \quad \quad 0 \leq p_i \leq M & , \forall i \in V_{N+1} \\
 & \quad \quad \quad y_0 = Q \\
 & \quad \quad \quad y_i \geq 0.1 \cdot Q & , \forall i \in V' \cup \{0\} \cup \{N+1\} \\
 & \quad \quad \quad y_j + h d_{ij} \leq y_i + w_i + Q(1 - x_{ij}) & , \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_{N+1} \\
 & \quad \quad \quad w_i + y_i \leq Q & , \forall i \in F \\
 & \quad \quad \quad w_i + w'_i + y_i = Q & , \forall i \in V_{N+1} \\
 & \quad \quad \quad w_i \leq Q s_i r_i & , \forall i \in V \\
 & \quad \quad \quad w'_i \leq Q(1 - r_i) & , \forall i \in V
 \end{aligned}$$

4.2.3 Testes e validação do modelo

Na etapa 3 são realizados os experimentos numéricos desenvolvidos com o objetivo de verificar a comprovação do modelo proposto, sendo os testes realizados num computador portátil com sistema operacional Windows 10 e o software Gurobi na versão 9.1.1.

Para isso são utilizados os dados fornecidos pela Neoenergia Elektro os quais são introduzidos no modelo de roteirização visando a obtenção do menor deslocamento possível de modo a atender todos os pontos de interesse (clientes) a

serem atendidos num dia de trabalho, sendo que o veículo deve retornar à base no final da atividade.

Pretende-se verificar, também, a distância total percorrida entre os pontos de interesse, o tempo para atendimento dos pontos de interesse, se existe a necessidade de recargas intermediárias para o caminhão elétrico ou não, o tempo de resposta do solver e qual é o estado de carga da bateria após a realização das atividades ao retornar ao ponto de origem.

4.2.4 Viabilidade de implementação do caminhão elétrico

Na etapa 4 é apresentada uma análise comparativa de custos entre o caminhão movido à combustão fóssil e o caminhão elétrico visando a inserção de caminhões elétricos para as atividades de manutenção de rede de distribuição de energia.

Nessa etapa são considerados como dados de entrada o custo do caminhão à combustão fóssil e o custo do caminhão elétrico, os custos de manutenção preventiva dos mesmos, o custo de abastecimento com combustível fóssil e energia elétrica, a quantidade de dias úteis por ano e a quilometragem média anual percorrida informada pela Neoenergia Elektro.

Esses dados são analisados comparativamente buscando identificar os custos totais do caminhão à combustão fóssil e do caminhão elétrico para compreender qual é a variável que viabiliza ou inviabiliza a inserção de caminhões elétricos na manutenção de redes de distribuição de energia.

Também são exploradas particularidades dos caminhões elétricos que em alguns casos reforçam sua entrada nesse segmento e outras que são restritivas e minimizam a potencialização de inserção, visando entender qual ou quais variáveis tem maior importância nesse cenário.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação da metodologia de roteirização utilizando-se os dados das cidades de Mairiporã e Atibaia, ambas localizadas no Estado de São Paulo, com suas respectivas equipes e uma apreciação das avaliações dos critérios elencados. Posteriormente é realizada a análise dos resultados referentes à metodologia de otimização de rotas para manutenção de rede de distribuição de energia elétrica utilizando um caminhão elétrico na Neoenergia Elektro e também uma análise comparativa de custos visando a inserção de caminhões elétricos em atividades de manutenção de rede de distribuição de energia elétrica em substituição aos caminhões à combustão fóssil atualmente utilizados pela concessionária.

5.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS

Através dos dados disponibilizados pela Neoenergia Elektro obteve-se as informações relativas ao trabalho realizado por três equipes de Mairiporã e três equipes de Atibaia para o período de 03/11/2020 à 06/11/2020 (4 dias), sendo que fazem parte desses dados a quilometragem percorrida para atender cada ponto de interesse (cliente), a data do deslocamento, o tempo de deslocamento e posição geográfica do mesmo através do endereço disponibilizado.

Atualmente, a Neoenergia Elektro, uma distribuidora de energia elétrica utiliza em sua operação caminhões cabine simples 4x4 movidos à combustão fóssil, equipados com cesta aérea de 13,5 metros articulada telescópica e isolada 46 kV (dupla isolação) classe C, com carroceria em alumínio com compartimentos para acomodação de materiais e ferramentas necessárias à operação e manutenção da rede.

Neste caso, praticamente não existem restrições quanto ao abastecimento do caminhão uma vez que a capilaridade de postos de combustíveis fósseis é bastante extensa e vasta, possibilitando o reabastecimento mediante qualquer necessidade, sem grande preocupação com a autonomia e também com a roteirização. A Figura 9 apresenta uma ilustração da configuração do caminhão à diesel, cesta aérea e carroceria atualmente utilizados.

FIGURA 9 – LAYOUT GERAL DO CONJUNTO CAMINHÃO À DIESEL, CESTA AÉREA E CARROCERIA ATUALMENTE ATUALIZADO



FONTE: O autor (2021)

De acordo com informações da Neoenergia Elektro, atualmente as manutenções de redes são planejadas seguindo as políticas e requisitos internos, porém quando as equipes de campo recebem uma carteira de clientes os quais precisam ser atendidos em um único dia, especialmente para casos de manutenção da rede, fica a cargo da equipe (motorista e guardião da vida) decidir qual o melhor caminho a ser percorrido de forma a atender todas as demandas. Não existe a preocupação com a roteirização uma vez que praticamente não existem restrições para os caminhões movidos à combustão fóssil, devido a capilaridade de postos de combustíveis o que permite o reabastecimento a praticamente qualquer necessidade existente.

Porém, para realizar as mesmas atividades de manutenção de redes utilizando um caminhão elétrico equipado com cesta aérea e carroceria com as mesmas características existentes nos caminhões movidos à diesel, devem ser levados em consideração os aspectos técnicos da operação de caminhões elétricos, como autonomia e desempenho.

Como o caminhão é elétrico, escolher o caminho ótimo recai sobre um menor consumo de energia elétrica da bateria e por consequência uma maior autonomia e, preocupações com relação às recargas, pois não é adequado que o caminhão, durante a realização das mesmas, interrompa a operação e retorne à base para

realizar uma recarga, completa ou parcial, o que pode demorar muito tempo e diminuir a produtividade da equipe.

Caso seja extremamente necessária uma recarga durante a operação, pode-se recorrer a recargas de oportunidade utilizando a infraestrutura da rede de distribuição de energia, mas não são todos os pontos que estão disponíveis o que faz com que a roteirização do caminhão elétrico, além de determinar a rota ótima, considere também a autonomia do caminhão e os pontos de recargas de oportunidade.

Espera-se que o caminhão elétrico deixe a base operacional no início da manhã com a bateria 100% recarregada, realize todas as atividades previstas durante o dia de acordo com a rota ótima e retorne à base operacional ao final do dia para realizar a recarga completa durante o período noturno, no qual o caminhão não está em operação.

São utilizados neste trabalho os dados, premissas e informações que constam no desenvolvimento do projeto do caminhão elétrico, bem como os dados e informações da performance dos caminhões movidos à combustão fóssil que são atualmente utilizados na operação da Neoenergia Elektro.

Como premissas e dados iniciais para o trabalho de roteirização proposto nesta dissertação, a seguir são apresentadas as características de projeto do caminhão elétrico, cesta aérea e carroceria:

- Marca: BYD.
- Modelo: T7.
- Capacidade de carga líquida: 7.050 kg.
- Pneus: uso misto.
- Autonomia (nominal): até 200 km.
- Capacidade de carga da bateria: 160 kWh.
- Potência do motor elétrico auxiliar: 10 kW a 1.800 rpm.
- Carregador embarcado: 40 kW que permite a recarga parcial ou total do veículo diretamente do secundário de transformadores da rede de distribuição (Vehicle-to-Grid - V2G ou Veículo-para-Rede).

Características da cesta aérea:

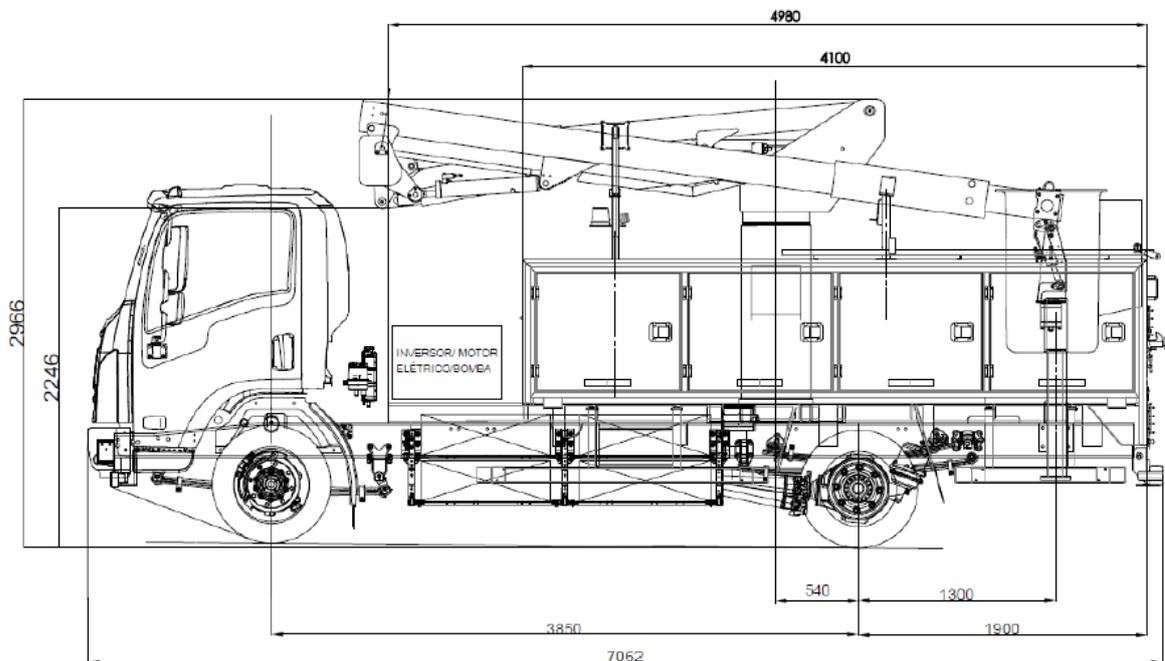
- Altura máxima de trabalho a partir da base do cesto: 13,2 a 13,6 m.
- Isolação (dupla isolamento) classe “C”: até 46 kV.
- Alcance horizontal: 8 m.
- Alcance com braço inferior totalmente recolhido e braço superior totalmente aberto: 7,3 a 7,7 m.
- Ângulo de rotação: infinito.
- Ângulo nominal de abertura dos braços na posição vertical: 180°.
- Capacidade máxima de carga da caçamba: 136 kg.
- Giro da caçamba: 180°.
- Sistema de tombamento da caçamba: - 92°.
- Sapatas estabilizadoras hidráulica do tipo “A”: 1 par.
- Peso máximo da cesta aérea: 1.060 kg.
- Conjunto estrutural: projetado de forma a atender as condições previstas nas normas ANSI/AS1 A92.2/2011 e NBR 16092.

Características da carroceria:

- Confeccionada em perfis estruturais de alumínio com forração em alumínio e compartimentos de carga para materiais e ferramentas necessárias à operação das atividades.
- Peso máximo da carroceria: 1.200 kg.

A Figura 10 apresenta o layout geral em uma vista lateral do conjunto montado considerando o caminhão elétrico equipado com a cesta aérea e a carroceria.

FIGURA 10 – LAYOUT GERAL DO CONJUNTO CAMINHÃO ELÉTRICO, CESTA AÉREA E CARROCERIA



FONTE: Oening et al. (2020)

Quando o projeto executivo estiver finalizado e o caminhão elétrico entrar em operação no ano de 2022, o mesmo será alocado pela Neoenergia Elektro na cidade de Mairiporã/SP e para esta dissertação é abordada a roteirização do caminhão elétrico para a cidade de Mairiporã e também para Atibaia/SP, devido à complexidade operacional local relativa ao terreno acidentado, com muitas estradas não pavimentadas, bem como ser uma região que apresenta uma com grande densidade demográfica e uma rede de distribuição de energia elétrica que necessita de reparos mais constantes do que a cidade de Limeira, a qual conta com uma área geográfica mais ampla, terreno mais plano e menos estradas não pavimentadas.

5.2 PARÂMETRO UTILIZADOS NA MODELAGEM DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO

Alguns parâmetros devem ser definidos para execução do problema. A seguir, descreve-se na

Tabela 5 os parâmetros utilizados para o problema de otimização e considerações sobre o solver utilizado.

TABELA 5 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

<i>Depósito</i>	<i>Base operacional</i>
<i>Distâncias (d_{ij})</i>	Obtidos pelo Google API Distance Matrix
<i>Tempo de trajeto (t_{ij})</i>	
<i>Capacidade máxima do carregador ($capacidade_{carregador}$)</i>	Nó depósito -> 40kWh Demais nós -> 20 kWh
<i>Existência de eletropostos (vetor s)</i>	Todos os nós possuem eletropostos
<i>Taxa de consumo de energia do VE (h)</i>	0,8 kWh
<i>Capacidade da bateria do VE (Q)</i>	160 kWh
<i>Penalidades na função objetivo</i>	$Pen_1 = 2$ e $Pen_2 = 0,05$
<i>Valor M</i>	9999
<i>Quantidade de tempo de execução máxima do solver para cada problema</i>	500 segundos ou aproximadamente 8 minutos

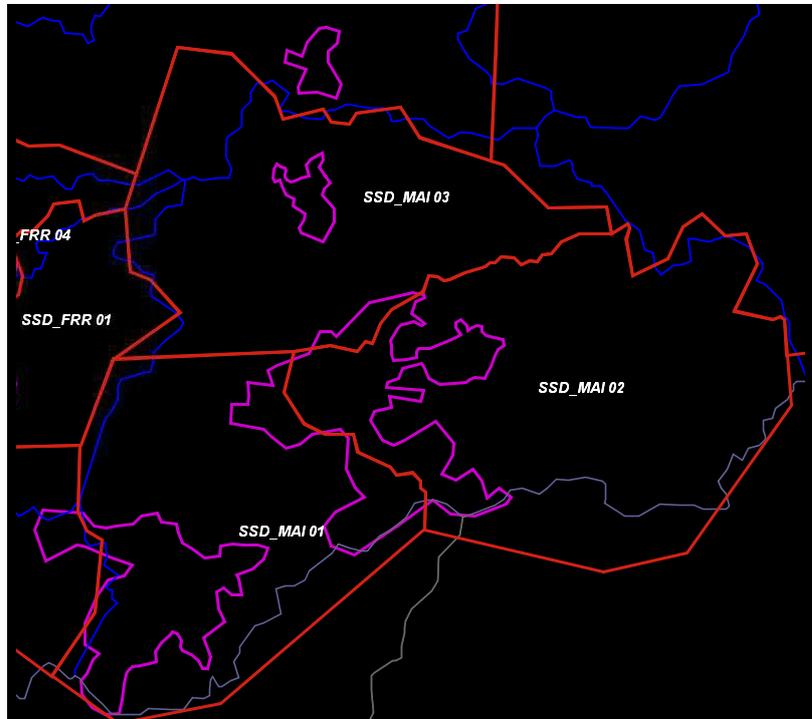
FONTE: LACTEC et al. (2021)

5.3 TESTES E VALIDAÇÃO DO MODELO

5.3.1 Resultados relativos à Mairiporã

O planejamento para os dias 03, 04, 05 e 06/11/2020 foram elaborados para três equipes que atendem a cidade, sendo elas: MAI-01, MAI-02 e MAI-03. A Figura 11 destaca a área de operação de cada equipe pelas linhas vermelhas, porém não necessariamente sempre a equipe ficará na própria área de atuação (poligonal).

FIGURA 11 – DIVISÃO DAS EQUIPES NA CIDADE DE MAIRIPORÃ (POLIGONAIS)



FONTE: LACTEC et al. (2021)

Os resultados do planejamento das atividades estão registrados em tabelas que constam no Apêndice 1, as quais contêm informações quanto ao circuito, distância da viagem em quilômetros, tempo total de viagem associado ao circuito em minutos, cargas no momento da chegada nos pontos, se foi necessária recarga quanto foi carregado e o tempo de execução do solver para resposta.

A Tabela 6 apresenta um resumo dos resultados da simulação para equipe MAI-01 de Mairiporã onde se nota que a distância percorrida pelo caminhão elétrico representa 38% da carga total da bateria para a máxima distância percorrida, não havendo, portanto, restrições para aplicação desse veículo para essas atividades uma vez que a autonomia é suficiente.

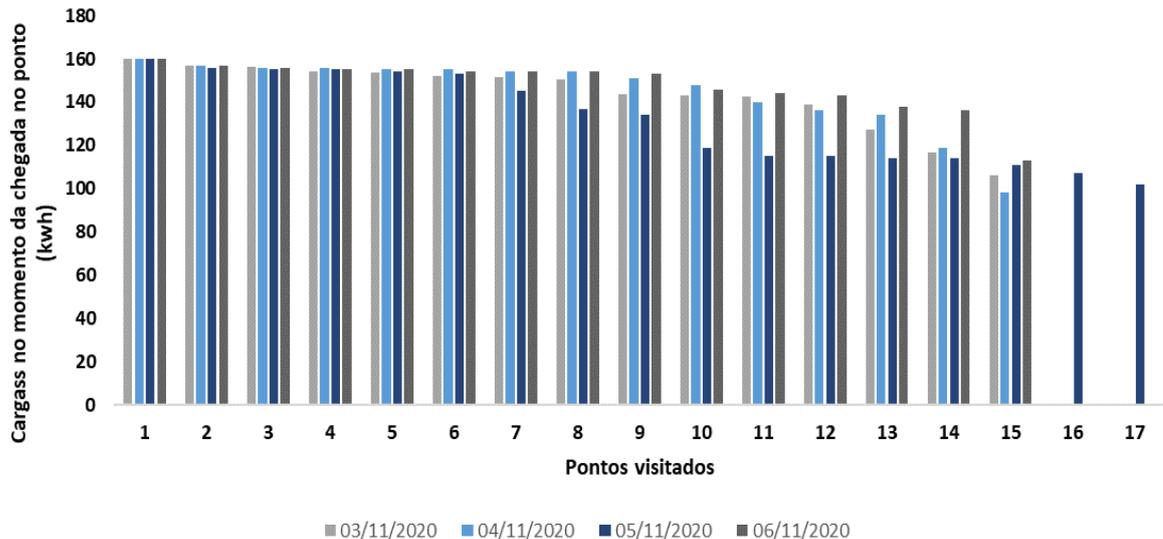
TABELA 6 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE MAI-01 DE 03/11/2020 A 06/11/2020

Equipe MAI-01					
TABELA	DIA	DISTÂNCIA VIAGEM (km)	TEMPO VIAGEM (min.)	RECARGA?	TEMPO PARA OBTER A SOLUÇÃO (segundos)
21	03/11/2020	67,63	142,13	Não	1,54
22	04/11/2020	76,68	151,52	Não	54,19
23	05/11/2020	72,07	165,50	Não	41,96
24	06/11/2020	59,12	123,25	Não	17,59

FONTE: O autor (2021)

A Figura 12 representa o estado de carga da bateria do caminhão elétrico referente ao deslocamento da equipe MAI-01 no período de 03/11/2020 a 06/11/2020.

FIGURA 12 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE MAI-01



FONTE: O autor (2021)

A Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados da simulação para equipe MAI-02 de Mairiporã onde se nota que a distância percorrida pelo caminhão elétrico representa 38% da carga total da bateria para a máxima distância percorrida, não havendo, portanto, restrições para aplicação desse veículo para essas atividades uma vez que a autonomia é suficiente.

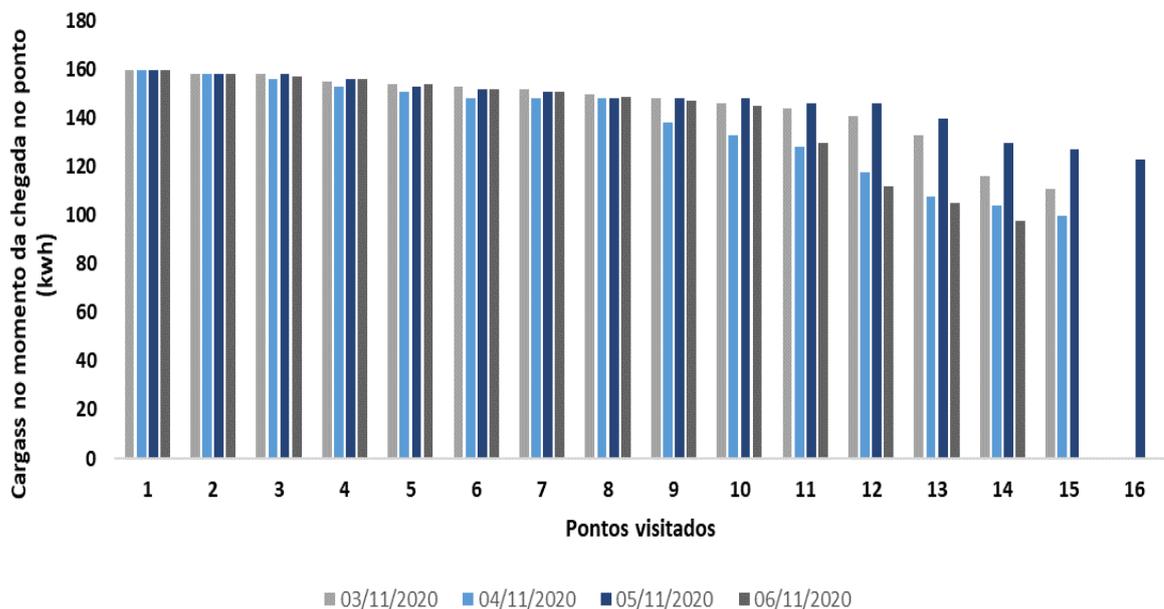
TABELA 7 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE MAI-02 DE 03/11/2020 A 06/11/2020

Equipe MAI-02					
TABELA	DIA	DISTÂNCIA VIAGEM (km)	TEMPO VIAGEM (min.)	RECARGA?	TEMPO PARA OBTER A SOLUÇÃO (segundos)
25	03/11/2020	60,77	137,93	Não	97,23
26	04/11/2020	74,99	180,46	Não	7,31
27	05/11/2020	45,48	114,40	Não	192,07
28	06/11/2020	77,20	157,41	Não	5,94

FONTE: O autor (2021)

A Figura 13 representa o estado de carga da bateria do caminhão elétrico referente ao deslocamento da equipe MAI-02 no período de 03/11/2020 a 06/11/2020.

FIGURA 13 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE MAI-02



FONTE: O autor (2021)

A Tabela 8 apresenta um resumo dos resultados da simulação para equipe MAI-03 de Mairiporã onde se nota que a distância percorrida pelo caminhão elétrico representa 84% da carga total da bateria para a máxima distância percorrida, não havendo, portanto, restrições para aplicação desse veículo para essas atividades uma vez que a autonomia é suficiente.

TABELA 8 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE MAI-03 DE 03/11/2020 A 06/11/2020

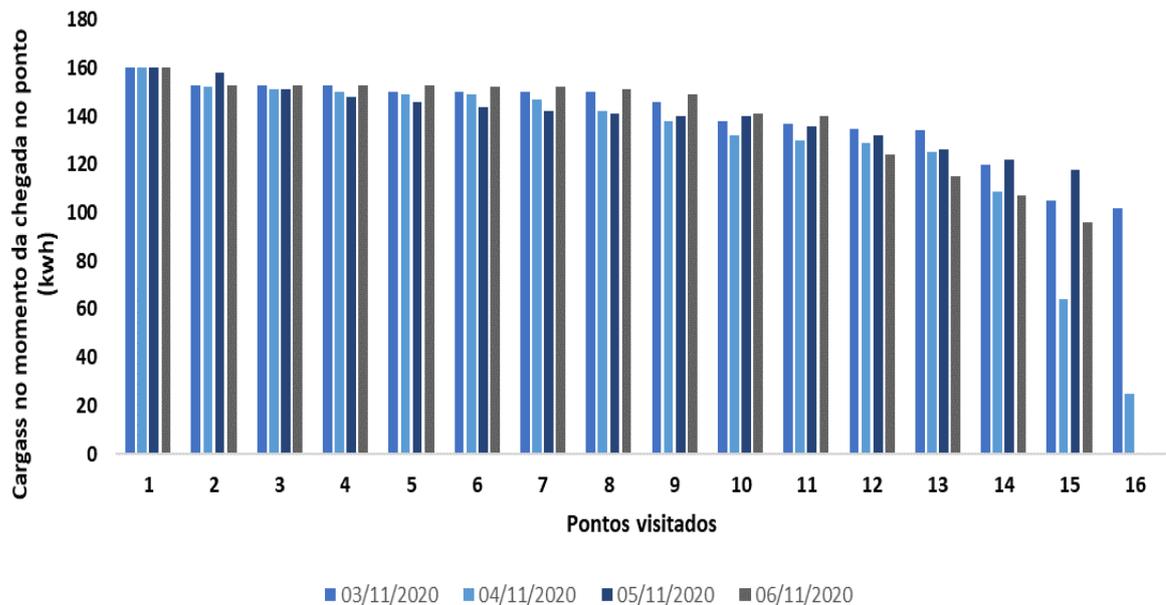
Equipe MAI-03					
TABELA	DIA	DISTÂNCIA VIAGEM (km)	TEMPO VIAGEM (min.)	RECARGA?	TEMPO PARA OBTER A SOLUÇÃO (segundo)
29	03/11/2020	72,35	112,18	Não	72,89
30	04/11/2020	168,00	240,00	Não	500,00
31	05/11/2020	51,92	123,50	Não	1,74
31	06/11/2020	78,76	159,53	Não	387,22

FONTE: O autor (2021)

Destaca-se que quando o solver atinge o tempo máximo estipulado de 500 segundos, não significa que a solução ótima está garantida, mas sim uma solução aproximada.

A Figura 14 representa o estado de carga da bateria do caminhão elétrico referente ao deslocamento da equipe MAI-03 no período de 03/11/2020 a 06/11/2020.

FIGURA 14 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE MAI-03



FONTE: O autor (2021)

A Tabela 9 a seguir apresenta um resumo dos deslocamentos das equipes MAI-01, MAI-02 e MAI-03 para o período de 03/11/2020 a 06/11/2020 para o caminhão elétrico.

TABELA 9 – RESUMOS DOS DESLOCAMENTOS DAS TRÊS EQUIPES DE MAIRIPORÃ NO PERÍODO DE 03/11/2020 A 06/11/2020 COM CAMINHÃO ELÉTRICO

CAMINHÃO ELÉTRICO					
EQUIPE	03/11/2020	04/11/2020	05/11/2020	06/11/2020	TOTAL
MAI-01	67,63	76,68	72,07	59,12	275,50
MAI-02	60,77	74,99	45,58	77,20	258,54
MAI-03	72,35	168,00	51,92	78,76	371,03
TOTAL	200,75	319,67	169,57	215,08	905,07

FONTE: O autor (2021)

A Tabela 10 apresenta um resumo dos deslocamentos realizados pelas equipes MAI-01, MAI-02 e MAI-03 para o período de 03/11/2020 a 06/11/2020, utilizando caminhão à combustão fóssil, onde o mesmo não possui uma roteirização e nota-se que a falta de planejamento resulta em um deslocamento cerca de 63% maior quando comparado com o caminhão elétrico.

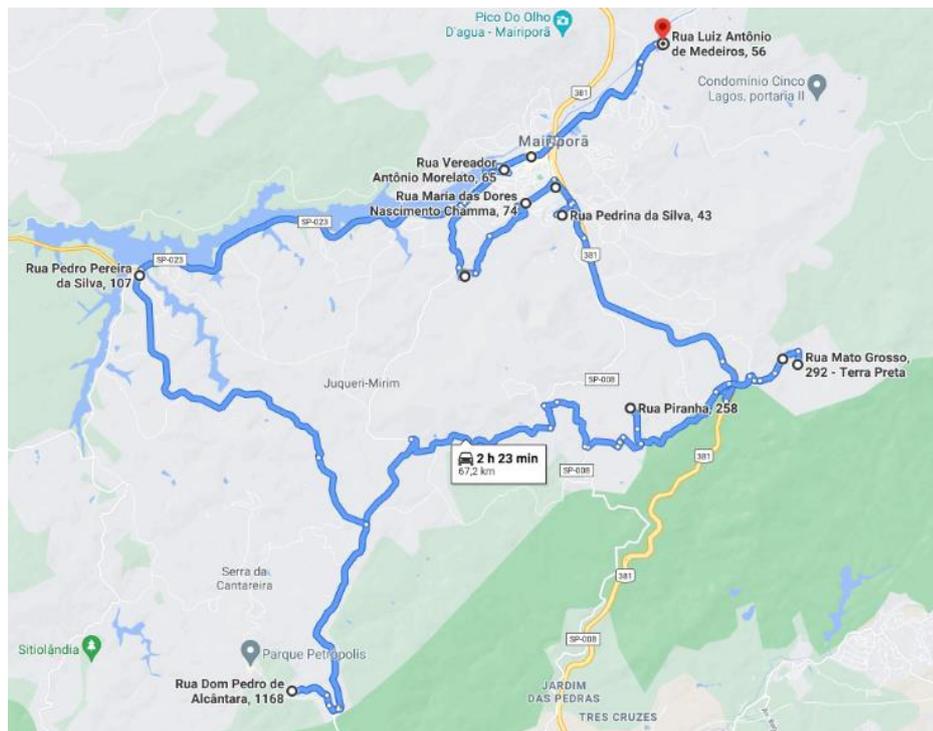
TABELA 10 – RESUMOS DOS DESLOCAMENTOS DAS TRÊS EQUIPES DE MAIRIPORÃ NO PERÍODO DE 03/11/2020 A 06/11/2020 COM CAMINHÃO À COMBUSTÃO

CAMINHÃO À COMBUSTÃO					
EQUIPE	03/11/2020	04/11/2020	05/11/2020	06/11/2020	TOTAL
MAI-01	103,70	91,44	169,08	140,75	504,97
MAI-02	100,10	172,70	49,60	128,30	450,70
MAI-03	152,60	126,30	134,90	105,70	519,50
TOTAL	356,40	390,44	353,58	374,75	1.475,17

FONTE: O autor (2021)

A título de exemplo, a Figura 15 destaca a rota a ser realizada pela equipe MAI-01, dia 03/11/2020 onde a mesma parte da base operacional, passa por 14 pontos de interesse realizando atividades e retorna ao ponto de origem com 65% da carga da bateria.

FIGURA 15 – TRAJETO OTIMIZADO PARA MAIRIPORÃ – EQUIPE MAI-01, 03/11/2020



FONTE: LACTEC et al. (2021)

5.3.2 Resultados relacionados à Atibaia

O planejamento para os dias 03, 04, 05 e 06/11/2020 foram elaborados para três equipes que atendem a cidade, sendo elas: ATI-01, ATI-02 e ATI-03. Os resultados do planejamento estão registrados em tabelas, ao qual contêm informações quanto ao circuito, distância da viagem em quilômetros, tempo total de viagem associado ao circuito em minutos, cargas no momento da chegada nos pontos, se foi necessária recarga, quanto foi carregado e o tempo de execução do solver para resposta.

A Tabela 11 apresenta um resumo dos resultados da simulação para equipe ATI-01 de Atibaia onde se nota que a distância percorrida pelo caminhão elétrico representa 39% da carga total da bateria para a máxima distância percorrida, não

havendo, portanto, restrições para aplicação desse veículo para essas atividades uma vez que a autonomia é suficiente.

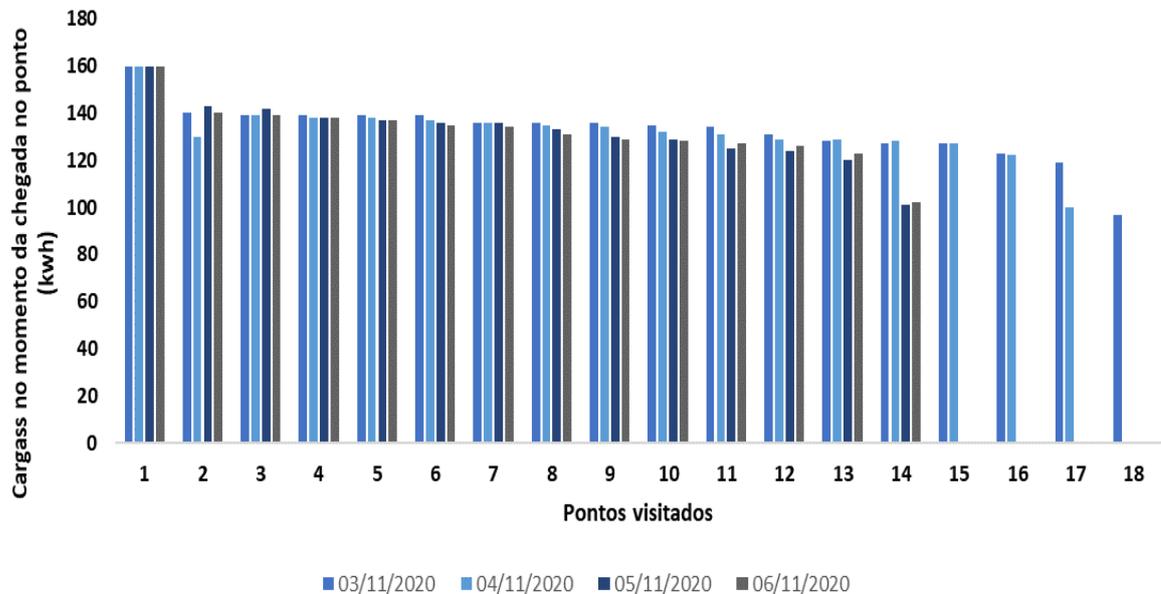
TABELA 11 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE ATI-01 DE 03/11/2020 A 06/11/2020

Equipe ATI-01					
TABELA	DIA	DISTÂNCIA VIAGEM (km)	TEMPO VIAGEM (min.)	RECARGA?	TEMPO PARA OBTER A SOLUÇÃO (segundos)
33	03/11/2020	78,03	118,2	Não	500
34	04/11/2020	74,41	118,13	Não	500
35	05/11/2020	73,15	110,30	Não	500
36	06/11/2020	72,50	104,50	Não	500

FONTE: O autor (2021)

A Figura 16 representa o estado de carga da bateria do caminhão elétrico referente ao deslocamento da equipe ATI-01 no período de 03/11/2020 a 06/11/2020.

FIGURA 16 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE ATI-01



FONTE: O autor (2021)

A Tabela 12 apresenta um resumo dos resultados da simulação para equipe ATI-02 de Atibaia onde nota-se que a distância percorrida pelo caminhão elétrico representa 101% além da carga total da bateria para a máxima distância percorrida. Analisando a base de dados se nota que a equipe não realizou uma atividade na cidade de Bertiooga, mas sim o veículo se deslocou até lá para realizar uma manutenção no equipamento. Nos dados do dia 06/11/2020 nota-se um consumo de bateria maior que a capacidade da mesma isso porque o veículo partiu da base de Mairiporã, seguiu para Atibaia onde realizou as atividades durante todo o dia e retornou à Mairiporã, necessitando assim de recarga intermediária.

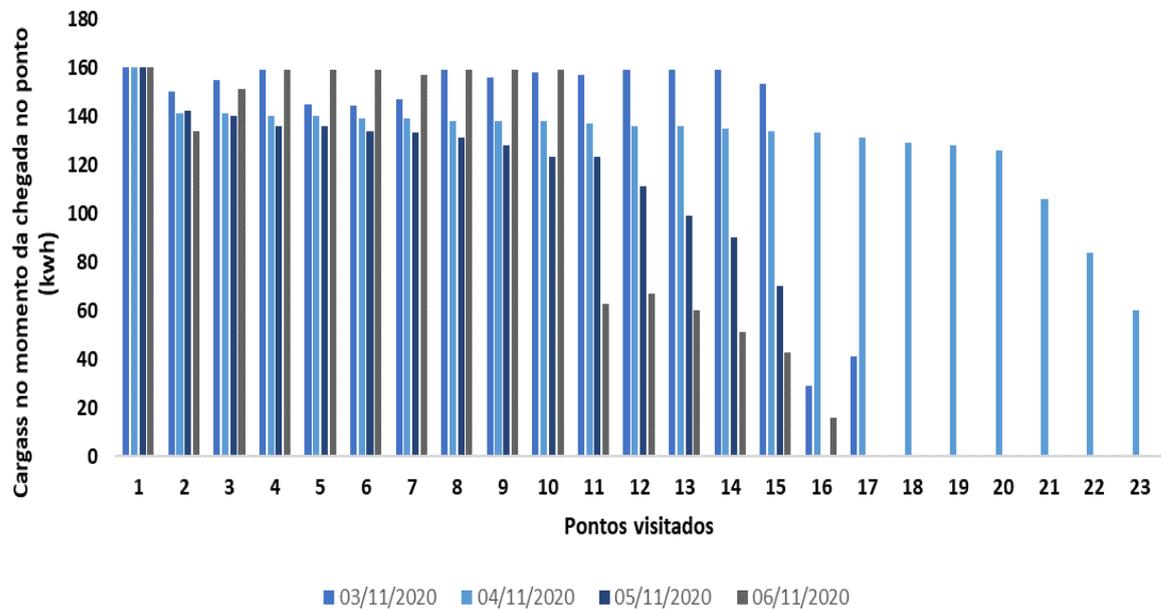
TABELA 12 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE ATI-02 DE 03/11/2020 A 06/11/2020

Equipe ATI-02					
TABELA	DIA	DISTÂNCIA VIAGEM (km)	TEMPO VIAGEM (min.)	RECARGA?	TEMPO PARA OBTER A SOLUÇÃO (segundos)
37	03/11/2020	402,39	500,35	Sim	500
38	04/11/2020	124,18	182,71	Não	500
39	05/11/2020	111,47	189,51	Não	500
40	06/11/2020	349,39	328,38	Sim	500

FONTE: O autor (2021)

A Figura 17 representa o estado de carga da bateria do caminhão elétrico referente ao deslocamento da equipe ATI-02 no período de 03/11/2020 a 06/11/2020.

FIGURA 17 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE ATI-02



FONTE: O autor (2021)

A Tabela 13 apresenta um resumo dos resultados da simulação para equipe ATI-03 de Atibaia onde se nota que a distância percorrida pelo caminhão elétrico representa 81% da carga total da bateria para a máxima distância percorrida, não havendo, portanto, restrições para aplicação desse veículo para essas atividades uma vez que a autonomia é suficiente.

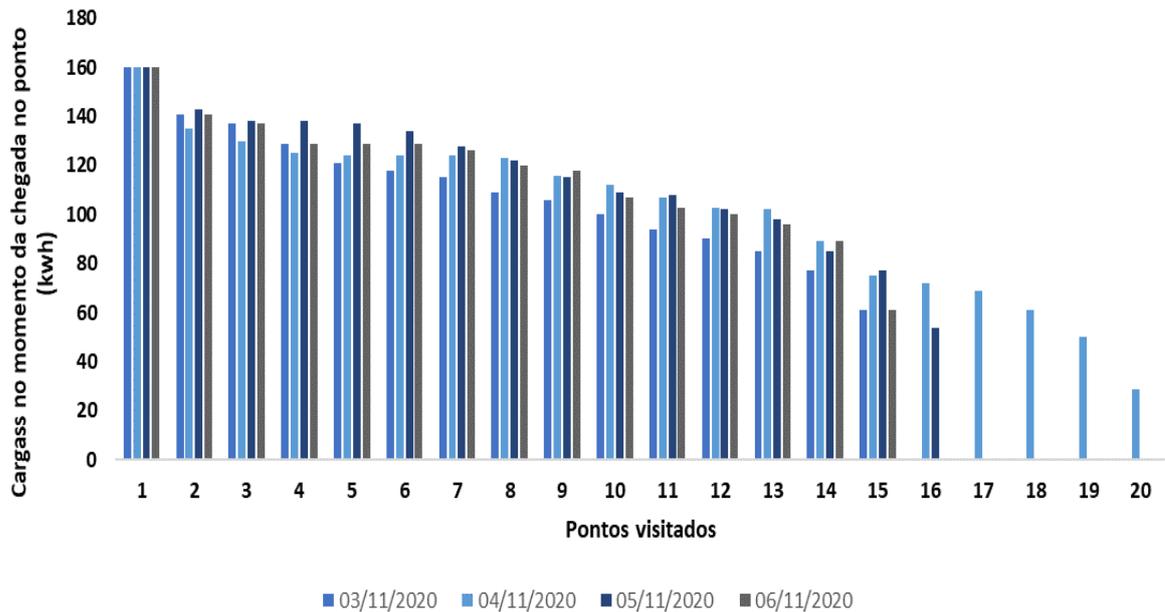
TABELA 13 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA EQUIPE ATI-03 DE 03/11/2020 A 06/11/2020

Equipe ATI-03					
TABELA	DIA	DISTÂNCIA VIAGEM (km)	TEMPO VIAGEM (min.)	RECARGA?	TEMPO PARA OBTER A SOLUÇÃO (segundos)
41	03/11/2020	123,58	186,45	Não	77
42	04/11/2020	162,50	217,56	Não	500,00
43	05/11/2020	131,28	160,86	Não	500
44	06/11/2020	122,97	168,01	Não	84

FONTE: O autor (2021)

A Figura 18 representa o estado de carga da bateria do caminhão elétrico referente ao deslocamento da equipe ATI-03 no período de 03/11/2020 a 06/11/2020.

FIGURA 18 – CARGA DA BATERIA – EQUIPE ATI-03



FONTE: O autor (2021)

A Tabela 14 a seguir apresenta um resumo dos deslocamentos das equipes ATI-01, ATI-02 e ATI-03 para o período de 03/11/2020 a 06/11/2020 para o caminhão elétrico.

TABELA 14 – RESUMOS DOS DESLOCAMENTOS DAS TRÊS EQUIPES DE ATIBAIA NO PERÍODO DE 03/11/2020 A 06/11/2020 COM CAMINHÃO ELÉTRICO

CAMINHÃO ELÉTRICO					
EQUIPE	03/11/2020	04/11/2020	05/11/2020	06/11/2020	TOTAL
ATI-01	78,03	74,41	73,15	72,50	298,09
ATI-02	402,39	124,18	111,47	349,39	987,43
ATI-03	123,58	162,50	131,28	122,97	540,33
TOTAL	604,00	361,09	315,90	544,86	1.825,85

FONTE: O autor (2021)

A Tabela 15 apresenta um resumo dos deslocamentos realizados pelas equipes ATI-01, ATI-02 e ATI-03 para o período de 03/11/2020 a 06/11/2020, utilizando caminhão à combustão fóssil, onde o mesmo não possui uma roteirização e nota-se que a falta de planejamento resulta em um deslocamento cerca de 42% maior quando comparado com o caminhão elétrico.

TABELA 15 – RESUMOS DOS DESLOCAMENTOS DAS TRÊS EQUIPES DE ATIBAIA NO PERÍODO DE 03/11/2020 A 06/11/2020 COM CAMINHÃO À COMBUSTÃO

CAMINHÃO À COMBUSTÃO					
EQUIPE	03/11/2020	04/11/2020	05/11/2020	06/11/2020	TOTAL
ATI-01	104,35	92,60	100,10	108,85	405,90
ATI-02	567,17	147,04	125,10	396,00	1.235,31
ATI-03	237,00	258,93	231,90	234,23	962,06
TOTAL	908,52	498,57	457,10	739,08	2.603,27

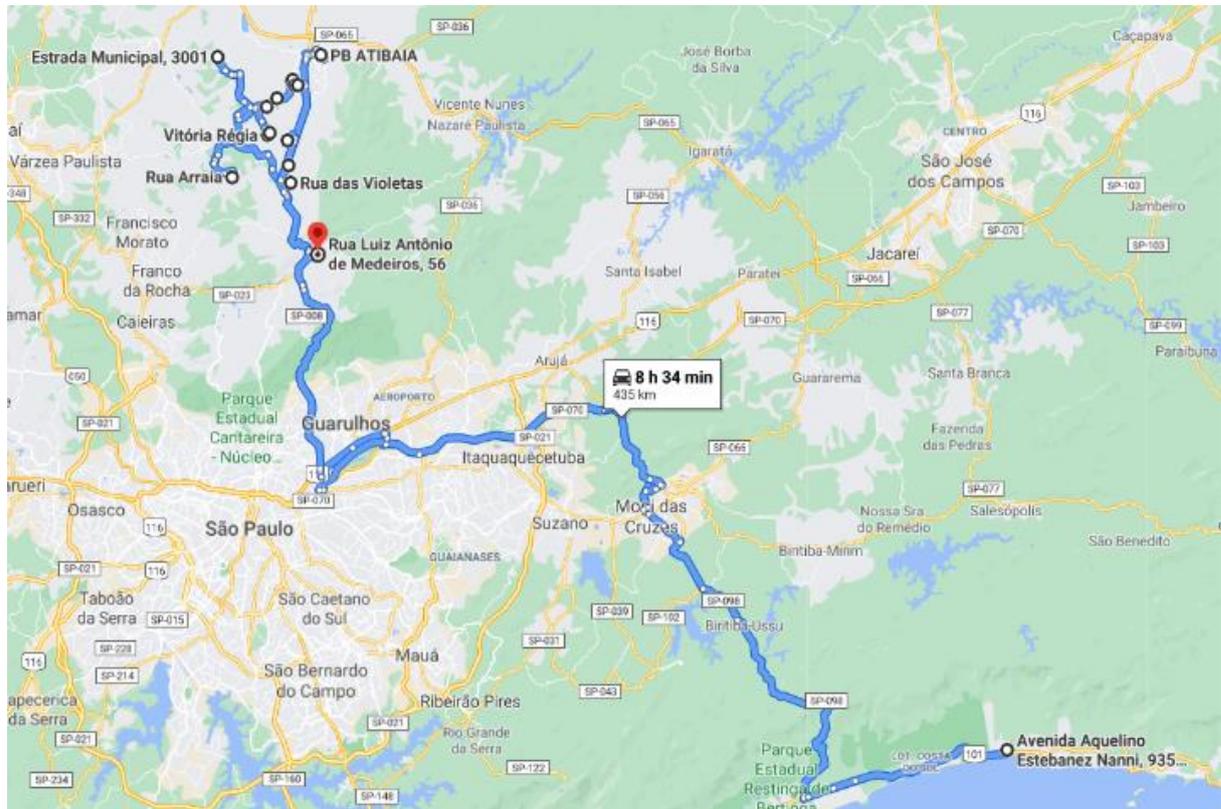
FONTE: O autor (2021)

Dos resultados obtidos para Atibaia, destaca-se uma maior concentração de pontos para otimização. Por estarmos tratando de um modelo de otimização exato de programação linear inteira mista, o aumento de pontos faz com que o tempo da execução seja maior. Outro ponto a ser destacado é que só houve recargas da bateria em dois planejamentos.

Ocorreu recarregamento devido a um dos endereços, definidos a partir da latitude e longitude da base de dados, ficou fora da poligonal de Atibaia, onde o endereço recaí na cidade de Bertioga, São Paulo. Devido a isso, ocorreu recarregamentos durante o trajeto. Mesmo assim, há de ser destacado que o carregamento ocorreu de modo a sempre deixar a bateria completamente carregada na saída do veículo elétrico em cada ponto. O trajeto é descrito na

Figura 19.

FIGURA 19 – TRAJETO OTIMIZADO PARA ATIBAIA – ATI-02, 03/11/2020

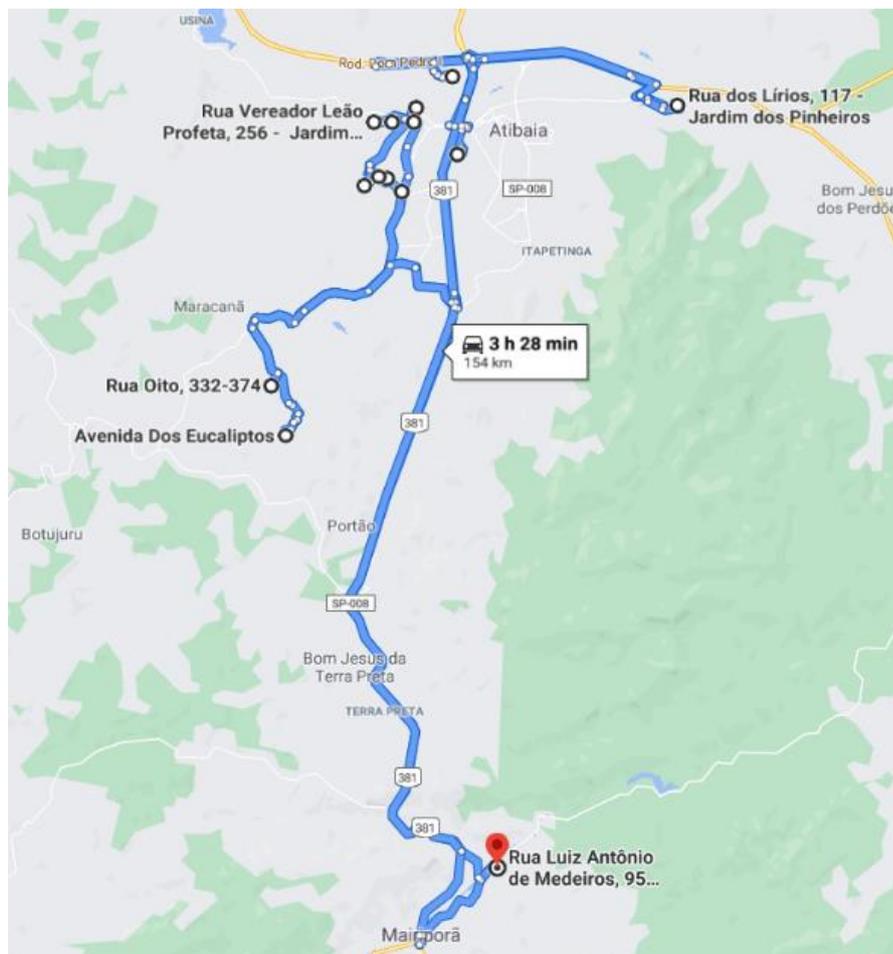


FONTE: LACTEC et al. (2021)

No caso apresentado, observa-se que um dos endereços definidos é distante da maioria dos demais considerados no planejamento. Este ocorrido é um erro retornado pela base de dados de distância adotada, uma vez que o endereço se encontra na região correta da poligonal. Mesmo com o modelo minimizando distâncias prioritariamente, além de penalizar carregamentos, a rota otimizada possui a menor distância dentre os endereços (lembrando que o último endereço é necessariamente o depósito). Devido a este ocorrido, ocorreu recargas durante o trajeto.

O trajeto otimizado descartando a localidade de Bertioga é mostrado na Figura 20.

FIGURA 20 – TRAJETO OTIMIZADO PARA ATIBAIA – ATI-02, 06/11/2020



FONTE: Oening et al. (2021)

Mesmo assim, é verificado nestes dois casos que são recargas a serem efetuadas em vários pontos, mas em alguns deles menores de 1kWh. Estes valores menores de 1kWh identificados são para deixar a bateria do veículo elétrico sempre na carga completa para sair do ponto que está, mesmo que o modelo implementado permita recargas parciais.

O modelo proposto é avaliado sendo que o mesmo atende às premissas com a ressalva de que como se trata de uma programação inteira linear mista o aumento no número de pontos faz com que o tempo de execução seja maior, pontualmente para algumas análises.

5.4 Análise comparativa de custos do caminhão elétrico e caminhão a combustão

Como forma de ampliar o escopo dessa dissertação é realizada uma análise comparativa dos custos de aquisição, abastecimento e manutenção preventiva dos caminhões à combustão e elétricos, visando entender qual das variáveis impacta na massificação dos caminhões elétricos para a atividade de manutenção de redes de distribuição de energia elétrica. Não fazem parte dessa análise os custos relativos aos equipamentos e implementos instalados nos caminhões uma vez que os mesmos são similares e independem do tipo de caminhão, bem como os custos de manutenções corretivas que dependem de variáveis, por exemplo, relacionadas à maneira como os caminhões são conduzidos e, portanto, de difícil controle e parametrização.

A Tabela 16 apresenta os custos de aquisição para cada um dos modelos de caminhões à combustão fóssil utilizados pela companhia de distribuição de energia elétrica, sendo que esses custos foram obtidos através de pesquisas na tabela FIPE. Nota-se que o valor do caminhão elétrico é 3,8 vezes maior do que o valor do caminhão à combustão.

TABELA 16 – CUSTOS DE AQUISIÇÃO DE CAMINHÕES À COMBUSTÃO E ELÉTRICO

MARCA/MODELO	PREÇO UNITÁRIO DE AQUISIÇÃO R\$	OBSERVAÇÕES
VW 11.180 4x4 Delivery	395.380	Referência Tabela FIPE 30/12/2021 - Código 515180-5
VW 15.190 4x4 Constellation	360.021	Referência Tabela FIPE 30/12/2021 - Código 515134-1
Caminhão Elétrico BYD T7 4x2	1.500.000	Inovações do P&D incorporadas no custo. Referência 11/2020

FONTE: O autor (2021)

A Tabela 17 apresenta os custos com manutenção preventiva considerando que cada um dos caminhões roda em média 36.000 quilômetros por ano com base em informações disponibilizadas pela distribuidora de energia elétrica. Os custos de manutenção preventiva para cada modelo de veículo foram obtidos através de pesquisas de mercado junto aos fabricantes de cada marca. Nota-se que para uma mesma quilometragem acumulada após 5 anos de utilização, os custos das

manutenções preventivas do caminhão elétrico são cerca de 4 vezes menores do que o caminhão à combustão.

TABELA 17 – CUSTOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE CAMINHÕES À COMBUSTÃO E ELÉTRICO

QUILOMETRAGEM ANUAL	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	TOTAL
MARCA/MODELO	36.000	72.000	108.000	144.000	180.000	
VW 11.180 4x4 Delivery	1.944	6.768	17.032	30.672	48.798	105.214
VW 15.190 4x4 Constelattion	1.890	5.868	14.170	25.243	39.726	86.897
Caminhão Elétrico BYD T7 4x2	4.983	4.983	4.983	4.983	4.983	24.915

FONTE: O autor (2021)

A Tabela 18 apresenta uma estimativa de custos anuais de combustível fóssil e energia elétrica utilizados para abastecer os veículos, tomando por base suas características técnicas. Os valores do litro de diesel e do quilowatt-hora são obtidos com dados de mercado na área de concessão da distribuidora de energia elétrica tomando por base a média do mês de dezembro de 2021. Considerando que os veículos rodem 36.000 quilômetros por ano, obtêm-se o custo total de abastecimento onde nota-se que o custo para abastecimento do caminhão elétrico é cerca de 40% a menos que o custo de abastecimento do caminhão à combustão.

TABELA 18 – ESTIMATIVA DE CUSTO ANUAL COM COMBUSTÍVEL FÓSSIL E ELETRICIDADE

MARCA/MODELO	CAPACIDADE TANQUE (l) OU BATERIA (kWh)	PREÇO MÉDIO DIESEL (R\$/l) OU ENERGIA ELÉTRICA (R\$/kWh)	CUSTO PARA ABASTECER 100% (R\$)	AUTONOMIA (km)	CUSTO MÉDIO (R\$/km)	GASTO MÉDIO ANUAL DE COMBUSTÍVEL (R\$)
VW 11.180 4x4 Delivery	150,00	5,10	765,00	450,00	1,70	61.200,00
VW 15.190 4x4 Constelattion	275,00	5,10	1.402,50	825,00	1,70	61.200,00
Caminhão Elétrico BYD T7 4x2	160,60	0,85	136,51	200,00	0,68	24.571,80

FONTE: O autor (2021)

A Tabela 19 apresenta um resumo dos custos totais para os caminhões à combustão e o caminhão elétrico, num horizonte de 5 anos, considerando os os custos totais de aquisição, somados os custos de abastecimento e manutenção preventiva. Nota-se que os custos totais do caminhão à combustão é cerca de 49% a mais em relação aos custos totais do caminhão elétrico.

TABELA 19 – COMPARATIVO ENTRE CUSTOS DE AQUISIÇÃO, MANUTENÇÃO PREVENTIVA E COMBUSTÍVEL DE CAMINHÕES ELÉTRICOS E À COMBUSTÃO

QUILOMETRAGEM ANUAL MARCA/MODELO	INVESTIMENTO INICIAL	CUSTOS AO LONGO DE 5 ANOS		TOTAL
		COMBUSTÍVEL	MANUTENÇÃO	
VW 11.180 4x4 Delivery	395.380	306.000	105.214	806.594
VW 15.190 4x4 Constelattion	360.021	306.000	86.897	752.918
Caminhão Elétrico BYD T7 4x2	1.500.000	122.859	24.915	1.647.774

FONTE: O autor (2021)

Ressalta-se que o alto valor de aquisição do caminhão elétrico apresentado no estudo deve-se ao fato do mesmo estar vinculado ao P&D o qual conta com vários diferenciais, desenvolvimentos aplicados e o fato do mesmo ser importado o que fazem com que seu custo inicial seja bem superior a outros modelos comerciais.

Apesar do custo de aquisição do caminhão elétrico ser significativamente maior que o caminhão à combustão, os gastos posteriores com manutenção preventiva e combustível (eletricidade) ao longo do tempo são bem menores que os do caminhão à combustão, porém mesmo assim a equalização dos custos ainda fica comprometida num curto ou médio espaço de tempo.

Diante desse fato criou-se o cenário apresentado na Tabela 20 onde, mantendo-se os custos de abastecimento e manutenção, variou-se o custo do caminhão elétrico até que os custos totais do caminhão elétrico e do caminhão a combustão fossem equivalentes. Para que se tenha a equidade total de custos é necessário que o custo de aquisição do caminhão elétrico seja de R\$ 660.000.

TABELA 20 – EQUIDADE DE CUSTOS DO CAMINHÃO À COMBUSTÃO E CAMINHÃO ELÉTRICO

QUILOMETRAGEM ANUAL MARCA/MODELO	INVESTIMENTO INICIAL	CUSTOS AO LONGO DE 5 ANOS		TOTAL
		COMBUSTÍVEL	MANUTENÇÃO	
VW 11.180 4x4 Delivery	395.380	306.000	105.214	806.594
VW 15.190 4x4 Constelattion	360.021	306.000	86.897	752.918
Caminhão Elétrico Viável	660.000	122.859	24.915	807.774

FONTE: O autor (2021)

De posse do custo de aquisição necessário para a equidade com o caminhão à combustão, fez-se uma busca aberta na Internet de empresas que possuem caminhão elétrico com características técnicas que atendam a necessidade do projeto e seus respectivos custos de aquisição.

O único caminhão que atende tecnicamente é o VW e-Delivery 11 toneladas 4x2 com 6 packs de bateria, porém seu custo de aquisição é de R\$ 940.000, que ainda é superior à necessidade para equidade com o caminhão à combustão, comparando os custos totais.

A seguir, algumas particularidades que devem ser destacadas quanto da inserção de caminhões elétricos para a atividade de manutenção de redes de energia elétrica, tais como:

- Considerando-se os altos custos de aquisição, os grandes fomentadores dos caminhões elétricos devem ser a iniciativa privada ou governamental através de projetos, como os de P&D, por exemplo.
- O grande entrave ainda é o alto custo de aquisição que tende a reduzir à medida que ocorrerem novos desenvolvimentos, principalmente referentes à produtos nacionais e novas tecnologias de baterias, que podem fazer com que os custos sejam reduzidos.
- Faz-se necessária também a expansão da infraestrutura de recarga para os caminhões elétricos ao longo do trajeto, uma vez que é inviável que o mesmo retorne até uma base operacional da distribuidora de energia elétrica enquanto realiza as manutenções na rede para uma recarga de bateria, seja ela parcial e/ou total.

- Desenvolvimento de tecnologias de recargas de oportunidade que permitam a recarga dos caminhões enquanto os mesmos realizam as atividades de manutenção da rede de energia elétrica, utilizando a própria rede da concessionária como ponto de recarga.
- Os caminhões elétricos permitem realizar atividades em grandes centros urbanos sem o incômodo sonoro dos motores dos caminhões à combustão, uma vez que o ruído de seu motor é praticamente nulo. Isso gera oportunidades da ampliação da capacidade produtiva, uma vez que trabalhos podem ser executados em período noturno sem que haja incômodo aos usuários.
- A ampliação da utilização de caminhões elétricos tende a reduzir a poluição ambiental por emissão de gases de efeito estufa uma vez que esses tipos de veículos não emitem tais gases, o que é muito benéfico ao meio ambiente e à saúde da população em geral.
- Os motores elétricos apresentam elevada eficiência em comparação com motores a combustão fóssil, sendo que os elétricos tem eficiência de 90% enquanto os de combustão fóssil de 30%. Além disso, possuem menos componentes o que os torna mais simples e com custo de manutenção menor.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação apresentou a aplicação de uma metodologia para o planejamento de rotas para caminhões elétricos e uma análise comparativa de custos para inserção destes aplicada na manutenção de redes de distribuição de energia. O modelo proposto realiza a roteirização de trajetos de acordo com informações da bateria do caminhão elétrico e sua autonomia. Também foram realizados experimentos numéricos com dados reais da operação histórica nas cidades de Mairiporã e Atibaia, ambas do Estado de São Paulo.

O modelo proposto conta com a possibilidade de recarregamento em diversos pontos do trajeto, bem como a recarga ser parcial ou completa. A proposta também garante na função objetivo que será recarregada a bateria quando necessário, bem como garante que a evolução do consumo de bateria seja congruente com a função de consumo adotada no modelo, uma função linear. Além disso, o requisito de consumo de energia da bateria até no máximo 10% da bateria também é garantido no modelo.

Quanto aos experimentos numéricos realizados, baseado nas características da bateria do veículo elétrico a ser implementado, na maioria dos casos não houve a necessidade de recarregamento durante a execução do planejamento.

Como conclusão desse trabalho, os resultados dos experimentos realizados foram considerados coerentes e congruentes com aquilo que o modelo matemático se propõe a realizar, pois encontrou-se os resultados dentro das condições propostas no estudo.

É notável que a aplicação da metodologia de roteirização a caminhões elétricos é de fundamental importância pois os mesmos apresentam uma menor autonomia perante os modelos à combustão, bem como maior restrição a pontos de recarga da bateria.

Evidencia-se também através deste trabalho que é fundamental a aplicação da roteirização em caminhões movidos à combustão fóssil, uma vez que aplicando a metodologia de roteirização pode-se obter uma redução de 63% nos deslocamentos de Mairiporã e de 42% de Atibaia, além de ganhos relevantes na economia de combustível e reduções nos custos de manutenções preventivas, aumentando assim a vida útil dos veículos.

Através da análise comparativa de custos entre o caminhão movido à combustão fóssil e o caminhão elétrico percebe-se que os altos custos iniciais de aquisição dos caminhões elétricos ainda são a maior barreira à sua penetração de maneira mais abrangente no mercado nacional. Adicionalmente têm-se uma menor autonomia do caminhão elétrico quando comparada com modelos movidos à combustão fóssil, bem como uma baixa capilaridade de pontos de recarga, sendo estes pontos que dificultam a massificação dos modelos eletrificados.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Devido a quantidade de dados inseridos no solver, o mesmo entrega uma solução aproximada, sendo que em trabalhos futuros onde a quantidade de dados seja muito grande, recomenda-se a implementação de métodos de resolução aproximada, tais como a Colônia de Formigas, Clarke & Write dentre outros.

Com o avanço da tecnologia das baterias dos caminhões elétricos e um conseqüente aumento da autonomia dos mesmos, pode-se refazer o estudo aplicando-se as características mais atuais dos caminhões elétricos disponíveis no modelo o que pode permitir que sejam realizados uma maior gama de trabalhos durante um dia de serviço, bem como alcançar clientes de estejam mais distantes.

À medida que também avança a infraestrutura de carregamento disponível novos estudos podem ser desenvolvidos incluindo-se os novos pontos de carregamento, bem como outras tecnologias como as recargas de oportunidade onde o caminhão elétrico pode ser recarregado enquanto o serviço é realizado.

Com a introdução de novos modelos de caminhões elétricos no mercado nacional e a conseqüente redução nos custos de aquisição, manutenção e abastecimento, pode-se aplicar uma análise de viabilidade econômica e financeira visando buscar a ampla introdução dos caminhões elétricos aplicados na manutenção de redes de distribuição de energia.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, Tarek. **The plug-in hybrid electric vehicle routing problem with time windows**. 2013. Dissertação de Mestrado. University of Waterloo.
- ASGHARI, Mohammad et al. **Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review**. International Journal of Production Economics, p. 107899, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA (ABRADEE). **Redes de energia elétrica**. Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 28 de maio de 2020.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Cálculo de Perdas na Distribuição – Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição**. Revisão 5. Versão 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-7>>, acesso em: 03/04/2021.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Revisão 12. Versão 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-8>>, acesso em: 03/04/2021.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 10 – Sistema de Informação Geográfico Regulatório**. Revisão 2. Versão 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-10>>, acesso em: 03/04/2021.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares – Módulo 11 – Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares**. Revisão 1. Versão 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-11>>, acesso em: 03/04/2021.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 616 p.
- BEDI, M. K.; Singh, S. **Comparative Study of Two Natural Phenomena Based Optimization Techniques**. International Journal of Scientific & Engineering Research v. 4, p. 1-4, 2013.
- BOON, W. P. C., & Bakker, S. (2016). **Learning to shield - Policy learning in socio technical transitions**. Environmental Innovation and Societal Transitions, 18, 181-200. doi: 10.1016/j.eist.2015.06.003.
- BRUGLIERI, Maurizio et al. **A Variable Neighborhood Search Branching for the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows**. Electron. Notes Discret. Math., v. 47, p. 221-228, 2015.

CABUSSÚ, M. S.; Ravaglio, M. A.; Kowalski, E. L.; Cleuber S. S. Chaves, Dailton P. Cerqueira; J. A. Teixeira Júnior. **Substituição de cabos aéreos em redes de média tensão energizada**. Revista CIER, Argentina, p. 77-85, 01 dez. 2009.

CETESB. **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo**. 2019. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>>, acesso em: 23/12/2021.

COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. Livros Técnicos e Científicos, 2007.

CONRAD, Ryan G.; FIGLIOZZI, Miguel Andres. **The recharging vehicle routing problem**. In: **Proceedings of the 2011 industrial engineering research conference**. IISE Norcross, GA, 2011. p. 8.

CONSTANTINO, L. L., FERNANDES, L., GONÇALVES, R. M., PIETRO JUNIOR, A. G. O. Plano de manutenção preventiva em rede de distribuição de energia: priorização de ações em blocos interrompidos com causa atribuída a defeitos transitórios. **XXII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica SENDI**, Curitiba-PR, 2016.

DANTZIG, George Bernard. **Linear programming and extensions**. Princeton university press, 1998.

DAVENDRA, Donald (Ed.). **Traveling Salesman Problem: Theory and Applications**. BoD–Books on Demand, 2010.

DESAULNIERS, Guy et al. **Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows**. Operations Research, v. 64, n. 6, p. 1388-1405, 2016.

DHILLON, B. S. **Maintainability maintenance and reability for Engineers**. New York: CRC, 2006.

DIJK, M. (2016). **Electric revege after 100 years? Comparing car market patterns around 1900 and 2000**. International Journal of Automotive Technology and Management, 16(2), 147-168. doi: 10.1504/IJATM.2016.079227.

DOPPSTADT, Christian; KOBERSTEIN, Achim; VIGO, Daniele. **The hybrid electric vehicle–traveling salesman problem**. European Journal of Operational Research, v. 253, n. 3, p. 825-842, 2016.

DORIGO, M; Stützle, T. **Ant Colony Optimization**. MIT Press 2004.

ENSSLIN, L., Ensslin, S. R., Lacerda, R. T. O. & Tasca, J. E. **Processo de seleção de portfólio bibliográfico**. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Brasil 2010.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Eletromobilidade e Biocombustíveis**. 2018. Documento de apoio ao PNE 2050. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/topico-457>>. Acesso em: 23 de dezembro de 2021.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2019 – Relatório Síntese**. 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 23 de dezembro de 2021.

ERDELIĆ, Tomislav; CARIĆ, Tonči. **A survey on the electric vehicle routing problem: variants and solution approaches**. *Journal of Advanced Transportation*, v. 2019, 2019.

ERDINÇ, O., Yetilmezsoy, K., Erenoğlu, A. K., & Erdinç, O. (2019). **Route optimization of an electric garbage truck fleet for sustainable environmental and energy management**. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1275–1286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.295>.

ERDOĞAN, Sevgi; MILLER-HOOKS, Elise. **A green vehicle routing problem. Transportation research part E: logistics and transportation review**, v. 48, n. 1, p. 100-114, 2012.

FELIPE, Ángel et al. **A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges**. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 71, p. 111-128, 2014.

FENG, Wei; FIGLIOZZI, Miguel. **An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market**. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 26, p. 135-145, 2013.

FERNANDES, L. **Ferramenta de apoio à decisão para priorização de obras de manutenção em redes de distribuição de energia elétrica**. UFRS. Porto Alegre, RS, 2014.

FERREIRA, Ivanilda A e Lima, Elizama R. **Caixeiro Viajante: Aplicação da modelagem matemática na otimização de rotas em uma concessionária de energia elétrica**. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia de Produção*, v.20, nº1, 2020.

FIORI, Chiara; AHN, KyoungHo; RAKHA, Hesham A. **Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation**. *Applied Energy*, v. 168, p. 257-268, 2016.

FRANCESCHINI, Argel; Ribeiro, Daniel; Kawakami, Fabrício; Silva, Matheus; Chaves, Rodrigo; Lopes, Rodrigo; Dias, Rogério. **E-Delivery, o primeiro caminhão elétrico da Volkswagen, do Brasil para o mundo**. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, 2021.

FRANCISCO, Rodrigo H C e Gilberto, Thalisa M J. 2018. **Pesquisa Operacional. Aplicada na área de logística de transporte rodoviário em uma transportadora**

do município de Franca/SP. Revista Eletrônica Creare: Revista das Engenharias. 2018.

FREITAS, Patrícia M. B. de, MEDEIROS, Lúcio, OENING, Ana Paula. **Relatório Técnico Etapa 17 – Pesquisa sobre mercado de caminhões de manutenção.** Curitiba: Lactec, 2021. Relatório Técnico.

FROGER, Aurélien et al. **A matheuristic for the electric vehicle routing problem with capacitated charging stations.** 2017.

FROGER, Aurélien et al. **Improved formulations and algorithmic components for the electric vehicle routing problem with nonlinear charging functions.** Computers & Operations Research, v. 104, p. 256-294, 2019.

GAMA, M. B. **Roteirização de veículos: implementação e melhoria do método de Clarke & Wright.** TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Vale do Rio São Francisco, Juazeiro, 2011.

GARCIA, Vinícius J, et al. 2012. **Problema de Roteamento de veículos para atendimento de ordens.** Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa. 28 de Setembro de 2012.

GEELS, F. W. (2002). **Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study.** Research Policy, 31(8), 1257-1274. doi: [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8).

GOEKE, Dominik; SCHNEIDER, Michael. **Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles.** European Journal of Operational Research, v. 245, n. 1, p. 81-99, 2015.

HEI. (2018). **State of Global Air 2018 Special Report.** Boston, MA: Health Effects Institute.

HEKKERT, M. P., Suurs, R. A. A., Negro, S. O., Kuhlmann, S., & Smits, R. E. H. M. (2007). **Functions of innovation systems: A new approach for analysing Technological change.** Technological Forecasting and Social Change, 74(4), 413-432. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.03.002>.

HIERMANN, Gerhard et al. **Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles.** European Journal of Operational Research, v. 272, n. 1, p. 235-248, 2019.

JEONG, H. Y., & Lee, S. (2019). **Optimization of vehicle-carrier routing: Mathematical model and comparison with related routing models.** Procedia Manufacturing, 39, 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.337>.

KAGAN, N., DE OLIVEIRA, C. C. C. B, ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica,** EDGARD BLUCHER, 2005.

KARDEC, A.; NASCIF, J: **Manutenção: função estratégica**. 3 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KHALIGH, A., & Li, Z. (2010). **Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 59(6), 2806-2814. doi: 10.1109/TVT.2010.2047877.

KEMP, R., Schot, J., & Hoogma, R. (1998). **Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: The approach of strategic niche management**. Technology Analysis & Strategic Management, 10(2), 175-198. doi: 10.1080/09537329808524310.

KESKIN, Merve; ÇATAY, Bülent. **Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 65, p. 111-127, 2016.

KESKIN, M., Çatay, Bülent. (2018). **A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time and fast charges**. Computers and Operations Research 100 (2018) 172-188.

KESKIN, Merve; LAPORTE, Gilbert; ÇATAY, Bülent. **Electric vehicle routing problem with time-dependent waiting times at recharging stations**. Computers & Operations Research, v. 107, p. 77-94, 2019.

KOÇ, Çağrı; JABALI, Ola; LAPORTE, Gilbert. **Long-haul vehicle routing and scheduling with idling options**. Journal of the operational research society, p. 1-13, 2017.

KÜÇÜKOĞLU, I., Dewil, R., Cattrysse, D. **Hybrid simulated annealing and tabu search method for the electric travelling salesman problem with time windows and mixed charging rates**. Expert Systems with Applications 134 (2019) 279-303.

KULLMAN, Nicholas; GOODSON, Justin; MENDOZA, Jorge E. **Dynamic electric vehicle routing: heuristics and dual bounds**. 2018.

LACTEC. et al. **Relatório Técnico Etapa 6 – Levantamento bibliográfico quanto ao problema de roteirização considerando veículos elétricos**. Projeto PD-0038500069/2019 – “Desenvolvimento de Caminhão Elétrico para Manutenção de Redes de Distribuição de Energia”. Proponente: Neoenergia Elektro. Curitiba: Lactec, 2021. Relatório Técnico.

LATECT. et al. **Relatório Técnico Etapa 6 – Relatório da metodologia de otimização multicritério para definição das rotas de manutenção**. Projeto PD-0038500069/2019 – “Desenvolvimento de Caminhão Elétrico para Manutenção de Redes de Distribuição de Energia”. Proponente: Neoenergia Elektro. Curitiba: Lactec, 2021. Relatório Técnico.

LAPORTE, G. **The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms**. *European Journal of Operational Research*, v. 59, n. 3, p. 345-358. 1992.

LEITE, Hermann C A. 2012. **Aplicação de metaheurística baseada no comportamento de colônia de formigas na otimização de rotas em distribuidora de energia elétrica**. XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. 26 de Outubro de 2012.

LI, Cheng et al. **An electric vehicle routing optimization model with hybrid plug-in and wireless charging systems**. *IEEE Access*, v. 6, p. 27569-27578, 2018.

LIIMATAINEN, H., van Vliet, O., & Aplyn, D. (2019). **The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis**. *Applied Energy*, 236(November 2018), 804–814. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.017>.

LIN, Jane; ZHOU, Wei; WOLFSON, Ouri. **Electric vehicle routing problem**. *Transportation Research Procedia*, v. 12, n. Supplement C, p. 508-521, 2016.

LUNA, T. F., Maldonado, F. U., Vaz, C. R. **Estado da arte em transições sócio-técnicas para veículos elétricos: evolução e perspectivas**. In: XLIII Encontro da ANPAD, 2019, São Paulo. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/336278561_ESTADO_DA_ARTE_EM_TRANSICOES_SOCIO-TECNICAS_PARA_VEICULOS_ELETRICOS_EVOLUCAO_E_PERSPECTIVAS>, acesso em: 22/03/2020.

MACRINA, Giusy et al. **The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows**. *Computers & Operations Research*, v. 101, p. 183-199, 2019.

MADANKUMAR, Sakthivel; RAJENDRAN, Chandrasekharan. **Mathematical models for green vehicle routing problems with pickup and delivery: A case of semiconductor supply chain**. *Computers & Operations Research*, v. 89, p. 183-192, 2018.

MARKAND, J., Raven, R., & Truffer, B. (2012). **Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects**. *Research Policy*, 41(6), 955-967. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013>.

MELO, Luiz Antônio, M.SC; LIMA, Gilson Brito Alves, D.SC; GOMES, Nelson Damieri, M.SC; SOARES, Rui, M.SC. **Segurança nos serviços emergenciais em redes elétricas: fatores ambientais**. *Production*, volume 13, número 2. São Paulo, 2003. Disponível em: < https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132003000200009 >, acesso em: 13/01/2021.

MONTOYA, Alejandro et al. **The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function**. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 103, p. 87-110, 2017.

MOTTA, Eduardo Costa da. **NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. CEFET-RS. Pelotas, 2008. 221 p.: 85 il.

MYERS, M, W, C. **Análise de viabilidade para substituição de caminhões da categoria VUC com motor diesel por caminhões com motor elétrico em uma empresa de transporte e logística**. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

NYKVIST, B., & Nilsson, M. (2015a). **The EV paradox - A multilevel study of why Stockholm is not a leader in electric vehicles**. Environmental Innovation and Societal Transitions, 14, 26-44. doi: 10.1016/j.eist.2014.06.003.

NR-10. Norma Regulamentadora nº 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade – Ed. 2004.

NR-18. Norma Regulamentadora nº 18 – Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção – Ed. 2004.

PADILHA, Alan M O e Garcia, Vinícius J. 2015. **Problema de Roteamento de Veículos dinâmicos com janela de tempo aplicado ao atendimento de ordens emergenciais de uma concessionária de energia elétrica**. Dissertação de Conclusão de Curso de graduação: Universidade Federal de Santa Maria. 2015.

PAPADIMITRIOU, Christos H.; STEIGLITZ, Kenneth. **Combinatorial optimization: algorithms and complexity**. Courier Corporation, 1998.

PAZ, J.; GRANADA-ECHEVERRI, Mauricio; ESCOBAR, J. **The multi-depot electric vehicle location routing problem with time windows**. International Journal of Industrial Engineering Computations, v. 9, n. 1, p. 123-136, 2018.

PEREIRA, Anderson D, et al. 2012. **Sistema de otimização de rotas de leitura, entrega de faturas e segunda-via e de processos de corte e religação de energia elétrica para aplicações de melhoria operacional e rastreabilidade de serviços**. XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. 26 de Outubro de 2012.

REIS, Camila C C, et al. 2016. **Técnicas de Pesquisa Operacional aplicadas na otimização de rotas de uma rede de lojas de materiais de construção**. ENEGEP: Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 06 de Outubro de 2016.

ROBERTI, Roberto; WEN, Min. **The electric traveling salesman problem with time windows**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 89, p. 32-52, 2016.

RODRIGUES, Natalia C, Lopes, Guido D C e Junior, Aloisio, C G. 2016. **Aplicação de ferramentas de pesquisa operacional para determinação das melhores rotas da coleta de leite**. XXXVI Encontro nacional de Engenharia de Produção. 06 de Outubro de 2016.

SANTOS, Signie L. França; OENING, Ana Paula. **Relatório Técnico Etapa 1 – Estudos para definição dos requisitos e características para aprimoramento do caminhão e do carregador.** Curitiba: Lactec, 2020. Relatório Técnico.

SANTOS, Signie L. França; OENING, Ana Paula. **Relatório Técnico Etapa 3 – Estudos para definição dos requisitos das funcionalidades a serem adicionadas ao caminhão para manutenção na rede de distribuição.** Curitiba: Lactec, 2020. Relatório Técnico.

SANTOS, Signie L. França; OENING, Ana Paula. **Relatório Técnico Etapa 4 – Avaliação das características da rede de BT e simulações computacionais do sistema elétrico para avaliação dos possíveis pontos de carregamento.** Curitiba: Lactec, 2020. Relatório Técnico.

SARMAH, S. P., Yadav, R., & Rathore, P. (2019). **Development of Vehicle Routing model in urban Solid Waste Management system under periodic variation: A case study.** IFAC-PapersOnLine, 52(13), 1961–1965. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.490>.

SASSI, Ons; CHERIF, Wahiba Ramdane; OULAMARA, Ammar. **Vehicle routing problem with mixed fleet of conventional and heterogenous electric vehicles and time dependent charging costs.** 2014.

SCHIFFER, Maximilian; WALTHER, Grit. **The electric location routing problem with time windows and partial recharging.** European Journal of Operational Research, v. 260, n. 3, p. 995-1013, 2017.

SCHIFFER, Maximilian; WALTHER, Grit. **Strategic planning of electric logistics fleet networks: a robust location-routing approach.** Omega, v. 80, p. 31-42, 2018.

SCHNEIDER, Michael; STENGER, Andreas; GOEKE, Dominik. **The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations.** Transportation Science, v. 48, n. 4, p. 500-520, 2014.

SILVA, Rodrigo C, Munaretto, Anelise e Delgado, Myriam R. **Otimização por Colônia de Formigas para o roteamento e consumo de energia em redes de sensores sem fio.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SIMSIR, F., & Ekmekci, D. (2019). **A metaheuristic solution approach to capacitated vehicle routing and network optimization.** Engineering Science and Technology, an International Journal, 22(3), 727–735. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.002>.

SMITH, A., Voß, J.-P., & Grin, J. (2010). **Innovation studies and Sustainability transitions: The allure of the multi-level perspective and its challenges.** Research Policy, 39(4), 435-448. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.01.023>.

SINDPEÇAS. **Relatório da Frota Circulante**. Edição 2021. Disponível em: <<https://www.sindipecas.org.br/area-atuacao/?co=s&a=frota-circulante>>. Acesso em: 22 de dezembro de 2021.

STEINER, Maria T A, et al. 2006. **Técnicas da pesquisa operacional aplicadas à logística de atendimento aos usuários de uma rede de distribuição de energia elétrica**. Revista Eletrônica Sistemas & Gestão. Dezembro de 2006.

STRUBEN, J., & Sterman, J. D. (2008). **Transition Challenges for Alternative Fuel Vehicle and Transportation Systems**. Environment and Planning B: Planning and Design, 35(6), 1070-1097. doi: 10.1068/b33022t.

SWEDA, Timothy M.; DOLINSKAYA, Irina S.; KLABJAN, Diego. **Adaptive routing and recharging policies for electric vehicles**. Transportation Science, v. 51, n. 4, p. 1326-1348, 2017.

TAUFER, Fernando S G e Pereira, Elaine C. 2011. **Aplicação do Problema do Caixeiro Viajante na otimização de roteiros**. ENEGEP: Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 07 de Outubro de 2011.

TOLEDO, Luiz F. B. R.; OENING, Ana Paula. **Relatório Técnico Etapa 4 – Avaliação das características da rede BT e simulações computacionais do sistema elétrico para avaliação dos possíveis pontos de carregamento**. Curitiba: Lactec, 2020. Relatório Técnico.

TUCKER, A. W. On directed graphs and integer programs. In: **Symposium on Combinatorial Problems**, Princeton University, 1960.

VILLEGAS, Juan G. et al. **The technician routing and scheduling problem with conventional and electric vehicle**. In: Technical Report. 2018.

WEN, Min et al. **An adaptive large neighborhood search heuristic for the electric vehicle scheduling problem**. Computers & Operations Research, v. 76, p. 73-83, 2016.

WHO. (2018). **World health statistics 2018: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals**. Geneva: World Health Organization.

YANG, Jun; SUN, Hao. **Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles**. Computers & Operations Research, v. 55, p. 217-232, 2015.

ZHANG, Shuai et al. **Electric vehicle routing problem with recharging stations for minimizing energy consumption**. International Journal of Production Economics, v. 203, p. 404-413, 2018.

ZHANG, Dezhi et al. **Joint optimization of green vehicle scheduling and routing problem with time-varying speeds**. Plos One, v. 13, n. 2, p. e0192000, 2018.

ZÜNDORF, Tobias. **Electric vehicle routing with realistic recharging models.** Unpublished Master's thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, 2014.

APÊNDICE 1 – Planejamento da roteirização para as cidades de Mairiporã e Atibaia

Da Tabela 21 até a Tabela 32 são apresentados o planejamento da roteirização de Mairiporã das equipes MAI-01, MAI-02 e MAI-03 para os dias 03/11/2020 até o dia 06/11/2020.

TABELA 21 – PLANEJAMENTO MAI-01, DIA 03/11/2020

Data	03/11/2020														
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Base
Distancia da Viagem (km)	67,63														
Tempo de Viagem (min)	142,13														
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	157	156	154	154	152	151	150	144	143	143	139	127	116	106
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	1,54														

TABELA 22 – PLANEJAMENTO MAI-01, DIA 04/11/2020

Data	04/11/2020														
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Base
Distancia da Viagem (km)	76,68														
Tempo de Viagem (min)	151,53														
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	157	157	156	156	155	155	154	151	148	140	136	134	120	99
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	54,19														

TABELA 23 – PLANEJAMENTO MAI-01, DIA 05/11/2020

Data	05/11/2020																
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Ponto 15	Base
Distancia da Viagem (km)	72,07																
Tempo de Viagem (min)	165,50																
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	157	156	155	154	154	145	138	134	119	116	115	115	114	112	108	103
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	41,96																

TABELA 24 – PLANEJAMENTO MAI-01, DIA 06/11/2020

Data	06/11/2020															
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Base	
Distancia da Viagem (km)	59,12															
Tempo de Viagem (min)	123,25															
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160,00	157	156	155	155	155	154	154	153	147	144	144	138	136	113	
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tempo para obter a solução (s)	17,59															

TABELA 25 – PLANEJAMENTO MAI-02, DIA 03/11/2020

Data	03/11/2020														
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Base
Distancia da Viagem (km)	60,77														
Tempo de Viagem (min)	137,93														
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	159	158	155	154	154	152	151	148	146	144	142	133	117	111
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	97,23														

TABELA 26 – PLANEJAMENTO MAI-02, DIA 04/11/2020

Data	04/11/2020														
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Base
Distancia da Viagem (km)	74,99														
Tempo de Viagem (min)	180,46														
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	159	156	154	151	149	149	148	138	133	129	118	108	104	100
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	7,31														

TABELA 27 – PLANEJAMENTO MAI-02, DIA 05/11/2020

Data	05/11/2020															
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Base
Distancia da Viagem (km)	45,58															
Tempo de Viagem (min)	114,4															
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	159	158	156	153	153	152	149	149	148	147	147	141	131	127	124
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	192,07															

TABELA 28 – PLANEJAMENTO MAI-02, DIA 06/11/2020

Data	06/11/2020														
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Base	
Distancia da Viagem (km)	77,20														
Tempo de Viagem (min)	157,41														
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	159	157	156	154	153	152	149	148	146	130	113	105	98	
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tempo para obter a solução (s)	5,94														

TABELA 29 – PLANEJAMENTO MAI-03, DIA 03/11/2020

Data	03/11/2020															
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Base
Distancia da Viagem (km)	72,35															
Tempo de Viagem (min)	112,18															
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	153	153	152	151	151	150	150	146	138	137	136	134	120	106	102
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	72,89															

TABELA 30 – PLANEJAMENTO MAI-03, DIA 04/11/2020

Data	03/11/2020															
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Base
Distancia da Viagem (km)	168,00															
Tempo de Viagem (min)	240,00															
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	153	151	151	150	149	147	142	139	133	130	129	125	109	64	25
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	500,0															

TABELA 31 – PLANEJAMENTO MAI-03, DIA 05/11/2020

Data	05/11/2020														
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Base
Distancia da Viagem (km)	51,92														
Tempo de Viagem (min)	123,50														
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	159	151	149	146	144	142	141	140	140	137	133	127	122	118
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	1,74														

TABELA 32 – PLANEJAMENTO MAI-03, DIA 06/11/2020

Data	06/11/2020														
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Base
Distancia da Viagem (km)	78,76														
Tempo de Viagem (min)	159,53														
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	154	153	153	153	152	152	152	149	141	140	124	116	107	97
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	387,22														

Da Tabela 33 até a Tabela 44 são apresentados o planejamento da roteirização de Atibaia das equipes ATI-01, ATI-02 e ATI-03 para os dias 03/11/2020 até o dia 06/11/2020.

TABELA 33 – PLANEJAMENTO ATI-01, DIA 03/11/2020

Data	03/11/2020																	
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Ponto 15	Ponto 16	Base
Distancia da Viagem (km)	78,03																	
Tempo de Viagem (min)	118,20																	
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	141	139	139	139	139	137	137	136	135	135	132	128	128	127	123	120	97
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	500,00																	

TABELA 34 – PLANEJAMENTO ATI-01, DIA 04/11/2020

Data	04/11/2020																	
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Ponto 15	Base	
Distancia da Viagem (km)	74,41																	
Tempo de Viagem (min)	118,13																	
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	141	140	139	138	138	136	135	134	133	131	130	129	128	127	123	100	
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tempo para obter a solução (s)	500,00																	

TABELA 35 – PLANEJAMENTO ATI-01, DIA 05/11/2020

Data	05/11/2020													
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Base
Distancia da Viagem (km)	73,15													
Tempo de Viagem (min)	110,30													
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	144	142	138	138	137	136	134	131	130	126	125	121	101
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	500,00													

TABELA 36 – PLANEJAMENTO ATI-01, DIA 06/11/2020

Data	06/11/2020													
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Base
Distancia da Viagem (km)	72,49													
Tempo de Viagem (min)	104,53													
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	141	139	138	137	136	135	131	130	129	127	126	124	102
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	500,00													

TABELA 37 – PLANEJAMENTO ATI-02, DIA 03/11/2020

Data	03/11/2020																
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Ponto 15	Base
Distancia da Viagem (km)	402,39																
Tempo de Viagem (min)	500,35																
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	150	157	160	146	144	148	159	156	159	157	160	159	160	154	29	41
Recarrega?	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não									
Quanto recarrega? (kWh)	0	9,50	4,01	0,46	14,20	15,98	12,38	0,47	3,90	1,38	2,57	0,05	0,65	0,32	6,46	130,69	0
Tempo para obter a solução (s)	500,00																

TABELA 38– PLANEJAMENTO ATI-02, DIA 04/11/2020

Data	04/11/2020																						
Circuito	Base	Ponto1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Ponto 15	Ponto 16	Ponto 17	Ponto 18	Ponto 19	Ponto 20	Ponto 21	Base
Distância da Viagem (km)	124,18																						
Tempo de Viagem (min)	182,71																						
Cargas no momento da chegada ao ponto (kWh)	160	141	141	140	140	140	140	139	139	139	138	136	136	136	134	134	132	129	129	126	106	86	61
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	500,00																						

TABELA 39 – PLANEJAMENTO ATI-02, DIA 05/11/2020

Data	05/11/2020														
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Base
Distancia da Viagem (km)	111,47														
Tempo de Viagem (min)	189,51														
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	143	141	137	136	134	133	131	128	124	123	111	100	91	71
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	500,00														

TABELA 40 – PLANEJAMENTO ATI-02, DIA 06/11/2020

Data	06/11/2020															
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Base
Distancia da Viagem (km)	349,39															
Tempo de Viagem (min)	328,38															
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	135	151	160	160	159	158	159	159	160	64	68	61	52	43	16
Recarrega?	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não									
Quanto recarrega? (kWh)	0	25,29	8,61	0,44	0,35	0,79	2,10	0,55	0,94	0,49	96,38	0	0	0	0	
Tempo para obter a solução (s)	500,00															

TABELA 41 – PLANEJAMENTO ATI-03, DIA 03/11/2020

Data	03/11/2020														
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Base
Distancia da Viagem (km)	123,58														
Tempo de Viagem (min)	186,45														
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	141	138	129	122	119	115	110	107	100	95	91	86	78	61
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	77,00														

TABELA 42 – PLANEJAMENTO ATI-03, DIA 04/11/2020

DATA	04/11/2020																			
CIRCUITO	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Ponto 15	Ponto 16	Ponto 17	Ponto 18	Base
DISTÂNCIA DA VIAGEM (KM)	162,50																			
TEMPO DE VIAGEM (MIN)	217,56																			
CARGAS NO MOMENTO DA CHEGADA AO PONTO (KWH)	160	135	131	125	125	125	124	123	117	112	107	103	102	89	75	72	70	62	51	30
RECARREGA?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
QUANTO RECARREGA? (KWH)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TEMPO PARA OBTER A SOLUÇÃO (S)	500,00																			

TABELA 43 – PLANEJAMENTO ATI-03, DIA 05/11/2020

Data	05/11/2020															
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Base
Distancia da Viagem (km)	131,28															
Tempo de Viagem (min)	160,86															
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	14	138	138	138	135	128	122	116	109	109	103	99	86	77	55
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo para obter a solução (s)	500,00															

TABELA 44 – PLANEJAMENTO ATI-03, DIA 06/11/2020

Data	06/11/2020															
Circuito	Base	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Base	
Distancia da Viagem (km)	122,97															
Tempo de Viagem (min)	168,01															
Cargas no momento da chegada no ponto (kWh)	160	141	138	129	129	129	127	120	118	108	104	100	96	90	62	
Recarrega?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
Quanto recarrega? (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tempo para obter a solução (s)	84,00															