

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**DAYARA PEREIRA BASSO**

**META-HEURÍSTICA BUSCA LOCAL ITERADA PARA O DIMENSIONAMENTO  
DE UMA MICRORREDE HÍBRIDA PARA ALIMENTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO  
DE RECARGA AUTÔNOMA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Ilha Solteira - SP

2024



**DAYARA PEREIRA BASSO**

**META-HEURÍSTICA BUSCA LOCAL ITERADA PARA O DIMENSIONAMENTO  
DE UMA MICRORREDE HÍBRIDA PARA ALIMENTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO  
DE RECARGA AUTÔNOMA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), para obtenção do título de Grau acadêmico Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Orientador(a): Prof. Dr. John Fredy Franco Baquero

Ilha Solteira - SP

2024

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B322m Basso, Dayara Pereira.  
Meta-heurística busca local iterada para o dimensionamento de uma microrrede híbrida para alimentação de uma estação de recarga autônoma de veículos elétricos / Dayara Pereira Basso. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024  
70 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia Elétrica, 2024

Orientador: John Fredy Franco Baquero

Inclui bibliografia

1. Comunidades remotas. 2. Estação de recarga. 3. Fontes renováveis de energia. 4. Microrrede híbrida. 5. Veículos elétricos.

  
Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061  
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao  
Usuário e Documentação  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Esta pesquisa teve o objetivo de desenvolver um método de otimização para o dimensionamento de uma microrrede híbrida para alimentação de uma estação de recarga de veículos elétricos que atendem comunidades remotas. O método se baseia na meta-heurística busca local iterada, que não é muito explorada na literatura para o dimensionamento de microrredes, além disso, busca-se explorar o método de otimização em um caso com comunidades remotas, que possuem a característica de fornecimento de eletricidade instável e dependência sistemas de *backup* com geradores a diesel. Assim, uma microrrede movida à energia renovável e baterias para recarregar veículos elétricos que prestam serviços na região promoveria a sustentabilidade. Consequentemente, haveria diminuição dos impactos negativos na saúde da população desta região, pois um veículo elétrico não emite gases poluentes. Outro benefício para as comunidades remotas seria um possível aumento no atendimento de serviços ofertados, isto é, por estarem mais afastadas dos centros urbanos as vezes não recebem atendimento de prestadores de serviços. Dessa forma, além do benefício ambiental e social, pode-se gerar impacto econômico indiretamente para as empresas prestadoras de serviço, que poderão economizar utilizando veículos elétricos mais eficientes e econômicos em termos de combustível e manutenção.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This research aimed to develop an optimization method for dimensioning a hybrid microgrid to power an electric vehicle charging station that serves remote communities. The method is based on the iterated local search metaheuristic, which is not widely explored in the literature for dimensioning microgrids. In addition, it seeks to explore the optimization method in a case with remote communities, which have the characteristic of unstable electricity supply and dependence on backup systems with diesel generators. Thus, a microgrid powered by renewable energy and batteries to recharge electric vehicles that provide services in the region would promote sustainability. Consequently, there would be a reduction in the negative impacts on the health of the population in this region, since an electric vehicle does not emit polluting gases. Another benefit for remote communities would be a possible increase in the service provision offered, that is, because they are further away from urban centers, they sometimes do not receive service from service providers. In this way, in addition to the environmental and social benefits, it can generate an indirect economic impact for service providers, who will be able to save money by using more efficient and economical electric vehicles in terms of fuel and maintenance.


**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** META-HEURÍSTICA BUSCA LOCAL ITERADA PARA O  
DIMENSIONAMENTO DE UMA MICRORREDE HÍBRIDA PARA  
ALIMENTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA AUTÔNOMA DE  
VEÍCULOS ELÉTRICOS

**AUTORA:** DAYARA PEREIRA BASSO

**ORIENTADOR:** JOHN FREDY FRANCO BAQUERO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Elétrica, área:  
Automação pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JOHN FREDY FRANCO BAQUERO (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

  
Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

  
Prof. Dr. MARINA LAVORATO DE OLIVEIRA (Participação Virtual)  
Departamento de Sistemas e Energia / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Ilha Solteira, 02 de agosto de 2024

Dedico este trabalho às minhas irmãs e aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a Deus pela concessão desta oportunidade de aprender com a pós-graduação e de todas as pessoas que foram colocadas pelo Senhor ao meu lado, as bênçãos que foram derramadas sobre mim neste período, para que um dia eu possa retribuir esta oportunidade de aprender um pouco mais sobre engenharia e ciências.

Agradeço a minha mãe, Nilcen Luciene, pelo amparo incondicional, cuidado incessante, pelo amor sem limites e todas as vezes que ofereceu colo quando mais precisei. Ao meu pai, que não esteve presente com vida nesta fase, mas que me proporcionou lembranças felizes que se tornaram combustível para eu nunca desistir.

Agradeço com o coração repleto de gratidão à minha irmã Daíse, por ser meu espelho, o exemplo de quem quero me tornar como pessoa, sua força, dedicação, esperança e entusiasmo me guiam em tentar oferecer sempre o meu melhor. Agradeço também pelo apoio e ajuda que nunca me foi negado, além do incentivo em continuar minha carreira acadêmica.

Agradeço a minhas irmãs Dani pelo convívio sempre agradável e Daiane, pelo suporte prestado sempre que precisei, além dos conselhos sempre bem-vindos.

Gostaria de agradecer aos meus companheiros do LaPSEE, Norberto, Rafa, Elis, Enielma, Tainá, Sebastian, Eduard, Wilson, Pato, Diego, Mayla, Brian, Gabriel, Mario, Luis, e em especial, ao Matheus e Patrício, que foram mais que companheiros de jornada, foram também excelentes amigos. Agradeço o convívio diário, principalmente os cafés na copa que tornaram esta etapa da minha vida mais agradável.

Agradeço também aos meus companheiros de estágio no exterior, Wandry e Etiane. Wandry que apesar do pouco tempo de convívio continua oferecendo suporte acadêmico e amizade, e a amiga Etiane por ser o melhor presente que a Espanha me deu, a melhor amiga que tive, que me ofereceu amparo, amizade, crescimento e me ensinou a reconhecer minhas competências.

Ao Prof. Dr. Fredy, pela orientação, confiança e dedicação prestadas a mim durante este mestrado, pela disponibilidade em me auxiliar na pesquisa sempre que necessário. Ao Prof. Dr. José Manuel Arroyo, pela orientação e ensinamentos dedicados a mim no período do estágio na Espanha.

Aos professores da pós-graduação do DEE/UNESP, que, de alguma forma contribuíram para a minha formação acadêmica ao longo deste mestrado, dentre os quais cito os Profs. Drs. Jonas Boas Leite, John Fredy Franco, José Mantovani, Fábio Bertequini, Rubén Romero, e Leonardo Macedo.

Aproveito para agradecer a todas as pessoas e funcionários da FEIS/UNESP, que contribuíram em diferentes instâncias para a elaboração deste trabalho.

Agradeço ao apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), concedido por meio do Processo nº 2021/14389-3 e do Processo BEPE nº 2023/02583-5.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.



“Eu não sou livre enquanto alguma mulher não o for,  
mesmo quando as correntes dela forem muito  
diferentes das minhas”. (Audre Lorde)

## RESUMO

A preocupação com a crise climática e o aquecimento global vem sendo um tema cada vez mais discutido em congressos e assembleias. Grande parte da contribuição no aumento da temperatura global está associada a emissões de poluentes do setor de transporte, principalmente dos veículos movidos à queima de combustíveis fósseis. Como alternativa a estes tipos de veículos surgiram os veículos elétricos (VEs), que podem ser empregados na mobilidade pessoal ou na prestação de serviços de empresas. Entretanto, a escalabilidade do uso de VEs está limitada pela baixa autonomia da bateria e necessidade de constantes visitas à estação de recarga, o que se torna ainda mais desafiador quando os clientes estão localizados em comunidades remotas. Estas comunidades, caracterizadas por ficarem afastadas de grandes centros metropolitanos e algumas vezes não contarem com fornecimento confiável de recursos, particularmente eletricidade, sofrem dificuldades no atendimento de serviços ofertados com VEs. Nesse contexto, a implantação de estações de recarga na comunidade remota ofereceria uma maior segurança energética, permitiria o uso de VEs, promovendo a sustentabilidade nessas comunidades e contribuindo na diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento da meta-heurística Busca Local Iterada para o dimensionamento de uma microrrede híbrida baseada em energia renovável para a alimentação de uma estação de recarga autônoma de VEs que prestam serviços em comunidades remotas, que inclui o roteamento do VE como parte do problema. O método é apresentado, bem como a formulação matemática do problema, com a idealização da representação de uma proposta de solução, as condições de factibilidade e penalizações. Os testes realizados em uma região com comunidades remotas com 15 nós, sendo 13 clientes de comunidades remotas, 1 depósito e estação de recarga, mostraram que seriam necessários para a microrrede 29 unidades de painéis fotovoltaicos e 2 unidades de baterias, além da solução da rota do VE, com um tempo de execução de 4 segundos. Os resultados mostraram que o método é capaz de propor soluções com baixo custo e com esforço computacional pequeno.

**Palavras-chave:** comunidades remotas; estação de recarga; fontes renováveis de energia; microrrede híbrida; veículos elétricos.

## ABSTRACT

Concern about the climate crisis and global warming has been an increasingly discussed topic in congresses and assemblies. A large part of the contribution to the increase in global temperatures is associated with pollutant emissions from the transport sector, mainly from vehicles powered by burning fossil fuels. As an alternative to these types of vehicles, electric vehicles (EVs) have emerged, which can be used for personal mobility or to provide business services. However, the scalability of EV use is limited by low battery autonomy and the need for constant visits to the charging station, which becomes even more challenging when customers are in remote communities. These communities, characterized by being far from large metropolitan centers and sometimes not having a reliable supply of resources, particularly electricity, experience difficulties in providing services offered with EVs. In this context, the implementation of charging stations in the remote community would offer greater energy security, allow the use of EVs, promoting sustainability in these communities and contributing to the reduction of greenhouse gas emissions. Therefore, this work proposes the development of the Iterated Local Search meta-heuristic for the design of a hybrid microgrid based on renewable energy to power an autonomous charging station for EVs that provide services in remote communities, with the proposal of EV routing as part of the problem. The method is presented, as well as the mathematical formulation of the problem, with the idealization of the representation of a proposed solution, the feasibility conditions and penalties. Tests carried out in a region with remote communities with 15 nodes, 13 customers from remote communities, 1 depot and charging station, showed that 29 units of photovoltaic panels and 2 units of batteries would be needed for the microgrid, in addition to the route solution of the VE, with an execution time of 4 seconds. The results showed that the method can propose low-cost solutions with little computational effort.

**Keywords:** charging station; electric vehicles; hybrid microgrid; remote communities; renewable energy sources.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo energético do Brasil por setor em 2022, em toneladas equivalentes de petróleo (Mtep).....	19
Figura 2 – Participação das fontes no consumo energético do transporte no Brasil. ....	19
Figura 3 – Total de emissões antrópicas de CO <sub>2</sub> em 2022 por setor no Brasil. ....	20
Figura 4 – Vendas de veículos elétricos em milhões, 2016 – 2023.....	21
Figura 5 – Representação de uma proposta de solução. ....	32
Figura 6 – Esquema do sistema proposto para a microrrede e comunidade remota. ....	34
Figura 7 – Transições no espaço de busca da meta-heurística ILS. ....	41
Figura 8 – Fluxograma de funcionamento de um algoritmo de busca local iterada.....	42
Figura 9 – Representação geral de uma estrutura de vizinhança.....	43
Figura 10 – Procedimento de geração de vizinhos da rota. ....	44
Figura 11 – Geração de vizinhos da microrrede.....	45
Figura 12 – Diagrama de fluxo para a busca local proposta. ....	46
Figura 13 – Exemplo de perturbação da rota.....	47
Figura 14 – Perfis de irradiação solar.....	49
Figura 15 – Topologia dos nós do caso de estudo.....	51
Figura 16 – Rota encontrada pelo método.....	53
Figura 17 – Estado de carga do VE ao longo da rota. ....	53
Figura 18 – Análise da energia da microrrede e da energia de recarga do VE. ....	54
Figura 19 – Valor da função objetivo nas soluções visitadas.....	54
Figura 20 – Valor da função objetivo na execução de verificação da ILS.....	56
Figura 21 – Valor da função objetivo para diferentes soluções do número de baterias na execução de verificação da ILS. ....	56
Figura 22 – Valor da função objetivo para diferentes soluções do número de painéis fotovoltaicos na execução de verificação da ILS. ....	57
Figura 23 – Dimensionamento da microrrede (número de baterias e de painéis em diferentes soluções) na execução de verificação da ILS. ....	58
Figura 24 – Número de vizinhos visitados e iterações em cada execução da ILS. ....	58
Figura 25 – Tempo de execução de cada ILS.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos problemas de estudo e considerações dos trabalhos da literatura comentados. ....	29
Tabela 2 – Parâmetros adotados para o método ILS proposto. ....	50
Tabela 3 – Parâmetros utilizados no caso de estudo. ....	51
Tabela 4 – Solução encontrada pelo método para o caso de estudo. ....	52
Tabela 5 – Valores médios das variáveis e médias de desempenho do algoritmo para 100 execuções. ....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
ER	Estação de Recarga
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	<i>International Energy Agency</i>
ILS	<i>Iterated Local Search</i>
NSGA	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
VEs	Veículos Elétricos

## LISTA DE SÍMBOLOS

### A. Conjuntos

$C$  Conjunto de cenários

$N$  Conjunto de nós

### B. Índices

$c$  Índice do cenário

$i$  Índice do nó atual

$t$  Índice do intervalo de tempo

### C. Parâmetros

$\alpha$  Coeficiente para calcular o valor presente de um custo

$\beta_1$  Penalização para o tempo de carga

$\beta_2$  Bonificação para a recarga das baterias

$\beta_3$  Penalização para o tempo máximo de operação

$\beta_4$  Penalização para o estado de carga insuficiente para completar a rota

$\beta_5$  Penalização para energia insuficiente na microrrede para carregar o veículo elétrico

$\beta_6$  Penalização para energia fotovoltaica insuficiente para carregar as baterias

$\beta_7$  Penalização para o estado de carga do veículo elétrico menor que o mínimo permitido

$\delta$  Consumo de energia por distância

$\eta^c$  Eficiência de carga das baterias

$\eta^d$  Eficiência de descarga das baterias

$\pi_c$  Probabilidade de cada cenário  $c$

$\phi$  Taxa de juros

$custo_d$  Custo de viajar cada unidade de distância

$custo_{NBAT}$  Custo de instalação de uma unidade de bateria

$custo_{NPV}$  Custo de instalação de uma unidade de painel fotovoltaico

$d_{(x_{i-1}, x_i)}^M$  Distância entre o nó  $i$ -ésimo e o nó anterior na rota definida por  $x$

$\overline{E}^{BAT}$  Energia nominal da bateria

$G_c$  Irradiação solar no cenário  $c$

$I_c$  Corrente na célula fotovoltaica no cenário  $c$

$I^{mppt}$  Corrente no ponto de máxima potência

$I^{sc}$  Corrente de curto-circuito

$K^i$  Coeficiente de temperatura para a corrente

$K^v$  Coeficiente de temperatura para a tensão

$N$  Número de nós

$N^{anos}$  Número de anos de vida útil da bateria do veículo elétrico

$N^{dias}$  Número de dias úteis do ano

$N^{oct}$  Temperatura nominal de funcionamento do painel fotovoltaico

$P^{BAT}$  Potência nominal de cada bateria

$\overline{SOC}$	Estado de carga máximo do veículo elétrico
$\underline{SOC}$	Estado de carga mínimo do veículo elétrico
$T^a$	Temperatura ambiente
$T_c$	Temperatura na célula fotovoltaica no cenário $c$
$T^{MÁX}$	Tempo máximo de operação do veículo elétrico
$t_{(x_{i-1}, x_i)}^M$	Tempo de percurso entre o nó $i$ -ésimo e o nó anterior na rota definida por $x$
$V_c$	Tensão na célula fotovoltaica no cenário $c$
$v^{cte}$	Velocidade constante do veículo elétrico
$V^{oc}$	Tensão de circuito aberto
$V^{mppt}$	Tensão no ponto de máxima potência

#### D. Variáveis

$\tau_c$	Tempo de recarga do veículo elétrico
$cap^{BAT}$	Capacidade nominal das baterias
$d_{total}$	Distância total percorrida pelo veículo elétrico
$d_{x_i}$	Distância percorrida pelo veículo elétrico até o nó $i$ -ésimo
$E_t^{BAT}$	Energia da bateria no intervalo de tempo $t$
$f_o$	Função objetivo
$f_{o_{pen}}$	Função objetivo penalizada
$N_{BAT}$	Número da quantidade de baterias
$N_{PV}$	Número da quantidade de painéis fotovoltaicos
$p_t^{BAT,c}$	Potência de carga das baterias no intervalo de tempo $t$
$p_t^{BAT,d}$	Potência de descarga das baterias no intervalo de tempo $t$
$p_c^{PV}$	Potência fotovoltaica fornecida pelos painéis fotovoltaicos
$SOC_r$	Estado de carga necessário para o veículo elétrico carregar e completar a rota
$SOC_{x_i}$	Estado de carga do veículo elétrico no nó $i$ da rota $x$
$t_{x_i}^{rota}$	Tempo de percurso no nó $i$ da rota $x$
$x$	Ordem da rota do veículo elétrico



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE UMA MICRORREDE HÍBRIDA PARA ALIMENTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA DE VES EM UMA COMUNIDADE REMOTA .....</b>	<b>31</b>
3.1	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....	31
3.1.1	Forma de representar a proposta de solução .....	31
3.1.2	Função objetivo.....	32
3.1.3	Dimensionamento da microrrede.....	33
3.1.4	Problema de roteamento de veículos elétricos .....	35
3.1.5	Penalização da função objetivo.....	37
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DA METAHEURÍSTICA BUSCA LOCAL ITERADA (ILS) PARA O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DA MICRORREDE.....</b>	<b>40</b>
4.1	BUSCA LOCAL ITERADA .....	41
4.1.1	Estrutura de vizinhança .....	42
4.1.2	Busca Local .....	45
4.1.3	Perturbação .....	46
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>49</b>
5.1	PARÂMETROS ADOTADOS .....	49
5.2	CASO DE ESTUDO .....	51
5.3	EXECUÇÃO DE VERIFICAÇÃO .....	55
5.4	ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL.....	59
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>62</b>
6.1	PRODUÇÃO DE TRABALHOS .....	63
6.2	TRABALHOS FUTUROS .....	64
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>
	<b>ANEXO A – MATRIZ DE DISTÂNCIA DO CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é um dos insumos principais no cotidiano das pessoas e possui suma importância, dada as suas diversas aplicações na saúde, bem-estar, lazer e outras utilidades. Na era das tecnologias avançadas, que são cada vez mais dependentes da eletricidade, o dia a dia das pessoas é afetado quando o acesso a este serviço é interrompido (Aziz Baig *et al.*, 2021). Todavia, apesar dos constantes avanços, o acesso à energia elétrica é escasso para 13% da população mundial, e conseqüentemente, aos benefícios que ela traz (Ritchie *et al.*, 2022).

Essa população sem acesso à energia elétrica se encontra em regiões emergentes, muitas vezes distantes de centros urbanos e com fornecimento de insumos instável, dependendo principalmente de combustíveis fósseis prejudiciais ao meio ambiente (Clairand *et al.*, 2022). Além disso, a prestação de serviços e entrega de mercadorias nesta região é limitada, uma vez que se encontram em locais mais afastados.

Uma alternativa interessante para reduzir a dependência de combustíveis fósseis é adotar veículos elétricos (VEs) na prestação de serviços nestas comunidades remotas, visando promover o respeito ao meio ambiente e ampliar o atendimento da população, dado que estes veículos são caracterizados por baixas emissões de gases de efeito estufa e com custo de operação e manutenção baratos (Shaaban *et al.*, 2019).

Entretanto, deve-se ressaltar que existem alguns desafios associados ao emprego dos VEs, como a autonomia da bateria, que pode ser insuficiente para atender clientes de comunidades remotas afastadas dos centros urbanos, custo elevado de troca de baterias e necessidade constante de visitas às estações de recarga, que muitas vezes dificultam a adoção desta alternativa mais limpa (Zhang *et al.*, 2022). Dessa maneira, implementar VEs em comunidades remotas, que já são caracterizadas por um fornecimento de energia pouco confiável, se torna um desafio ainda maior.

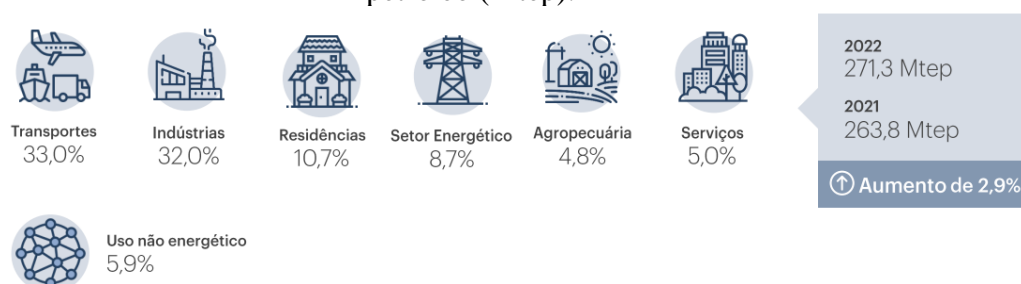
Uma proposta de solução se encaixa no emprego de microrredes híbridas para compor uma estação de recarga de VEs, visando explorar o contexto de comunidades remotas e consolidar o uso de VEs para prestação de serviços nestas comunidades.

Entretanto, deve ser mencionado que a natureza intermitente dos recursos limpos diminui a confiabilidade de uma microrrede baseada apenas em energia renovável; portanto, medidas adicionais devem ser adotadas para garantir a operação confiável da microrrede, como a instalação de mais de uma fonte de energia limpa e sistemas de armazenamento de energia, e.g., baterias, tornando-a uma microrrede híbrida (Mohamed *et al.*, 2019). Dessarte, é imprescindível que sejam definidas estratégias de dimensionamento e alocação de estações de recarga de VEs.

É conveniente discutir o cenário em que o Brasil se encontra acerca destes temas, isto é, o setor de transporte associado a matriz energética brasileira, visando esclarecer a necessidade de se implementar VEs em larga escala e dimensionar microrredes híbridas para suprir a necessidade de carga destes veículos em comunidades remotas.

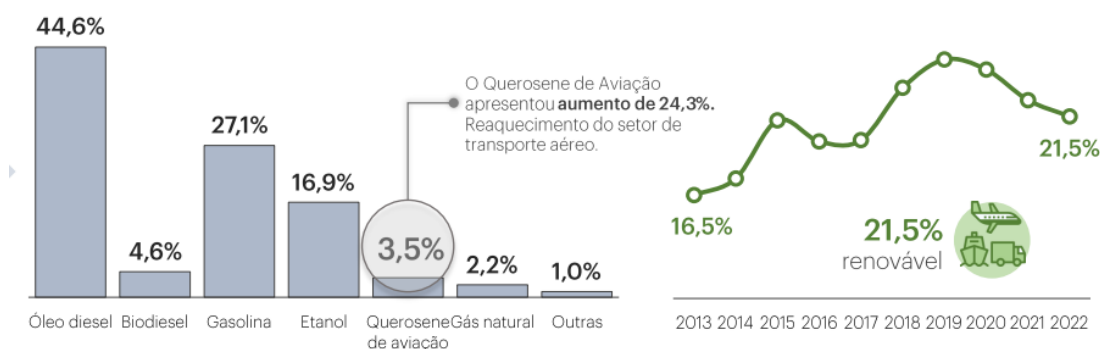
O transporte de carga e de passageiros representa uma atividade fundamental para a sociedade, seja com o início dos serviços de correspondência em domicílio nos meados do século XIX ou com os recentes aplicativos de delivery de comida ou ainda os de transporte individual privado, e.g., “Ifood” e “Uber”, respectivamente. Dentro deste cenário, destaca-se que este setor protagonizou o papel principal no consumo de energia em 2022, com 33% do consumo energético total do país, um aumento de 5% em relação a 2021 (Figura 1). Essa parcela é composta principalmente pelo óleo diesel (44,6%) e pela gasolina (27,1%), configurando uma matriz energética brasileira em que seu principal consumidor de energia utiliza mais de 70% de recursos fósseis, e apenas 21,5% de participação renovável, como mostra a Figura 2 (EPE, 2023).

Figura 1 – Consumo energético do Brasil por setor em 2022, em toneladas equivalentes de petróleo (Mtep).



Fonte: (EPE, 2023).

Figura 2 – Participação das fontes no consumo energético do transporte no Brasil.

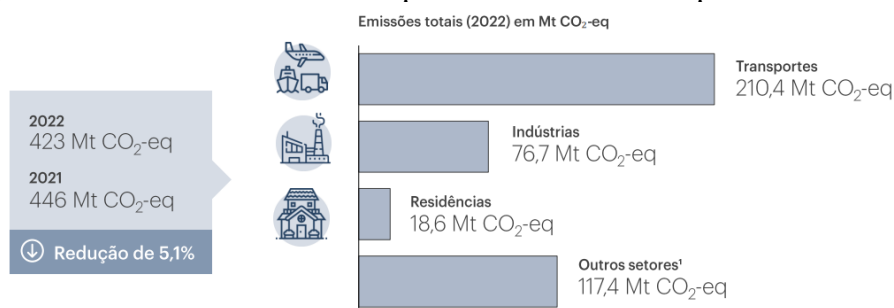


Fonte: (EPE, 2023).

Ademais, essa dependência de combustíveis fósseis do setor de transportes acarreta um cenário ambiental em que quase metade da emissão antrópica de CO<sub>2</sub> associada à matriz energética brasileira seja proveniente deste setor, com 210,4 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO<sub>2</sub>-eq) de um total de 423 como ilustrado na Figura 3 (EPE, 2023).

No âmbito mundial, tais atividades realizadas por veículos movidos a combustão de combustíveis fósseis representam quase 25% das emissões totais de gases de efeito estufa (Napoli *et al.*, 2020), provocando o aumento de mais de 1°C na temperatura média global. Ademais, a emissão destes poluentes afeta negativamente a saúde das pessoas e produz impactos irreversíveis ao meio ambiente e na qualidade do ar (Rehman *et al.*, 2022).

Figura 3 – Total de emissões antrópicas de CO<sub>2</sub> em 2022 por setor no Brasil.



Fonte: (EPE, 2023).

Dessa forma, é imprescindível que se definam estratégias para mitigar estes efeitos ao meio ambiente e à saúde das pessoas. Desde então, as empresas de distribuição de mercadorias e a sociedade tem procurado estratégias que minimizem os custos operacionais e ambientais, garantindo a qualidade do serviço ofertado aos usuários (Sánchez, 2021).

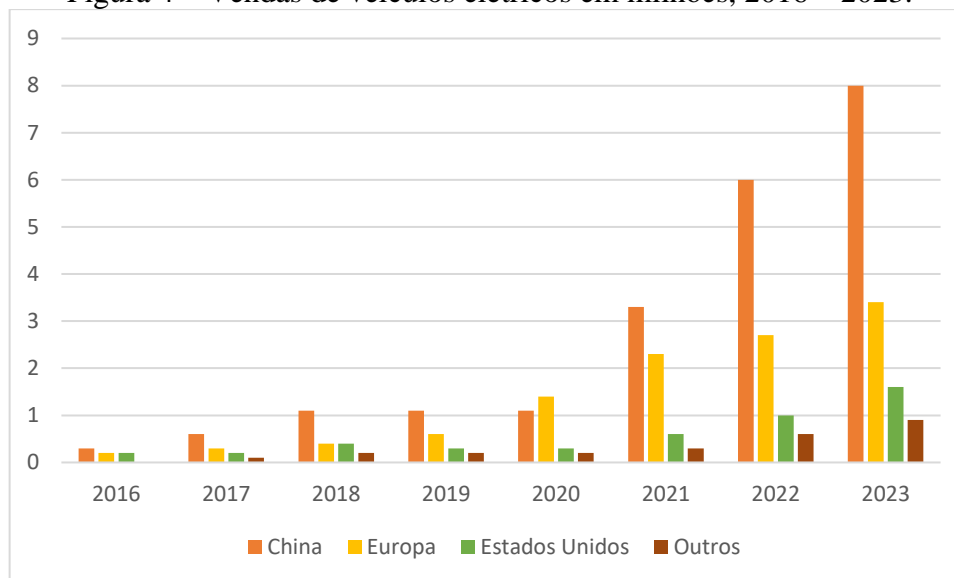
Nesse contexto, os VEs surgiram como alternativa aos veículos a combustão na realização das atividades de mobilidade urbana e de empresas de transporte, principalmente devido aos seus benefícios econômicos e ambientais, isto é, o nível baixo de emissão de gases poluentes (Liu *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2022).

Segundo o levantamento da *International Energy Agency*, IEA, a venda de VEs em 2021 duplicou seu percentual de mercado em relação ao ano da pandemia (2020), e em relação à 2019, triplicou, como pode ser observado na Figura 4. Em 2023, a venda de VEs ao redor do mundo foi de quase 14 milhões de unidades.

Em adição, pode-se mencionar que a China é o país que lidera este ranking de vendas ao longo dos anos, com 8 milhões de unidades em 2023, seguida da Europa, com 3,4 milhões de unidades, menor que metade do líder do mercado. O Brasil e outras regiões contam com

menos de 1 milhão de unidades de VEs vendidos em 2023, o que elucida o cenário de grande dependência de combustíveis fósseis para o setor do transporte (Paoli, 2022).

Figura 4 – Vendas de veículos elétricos em milhões, 2016 – 2023.



Fonte: (International Energy Agency: IEA, 2023).

Isto pode ser explicado pelos obstáculos de se adotar VEs no Brasil, que além de seu preço maior em relação aos veículos convencionais, possuem baixo tempo de autonomia, custo elevado na troca de baterias e necessidade de visitas constantes às estações de recarga, que é ainda mais exacerbado pelo fato do Brasil possuir longas distâncias que dificultam a adoção destes veículos para prestação de serviços em comunidades remotas (Cubides Rivera, 2016). Essas adversidades associadas aos VEs impõem a necessidade do desenvolvimento de abordagens robustas para lidar com os desafios de autonomia da bateria, tornando-se um tema de ampla pesquisa tanto no setor acadêmico como no setor privado.

Com isso, as abordagens devem envolver não só a definição de uma rota ótima para percurso do VE, mas principalmente o desenvolvimento de métodos de planejamento eficientes para alocar e dimensionar adequadamente as estações de recargas, especialmente quando associadas às energias renováveis (Shaaban *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2022).

Consequentemente, dimensionar corretamente estações de recarga com fontes limpas de geração de energia preservará e ampliará ainda mais esses benefícios ambientais; para mais, estes serviços podem desempenhar um papel importante na modernização das infraestruturas energéticas (Ugirimurera & Haas, 2017; Liu *et al.*, 2018).

Uma infraestrutura energética que vem ganhando espaço no planejamento de sistemas elétricos são as microrredes, caracterizadas pela presença e operação de geração renovável

como microturbinas, painéis fotovoltaicos, dispositivos de armazenamento de energia (baterias, capacitores de energia) e cargas controláveis, como os VEs (Fontenot & Dong, 2019). Elas podem operar no sistema *on grid*, isto é, conectada a uma rede elétrica principal, ou *off grid*, de modo ilhado e sem conexão com uma rede elétrica.

As microrredes podem ser empregadas para resolver vários tipos de problemas, tanto no nível da rede quanto no nível de edifícios residenciais. Alguns problemas comuns são o fluxo de energia ideal, previsão de carga, otimização de custos de energia, gerenciamento de energia predial e resposta à demanda (Fontenot & Dong, 2019). Assim, essa tecnologia pode ser aplicada para edifícios inteligentes, infraestrutura de recarga de VEs, sistemas auxiliares de subestações e comunidades remotas que possuem fornecimento de energia instável.

Dessa maneira, o uso de microrredes tem sido uma abordagem que vem ganhando espaço para a alimentação de estações de recarga, em razão da sua capacidade de resolver simultaneamente as questões de desigualdade energética e desafios ambientais (Chae *et al.*, 2020).

Todavia, microrredes usam energia de fontes intermitentes e o dimensionamento da capacidade de fontes distribuídas junto à inclusão de sistemas de armazenamento de energia é fundamental para garantir a viabilidade econômica e elétrica (Chae *et al.*, 2020).

Seguindo a necessidade de mitigar as emissões de poluentes gerados pelos setores energético e de transporte, a implantação de microrredes pode sanar tanto o problema de infraestruturas de recargas de VEs em comunidades remotas, quanto contribuir para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis.

No entanto, há uma lacuna na literatura em relação a métodos de planejamento eficientes para alocar e dimensionar conjuntamente microrredes e estações de recarga em comunidades remotas, satisfazendo as restrições da microrrede e levando em consideração a natureza intermitente das fontes renováveis (Simorgh *et al.*, 2018; Shaaban *et al.*, 2019). Além disso, não foram encontrados trabalhos que fazem o roteamento ideal do VE ao passo que calcula seu estado de carga e, consequentemente, dimensiona a estação de recarga a partir deste roteamento.

Nesse contexto, esta pesquisa de mestrado explorou a lacuna mencionada, propondo o desenvolvimento de uma meta-heurística Busca Local Iterada para o dimensionamento de uma microrrede híbrida baseada em geração renovável para alimentação de uma estação de recarga de VEs que prestam serviços ou realizam entregas em comunidades remotas.

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um método de otimização para o dimensionamento de uma microrrede híbrida associada a geração renovável e baterias para

alimentação de uma estação de recarga de VEs que prestam serviços ou realizam entregas em uma comunidade remota caracterizada por um fornecimento de energia instável.

Os objetivos específicos são:

- Investigar a aplicação da meta-heurística Busca Local Iterada para o dimensionamento de uma microrrede híbrida;
- Considerar geração renovável e baterias no dimensionamento da microrrede a fim de alimentar uma estação de recarga autônoma de VEs para uma comunidade remota;
- Formular o problema de roteamento de VEs com visitas à estação de recarga;
- Analisar o método de otimização desenvolvido considerando requisitos como tempo de espera para a recarga do veículo e investimento;
- Avaliar o esforço computacional do método proposto através do tempo necessário para encontrar a solução e o nível de normalidade das soluções geradas.
- Discutir o benefício ambiental produzido para as comunidades remotas com a adoção de VEs para a prestação de serviços.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: inicialmente, no Capítulo 1 são discutidos o tema central, sua relevância e justificativa e os objetivos da realização deste estudo. No Capítulo 2 é realizada uma breve revisão da literatura quanto ao planejamento e dimensionamento de microrredes e estações de recarga de VEs. O Capítulo 3 trata do problema de dimensionamento de uma microrrede híbrida para alimentação de uma estação de recarga de VEs em uma comunidade remota, idealizando a forma de representar uma proposta de solução, restrições do problema e a função objetivo. O método de otimização baseado na meta-heurística Busca Local Iterada e suas estratégias são caracterizados no Capítulo 4. No Capítulo 5 são apresentados os resultados da aplicação do caso de estudo com comunidades remotas ao método desenvolvido. Finalmente, no Capítulo 6 são explanadas as considerações finais obtidas pela aplicação do método desenvolvido, assim como são apresentadas propostas de pesquisa futura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para aumentar a escalabilidade do uso dos VEs se faz necessário o planejamento eficiente de infraestruturas de recarga para que estes veículos possam carregar durante suas rotas, devido a sua autonomia limitada para percorrer longas distâncias. Assim, trabalhos recentes vêm sendo desenvolvidos na área de planejamento e dimensionamento de estações de recarga para VEs que também resolvem os problemas de roteamento e de alocação ótima simultaneamente.

Shaaban *et al.* (2019) propuseram um algoritmo de planejamento para alocação de estações de recarga de veículos elétricos em comunidades remotas. Primeiro, os autores realizaram a alocação e dimensionamento de um conjunto de geradores distribuídos juntamente com estações de recarga de VE usando um algoritmo genético de classificação não dominada (NSGA-II), depois garantem a operação confiável e ecologicamente correta da microrrede, resolvendo um problema de programação multiobjetivo não linear.

Com a mesma estratégia de solução, o NSGA-II foi aplicado novamente para o problema de dimensionamento de geradores distribuídos e estações de recarga com dois estágios em Zainab *et al.* (2023). O primeiro determina as localizações e tamanhos dos geradores para estações de recarga no cenário conectado à rede, enquanto o planejamento do segundo estágio identifica as regiões ótimas no cenário ilhado.

Simulando o funcionamento de uma microrrede para suprir a demanda de uma ER por 20 anos, Chae *et al.* (2020) usaram o método de busca exaustiva para encontrar o ponto ótimo com implementação no MATLAB. Os autores buscaram projetar uma microrrede para estação de recarga localizada em uma ilha, que seria alimentada por sistemas fotovoltaicos e armazenamento de energia.

Também visando o atendimento em regiões isoladas da rede elétrica principal, o dimensionamento ideal de uma estação de recarga em uma vila que depende integralmente da energia gerada por painéis solares foi estudado por Ugirumurera e Haas (2017). Os autores desenvolveram um algoritmo baseado em busca para resolver o problema de programação não linear inteira e aplicam um modelo de cadeia de Markov 3-D para explicar a intermitência na produção de energia solar.

Um modelo de programação estocástica proposto por Amer *et al.* (2021) aloca e dimensiona turbinas eólicas de pequeno porte para estações de recarga rápida de VEs em áreas urbanas e suburbanas. Uma métrica de valor também é proposta para classificar locais de estações candidatas com base em sua atratividade para motoristas de VEs. Primeiro, os autores verificam se os modelos de planejamento da rede de distribuição se concentram nos aspectos



de alto nível da localização e dimensionamento das turbinas eólicas, ignorando considerações como tipos de turbinas, tamanhos, espaçamento, regulamentos legais e localizações candidatas. Depois, o modelo da procura de estações de recarga rápida segue técnicas de longa data, como as linhas de origem e destino, que se concentram no fluxo de tráfego como o principal determinante da procura. Por fim, uma restrição garante que toda a procura dos VEs seja satisfeita.

A modelagem estocástica formulando agora a recarga de VEs foi abordada por Zhang *et al.* (2021), onde um modelo de planejamento multiobjetivo para o dimensionamento e localização de estações de recarga é proposto. Os autores modelaram a geração de energia eólica com base nas simulações de Monte Carlo da cadeia de Markov, ao passo que a demanda estocástica de recarga do VE é prevista e, finalmente, as soluções ótimas para o modelo de planejamento conjunto são obtidas por meio do algoritmo de aprendizado de máquina conhecido como agregação natural multiobjetivo.

Em outro enfoque, as simulações de Monte Carlo podem ser conferidas para representar a incertezas de geração eólica no problema investigado por Shojaabadi *et al.* (2016), que aplica o NSGA para o planejamento de estações de recarga para veículos híbridos plug-in. Essa otimização também foi realizada para encontrar o tamanho e o local ótimos dos geradores eólicos, com minimização das perdas de energia.

Recentemente, Rehman *et al.* (2022) apresentaram formulações de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para obter o dimensionamento ótimo para um sistema de armazenamento de energia por bateria e um sistema de geração solar em uma estação de recarga. Os autores utilizaram relaxamentos de *McCormick* e o método *Big-M* para relaxar os termos bi lineares nas restrições operacionais das baterias, enquanto otimização baseada em PLIM foi proposta para levar em conta as incertezas no preço da eletricidade, geração solar e demanda de carga.

Com uma abordagem semelhante, Moradzadeh e Abdelaziz (2020) adotaram uma formulação de PLIM para determinar a capacidade ótima, o planejamento de geração renovável e armazenamento de energia para minimizar os custos associados a uma estação de recarga. A formulação proposta leva em consideração as incertezas de geração renovável e permite a escolha da combinação ideal do sistema de armazenamento e energia renovável, cuja proposta foi implementada em GAMS.

A modelagem deste problema com PLIM tem sido bastante investigada. No trabalho de Wang *et al.* (2020) é proposto o planejamento de uma estação de recarga *off-grid* movida a energia solar para carregar VEs e veículos a hidrogênio com seu respectivo combustível. O sistema projetado pelos autores se baseia em um eletrolisador de água instalado no sistema de

produção e armazenamento de hidrogênio, que é utilizado pelos veículos a hidrogênio e pela célula a combustível. Durante a inaccessibilidade do sistema fotovoltaico para alimentar os VEs, a célula a combustível funciona com hidrogênio para gerar eletricidade. Além disso, caso o sistema fotovoltaico e a célula não atendam a demanda, um gerador a diesel contribui para a produção de eletricidade. A otimização é abordada como um *framework* não estocástico na PLIM que lida com as incertezas.

Direya e Khatib (2023) apresentaram um modelo que combina armazenamento em baterias e fontes de energia renováveis para estações de recarga. Os modelos técnico-econômicos propostos foram usados para avaliar a localização da estação de recarga e os benefícios financeiros e ambientais do posto de recarga de VEs instalado em um contexto residencial, comercial ou industrial.

O planejamento de geradores distribuídos e sistemas de armazenamento de energia para as estações de recarga em subestações é abordado no trabalho de Zhou *et al.* (2023), onde um modelo PLIM minimiza o custo diário total, incluindo custo de investimento, operação da subestação, compra de energia, perda da rede e degradação da bateria. A técnica *Latin Hypercube Sampling* é utilizada para gerar cenários de incerteza para as renováveis e os comportamentos estocásticos de recarga dos VEs são representados por funções de densidade de probabilidade.

O estudo de Soykan, Er e Canakoglu (2022) determina a configuração de uma microrrede isolada composta por sistemas de geração eólica e fotovoltaica, além de baterias e veículos elétricos, propondo um problema de otimização multiobjetivo baseado em programação estocástica, onde são definidos objetivos como a redução dos custos do ciclo de vida e o aumento da confiabilidade do sistema, que é indicado como o índice de probabilidade de perda de energia.

Também tratando de um problema de otimização multiobjetivo, Leone *et al.* (2022) realizaram o dimensionamento ótimo de um sistema fotovoltaico e baterias em uma estação de recarga ultrarrápida de VEs. A função multiobjetivo proposta visa minimizar o custo anualizado da estação e as emissões poluentes usando um algoritmo genético (AG).

O projeto de uma estação de recarga rápida para veículos elétricos com geração renovável (eólica e fotovoltaica) e um sistema de armazenamento na estação de recarga foi proposto por Domínguez-Navarro *et al.* (2019), em que se otimiza a instalação e operação da estação de recarga utilizando um AG.

Atia e Yamada (2016) aplicaram PLIM para um sistema híbrido de energia renovável com baterias em microrredes residenciais, obtendo um modelo que leva em consideração o

comportamento estocástico das energias renováveis e a incerteza envolvida na previsão da carga elétrica, uma vez que é considerada a resposta à demanda de aparelhos.

Pode ser observado que o planejamento e dimensionamento de estações de recarga de VEs vem sendo amplamente investigado em pesquisas, da qual cada trabalho leva em consideração uma particularidade. Na maioria das vezes, são empregadas modelagens estocásticas para lidar com incertezas e o problema modelado com programação linear e não linear. Os métodos de solução variam entre robustas meta-heurísticas e *solvers* comerciais. Entretanto, poucos trabalhos buscam determinar o dimensionamento da microrrede levando em consideração o problema de roteamento do VE e o contexto de comunidades remotas. Um resumo dos trabalhos mencionados anteriormente, destacando os problemas de estudo, os métodos de otimização e considerações específicas pode ser conferido na Tabela 1.

Dessa forma, esta Dissertação propõe o dimensionamento de uma microrrede autônoma baseada em um sistema fotovoltaico e baterias para alimentar uma estação de recarga de VEs que atendem comunidades remotas, por meio da aplicação da meta-heurística busca local iterada. Este método heurístico é bastante empregado no problema de roteamento de VEs, entretanto, ainda não foi explorado o seu desempenho no dimensionamento de microrredes; isto contrasta com os trabalhos mencionados anteriormente sobre dimensionamento, que adotaram como métodos de solução NSGA-II, AG e PLIM. Outro ponto interessante a se mencionar é que esta meta-heurística baseada em busca local é capaz de propor diferentes soluções e visitar espaços de busca distintos em pouco tempo computacional. Dessarte, esta Dissertação considera não só o problema de dimensionamento como também o problema de roteamento em conjunto, logo, torna-se relevante avaliar o desempenho deste método com um problema mais complexo.

A priori, para o desenvolvimento do método, foi formulada a função objetivo de avaliação das soluções conforme as restrições que devem ser satisfeitas para o problema de roteamento de VEs, e em seguida, foi formulado a operação e dimensionamento de baterias e painéis relacionando com a energia necessária para carregar o VE, com base no estado de carga do VE calculado com o problema de roteamento. Por fim, com a função objetivo capaz de avaliar diferentes soluções, foi implementada a meta-heurística, propondo técnicas de geração de vizinhos da solução e diversificação do espaço de busca. Um caso de estudo composto por comunidades remotas do centro urbano é submetido ao método para avaliar o desempenho nas propostas de soluções.

As principais contribuições deste trabalho em comparação com os citados anteriormente são:

- Formulação do problema de roteamento de VEs com o cálculo do estado de carga, planejamento de energia fotovoltaica e sistema de armazenamento de energia de bateria, e operação de bateria com a meta-heurística busca local iterada – pouco explorada na literatura para o problema de dimensionamento de microrredes.
- Proposta da rota do VE que atenda comunidades remotas de centros urbanos, com necessidade de visita a estação de recarga durante o percurso para visitar todos os nós e retornar ao depósito.
- Dimensionar a microrrede de forma autônoma, independente da rede elétrica, possibilitando servir os veículos com energia fotovoltaica e, na ausência de irradiação, com baterias de armazenamento. Aplicação em um estudo de caso real de comunidades afastadas de um centro urbano e com abastecimento energético instável.
- Análise do impacto econômico para as empresas prestadoras de serviços e análise do benefício ambiental que a adoção de VEs para a prestação de serviços nestas comunidades poderia promover para a população residente, uma vez que a utilização de veículos movidos a combustão emitiria um determinado número de poluentes.

Tabela 1 – Comparação dos problemas de estudo e considerações dos trabalhos da literatura comentados.

Referência	Problema de estudo	Método	Considerações				
			DM	R	FR	B	CR/ Off grid
(Shaaban <i>et al.</i> , 2019)	Dimensionamento de estação de recarga	Modelo de programação multiobjetivo não linear inteiro misto e NSGA-II	✓	X	✓	X	✓
(Domínguez-Navarro <i>et al.</i> , 2019)	Dimensionamento de uma estação de recarga rápida	AG	✓	✓	✓	✓	X
(Moradzadeh & Abdelaziz, 2020)	Planejamento de energia renovável e baterias para uma estação de recarga rápida	PLIM e CPLEX	✓	✓	✓	✓	X
(Wang <i>et al.</i> , 2020)	Dimensionamento de estação de recarga off-grid com energia solar e hidrogênio	PLIM	✓	X	✓	✓	✓
(Chae <i>et al.</i> , 2020)	Dimensionamento de uma microrrede isolada para VEs	Método de busca exaustiva	✓	X	✓	✓	✓
(Amer <i>et al.</i> , 2021)	Dimensionamento de estação de recarga e pequenas turbinas eólicas	Modelo de programação não linear inteiro e AG	✓	X	✓	X	X
(Zhang <i>et al.</i> , 2021)	Planejamento de estação de recarga e sistema de distribuição	Algoritmo de agregação natural multiobjetivo	✓	X	✓	X	X
(Rehman <i>et al.</i> , 2022)	Dimensionamento de um sistema fotovoltaico e baterias para estação de recarga rápida	PLIM	✓	✓	✓	✓	X
(Soykan <i>et al.</i> , 2022)	Dimensionamento de uma microrrede isolada	Modelo de programação estocástica multiobjetivo	✓	✓	✓	✓	✓
(Leone <i>et al.</i> , 2022)	Dimensionamento de sistema fotovoltaico e baterias para estação de recarga ultrarrápida	AG e algoritmo multiobjetivo de enxame de partículas	✓	X	✓	✓	X
(Zainab <i>et al.</i> , 2023)	Planejamento de geradores distribuídos e estações de recarga	NSGA-II	✓	X	✓	✓	✓
(Direya & Khatib, 2023)	Desenvolvimento de modelos de sistemas fotovoltaicos para estação de recarga	Python	✓	X	✓	✓	X
(Zhou <i>et al.</i> , 2023)	Planejamento de geração distribuída e estação de recarga	PLIM	✓	✓	✓	✓	X
Esta Dissertação	Dimensionamento de microrrede híbrida para uma estação de recarga	Busca local iterada	✓	✓	✓	✓	✓

(DM) – Dimensionamento da microrrede; (R) – Roteamento; (FR) – Fontes de energias renováveis; (B) – Baterias/sistema de armazenamento;

(CR) – Comunidades remotas

\* A rota ótima não é uma das variáveis de decisão do problema como no trabalho proposto, porém, o trabalho em questão leva em consideração o comportamento do estado de carga dos VEs que serão carregados.

### **3 O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE UMA MICRORREDE HÍBRIDA PARA ALIMENTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA DE VES EM UMA COMUNIDADE REMOTA**

Este trabalho tem o enfoque de dimensionar uma microrrede composta de painéis fotovoltaicos e baterias para alimentar uma estação de recarga (ER) para VEs que prestam serviços em comunidades remotas de centros urbanos.

Dessa forma, o problema de otimização que foi investigado neste trabalho trata a minimização do custo de investimento da microrrede e minimização dos custos associados a distância percorrida pelo VE. Conforme a instância do problema, isto é, suas características de distância entre os clientes, tempo de percurso, número de clientes e parâmetros de autonomia do VE, busca-se traçar a rota e encontrar o número de painéis fotovoltaicos e bancos de baterias para carregar este veículo a um custo mínimo e formular o tempo de carga do VE como uma limitação do problema.

Na próxima seção será abordada com detalhes a formulação matemática do método, em outros termos, a forma de representar a proposta de solução, a função objetivo e as restrições do problema.

#### **3.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA**

Na utilização das meta-heurísticas deve-se especificar um conjunto de características relacionadas com a aplicação desta técnica na resolução de um problema complexo. Estas características são compostas pela forma de representação de uma proposta de solução (que pode ser direta ou na forma codificada), uma forma de identificar se uma proposta de solução é factível ou infactível, uma estratégia para encontrar a primeira proposta de solução, uma forma de caracterizar a vizinhança e uma estratégia de escolha do vizinho mais adequado para realizar a transição (Possagnolo, 2015).

A priori, será discutida a proposta da forma de representar as soluções e a formulação matemática do problema, primeiro apresentando a função objetivo, as equações de dimensionamento da microrrede e os cálculos envolvendo a rota do VE. Por fim, serão apresentadas as restrições para o problema e a função objetivo penalizada.

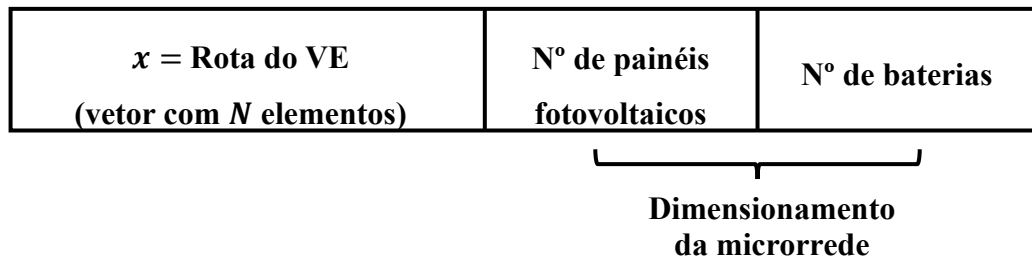
##### **3.1.1 Forma de representar a proposta de solução**

A forma idealizada para representar uma proposta de solução de um problema de otimização é a estratégia fundamental para representar uma proposta de solução do problema como um elemento do espaço de soluções (Gallego-Rendón *et al.*, 2007). Esta estratégia mostra como seria a forma mais adequada de representar uma solução candidata envolvendo as

variáveis de decisão do modelo matemático do problema, que, no caso deste trabalho, serão compostas pela definição da rota do VE e pelo dimensionamento da microrrede – um número inteiro de painéis fotovoltaicos e de baterias, como pode ser observado na Figura 5.

A rota do VE é composta por um vetor  $x$  com  $N$  elementos, onde  $N$  representa o número de nós do caso estudado, sendo que uma rota é definida como uma sequência, sem repetição, de todos esses nós. Dessa forma, realizando todas as permutações possíveis, é possível identificar todos os elementos do espaço de busca dessa parte do problema.

Figura 5 – Representação de uma proposta de solução.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com a proposta de solução devidamente definida e representada, a seguinte etapa de desenvolvimento do método se concentra em estabelecer a formulação matemática do problema, visando encontrar a melhor solução que leve em consideração o tempo de espera para recarga do VE e tempo de atendimento dos clientes com um custo de investimento mínimo.

### 3.1.2 Função objetivo

A função objetivo é uma função de variáveis ou termos que busca maximizar ou minimizar um problema estudado, também pode ser chamada de função de avaliação e por meio do seu cálculo é possível analisar diferentes soluções para este problema.

Desta forma, o problema de otimização deste estudo consiste em minimizar os custos totais apresentados na equação (1). O primeiro termo representa o custo da implementação do sistema de geração fotovoltaico, isto é, o custo de cada painel multiplicado pela sua quantidade,  $N_{PV}$ ; o segundo termo apresenta o custo do sistema de armazenamento, dado o custo de cada bateria multiplicado pela quantidade,  $N_{BAT}$ . O terceiro e último termo da função objetivo está relacionado à operação do VE. Este termo é composto por um custo fixo associado ao uso do VE,  $custo_d$  (com motoristas e percurso de rota diária), o número de dias no ano a se percorrer esta rota,  $N^{dias}$ ; uma taxa para trazer este valor de custo operacional futuro a um valor presente representado por  $\alpha$  (onde  $\alpha = 1 - (1 + \phi)^{-N^{anos}} / \phi$ , sendo  $N^{anos}$  a vida útil da bateria do VE e  $\phi$  a taxa de juros) e a soma de quilômetros percorridos por dia,  $d_{total}$ . Os fatores



$custo_{N_{PV}}$ ,  $custo_{N_{BAT}}$  e  $custo_d$  são parâmetros definidos de acordo com o custo de cada unidade de painel, de baterias e de se percorrer cada unidade de distância, respectivamente.

$$fo = N_{PV} \cdot custo_{N_{PV}} + N_{BAT} \cdot custo_{N_{BAT}} + N^{dias} \cdot custo_d \cdot \alpha \cdot d_{total} \quad (1)$$

A partir desta função de minimização de custos se define uma função objetivo penalizada que incentive que a rota termine mais rapidamente, junto a penalizações por violação das restrições que serão discutidas nas próximas seções. Essa função objetivo penalizada será discutida na seção 3.1.5. Tendo isto em vista, o valor final da função objetivo irá variar dependendo das condições da solução, se for uma boa solução terá um valor baixo, caso contrário, uma solução de pouca qualidade teria um valor mais elevado.

### 3.1.3 Dimensionamento da microrrede

A microrrede é uma infraestrutura energética caracterizada pela presença de geração renovável e sistemas de armazenamento de energia. Suas aplicações vêm sendo investigadas em razão da sua capacidade de resolver simultaneamente as questões de desigualdade energética e desafios ambientais (Fontenot & Dong, 2019; Chae *et al.*, 2020).

O esquema proposto neste trabalho envolve o dimensionamento de uma microrrede composta por painéis fotovoltaicos e baterias para compor uma ER que possua energia elétrica para abastecer a demanda do VE quando esteja prestando serviços na comunidade remota, isto é, a comunidade possui a particularidade de estar distantes de centros urbanos e possivelmente um fornecimento de energia elétrica instável. Este conceito é ilustrado na Figura 6.

A microrrede será composta por painéis solares e baterias que sejam capazes de fornecer a potência requerida pelos VEs, para que este seja capaz de completar a rota e retornar ao depósito. Assim, VEs que prestam serviços ou realizam entregas na comunidade remota, e.g., veículos de entrega de mercadorias, prestadores de serviços, visitas técnicas periódicas, ônibus de transporte entre as regiões e até mesmo caminhões coletores podem restaurar sua autonomia e completar a rota, integralmente abastecidos por energia de fontes limpas e minimizando os impactos ao meio ambiente que seriam gerados por veículos movidos à combustíveis fósseis.

Figura 6 – Esquema do sistema proposto para a microrrede e comunidade remota.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, para considerar painéis fotovoltaicos e baterias no dimensionamento da microrrede é necessário realizar o cálculo da energia fornecida por essas fontes. A energia das baterias,  $E^{BAT}$  é definida como o número de baterias,  $N_{BAT}$ , multiplicado pela capacidade nominal do modelo de baterias adotado, conforme apresentado na equação (2); enquanto a equação (3) modela a energia fotovoltaica disponível em  $kWh$  por meio do número de painéis fotovoltaicos,  $N_{PV}$ , e a corrente, tensão e fator de forma de cada célula fotovoltaica. Estas equações modelam, por meio da energia necessária para carregar o VE, o número de baterias e o número de painéis que são necessários, que são variáveis de decisão do problema de estudo.

$$E^{BAT} = N_{BAT} \cdot \bar{E}^{BAT} \quad (2)$$

$$P_c^{PV} = \frac{N_{PV} \cdot F \cdot V_c \cdot I_c}{1000}, \quad \forall c \in C \quad (3)$$

A energia das baterias a partir de um determinado momento  $t$  em que o VE chega à estação de recarga é definida pela equação (4), onde é calculada a operação da bateria, por meio das potências de carga e de descarga, em que a descarga da bateria foi utilizada para carregar o VE e a de carga pelo que foi carregado pelos painéis fotovoltaicos, sempre respeitando que a carga e a descarga sejam feitas com um fator de eficiência de carga  $\eta^c$  e de descarga,  $\eta^d$ .

$$E_{(t+1)}^{BAT} = E_t^{BAT} + P_t^{BAT,c} \eta^c - \frac{P_t^{BAT,d}}{\eta^d} \quad (4)$$

A energia fotovoltaica é calculada para cada um dos cenários de irradiação, conforme a equação (3) apresenta. É utilizado apenas um conjunto de cenários, composto por 3 cenários de

irradiação, assim, as equações (5)–(8) calculam separadamente, para cada cenário de irradiação, os valores para a tensão, corrente e temperatura na célula fotovoltaica,  $V_c$ ,  $I_c$ , e  $T_c$ . A equação (5) calcula o fator de forma,  $F$ , com a tensão de máxima potência  $V^{mppt}$  e a corrente de máxima potência  $I^{mppt}$ , e, a tensão de circuito aberto  $V^{oc}$  e a corrente de curto-circuito  $I^{sc}$ , parâmetros definidos de acordo com as características do painel fotovoltaico.

A equação (6) calcula a temperatura na célula fotovoltaica  $T_c$  em função da temperatura ambiente  $T^a$ , da temperatura nominal de operação da célula  $N^{oct}$  e da irradiação solar  $G_c$  correspondente a cada cenário  $c$ . A equação (7) modela a corrente fornecida pela célula fotovoltaica em função de sua temperatura e do coeficiente de temperatura para a corrente  $K^i$ . Da mesma forma, a tensão fornecida pela célula fotovoltaica, representada com a equação (8), é calculada em função de  $T_c$  e do coeficiente de temperatura para a tensão  $K^v$ .

$$F = \frac{V^{mppt} I^{mppt}}{V^{oc} I^{sc}} \quad (5)$$

$$T_c = T^a + \frac{N^{oct} - 20}{0.8 \cdot G_c}, \quad \forall c \in C \quad (6)$$

$$I_c = G_c [I^{sc} + K^i (T_s - 25)], \quad \forall c \in C \quad (7)$$

$$V_c = V^{oc} + K^v \cdot T_c, \quad \forall c \in C \quad (8)$$

### 3.1.4 Problema de roteamento de veículos elétricos

No geral, busca-se dimensionar uma microrrede para ser alocada em uma comunidade remota para que atenda as recargas de VEs que prestam serviços na região; entretanto, precisa-se levar em consideração a rota do veículo, visando determinar a quantidade de energia elétrica que o veículo precisará. Assim, são tratadas algumas restrições do problema clássico de roteamento de veículos, tais como (Campos, 2018):

- Sair do depósito e retornar ao depósito após de atender todos os clientes;
- Todos os clientes devem ser visitados;
- A capacidade da bateria do VE deve ser respeitada;
- Cada cliente é atendido apenas uma vez e somente por um VE;
- Adicionalmente, para o problema analisado neste trabalho, o veículo deve passar pela estação de recarga pelo menos uma vez.

O problema de roteamento de VEs tem sido bastante investigado na literatura e é possível encontrar vários trabalhos que exploram incertezas no tempo e na autonomia da bateria. Algumas propostas envolvem modelos clássicos para solução, como programação

inteira mista e modelos mais robustos, como aqueles que utilizam meta-heurísticas e *matheurísticas*. Sendo assim, diversas técnicas vêm sendo empregadas nesse tema de pesquisa operacional; uma revisão deste problema e derivações pode ser encontrado no trabalho de Moghdani *et al.* (2021).

Além do dimensionamento da microrrede e suas variáveis de decisão para o número de painéis e baterias, o problema também aborda o roteamento do VE. Assim, a variável  $x$  é um vetor de  $N$  posições que representa a rota conforme definido na representação de uma proposta de solução, então,  $x_i$  representa o nó visitado da posição do índice  $i$  do vetor  $x$ .

Neste estudo, as variáveis e parâmetros do problema de roteamento considerado no método, bem como as variáveis do VE são expressas pelas equações (9)–(13). Aqui,  $d_{(x_{i-1}, x_i)}^M$  é a distância entre os nós de posição  $x_i$  e o seu antecessor,  $x_{i-1}$ . A partir da solução  $x$  proposta pela meta-heurística ILS para a rota, calcula-se a distância percorrida no  $i$ -ésimo nó da rota,  $d_{x_i}$ , assim como o tempo de percurso no  $i$ -ésimo nó da rota,  $t_{x_i}^{rota}$ . Com estas grandezas é possível verificar se a proposta de solução é de boa qualidade ou não, pois uma rota desejada é aquela que seja mais rápida e pelo caminho mais curto.

Assim, por meio da equação (9), calcula-se a distância percorrida pelo VE na rota, onde a distância da rota até o nó indicado por  $x_i$  é igual à distância da rota até o nó anterior,  $d_{x_{i-1}}$  somado a distância média entre esses nós  $d_{(x_{i-1}, x_i)}^M$ . O tempo de percurso é modelado com a soma do tempo de rota até o nó anterior  $t_{x_{i-1}}^{rota}$  e o tempo médio de percurso entre os nós  $x_i$  e  $x_{i-1}$ ,  $t_{(x_{i-1}, x_i)}^M$ , conforme (10). Por fim, a equação (11) atualiza o estado de carga do VE, o  $SOC_{x_i}$ , definido como o  $SOC$  até o nó anterior,  $SOC_{x_{i-1}}$  menos o produto entre distância entre os nós  $x_i$  e  $x_{i-1}$  e o consumo médio de bateria por km.

$$d_{x_i} = d_{x_{i-1}} + d_{(x_{i-1}, x_i)}^M, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$t_{x_i}^{rota} = t_{x_{i-1}}^{rota} + t_{(x_{i-1}, x_i)}^M, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N, x_{i-1} \neq ER \quad (10)$$

$$SOC_{x_i} = SOC_{x_{i-1}} - \delta \cdot d_{(x_{i-1}, x_i)}^M, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N, x_{i-1} \neq ER \quad (11)$$

Para o caso em que o VE está na estação de recarga, ou seja, quando  $x_i$  corresponde à ER, são atualizados o tempo de percurso e o  $SOC_{x_i}$  considerando o tempo que ficou na ER,  $\tau_c$ . Assim, o tempo de percurso até o nó após visitar a ER,  $t_{x_i}^{rota}$  é definido com base ao tempo de percurso até a ER mais o tempo de carga,  $\tau_c$ , conforme (12). Para o estado de carga do VE, o  $SOC_{x_i}$  depois de visitar a estação de recarga deve considerar o quanto foi carregado, então sendo  $x_{i-1} = ER$ , o estado de carga é formulado como a equação (11) somado as contribuições

da microrrede para o carregamento, isto é, a potência fotovoltaica,  $P_t^{PV}$ , e a potência de descarga das baterias,  $P_t^{BAT,d}$ , referente a soma do intervalo de tempo que permaneceu na ER. Aqui, assume-se um passo para o intervalo de tempo como  $t = \lceil t_{x_i}^{rota} \rceil$ , aproximando para o horário em que chega na ER, dado que o perfil de irradiação solar é horário e  $\Delta t$  representa o intervalo de tempo, como mostra a equação (13):

$$t_{x_i}^{rota} = t_{x_{i-1}}^{rota} + t_{(x_{i-1}, x_i)}^M + \tau_c, \quad \forall x_{i-1} = ER, c \in C \quad (12)$$

$$SOC_{x_i} = SOC_{x_{i-1}} - \delta \cdot d_{(x_{i-1}, x_i)}^M + \sum_{t=t_{x_{i-1}}^{rota}}^{t_{x_{i-1}}^{rota} + \tau_c} P_t^{PV} \cdot \Delta t + \sum_{t=t_{x_{i-1}}^{rota}}^{t_{x_{i-1}}^{rota} + \tau_c} \frac{P_t^{BAT,d}}{\eta^d} \cdot \Delta t, \quad (13)$$

$$\forall x_{i-1} = ER, c \in C$$

### 3.1.5 Penalização da função objetivo

Para conceituar certas condições no problema e gerar soluções pela meta-heurística que levem em conta a factibilidade do problema, devem ser incorporadas penalizações no cálculo da função objetivo além do custo de investimento e operação, buscando modelar o problema que se deseja investigar e encontrar a solução que satisfaça estas condições com o menor custo. Dessa forma, uma possibilidade está na penalização para que a rota termine mais rapidamente, considerando que o tempo de carga seja o menor possível e o tempo máximo de atendimento dos clientes não seja violado, além de outras circunstâncias de factibilidade. As considerações que são incorporadas nas soluções são explanadas separadamente a seguir:

- A. Como espera-se que o tempo de carga do VE seja o menor possível, adiciona-se uma penalização para ser somado a função objetivo final. Isto é feito por meio do produto entre o fator de penalização para o tempo de carga  $\beta_1$  e o tempo de carga em si,  $\tau_c$ .
- B. Um incentivo é adotado para que as baterias da microrrede carreguem ao longo do dia com energia fotovoltaica, portanto, há uma bonificação adicionada na função objetivo final com o produto entre o fator  $\beta_2$  e a potência de carga das baterias,  $P_t^{BAT,c}$ .
- C. O tempo máximo de atendimento de todos os clientes ( $T^{MAX}$ ) não seja violado, então é adicionado uma penalização caso isto ocorra, dado pelo produto entre o fator de penalização  $\beta_3$  e a diferença entre o tempo de operação e  $T^{MAX}$ .
- D. O estado de carga necessário para que o VE complete a rota quando chegar a estação de recarga ( $SOC_r$ ) não deve ser maior que o estado de carga máxima do VE,  $\overline{SOC}$ , dessa forma, o fator de penalização  $\beta_4$  elimina as soluções de rota que possuem esta violação.

- E. A potência fornecida ao longo do dia pelos painéis fotovoltaicos ( $P_c^{PV}$ ) somada à capacidade das baterias não deve ser menor que o estado de carga necessário para o VE completar a rota, entretanto, caso isso ocorra, uma penalização é adicionada a função objetivo por meio do fator  $\beta_5$ .
- F. Caso a potência fotovoltaica disponível ao longo de todo o dia ( $P_c^{PV}$ ) não for suficiente para carregar o módulo de baterias, uma penalização  $\beta_6$  é adicionada na função objetivo.
- G. O *SOC* do VE não deve ser menor que um *SOC* permitido, ou seja, o VE não deve ficar sem autonomia, pois esta condição supõe que o VE está parado no meio do caminho, então, a diferença entre o mínimo e o calculado com um fator de penalização  $\beta_7$  é somado na função objetivo.

Finalmente, a partir da função objetivo de minimização de custos definida pela equação (1) se define uma nova função objetivo penalizada que incentive que a rota termine mais rapidamente e as penalizações por violação das restrições mencionadas sejam minimizadas ou eliminadas no processo de otimização. Assim, a equação (14) representa a função objetivo penalizada, composta pela função objetivo original apresentada por (1) e a soma da contribuição de cada um dos cenários  $c$  para as condições descritas anteriormente. Na soma, o primeiro termo representa a penalização para o tempo de carga, visando que este tempo seja o menor possível, conforme descrito no item A. O segundo termo representa o incentivo escrito no item B, formulado como o produto entre fator de bonificação  $\beta_2$  e a potência de carga dos módulos de baterias, isto é, o quanto carregou os módulos de baterias pelos painéis fotovoltaicos. O terceiro termo representa a penalização para atraso descrita em C, dada pelo valor máximo entre 0 e o produto entre  $\beta_3$  e o tempo de atraso (diferença entre o tempo de percurso no final da rota,  $t_{x_N}^{rota}$  e tempo máximo de atendimento dos clientes  $T^{M\acute{A}X}$ ). O quarto termo representa a penalização para o caso em que o  $SOC_r$  necessário para completar a rota seja maior que a potência da bateria do VE, conforme descrito no item D. O quinto termo representa a situação descrita no item E, em que há a penalização para o caso em que a microrrede não forneça potência suficiente para carregar o VE. O sexto termo garante uma penalização caso a potência fornecida ao longo do dia pelos painéis não seja suficiente para completar a capacidade das baterias, como descrito no item F. Por fim, para modelar os limites do estado de carga do VE, penaliza-se a função objetivo caso o  $SOC_{x_i}$  em qualquer nó  $x_i$  da rota ser menor que o estado de carga mínimo *SOC*, como mencionado no item G.

$$\begin{aligned}
f_{open} = f_o + \sum_{c \in \mathcal{C}} \pi_c & \left[ \beta_1 \cdot \tau_c - \beta_2 \cdot \sum_t^{24} P_t^{BAT,c} \right. \\
& + \beta_3 \cdot \max\{t_{x_N} - T^{MAX}, 0\} + \beta_4 \cdot \max\{SOC_r - \overline{SOC}, 0\} \\
& + \beta_5 \cdot \max\{SOC_r - P_c^{PV} + \overline{E}^{BAT}, 0\} \\
& + \beta_6 \cdot \max\{\overline{E}^{BAT} - P_c^{PV}, 0\} \\
& \left. + \beta_7 \cdot \max\{\underline{SOC} - SOC_{x_i}, 0\} \right]
\end{aligned} \tag{14}$$

#### 4 APLICAÇÃO DA METAHEURÍSTICA BUSCA LOCAL ITERADA (ILS) PARA O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DA MICRORREDE

As meta-heurísticas são algoritmos amplamente utilizados para resolver problemas de otimização grandes e complexos. Estas estratégias desempenham um papel importante na otimização devido à sua capacidade na resolução de problemas de grande porte, onde se torna dispendiosa a aplicação da otimização matemática clássica que, por sua vez, necessita de grande esforço computacional para resolver estes problemas complexos (Stegherr *et al.*, 2022).

Os métodos de otimização que se baseiam em meta-heurísticas realizam operações de intensificação e diversificação para encontrar soluções quase ótimas e, eventualmente, a solução ótima. Esses algoritmos geralmente encontram soluções mais rapidamente que algoritmos estocásticos comuns e a otimização matemática, que podem ser tão boas quanto a solução ótima encontradas por métodos exatos, porém demandando um tempo menor (Jahwar & Abdulazees, 2020; Stegherr *et al.*, 2022).

Um ponto comum de muitas meta-heurísticas é o uso de técnicas de busca local, que são hibridizadas dentro de um algoritmo existente ou usadas como parte essencial da construção dele. Os algoritmos de busca local são originalmente algoritmos de objetivo único muito eficazes em solucionar problemas difíceis da otimização combinatória (Blot *et al.*, 2018; Stegherr *et al.*, 2022).

A ideia fundamental da busca local é partir de uma solução inicial (que pode ser gerada aleatoriamente) e explorar sucessivamente soluções de melhores qualidades na vizinhança de acordo com uma função de avaliação/objetivo (Glover & Kochenberger, 2006)

As primeiras abordagens de busca local foram registradas no final da década de 1950, com Bock (1958) e Croes (1958) investigando o problema do caixeiro viajante. Essa técnica pode encontrar boas soluções rapidamente, entretanto, há a possibilidade de o algoritmo ficar preso em ótimos locais, isto é, a melhor solução da vizinhança, mas não necessariamente a melhor solução do problema - o ótimo global (Vaessens; Aarts; Lenstra, 1998).

Para melhorar a eficácia da busca local e evitar que o algoritmo fique preso em ótimos locais ruins, várias técnicas foram introduzidas ao longo dos anos, como *Simulated Annealing*, *Tabu Search*, *Guided Local Search* e a *Iterated Local Search* (Vaessens; Aarts; Lenstra, 1998). Este trabalho busca investigar o uso desta última meta-heurística, *Iterated Local Search* (ILS) - ou traduzindo - busca local iterada, para o problema de dimensionamento de uma microrrede.

Essa meta-heurística é bastante empregada no problema de roteamento de veículos e no problema do caixeiro viajante (Penna *et al.*, 2013; Palhazi Cuervo *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2015; Alvarez *et al.*, 2018; Lourenço *et al.*, 2019; Brandão, 2020), entretanto, ainda não foi

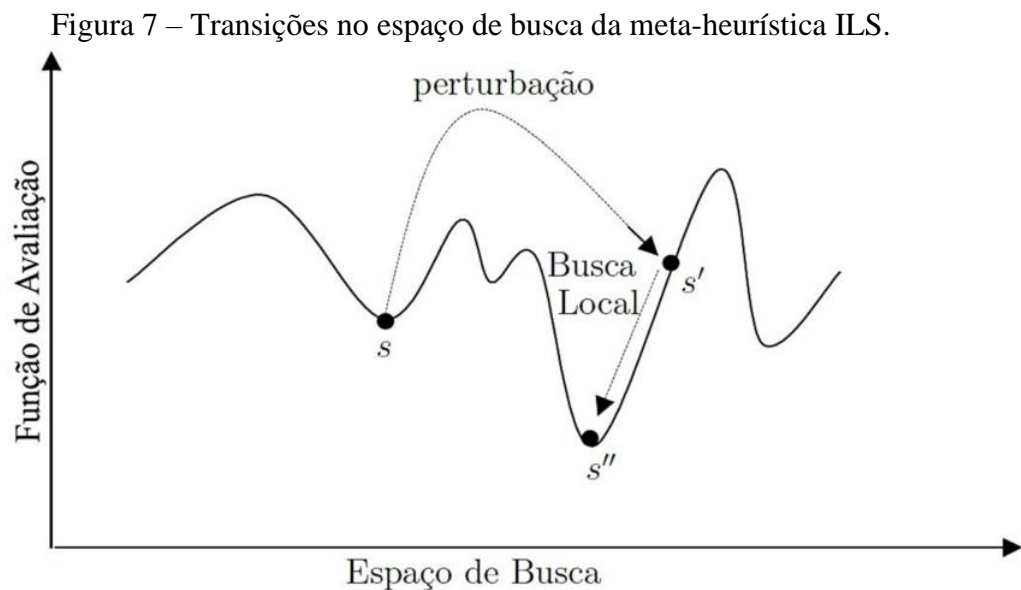


explorado seu desempenho no dimensionamento de microrredes. Desta forma, como este trabalho busca tratar ambos os problemas, torna-se de interesse utilizar este método de otimização, uma vez que também apresenta bons resultados com baixo tempo computacional.

#### 4.1 BUSCA LOCAL ITERADA

A busca local iterada (ILS) é uma meta-heurística que tem como base a heurística de busca local, com o adicional de operações de perturbações para fugir de ótimos locais. Segundo Glover e Kochenberger (2006), a essência da meta-heurística de ILS é construir iterativamente uma sequência de soluções geradas pela heurística de busca local, levando a soluções muito melhores do que usar apenas tentativas repetidas da busca local.

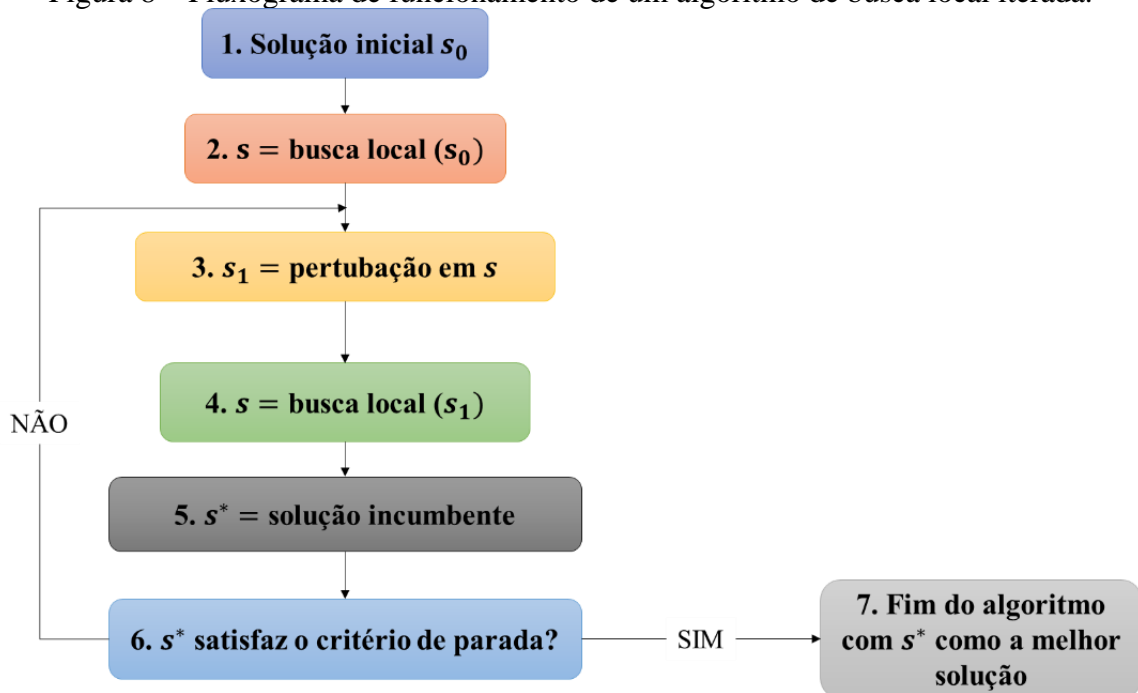
De acordo com a Figura 7, dentro do funcionamento da meta-heurística ILS, uma solução  $s$  é perturbada para se encontrar  $s'$ , que, por sua vez, é submetida a outro processo de busca local até que se encontre  $s''$ , isto é, uma solução de melhor qualidade (Landes, 2017).



Fonte: (Landes, 2017).

Especificamente, o esquema ilustrado na Figura 8 exemplifica o processo, em que a ILS perturba os pontos ótimos locais para diversificar e visitar outros espaços de soluções. Neste método é gerada uma solução inicial,  $s_0$ , sendo esta submetida a uma busca local para encontrar  $s$  e as operações de perturbação são aplicadas para definir  $s_1$ . Essa solução perturbada é melhorada e submetida novamente à busca local até o critério de parada ser atendido e definido a melhor solução, a incumbente  $s^*$  (Barros Junior, 2020; Freitas, 2022; Rego; Glover, 2007).

Figura 8 – Fluxograma de funcionamento de um algoritmo de busca local iterada.



Fonte: Adaptado de Lemos (2015).

Na sequência, os processos de estrutura de vizinhança da representação da solução, busca local, assim como as operações de perturbação serão discutidos visando caracterizar as técnicas utilizadas para desenvolver a ILS e aplicar ao problema de estudo da Seção 3.

#### 4.1.1 Estrutura de vizinhança

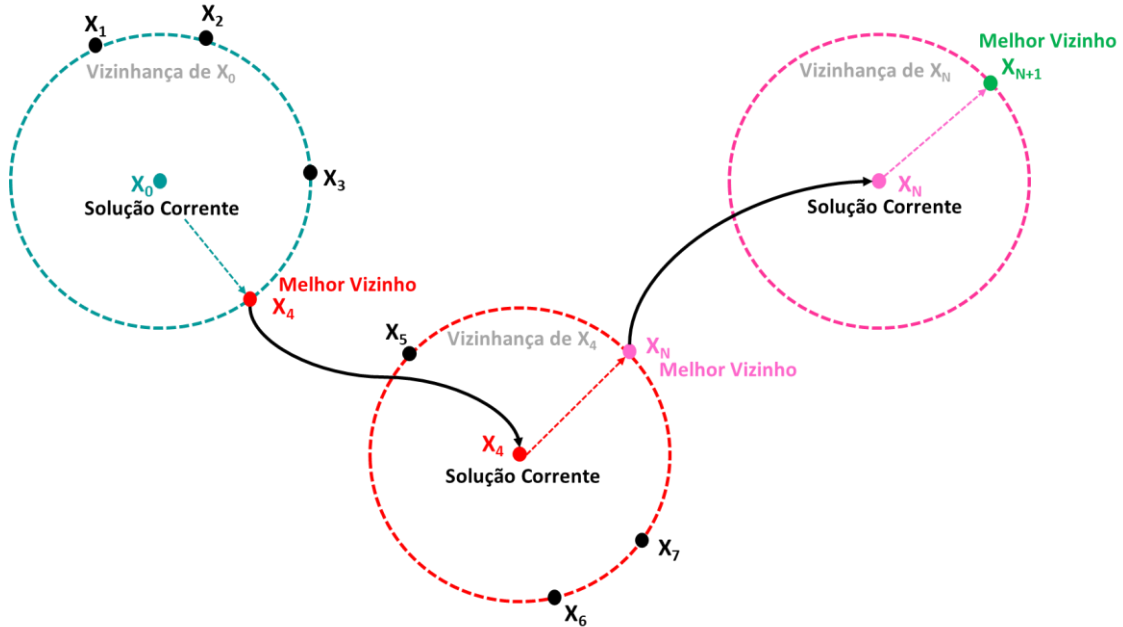
A estrutura de vizinhança para uma solução representa a solução mais próxima do atual. A principal diferença entre as meta-heurísticas se baseia na escolha do vizinho para realizar uma transição de solução através do espaço de busca (Possagnolo, 2015).

Na heurística de busca local, o processo é iniciado a partir de uma solução inicial que se transforma na solução corrente e, a partir desta solução, são geradas as soluções vizinhas usando uma definição de vizinhança. O algoritmo passa para a melhor solução vizinha desde que esta seja melhor que a solução corrente. Este processo é repetido até que a melhor solução vizinha seja de pior qualidade do que a solução corrente (Possagnolo, 2015).

A Figura 9 representa a busca através de uma estrutura de vizinhança, em que  $X_0$  é uma solução corrente e  $X_1, X_2, X_3$  e  $X_4$  são soluções vizinhas a esta.  $X_4$  é definido como o melhor vizinho de  $X_0$ , então o algoritmo deve passar para  $X_4$  como solução corrente e buscar seus vizinhos, em que se encontra  $X_5, X_6, X_7$  e  $X_N$ . Ao analisar todos os vizinhos,  $X_N$  é definido como melhor vizinho e se torna a solução corrente. Este processo é repetido explorando todos

os vizinhos da solução corrente e pulando sempre para a melhor, até que não se encontrem melhorias.

Figura 9 – Representação geral de uma estrutura de vizinhança.



Fonte: Elaborado pela autora.

A estrutura de vizinhança é idealizada a partir da forma em que se representa uma proposta de solução (representada na forma direta ou codificada). Dessa forma, uma proposta de solução vizinha é obtida a partir da solução corrente implementando um mecanismo de perturbação. O número de propostas de solução vizinhas é chamado de cardinalidade da vizinhança. Conforme demonstrado na Figura 5, a proposta de solução será composta por um vetor em que as primeiras posições serão a rota do VE e as duas últimas posições serão o dimensionamento da microrrede, composta primeiro pelo número de painéis fotovoltaicos seguido do número de baterias.

Cada vizinho desta solução representará uma única mudança neste vetor, seja no número dos painéis fotovoltaicos, de baterias ou na ordem da rota. Portanto, para representar as estruturas de vizinhança foram elaboradas diferentes estratégias para buscar o melhor vizinho da solução corrente, que serão exemplificados nos tópicos a seguir.

#### 4.1.1.1 Geração de vizinhos da rota

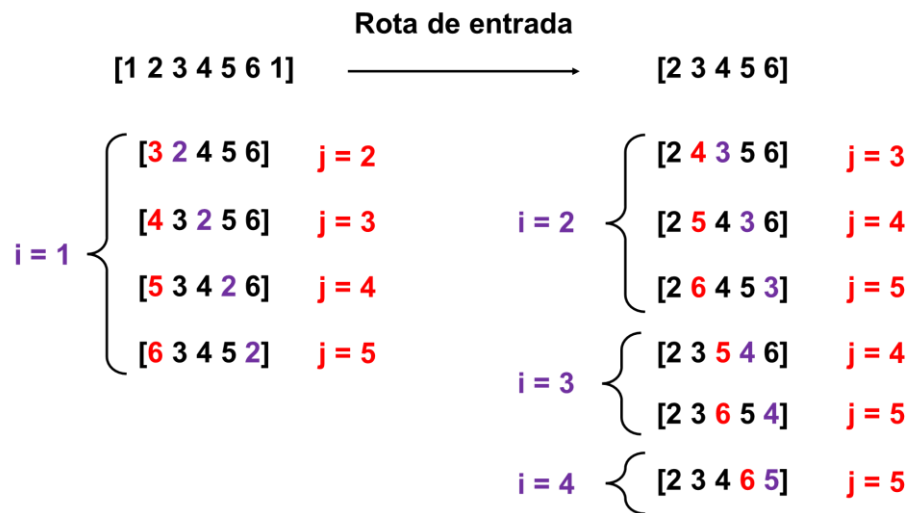
A estrutura de vizinhança da rota foi definida como a troca de posição da rota, de forma que todas as trocas de índices sejam avaliadas e encontrada a melhor solução. Dessa forma, são trocados o nó de posição  $i$  para posição  $j$  e vice-versa até que se percorra todos os elementos

do vetor que compõem a rota. Para cada nova rota gerada, ou seja, a rota vizinha da rota corrente, é calculado o valor da função objetivo; caso a rota vizinha tenha valor da função objetivo menor que a rota corrente, atualiza-se a rota vizinha para a rota corrente.

Um exemplo de como o algoritmo procede nos termos de troca de nós da rota pode ser verificado na Figura 10, em que há uma rota de entrada que inicia e termina no depósito. Como o depósito sempre deve ser o último e o primeiro nó visitado, o nó 1, ele é retirado da troca de índices.

No exemplo em questão,  $i$  vai de 1 até 4 (a rota possui 6 nós, mas o primeiro e último ponto sempre é o depósito), e  $j$  vai de  $i + 1$  – até 5. Sendo assim, no primeiro laço, quando  $i$  vale 1, se troca o nó correspondente ao índice 1 da rota com todos os índices  $j$ . O algoritmo faz essa troca sucessivamente até analisar todos os vizinhos e encontrar a rota com a combinação que oferece o melhor valor da função objetivo. Dessa forma, a cardinalidade de vizinhança é  $|N(x)| = 10$ .

Figura 10 – Procedimento de geração de vizinhos da rota.



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.1.1.2 Geração de vizinhos do dimensionamento da microrrede

A microrrede é composta pelo número de painéis fotovoltaicos e pelo número de módulos de baterias. Sendo estes valores inteiros, os vizinhos mais próximos seriam formados adicionando ou subtraindo uma unidade.

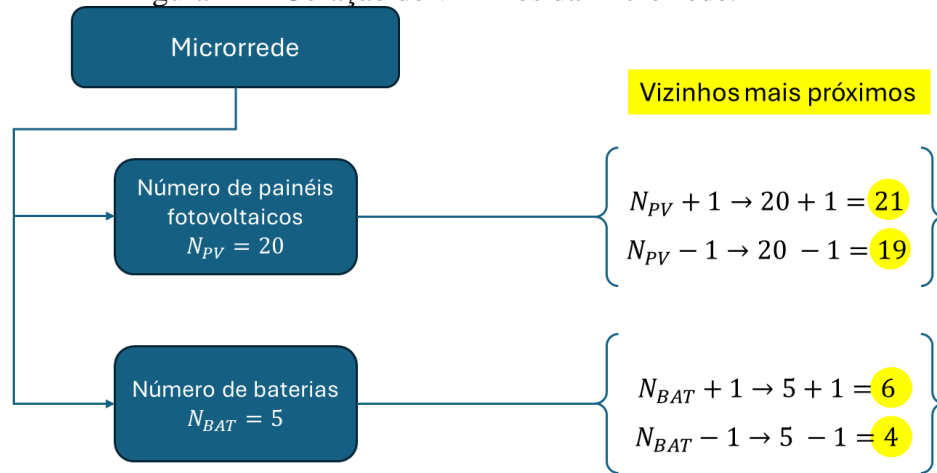
As sub-rotinas de geração de vizinhos da microrrede limitam o número de painéis/baterias entre zero e os parâmetros  $N_{PV_{MÁX}}$  e  $N_{BAT_{MÁX}}$ . Se o número corrente for menor que o limite superior ( $N_{PV_{MÁX}}$  ou  $N_{BAT_{MÁX}}$ ) pode ser adicionada mais uma unidade. Se for

menor que o valor de entrada, o algoritmo atualiza o número de painéis/baterias e verifica o valor da função objetivo.

Algo semelhante é feito com o limite inferior: se o número atual for maior ou igual a 1, há a possibilidade de diminuir uma unidade de painéis/baterias e analisar se o valor da função objetivo obtém melhoria. Um exemplo com valores numéricos para a geração de vizinhos da solução da microrrede pode ser conferido na Figura 11.

Se ao analisar os vizinhos próximos do número de baterias/painéis não houver melhoria na função objetivo, o algoritmo retorna o valor corrente.

Figura 11 – Geração de vizinhos da microrrede.



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.1.2 Busca Local

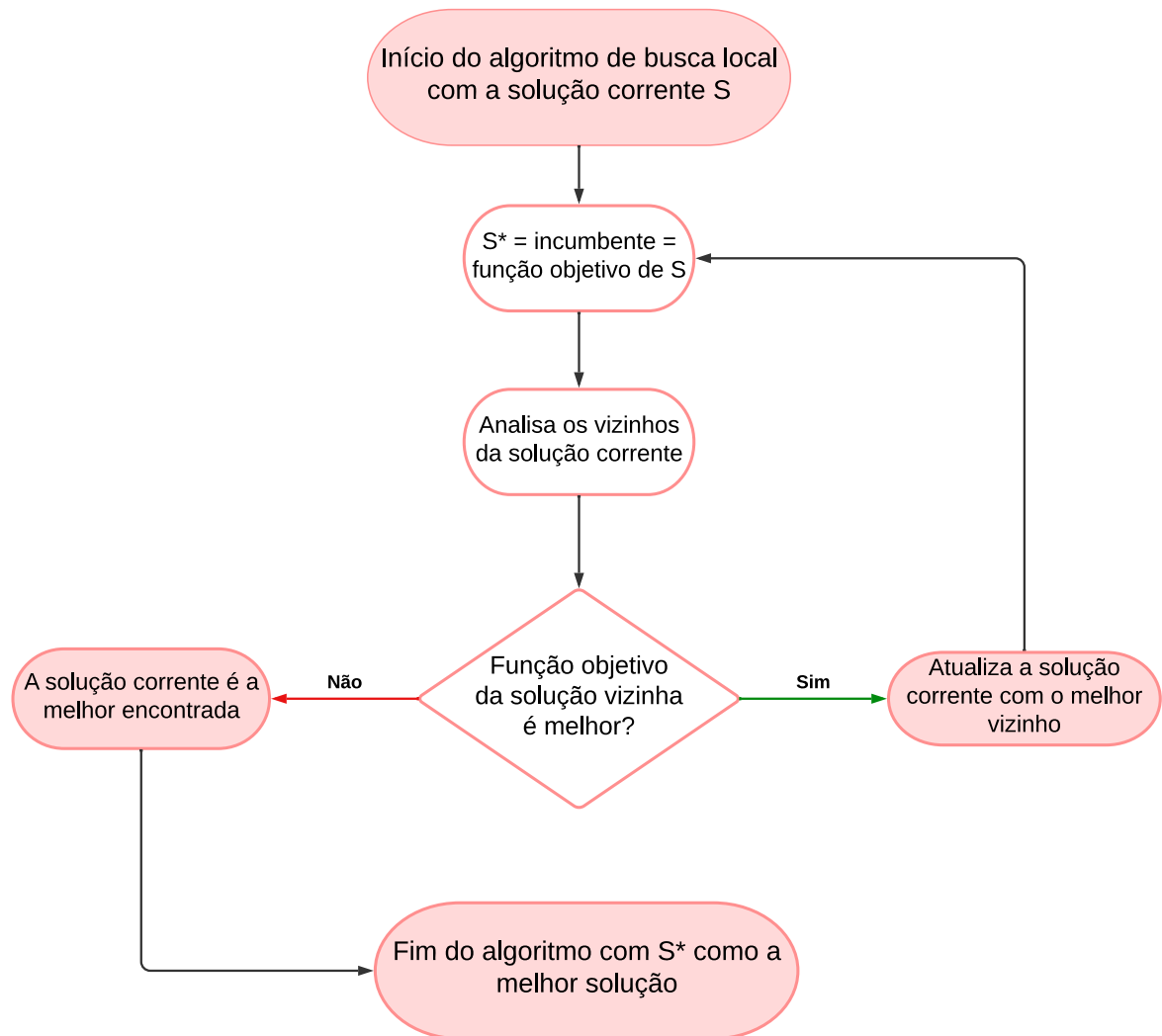
A busca local é o processo heurístico que vai aplicar iterativamente os algoritmos de geração de vizinhança e analisar o valor da função objetivo até encontrar a melhor solução local. Este processo vai testar separadamente cada setor que compõe o vetor solução: a rota, o número de painéis fotovoltaicos e o número de baterias.

Inicialmente, a estratégia gera uma proposta de solução inicial que se transforma na solução corrente e entra em um laço de repetição para testar os três tipos de geração de vizinhos mencionados anteriormente, verificando sempre o melhor vizinho que gera o menor valor da função objetivo. Isso é repetido enquanto houver melhoria, atualizando os valores que compõem a nova solução ( $N_{PV_{NOVA}} = N_{PV_{CORRENTE}}$ , por exemplo) e iniciado novamente o ciclo com a nova solução como a corrente, analisando a nova vizinhança dessa solução atualizada.

Vale ressaltar que este procedimento de busca local realizará transições através dos vizinhos de melhor qualidade, indo de vizinho em vizinho até encontrar o ótimo local. A Figura 12 representa o diagrama de fluxo para a busca local. Comumente esse processo termina em

um ótimo local e nem sempre encontra uma das melhores soluções para o problema, por isso, há aplicação de perturbações na solução ótima local visando sair de um espaço de vizinhança para outro e buscar melhoria na função objetivo. Essas perturbações caracterizam a principal diferença entre a busca local e a meta-heurística busca local iterada. As operações adotadas neste trabalho serão discutidas a seguir.

Figura 12 – Diagrama de fluxo para a busca local proposta.



Fonte: Elaborado pela autora.

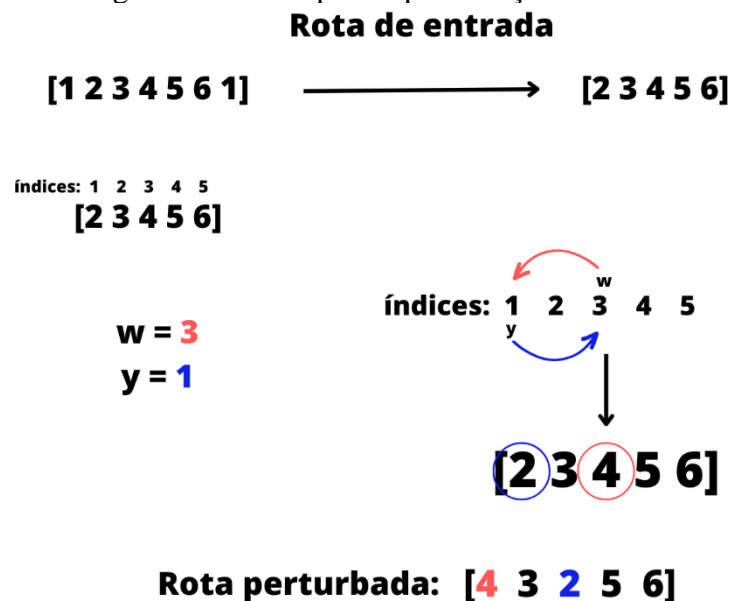
#### 4.1.3 Perturbação

A etapa de perturbação na ILS trata de uma estratégia de como contornar o principal problema da heurística de busca local, que encerra o processo quando o melhor vizinho é de pior qualidade que a solução corrente. Em outras palavras, como sair de um ótimo local (POSSAGNOLO, 2015).

Para fazer isso, foi implementada uma operação para troca de pares da rota, frequentemente utilizada no problema comum de roteamento de veículos. Além disso, também foi proposto uma perturbação para alterar os valores que compõem o dimensionamento da microrrede a partir de um limiar. São aplicadas aleatoriamente quatro operações de perturbação na solução ótima local, visando dar um deslocamento maior no espaço de busca o que representa uma diversificação, como demonstra a Figura 7.

A priori, para a perturbação na rota corrente, se recebe uma rota inicial, *rota*, e é gerada uma rota perturbada, *rota<sub>p</sub>*. São escolhidos aleatoriamente dois números entre o tamanho da rota, para servir como troca de nós, *w* e *y*. Assim, *w* e *y* recebem valores aleatórios que serão tomados como índice e a partir destes são trocados os respectivos nós dos índices. A Figura 13 representa este esquema com um exemplo, onde são sorteados aleatoriamente dois números entre 1 e 6, sendo *w* = 3 e *y* = 1. Então, troca-se o nó do índice na posição 3 (o nó 4) para a posição 1 (o nó 2) e tem-se a rota perturbada.

Figura 13 – Exemplo de perturbação da rota.



Fonte: Elaborado pela autora.

Além desta técnica de alteração na rota ilustrada pela Figura 13, também se aplicam perturbações no valor do dimensionamento da microrrede. Um algoritmo de perturbação geral na solução corrente recebe os parâmetros de entrada e os termos que compõem o vetor solução, isto é - rota e dimensionamento da microrrede, e além da descrita anteriormente a respeito da rota, aplica um aumento no número de painéis e de baterias da solução corrente por um valor *k*, conforme expressado a seguir:

$$N_{PV_P} = N_{PV_{corrente}} + \lceil k \cdot N_{PV_{corrente}} \rceil \quad (15)$$

$$N_{BAT_P} = N_{BAT_{corrente}} + \lceil k \cdot N_{BAT_{corrente}} \rceil \quad (16)$$

É viável mencionar que muitas vezes a solução perturbada final pode ser infactível, isto é, possuir um valor muito alto para a função objetivo. Entretanto, isto não caracteriza um obstáculo, pois a solução perturbada é submetida a uma busca local e logo se encontra um vizinho de melhor qualidade em uma vizinhança diferente da solução anterior.

Após detalhar os processos que compõem o método, isto é, a busca local, vizinhança, e a perturbação, um algoritmo principal foi desenvolvido para englobar todas essas funções e realizar o processo iterativo da ILS, que é apresentado no **Quadro 1**.

O primeiro passo é gerar a solução inicial  $s_0$ , que começa lendo uma matriz de dados de distância entre os nós, gerando valores aleatórios para a rota e para os valores de dimensionamento da microrrede. Esses valores vão constituir a solução inicial e a incumbente,  $s^*$ , é definida como o valor da função objetivo para essa solução.

Em seguida, uma busca local é aplicada nessa solução, gerando a solução corrente  $s$ , sendo a melhor vizinha de  $s_0$ . Assim, inicia-se o processo iterativo que irá aplicar constantes perturbações na solução corrente  $s$ , gerando  $s_1$ , que será submetida novamente a uma busca local e gerada uma nova  $s$ . Se  $s$  da busca local na solução  $s_1$  possuir melhor valor que a incumbente, atualiza-se o valor da incumbente com  $incumbente = s$ . Isto deve ser repetido enquanto não se atingir o número máximo de iterações ou que não haja mais melhorias na solução. Por fim, o algoritmo retorna um vetor solução,  $v_{sol}$ , composto pela melhor solução encontrada, com uma rota e números de painéis fotovoltaicos e de baterias e o valor da função objetivo para essa solução.

---

**Quadro 1.** Algoritmo da meta-heurística Busca Local Iterada

---

**Procedimento da Busca Local Iterada**

---

Gera a solução inicial  $s_0$

$s = \text{busca local}(s_0)$

$incumbente = s$

**enquanto**  $cont < \text{número máximo de iterações}$     **faça**

    Gera  $s_1 = \text{perturbação}(s)$

$s = \text{busca local}(s_1)$

**se**  $s < incumbente$

$incumbente = s$

**fim da condição**

$cont = cont + 1$

**fim enquanto**

$v_{sol} = incumbente$

Retorna  $v_{sol}$

**fim da Busca Local Iterada**

---



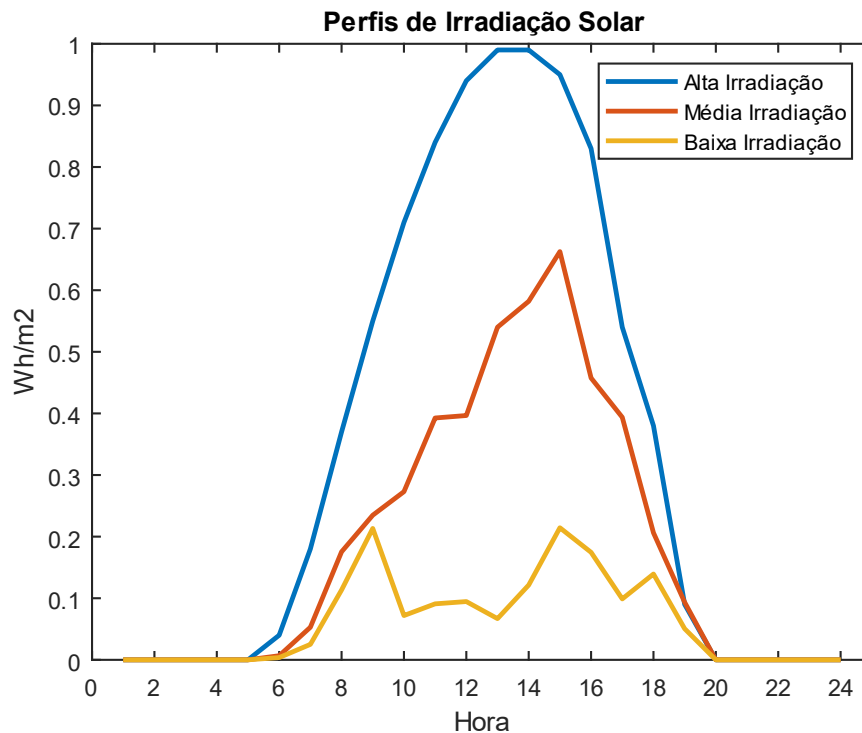
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método de otimização ao caso de estudo para avaliação do desempenho. Primeiro serão expostos os parâmetros adotados e os perfis de irradiação utilizados como cenários, em seguida, o caso de estudo e as análises obtidas com os testes, depois, um teste de verificação da meta-heurística foi executado, isto é, foram realizadas 100 execuções do método para analisar o comportamento médio de proposta de soluções. Por fim, é apresentada uma análise ambiental da emissão de  $CO_2$  que seria evitado é apresentada.

### 5.1 PARÂMETROS ADOTADOS

A Tabela 2 apresenta os parâmetros que foram adotados para o método de otimização baseado na meta-heurística ILS. A Figura 14 apresenta os três perfis de irradiação solar usados, representando cenários de alta, média e baixa irradiância, adotados do trabalho de Martinez *et al.* (2021). O método foi implementado no MATLAB em um computador com processador AMD Ryzen 7 5700 G.

Figura 14 – Perfis de irradiação solar.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2 – Parâmetros adotados para o método ILS proposto.

Parâmetros do módulo de baterias		
$custo_{BAT}$	Custo de cada bateria	R\$ 8000,00
$\eta^c$	Eficiência de carga das baterias	95%
$\eta^d$	Eficiência de descarga das baterias	95%
$N_{BAT_{M\acute{A}X}}$	Número máximo de baterias	100
$\overline{E}^{BAT}$	Capacidade nominal de cada bateria	5 kWh
Parâmetros dos painéis fotovoltaicos		
$custo_{PV}$	Custo de cada painel fotovoltaico	R\$ 500,00
$I_{mppt}$	Corrente em ponto de máxima potência	17,3 A
$I_{SC}$	Corrente de curto-circuito	18,32 A
$K_i$	Coefficiente de temperatura para a corrente	0,04 mA/°C
$K_v$	Coefficiente de temperatura para a tensão	-0,25 V/°C
$N_{OCT}$	Temperatura nominal do painel fotovoltaico	44 °C
$N_{PV_{M\acute{A}X}}$	Número máximo de painéis fotovoltaicos	100
$V_{mppt}$	Tensão em ponto de máxima potência	34,7 V
$V_{OC}$	Tensão de circuito aberto	41,6 V
Parâmetros do Veículo Elétrico		
$\delta$	Consumo de energia por distância	0,3 kWh/km
$custo_d$	Custo de percurso do veículo elétrico	0,2 R\$/km
$P_{VEM}$	Potência máxima de recarga do veículo elétrico	20 kW
$\overline{SOC}$	Estado de carga máximo	60 kWh
$\underline{SOC}$	Estado de carga mínimo	10 kWh
Outros Parâmetros		
$\beta_1$	Penalização para o tempo de recarga do veículo elétrico	R\$ 100/h
$\beta_2$	Bonificação para recarga das baterias com energia fotovoltaica	R\$ 10/kW
$\beta_3$	Penalização para tempo limite de atendimento dos clientes	R\$ 1000/h
$\beta_4$	Penalização para estado de carga insuficiente para completar a rota	R\$ 1.000.000/kWh
$\beta_5$	Penalização para energia insuficiente na microrrede	R\$ 1.000.000/kWh
$\beta_6$	Penalização para energia fotovoltaica insuficiente para carregar as baterias	R\$ 1.000.000/kWh
$\beta_7$	Penalização para o estado de carga menor que o mínimo permitido	R\$ 1.000.000/kWh
$\Delta t$	Intervalo de tempo	1 hora
$\phi$	Taxa de juros	10%
$\pi_c$	Probabilidade de cada cenário de irradiação	1/3
$k$	Fator de perturbação do número de painéis e baterias	50%
$N^{dias}$	Número de dias úteis no ano a se percorrer a rota	252 dias
$N^{anos}$	Vida útil da bateria do veículo elétrico	10 anos
$N^{per}$	Número máximo de operações de perturbação	100
$T_a$	Temperatura ambiente	25 °C
$T_{max}$	Horário máximo de atendimento dos clientes	18 h

Fonte: Elaborado pela autora.

## 5.2 CASO DE ESTUDO

Este caso analisa o contexto de comunidades remotas de centros urbanos. A região analisada refere-se a um município de Rosana, do Oeste Paulista, composto pela cidade de Primavera (22°31'32"S 52°56'53"W) e por comunidades remotas no entorno deste município, como pode ser observado na Figura 15. Estas regiões afastadas, representadas pelos nós 2 a 15, são comunidades rurais em que centenas de pessoas residem, muitas vezes com acesso instável de insumos básicos, como fornecimento de água e energia elétrica. Dessa forma, empresas de *delivery*, de entrega de mercadorias e prestadoras de serviços raramente fazem visitas a estas comunidades, limitando o atendimento desses clientes mais afastados. Visando analisar este contexto de comunidades remotas de centros urbanos, este caso foi considerado e os resultados obtidos com o método descrito na seção anterior com os parâmetros das Tabelas 2 e 3.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no caso de estudo.

$d$	Matriz de distância entre os nós	(ANEXO A – MATRIZ DE DISTÂNCIA DO CASO DE ESTUDO)
$ER$	Nó que corresponde a estação de recarga	9
$t_{x_1}$	Hora de partida do VE do depósito	8h
$t_{x_{i-1,i}}^M$	Tempo médio para percorrer os nós	$t_{x_{i-1,i}}^M = \frac{d_{x_{i-1,i}}^M}{50 \text{ km/h}}$

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 – Topologia dos nós do caso de estudo.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2024).

A Tabela 4 apresenta a melhor solução encontrada pelo método, composta pelo vetor da rota, pelo valor da função objetivo e o dimensionamento da microrrede. Para o caso de estudo da Figura 15, a rota para o VE é demonstrada na Figura 16, seguindo a ordem da rota apresentada na Tabela 4. O valor da função objetivo para esta solução, levando em consideração o custo de investimento, operação e penalizações é de R\$ 101.870,00 para instalar 29 painéis fotovoltaicos e 2 baterias, além de percorrer diariamente uma rota de cerca de 212 km ao longo da vida útil da bateria do VE. A composição deste custo é de R\$ 30.500,00 de investimento em painéis e baterias, R\$ 65.561,00 de operação do VE ao longo dos 10 anos; a parcela de penalizações é de R\$ 36.092,00, associada ao incentivo para reduzir o tempo de carga do VE, todavia, este valor é composto somente pela penalização do tempo de carga e é reduzido pelo fator de bonificação de se carregar as baterias pelos painéis ( $\beta_2$ ). O VE fica cerca de duas horas e 30 minutos para realizar a recarga nesta rota, percorre por um tempo de pouco mais de sete horas e 20 minutos. O método de busca utiliza 4 segundos para encontrar essa solução.

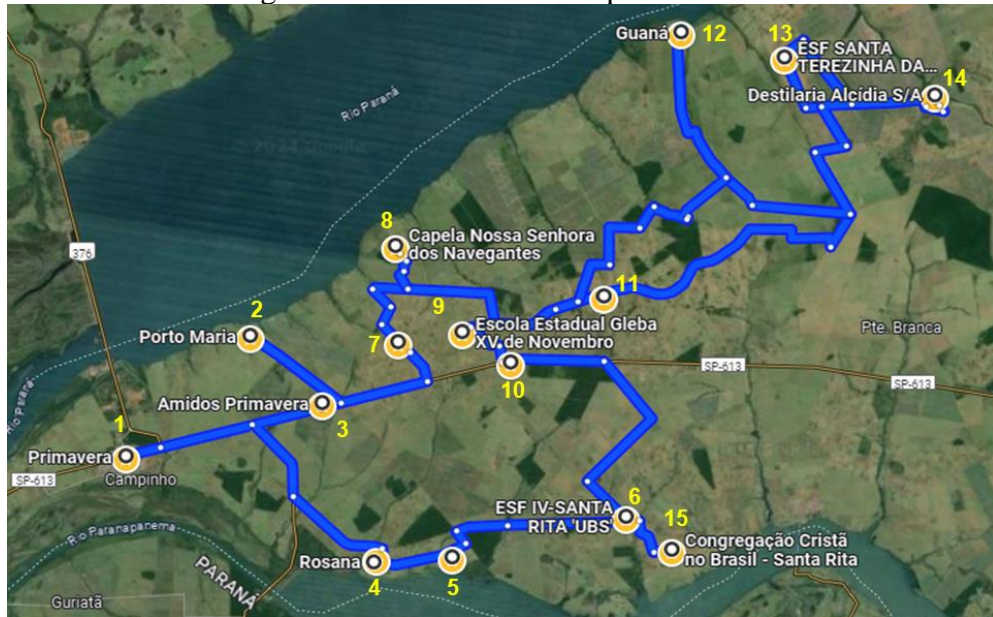
O estado de carga (*SOC*) do VE ao longo dos nós da rota é apresentado na Figura 17, onde pode ser observado que o VE parte do depósito com o *SOC* máximo e se aproxima do mínimo na estação de recarga (nó 9), saindo da estação de recarga (nó 9''), finalizando a rota e retornando ao depósito com o estado de carga mínimo. Na Figura 18 é ilustrada uma análise da energia da microrrede e da recarga do VE, onde pode ser visto que o VE chega para carregar por volta das 12h e utiliza cerca de 10 kWh, enquanto o comportamento da energia fotovoltaica segue o perfil de irradiação. A energia das baterias diminui conforme o VE chega à estação para carregar; depois do VE sair da estação, as baterias são carregadas pelo fornecimento de potência dos painéis fotovoltaicos.

Tabela 4 – Solução encontrada pelo método para o caso de estudo.

<b>Rota</b>	<b>[1 4 5 15 6 11 13 14 12 10 9 8 7 2 3 1]</b>
Valor da função objetivo ( $f_{o_{pen}}$ )	R\$101.870,00
Valor do investimento da microrrede e operação do VE ( $f_o$ )	R\$96.060,56
Distância total percorrida	211,7 km
Tempo médio de carga do VE	2 horas e 36 minutos
Tempo médio de percurso total da rota	7 horas e 21 minutos
Número de painéis fotovoltaicos	29 unidades
Número de baterias	2 unidades
Tempo de execução	4 s

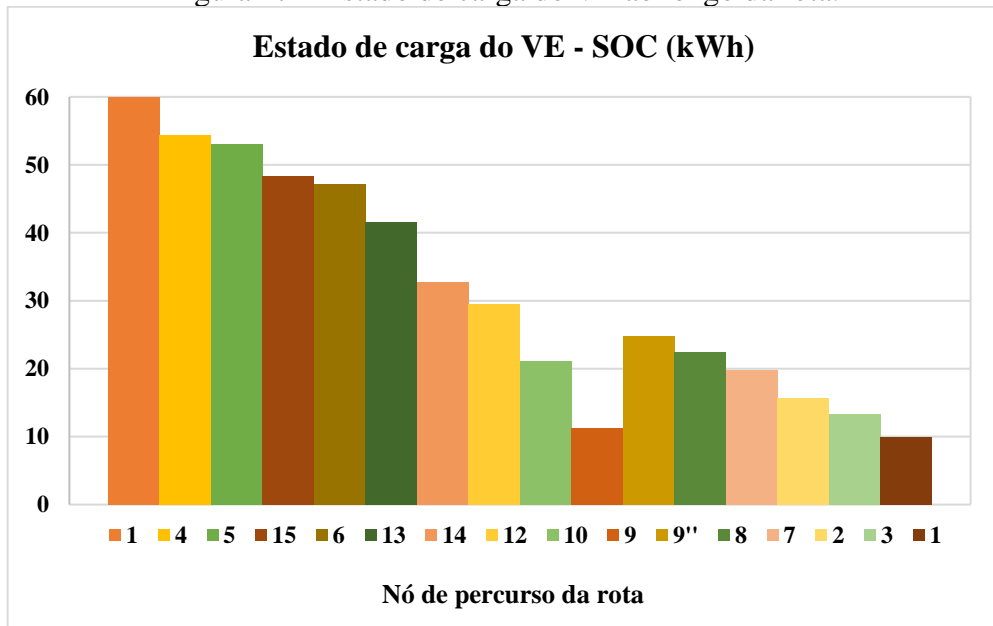
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 16 – Rota encontrada pelo método.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2024).

Figura 17 – Estado de carga do VE ao longo da rota.

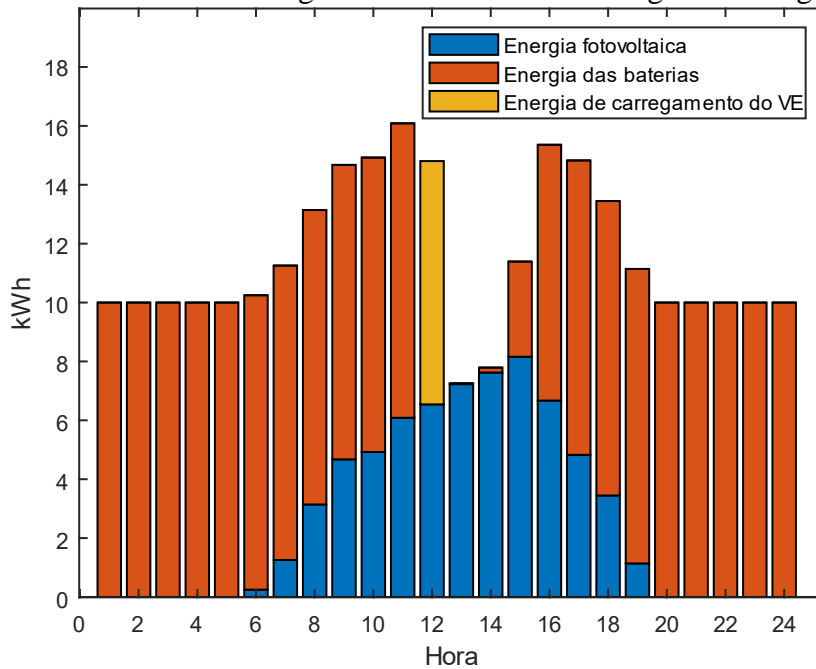


Fonte: Elaborado pela autora.

Ao longo da execução da meta-heurística ILS, várias soluções são visitadas e avaliadas, com a Figura 19 representando o valor da função objetivo ao longo das soluções visitadas. Esta figura apresenta o valor da função objetivo em cada iteração da busca local, sejam elas factíveis ou não. Pode ser observado que o primeiro ponto deste gráfico, representando a solução inicial gerada pelo algoritmo, é uma solução que possui qualidade baixa, com alto valor para a função objetivo; no entanto, vai diminuindo o valor conforme vizinhos de melhor qualidade são encontrados. Também é importante mencionar que uma característica da ILS é a presença de

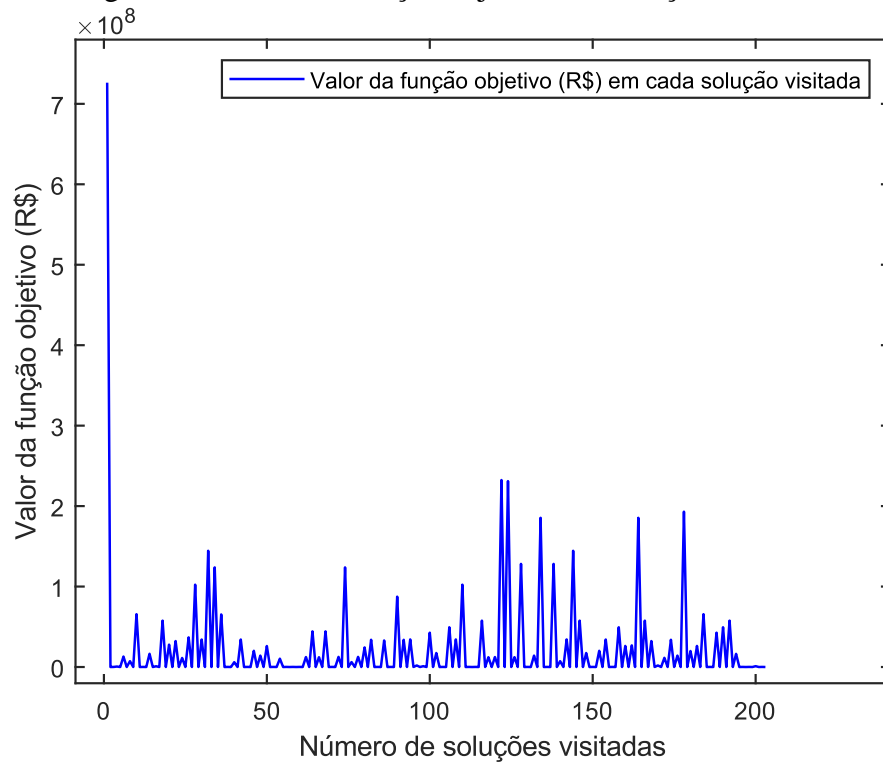
picos no gráfico de avaliação do espaço de soluções, o que representa quando a solução corrente é submetida a uma operação de perturbação, fazendo que outra região do espaço de busca seja visitada e incentivando que a solução encontrada não seja apenas um ótimo local.

Figura 18 – Análise da energia da microrrede e da energia de recarga do VE.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 – Valor da função objetivo nas soluções visitadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 5.3 EXECUÇÃO DE VERIFICAÇÃO

Foi realizada uma execução de verificação do método ILS, isto é, um teste de desempenho ao executá-lo um número de vezes repetidamente para analisar o valor médio das soluções e do tempo computacional necessário. Assim, os testes forneceram os valores da Tabela 5, com 100 execuções do algoritmo ILS. Como pode ser visto, o valor médio da função objetivo é próximo daquele encontrado na melhor solução apresentada anteriormente, com aumento de R\$ 30.000,00, proporcionados pela variação do número médio de painéis. Além disso, destaca-se o tempo computacional necessário, o que para cada execução teve média de 4 segundos, enquanto para executar o algoritmo 100 vezes foram necessários 434 segundos, aproximadamente 7 minutos. É importante frisar a eficácia de se empregar meta-heurísticas para soluções de problemas, uma vez que o algoritmo implementado foi capaz de encontrar rapidamente uma boa solução. Também vale ressaltar que o método visita uma grande quantidade de soluções rapidamente, realizando cerca de duas mil iterações de busca local e uma média de 9.464 vizinhos visitados em cada execução da ILS.

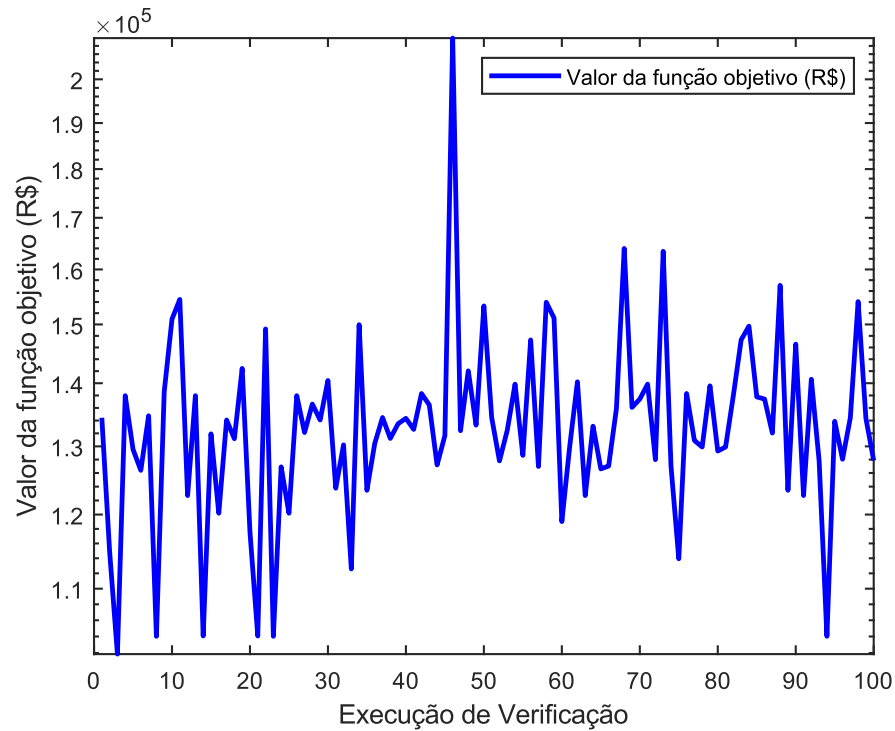
Tabela 5 – Valores médios das variáveis e médias de desempenho do algoritmo para 100 execuções.

Valor médio da função objetivo	R\$ 131.760,00
Número médio de iterações de busca local	2101
Número médio de vizinhos	9464
Tempo de execução total	434,44 s
Tempo médio	4,34 s

Fonte: Elaborado pela autora.

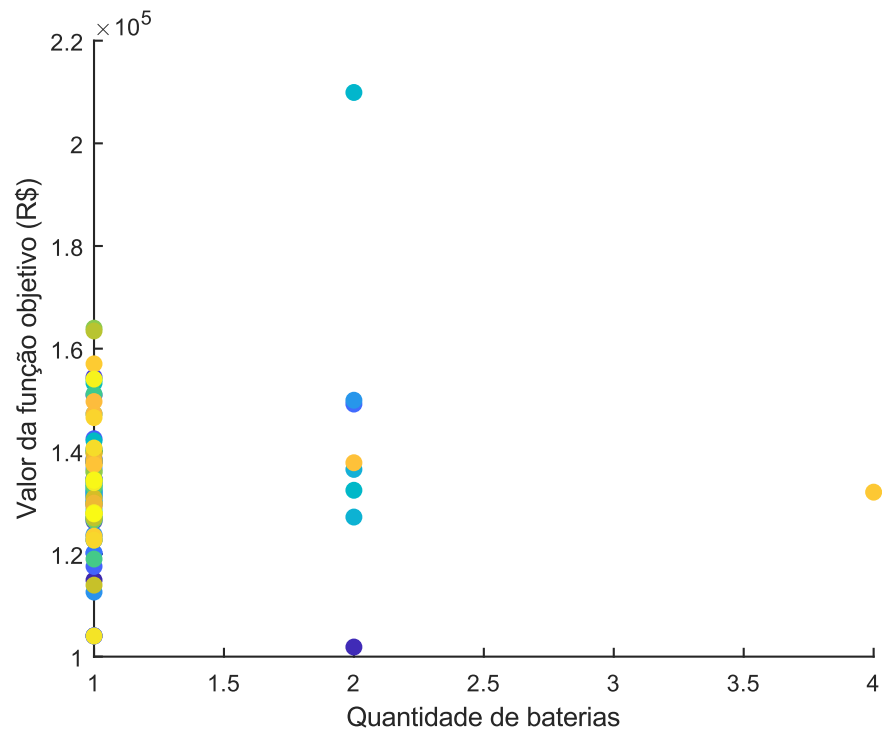
A Figura 20 representa o valor da função objetivo ao final de cada solução proposta pela ILS, enquanto a Figura 21 e Figura 22 ilustram o comportamento da quantidade de baterias e de painéis fotovoltaicos, respectivamente, ao longo das soluções na execução de verificação. Pode ser observado que o número de baterias não ultrapassa 4 unidades, sendo que a maior concentração está entre 1 e 2 unidades; soluções mais dispersas são observadas para o número de painéis fotovoltaicos, uma vez que possuem custo menor e consequentemente potência menor. Já na Figura 23 são ilustradas as soluções como combinação do número de painéis (eixo horizontal) e do número de baterias (eixo vertical), sendo possível comentar que poucas propostas de solução para o dimensionamento da microrrede estão próximas a melhor solução encontrada.

Figura 20 – Valor da função objetivo na execução de verificação da ILS.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21 – Valor da função objetivo para diferentes soluções do número de baterias na execução de verificação da ILS.



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando o espaço de busca das soluções do método, a Figura 24 mostra o número de iterações de busca local e de vizinhos analisados em cada execução da ILS. O número de



vizinhos que são avaliados é alto, com cerca de 9.500, mas permanece quase linear em cada execução, ao mesmo tempo que o número de iterações de busca local é relativamente mais baixo, com uma média de 2101, conforme mencionado na Tabela 5. Finalmente é exibido o tempo de execução da ILS, na Figura 25. Como pode ser visto, o tempo médio é de 4 segundos, mas algumas execuções encontram a solução com menos de 2 segundos ao passo que as execuções que demoraram mais tempo atingiram um valor de 11 segundos. Desse modo, pode-se afirmar a eficiência do método baseado na meta-heurística ILS na proposta de boas soluções, que visita muitos vizinhos e vários espaços de busca com pouco esforço computacional.

Figura 22 – Valor da função objetivo para diferentes soluções do número de painéis fotovoltaicos na execução de verificação da ILS.

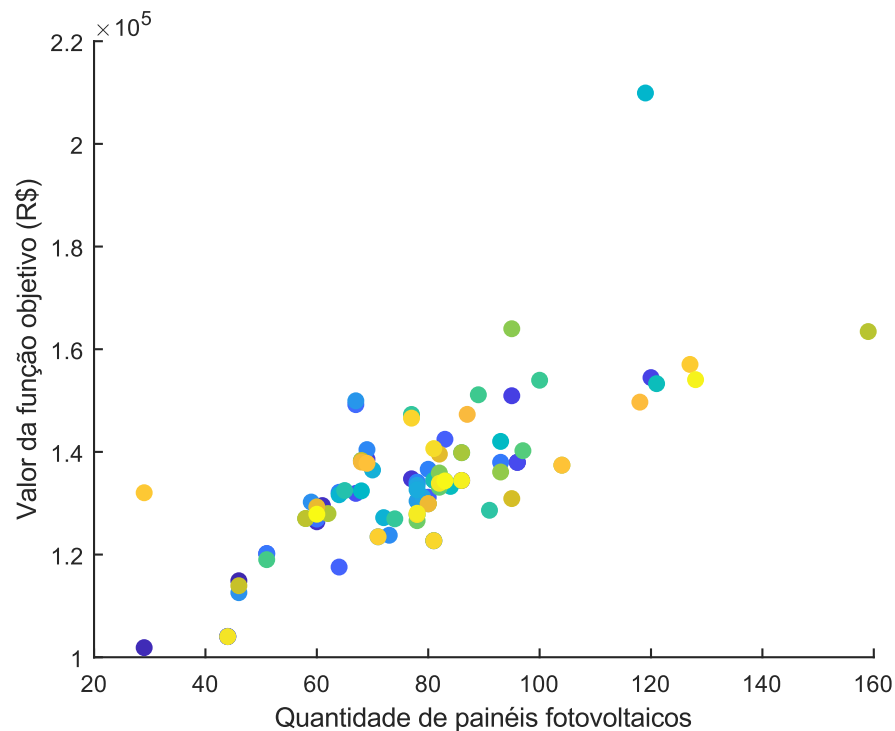
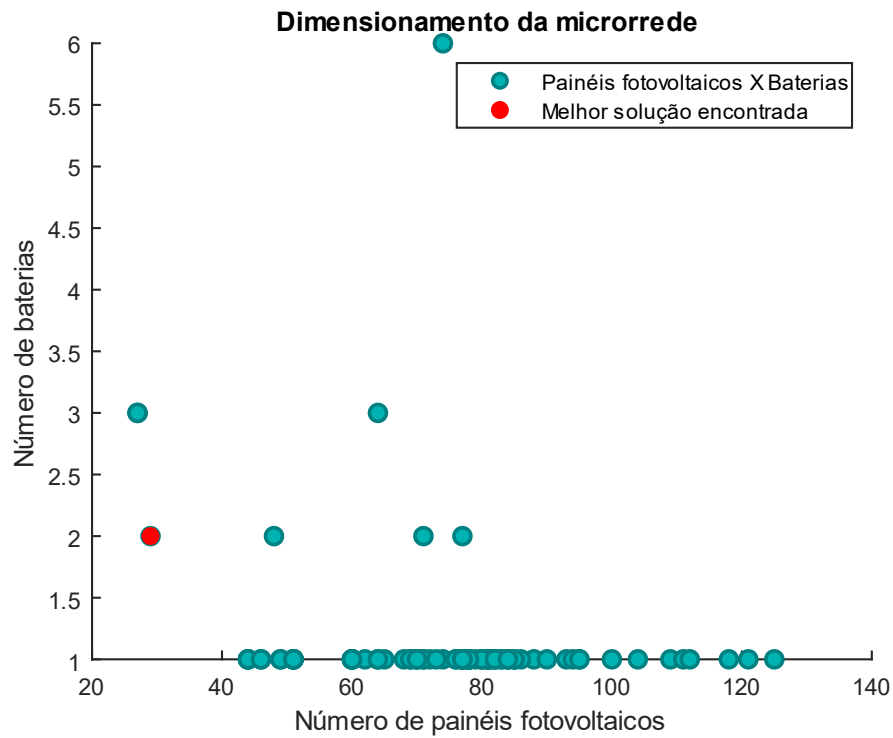
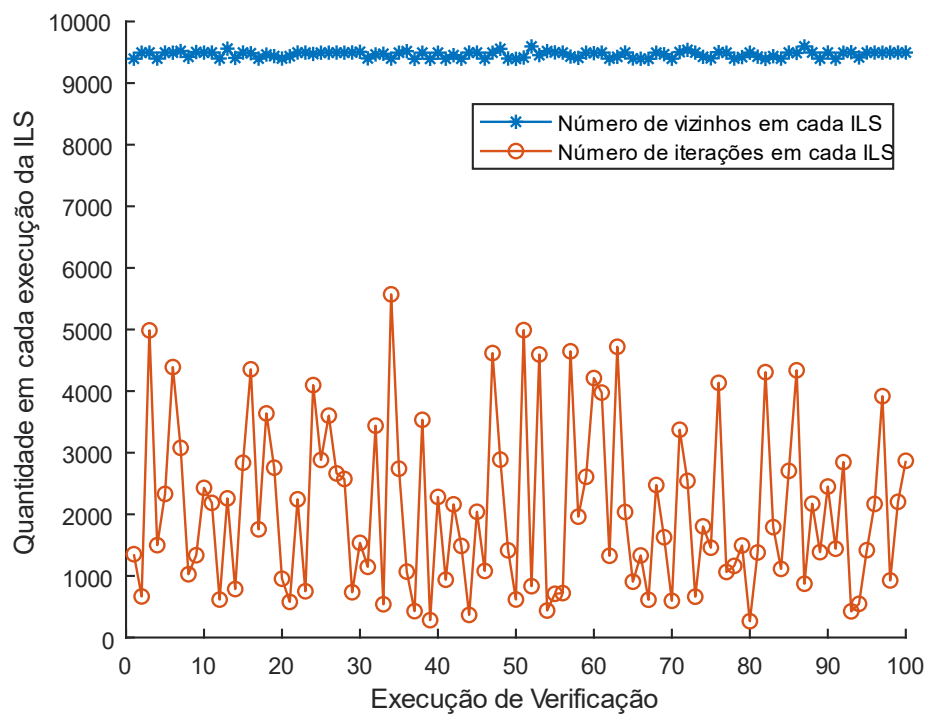


Figura 23 – Dimensionamento da microrrede (número de baterias e de painéis em diferentes soluções) na execução de verificação da ILS.



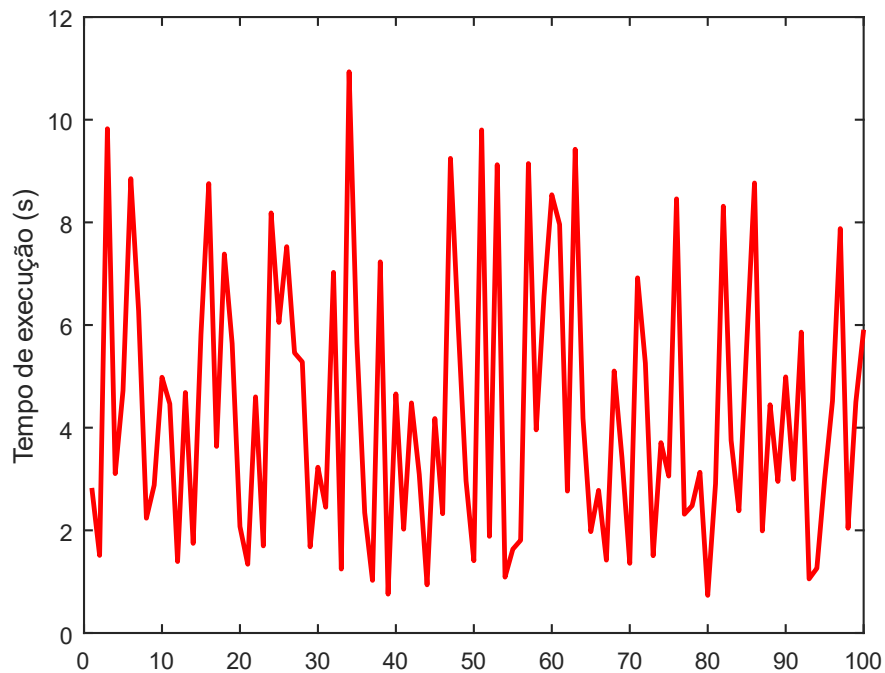
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 – Número de vizinhos visitados e iterações em cada execução da ILS.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 25 – Tempo de execução de cada ILS.



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 5.4 ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL

Este trabalho busca investigar o emprego de VEs para realização de serviços de entrega de mercadorias e mobilidade urbana em comunidades remotas, visando promover a sustentabilidade nessas comunidades.

Neste contexto, o benefício ambiental relacionado com a adoção de VEs em comparação com os veículos a combustão é avaliado considerando as emissões de dióxido de carbono  $CO_2$  evitadas. Desta maneira, é possível avaliar a quantidade de emissões de  $CO_2$  que seriam depositados na atmosfera caso fosse utilizado um veículo a combustão e avaliar o benefício ambiental que utilizar um VE proporcionaria.

Com base nos cálculos e parâmetros sugeridos pela Norma ISO 14064, as emissões de  $CO_2$  são dadas pelo fator de emissão do tipo de combustível multiplicado pelos dados da atividade. Os dados da atividade se baseiam no consumo de combustível em litros, e isso pode ser calculado a partir dos valores obtidos na seção anterior de resultados, em que foi obtido uma quilometragem diária de percurso nas comunidades remotas de aproximadamente 212 km. Dessa forma, como se espera observar o benefício de se percorrer esta distância diariamente, ao longo da vida útil das baterias do VE, deve ser calculado o consumo de combustível total que seriam necessários considerando 212 km percorridos:

$$Emissões = Dados da atividade \cdot Fator de emissão$$

*Dados da atividade*  $\rightarrow$  consumo de combustível  $\left(\frac{km}{L}\right)$  / distância total (km)

$$Distância\ total\ (km) = consumo\ diário\ (km) \cdot N^{dias} \left(\frac{dias}{ano}\right) \cdot N^{anos} \cdot (ano)$$

$$Distância\ total\ (km) = 212\ km \cdot 252 \frac{dias}{ano} \cdot 10\ anos = 534.240\ km$$

Considerando um consumo médio de combustível de  $10 \frac{km}{L}$ , os dados da atividade são de 53.424 litros de combustível necessários para percorrer a mesma rota que o VE. O fator de emissão do diesel é de  $2,63 \frac{kg\ CO_2}{L}$  e da gasolina de  $2,28 \frac{kg\ CO_2}{L}$ , então, conforme dados da ISO 14064 da Associação Brasileira De Normas Técnicas, (2015), pode-se obter que:

$$Emissões = 53424\ L \cdot 2,28 \frac{kg\ CO_2}{L} = 121,807\ ton\ CO_2\ para\ uso\ de\ gasolina$$

$$Emissões = 53424\ L \cdot 2,63 \frac{kg\ CO_2}{L} = 140,505\ ton\ CO_2\ para\ uso\ de\ diesel$$

Sendo assim, se um veículo convencional fosse adotado para percorrer uma rota de cerca de 212 km por 252 dias úteis por ano durante 10 anos, seriam emitidas cerca de 122 toneladas de CO<sub>2</sub> se utilizasse gasolina e para diesel, 141 toneladas de CO<sub>2</sub>, depositados diretamente na atmosfera.

Além disso, ao se adotar VEs para realizar serviços há a economia com a compra deste combustível, que, pode ser calculada considerando os litros calculados anteriormente pelo preço médio do combustível e um fator para trazer este custo a um valor presente, adotado anteriormente como  $\alpha$  (ver Seção 3.1.2).

$$Gastos = Preço\ (R\$/L) \cdot \frac{consumo\ diário\ (km)}{consumo\ médio\ (km/L)} \cdot N^{dias} \cdot taxa\ de\ juros\ (\alpha)$$

$$\alpha = 1 - (1 + \phi)^{-N^{anos}} / \phi \cong 6,14$$

$$Gastos = 6,00 \frac{R\$}{L} \cdot \frac{212\ km}{10 \left(\frac{km}{L}\right)} \cdot 252 \cdot 6,14 = R\$ 196.814,00$$

Portanto, quase 200 mil reais seriam economizados com compra de combustível, de forma geral, sem citar outros gastos com manutenção adicionais, uma vez que este gasto pode ser comparado com a parcela da função objetivo relacionada ao custo operacional do VE, de

R\$ 65.561,00. Outro ponto a se considerar seria que o VE estaria carregando com energia solar, portanto, não teria um custo alto relacionado a recarga.

Finalmente, pode-se concluir que ao adotar um VE para realizar estes serviços em comunidades remotas, um depósito de pelo menos 120 toneladas de CO<sub>2</sub> na região seria evitado, acarretando não só o benefício ambiental evidente, mas também um benefício econômico com o investimento na microrrede para carregar o VE.

## 6 CONCLUSÕES

O emprego de VEs para realização de serviços de entrega de mercadorias e mobilidade urbana é limitado quando os clientes se encontram em comunidades remotas, devido as suas características de ficarem afastadas de grandes centros metropolitanos e não contarem com fornecimento confiável de recursos, particularmente eletricidade. Nesse contexto, uma forma de ampliar a adoção de VEs para realização de serviços nestas comunidades e diminuir a poluição gerada pelos veículos convencionais seria a instalação de ER em uma comunidade remota. Assim, foi desenvolvido um método de otimização baseado na meta-heurística ILS para o dimensionamento de uma microrrede híbrida para abastecimento de uma ER de VEs que prestam serviços em comunidades remotas.

Como parte do trabalho, este documento discute o estudo da técnica ILS e a formulação matemática para o problema, incluindo a idealização de uma forma de representar uma proposta de solução do problema, a função objetivo e definição dos critérios de factibilidade do problema, com o método implementado na ferramenta MATLAB.

Aplicou-se o método implementado em um caso de estudo em que os clientes a serem visitados se encontram em comunidades remotas e rurais, que possuem fornecimento de insumos instável, com 15 nós, sendo 1 depósito e uma ER. Com esse caso foi possível observar que VEs poderiam ser empregados por empresas de entregas, prestadoras de serviços ou ainda caminhões coletores de lixo, uma vez que esses serviços não são realizados nestas comunidades. Além do atendimento desses clientes, o benefício ambiental agregado utilizando VEs é notável dado as baixas emissões de poluentes.

Assim, ao dimensionar a microrrede para alimentar estes VEs obteve-se uma solução com 29 painéis fotovoltaicos e 2 baterias e um investimento de cerca de R\$ 101.870,00, sendo um custo de investimento em painéis e baterias de R\$ 30500,00 de investimento em painéis e baterias, R\$ 65.561,00 de operação do VE ao longo dos anos e a parcela de penalizações, que contribuem com R\$ 36.092,00 visando otimizar o tempo de carga do VE.

O VE fica cerca de duas horas e 30 minutos para realizar a recarga nesta rota, percorre por um tempo de pouco mais de sete horas e 20 minutos e o método utiliza 4 segundos para encontrar essa solução.

Para fins de análise do desempenho do método proposto, foram realizadas 100 execuções do método ILS para analisar o valor médio das soluções e do tempo computacional necessário. Assim, os testes forneceram um valor médio da função objetivo de R\$ 131.760. Além disso, destaca-se o tempo computacional necessário, o que para cada iteração teve média

de 4 segundos, enquanto para executar o algoritmo 100 vezes foram necessários 434 segundos, aproximadamente 7 minutos.

Vale ressaltar que meta-heurísticas são empregadas devido à eficiência de lidar com muitas variáveis e cálculos com pouco esforço computacional. Assim, destaca-se a eficiência do método proposto em encontrar uma boa solução com pouco aparato computacional, entretanto, como ponto negativo, pode-se mencionar que poucas soluções se concentraram perto da melhor solução encontrada, principalmente para o dimensionamento da microrrede (número de painéis fotovoltaicos e baterias).

Em relação à análise do impacto ambiental e os benefícios para as comunidades remotas da região do caso de estudo, de acordo com o cálculo sugerido pela ISO 14064, se um veículo utilizando gasolina fosse empregado para realizar entregas ou prestar serviços nestas comunidades, cerca de 120 toneladas de dióxido de carbono seriam depositados na atmosfera, o que seria evitado caso VEs fossem adotados, e, conseqüentemente, a qualidade do ar da região tende a ser maior pela diminuição da emissão de poluentes.

Por fim, pode-se concluir que o método proposto baseado na ILS para o dimensionamento da microrrede híbrida para estações de recarga de VEs que prestam serviços em comunidades remotas possui um bom desempenho e é eficiente na proposta de boas soluções com baixo tempo computacional.

## 6.1 PRODUÇÃO DE TRABALHOS

Durante a realização deste mestrado alguns trabalhos completos foram desenvolvidos e apresentados em congressos e simpósio. Um modelo de programação linear inteira mista com restrições probabilísticas para o problema de roteamento de veículos elétricos com incerteza no tempo de viagem foi desenvolvido e apresentado no Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CLAGTEE XIV 2022, que foi realizado no Rio de Janeiro e intitulado como “Chance-constrained mixed-integer programming model for the routing of electric vehicles with uncertainties in travel”.

Em 2023, foi desenvolvido um método de otimização e apresentado em Manaus no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2023. O trabalho tem o título “Meta-heurística busca local iterada para o dimensionamento de uma microrrede para alimentação de uma estação de carregamento autônoma de veículos elétricos”.

Espera-se apresentar um trabalho completo para o Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional de 2024 em Fortaleza que está em fase de avaliação, que investiga um modelo de

programação linear para o dimensionamento de uma estação de recarga de veículos elétricos de comunidades remotas.

Por fim, um artigo completo da contribuição de um modelo de programação linear inteiro misto desenvolvido durante o mestrado está sendo elaborado e espera-se que seja possível a publicação em revistas/periódicos científicos da área.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para as próximas etapas deste trabalho sugere-se investigar outras fontes de energia no dimensionamento da estação de recarga, adotar mais cenários de irradiação e adotar o comportamento estocástico em outros parâmetros de estudo, como por exemplo, a hora de saída e o estado de carga do VE do depósito.

Outras análises podem ser observadas no contexto deste trabalho, bem como a variação do nó correspondente à estação de recarga e testar outras instâncias de clientes para avaliar o desempenho computacional.

Também seria valioso utilizar o método de Monte Carlo para analisar diferentes cenários de geração fotovoltaica, dado que a proposta atual considera apenas alta, média e baixa irradiação solar, ou seja, três cenários, sendo o Monte Carlo capaz de considerar milhares de cenários diferentes. Energia eólica poderia ser modelada e incorporada ao método de otimização atual, para que o contexto de microrrede híbrida não dependa apenas de uma fonte renovável e do sistema de armazenamento.



## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, A.; MUNARI, P.; MORABITO, R. Iterated local search and simulated annealing algorithms for the inventory routing problem. **International Transactions in Operational Research**, [s. l.], v. 25, n. 6, p. 1785–1809, 2018.
- AMER, A.; AZAB, A.; AZZOUZ, M. A.; AWAD, A. S. A. A stochastic program for siting and sizing fast charging stations and small wind turbines in urban areas. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 1217–1228, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, S. B. de A. às M. e P. Empresas. **ABNT NBR ISO 14064 - Guia de implementação: Gestão de emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE)**. [S. l.: s. n.], 2015.
- ATIA, R.; YAMADA, N. Sizing and analysis of renewable energy and battery systems in residential microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 1204–1213, 2016.
- AZIZ BAIG, M. J.; IQBAL, M. T.; JAMIL, M.; KHAN, J. Design and analysis of an isolated DC-microgrid for a remote community in Pakistan. In: IEEE ANNUAL UBIQUITOUS COMPUTING, ELECTRONICS & MOBILE COMMUNICATION CONFERENCE (UEMCON), 12., 2021, [s. l.]. **Anais [...]**. [S. l.]: IEEE, 2021. p. 0712–0716.
- BARROS JUNIOR, A. A. de. **Engenharia de Produção: produtividade e competitividade**. 2ªed. [S. l.]: Editora Conhecimento Livre, 2020. 2020.v. II.
- BLOT, A.; KESSACI, M.-É.; JOURDAN, L. Survey and unification of local search techniques in metaheuristics for multi-objective combinatorial optimization. **J Heuristics**, [s. l.], v. 24, p. 853–877, 2018.
- BOCK, F. An algorithm for solving travelling-salesman and related network optimization problems. **Operations Research**, [s. l.], v. 6, n. 6, p. 897–897, 1958.
- BRANDÃO, J. A memory-based iterated local search algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 284, n. 2, p. 559–571, 2020.
- CAMPOS, A. A. **O problema de roteamento de veículos para coleta de lixo com janelas de tempo: abordagem heurística**. 2018. 82 f. - Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2018.
- CHAE, S. H.; KIM, G. H.; CHOI, Y.-J.; KIM, E.-H. Design of isolated microgrid system considering controllable EV charging demand. **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 22, p. 9746, 2020.
- CLAIRAND, J.-M.; SERRANO-GUERRERO, X.; GONZÁLEZ-ZUMBA, A.; ESCRIVÁ-ESCRIVÁ, G. Techno-economic assessment of renewable energy-based microgrids in the Amazon remote communities in Ecuador. **Energy Technology**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 2100746, 2022.

CROES, G. A. A Method for Solving Traveling-Salesman Problems. **Operations Research**, [s. l.], v. 6, n. 6, p. 791–812, 1958.

CUBIDES RIVERA, L. C. **Modelo matemático exacto del problema de ruteo de vehículos eléctricos considerando entrega y recogida de mercancía**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidad Tecnológica de Pereira, 2016.

DIREYA, R.; KHATIB, T. Simplified Python models for photovoltaic-based charging stations for electric vehicles considering technical, economic, and environmental aspects. **World Electric Vehicle Journal**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 103, 2023.

DOMÍNGUEZ-NAVARRO, J. A.; DUFO-LÓPEZ, R.; YUSTA-LOYO, J. M.; ARTAL-SEVIL, J. S.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Design of an electric vehicle fast-charging station with integration of renewable energy and storage systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [s. l.], v. 105, p. 46–58, 2019.

EPE. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional - BEN 2022**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 10 abr. 2024.

FONTENOT, H.; DONG, B. Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management – A review. **Applied Energy**, [s. l.], v. 254, p. 113689, 2019.

FREITAS, G. M. de. **Otimização do problema de expansão de longo prazo de sistemas de transmissão através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável**. 2022. - Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira - SP 2022.

GALLEGO-RENDÓN, R. A.; ZULUAGA, A. E.; LAZARO, R. A. R. **Programacion lineal entera**. Primeraed. [S. l.]: Taller de Publicaciones de la Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.

GLOVER, F. W.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics**. Eded. [S. l.]: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2006. 2006.

GOOGLE. **Google Maps**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: [https://www.google.com/maps/@-22.4651812,-52.8463137,41357m/data=!3m1!1e3?authuser=0&entry=tту&g\\_ep=EgoyMDI0MDgyMy4wI KXMDS0ASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/@-22.4651812,-52.8463137,41357m/data=!3m1!1e3?authuser=0&entry=tту&g_ep=EgoyMDI0MDgyMy4wI KXMDS0ASAFQAw%3D%3D). Acesso em: 27 ago. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: IEA. **Electric Vehicles**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>. Acesso em: 16 abr. 2024.

JAHWAR, A. F.; ABDULAZEES, A. M. Meta-heuristic algorithms for k-means clustering: a review. **PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology - PJAEE**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 12002–12020, 2020.

LANDES, F. B. **Optimistic: Um framework para implementação e uso de meta e hiper-heurísticas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Computação) - Universidade Federal Fluminense, Santo Antônio de Pádua 2017.

LEMOS, R. A. **Meta-heurísticas para o problema de planejamento de expansão da rede de transmissão de energia elétrica considerando restrições de segurança**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira 2015.

LEONE, C.; LONGO, M.; FERNANDEZ-RAMIREZ, L. M.; GARCIA-TRIVINO, P. Multi-objective optimization of PV and energy storage systems for ultra-fast charging stations. **IEEE Access**, [s. l.], v. 10, p. 14208–14224, 2022.

LIU, Y.; XIANG, Y.; TAN, Y.; WANG, B.; LIU, J.; YANG, Z. Optimal Allocation Model for EV Charging Stations Coordinating Investor and User Benefits. **IEEE Access**, [s. l.], v. 6, p. 36039–36049, 2018.

LIU, G.; XUE, Y.; CHINTHAVALI, M. S.; TOMSOVIC, K. Optimal sizing of PV and energy storage in an electric vehicle extreme fast charging station. *In*: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES CONFERENCE (ISGT), 2020, [s. l.]. **Anais [...]**. [S. l.]: IEEE, 2020. p. 1–5.

LOURENÇO, H. R.; MARTIN, O. C.; STÜTZLE, T. **Iterated Local Search: Framework and Applications**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 129–168.

MARTINEZ, N.; TABARES, A.; FRANCO, J. F. Generation of alternative battery allocation proposals in distribution systems by the optimization of different economic metrics within a mathematical model. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 1726, 2021.

MOGHDANI, R.; SALIMIFARD, K.; DEMIR, E.; BENYETTOU, A. The green vehicle routing problem: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 279, p. 123691, 2021.

MOHAMED, S.; SHAABAN, M. F.; ISMAIL, M.; SERPEDIN, E.; QARAQE, K. A. An efficient planning algorithm for hybrid remote microgrids. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 257–267, 2019.

MORADZADEH, M.; ABDELAZIZ, M. M. A. A new MILP formulation for renewables and energy storage integration in fast charging Stations. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 181–198, 2020.

NAPOLI, G.; POLIMENI, A.; MICARI, S.; ANDALORO, L.; ANTONUCCI, V. Optimal allocation of electric vehicle charging stations in a highway network: Part 1. Methodology and test application. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 27, p. 101102, 2020.

PALHAZI CUERVO, D.; GOOS, P.; SÖRENSEN, K.; ARRÁIZ, E. An iterated local search algorithm for the vehicle routing problem with backhauls. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 237, n. 2, p. 454–464, 2014.

PAOLI, L. **Electric Vehicles**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>. Acesso em: 11 dez. 2022.

PENNA, P. H. V.; SUBRAMANIAN, A.; OCHI, L. S. An Iterated Local Search heuristic for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem. **Journal of Heuristics**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 201–232, 2013.

POSSAGNOLO, L. H. F. M. **Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2015.

REGO, C.; GLOVER, F. Local Search and Metaheuristics. *In*: THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM AND ITS VARIATIONS, COMBINATORIAL OPTIMIZATION. [S. l.]: Springer, 2007. v. 12, p. 309–368.

REHMAN, W. ur; BO, R.; MEHDIPOURPICH, H.; KIMBALL, J. W. Sizing battery energy storage and PV system in an extreme fast charging station considering uncertainties and battery degradation. **Applied Energy**, [s. l.], v. 313, p. 118745, 2022.

RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. **Access to Energy**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-access#access-to-electricity>. Acesso em: 20 abr. 2023.

SÁNCHEZ, D. G. **Desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira mista para a otimização do roteamento de frotas de veículos elétricos considerando estações de carregamento**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2021.

SHAABAN, M. F.; MOHAMED, S.; ISMAIL, M.; QARAQE, K. A.; SERPEDIN, E. Joint planning of smart EV charging stations and DGs in eco-friendly remote hybrid microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 5819–5830, 2019.

SHOJAABADI, S.; ABAPOUR, S.; ABAPOUR, M.; NAHAVANDI, A. Simultaneous planning of plug-in hybrid electric vehicle charging stations and wind power generation in distribution networks considering uncertainties. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 99, p. 237–252, 2016.

SILVA, M. M.; SUBRAMANIAN, A.; OCHI, L. S. An iterated local search heuristic for the split delivery vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, [s. l.], v. 53, p. 234–249, 2015.

SIMORGH, H.; DOAGOU-MOJARRAD, H.; RAZMI, H.; GHAREHPETIAN, G. B. Cost-based optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations considering demand response programmes. **IET Generation, Transmission & Distribution**, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 1712–1720, 2018.

SOYKAN, G.; ER, G.; CANAKOGLU, E. Optimal sizing of an isolated microgrid with electric vehicles using stochastic programming. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, [s. l.], v. 32, p. 100850, 2022.

STEGHERR, H.; HEIDER, M.; HÄHNER, J. Classifying Metaheuristics: Towards a unified multi-level classification system. **Natural Computing**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 155–171, 2022.

UGIRUMURERA, J.; HAAS, Z. J. Optimal capacity sizing for completely green charging systems for electric vehicles. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 565–577, 2017.

VAESSENS, R. J. M.; AARTS, E. H. L.; LENSTRA, J. K. A local search template. **Computers & Operations Research**, [s. l.], v. 25, n. 11, p. 969–979, 1998.

WANG, Y.; KAZEMI, M.; NOJAVAN, S.; JERMSITTIPARSERT, K. Robust design of off-grid solar-powered charging station for hydrogen and electric vehicles via robust optimization approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 45, n. 38, p. 18995–19006, 2020.

WU, Y.; WANG, Z.; HUANGFU, Y.; RAVEY, A.; CHRENKO, D.; GAO, F. Hierarchical operation of electric vehicle charging station in smart grid integration applications — An overview. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [s. l.], v. 139, p. 108005, 2022. Disponível em: Acesso em: 9 jun. 2022.

ZAINAB, F.; NAZ, K.; MEHMOOD, K. K.; BUKHARI, S. B. A.; WADOOD, A.; KHALID, H. A.; PARK, H. An optimal joint planning of DGs and electric vehicle charging stations in grid-connected and islanded microgrids. **IET Renewable Power Generation**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 1623–1634, 2023.

ZHANG, L.; LIU, Z.; YU, L.; FANG, K.; YAO, B.; YU, B. Routing optimization of shared autonomous electric vehicles under uncertain travel time and uncertain service time. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, [s. l.], v. 157, p. 102548, 2022.

ZHANG, J.; WANG, S.; ZHANG, C.; LUO, F.; DONG, Z. Y.; LI, Y. Planning of electric vehicle charging stations and distribution system with highly renewable penetrations. **IET Electrical Systems in Transportation**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 256–268, 2021.

ZHOU, S.; HAN, Y.; MAHMOUD, K.; DARWISH, M. M. F.; LEHTONEN, M.; YANG, P.; ZALHAF, A. S. A novel unified planning model for distributed generation and electric vehicle charging station considering multi-uncertainties and battery degradation. **Applied Energy**, [s. l.], v. 348, p. 121566, 2023.

### ANEXO A – MATRIZ DE DISTÂNCIA DO CASO DE ESTUDO

D(km)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0,00	18,20	11,20	18,60	24,20	31,40	19,80	26,40	24,50	21,50	28,10	50,20	58,90	81,40	35,00
2	18,20	0,00	7,60	22,80	28,40	35,60	13,90	20,60	17,30	15,70	25,00	50,00	51,20	75,60	51,90
3	11,20	7,60	0,00	15,70	21,40	28,00	9,00	15,80	12,50	10,90	19,00	45,00	47,00	70,70	32,00
4	18,60	22,80	15,70	0,00	4,70	14,30	24,10	30,80	28,90	25,90	32,40	54,50	63,20	85,90	18,00
5	24,20	28,40	21,40	4,70	0,00	11,70	29,80	38,00	34,50	31,00	47,50	60,00	68,00	71,00	15,30
6	31,40	35,60	28,00	14,30	11,70	0,00	24,70	31,30	21,10	17,20	18,60	40,60	44,40	67,00	4,00
7	19,80	13,90	9,00	24,10	29,80	24,70	0,00	8,60	3,80	7,60	14,20	36,30	43,10	67,50	40,50
8	26,40	20,60	15,80	30,80	38,00	31,30	8,60	0,00	8,00	14,30	15,30	42,90	45,40	74,20	50,70
9	24,50	17,30	12,50	28,90	34,50	21,20	3,80	8,00	0,00	4,00	8,30	31,50	38,30	44,50	40,00
10	21,50	15,70	10,90	25,90	31,00	17,20	7,60	14,30	4,00	0,00	6,70	28,80	35,60	40,60	22,00
11	28,10	25,00	19,00	32,40	47,50	18,60	14,20	15,30	8,30	6,70	0,00	26,70	29,40	32,50	22,50
12	50,20	50,00	45,00	54,50	60,00	40,60	36,30	42,90	31,50	28,80	26,70	0,00	28,90	28,00	45,00
13	58,90	51,20	47,00	63,20	68,00	44,40	43,10	45,40	38,30	35,60	29,40	28,90	0,00	11,00	48,40
14	81,40	75,60	70,70	85,90	71,00	67,00	67,50	74,20	44,50	40,60	32,50	28,00	11,00	0,00	57,50
15	35,00	51,90	32,00	18,00	15,30	4,00	40,50	50,70	40,00	22,00	22,50	45,00	48,40	57,50	0,00