

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
ENGENHARIA ELÉTRICA

João Gabriel Silva de Avellar

**METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE CURVA DE CARGA DE
ESTAÇÕES DE RECARGA RÁPIDA EM RODOVIAS CONSIDERANDO
ESTADO DE CARGA**

Cachoeira do Sul, RS
2023

João Gabriel Silva de Avellar

**METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE CURVA DE CARGA DE ESTAÇÕES DE
RECARGA RÁPIDA EM RODOVIAS CONSIDERANDO ESTADO DE CARGA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado ao de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria no Campus de Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Nelson Knak Neto

Cachoeira do Sul, RS
2023

João Gabriel Silva de Avellar

**METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE CURVA DE CARGA DE ESTAÇÕES DE
RECARGA RÁPIDA EM RODOVIAS CONSIDERANDO ESTADO DE CARGA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado ao de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria no Campus de Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 14 de julho de 2023:

**Nelson Knak Neto, Dr. (UFSM)
(Orientador)**

Laura Lisiane Callai dos Santos, Dra. (UFSM)

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva, Dr. (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS
2023

RESUMO

METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE CURVA DE CARGA DE ESTAÇÕES DE RECARGA RÁPIDA EM RODOVIAS CONSIDERANDO ESTADO DE CARGA

AUTOR: João Gabriel Silva de Avellar

ORIENTADOR: Nelson Knak Neto

Com a crescente preocupação mundial com a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs), alternativas menos poluentes são exploradas em vários setores produtivos da sociedade. De acordo com pesquisas, cerca de 15% da emissão mundial de GEEs vêm do setor de transporte, fazendo-se assim necessária uma maior procura por meios de transporte mais limpos para o meio ambiente. Dentre as possíveis alternativas, destacam-se os Veículos Elétricos (VEs), que estão em um processo de adesão cada vez mais ampla nos maiores mercados do mundo. Entretanto, de acordo com a Agência Internacional De Energia, esse crescimento continuará limitado enquanto não houver a difusão de estruturas de carregamento eficientes e seguras. Ademais, no intuito de se garantir a eficiência dessas estruturas de recarga, é de vital importância o conhecimento de suas dinâmicas. Dessa forma, o presente trabalho busca desenvolver uma metodologia para a modelagem da curva de carga para estações de recarga rápida para Veículos Elétricos (VEs) em rodovias, dando ênfase na definição de um estado de carga do veículo partindo de sua distância percorrida. Para isso, será utilizado o software de programação Matlab. Com isso, busca-se apresentar uma metodologia para a projeção de carga de estações de recarga no intuito de permitir aos operadores do Sistema Elétrico de Potência uma maior precisão no planejamento do sistema, aumentando assim a sua eficiência. Com isso, o presente trabalho demonstra que as estações demandam uma potência considerável de sistemas de distribuição, além de serem preditas conforme a dinâmica rodoviária ao redor da mesma.

Palavras-chave: Estações de Recarga Rápidas. Curva de Carga. Simulação de Monte Carlo.

ABSTRACT

METHODOLOGY FOR LOAD CURVE MODELLING OF FAST CHARGING STATIONS IN HIGHWAYS CONSIDERING STATE OF CHARGE

AUTHOR: João Gabriel Silva de Avellar
ADVISOR: Nelson Knak Neto

As the concern with greenhouse gases emission increases, less pollutent alternatives are explored amongst various productive sectors in society. According to studies, around 15% of the global greenhouse gases emission comes from the transport sector, causing an increase in the development of environmentally cleaner means of transport. As such, electric vehicles (EVs) are highlighted as possible alternatives, which are passing through an increased adherence in the world's biggest markets. However, according to the International Agency of Energy, this adherence will be limited as long as there is no diffusion of safe and efficient charging structure. Additionally, in order to improve the efficiency of these charging structures, it is vital to understand their dynamics. Therefore, this present work aims to develop a methodology for load curve modelling of fast charging stations in highways, emphasising in the definition of the vehicle's state of charge utilizing its length traversed. To this end, the programming software Matlab will be used. As such, it is seeking to present a methodology for load projection in fast charging stations in order to allow distribution system's operators higher precision in its planning, therefore increasing the general efficiency. The following work presents its objectives, its boundaries and contributions, a referential framework, the methodology used and an analysis of the results obtained. Beyond this, a study case is done according to the highway BR-216, more specifically in its Pelotas-Torres stretch, and it the load curves obtained are analysed.

Keywords: Fast Charging Stations. Load Curve. Monte Carlo Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão de CO ₂ no Brasil por setor econômico.	8
Figura 2 – Dados da frota mundial de VEs.	12
Figura 3 – Esquema Básico do Pure-EV.	13
Figura 4 – Esquema Básico do PHEV.	14
Figura 5 – Esquema Básico do E-REV.	14
Figura 6 – Exemplo de uma curva de carga residencial.	19
Figura 7 – (a) Distribuição padrão de um evento aleatoriamente sorteado; (b) cumulativa de um evento aleatoriamente sorteado.	22
Figura 8 – Quantização de uma curva de carga.	24
Figura 9 – Metodologia para curva de carga.	26
Figura 10 – Esquema Básico das cidades ao longo da rodovia.	28
Figura 11 – Esquema Básico da rodovia com todos os componentes.	28
Figura 12 – Processo de Obtenção da Curva de Carga.	31
Figura 13 – Metodologia para obtenção e amostra da curva de carga.	35
Figura 14 – Mapa da rodovia analisada no estudo de caso.	39
Figura 15 – Vendas de VEs por ano.	41
Figura 16 – (a) Gráfico referente à Distribuição de Frequência dos Veículos Elétricos; (b) Gráfico referente à Distribuição Cumulativa de Frequência dos Veículos Elétricos.	43
Figura 17 – (a) Gráfico referente à Distribuição de Frequência das Cidades; (b) Gráfico referente à Distribuição Cumulativa de Frequência das Cidades.	44
Figura 18 – Representação da rodovia analisada com os pontos alocados.	46
Figura 19 – (a) Gráfico referente à Distribuição de Frequência dos Horários; (b) Gráfico referente à Distribuição Cumulativa de Frequência dos Horários.	48
Figura 20 – (a) Análise das faixas de distribuição de cada Veículo Elétrico; (b) Análise das faixas de distribuição cumulativa de cada Veículo Elétrico.	48
Figura 21 – (a) Análise das faixas de distribuição de cada Cidade de Partida; (b) Análise das faixas de distribuição cumulativa de cada Cidade de Partida. ...	49
Figura 22 – (a) Análise das faixas de distribuição de cada Cidade de Chegada; (b) Análise das faixas de distribuição cumulativa de cada Cidade de Chegada. .	50
Figura 23 – (a) Análise das faixas de distribuição de cada Horário de Partida; (b) Análise das faixas de distribuição cumulativa de cada Horário de Partida. ...	50
Figura 24 – Resultado obtido para todas as estações juntas.	51
Figura 25 – Resultado obtido para a Estação de Recarga 4.	52
Figura 26 – Resultado obtido para o Estação de Recarga 7.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados Técnicos de VEs em relação ao ciclo de condução.....	16
Tabela 2 – Modos de Recarga.....	17
Tabela 3 – Dados Técnicos de VEs em relação ao ciclo de condução.....	23
Tabela 4 – Dados Técnicos de VEs em relação ao ciclo de condução.....	37
Tabela 5 – Dados Unitários de Entrada Utilizados.....	40
Tabela 6 – Dados referentes à matriz de entrada para os Veículos Elétricos.....	43
Tabela 7 – Dados referentes à matriz de entrada para as Cidades.....	44
Tabela 8 – Dados referentes à matriz de entrada para as Estações de Recarga.....	45
Tabela 9 – Dados referentes à matriz de entrada para os Horários de Partida.....	47
Tabela 10 – Dados de demanda de todas as estações juntas em quantis.....	52
Tabela 11 – Dados de demanda da estação de recarga 4.....	53
Tabela 12 – Dados de demanda da estação de recarga 7.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	8
1.2	OBJETIVOS	9
1.2.1	Objetivo Geral	9
1.2.2	Objetivos Específicos	9
1.3	DELIMITAÇÕES	10
1.4	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	10
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	MOBILIDADE ELÉTRICA	12
2.1.1	Veículos Elétricos	13
2.1.1.1	Autonomia	15
2.1.2	Estações de recarga rápidas	17
2.2	INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	18
2.2.1	Planejamento e Operação do Sistema de Distribuição	18
2.2.2	Curva de carga	19
2.2.3	Modelagem de curva de carga em estações de recarga	20
2.3	MONTE CARLO	22
2.4	MÉTODO DOS QUANTIS	23
2.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	25
3	METODOLOGIA	26
3.1	PARÂMETROS INICIAIS	27
3.1.1	Entradas Estáticas	27
3.1.2	Entradas Variantes	30
3.2	PROCESSO PARA A OBTENÇÃO DE CURVA DE CARGA	30
3.2.1	Definições iniciais do veículo	32
3.2.2	Metodologia de parada e de recarga do veículo	33
3.2.3	Modelagem da Curva de Carga	34
3.3	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	36
4	ESTUDO DE CASO	39
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO	39
4.1.1	Entradas Unitárias	40
4.1.2	Entradas Matriciais	42
4.2	VALIDAÇÃO DO MONTE CARLO	48
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5	CONCLUSÃO	55
5.1	ANÁLISE SOBRE O MÉTODO	55
5.2	ÁREAS DE APRIMORAMENTO	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
	ANEXO A – DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA	61
A.1	ENTRADAS	61
A.1.1	Entradas Unitárias	61
A.1.2	Entradas Matriciais	62
A.2	PROCESSAMENTO	63

A.2.1	Limites de iteração	63
A.2.2	Os Monte Carlo de cada iteração para o código	63
A.2.3	Determinação da autonomia do Veículo	64
A.2.4	Metodologia de parada do VE	64
A.2.5	Cálculo de tempo das recargas	64
A.2.6	Cálculo da Demanda pela ERR	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Com o constante desenvolvimento de novas tecnologias, a preocupação mundial em relação às questões ambientais se torna proporcionalmente importante. Dentre estas questões ambientais, destaca-se a produção de Gases de Efeito Estufa (GEE), que acarretam em um acréscimo na temperatura média do planeta. Tratando-se dos GEEs, destaca-se o dióxido de carbono (CO₂), como principal resíduo poluente. A Figura 1 apresenta os dados relacionados à emissão de CO₂.

Figura 1 – Emissão de CO₂ no Brasil por setor econômico.



Fonte: Adaptado de (SEEG, 2021).

Observa-se na Figura 1 que as emissões decorrentes do setor de transporte representam a segunda maior dentre todos os setores. Em vista disso, a eletrificação do setor de transportes se torna uma estratégia viável na redução de emissão de dióxido de carbono (IEA, 2022). Este aspecto está diretamente relacionado com o fato de Veículos Elétricos (VEs) utilizarem baterias, tornando-se independentes de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, deixando de emitir GEEs na atmosfera (DAS *et al.*, 2020).

De acordo com a Agência Internacional de Energia, a adesão ao mercado recente de veículos de passeio movidos à energia elétrica é diretamente proporcional ao desenvolvimento e difusão de estruturas de carregamento seguras e eficientes (IEA, 2022). Conseqüentemente, um maior investimento nestas estruturas é de grande importância para o desenvolvimento do mercado de mobilidade elétrica.

Como estes veículos carregam utilizando energia proveniente da rede de distribuição, são necessários estudos para prever seus impactos a fim de garantir a eficácia do sistema de distribuição sob novos regimes de carga (AHMAD; KHALID; PANIGRAHI, 2021). Assim, diversas metodologias estão sendo desenvolvidas para uma melhor projeção dos

impactos positivos e negativos da integração de VEs no sistema de distribuição. Entretanto, como os VEs são interpretados como cargas móveis no sistema, análises logísticas são necessárias para se realizar estudos relacionados ao impacto na rede (GONG; CAO; ZHAO, 2017).

Ademais, devido à característica limitante de autonomia máxima nos VEs, torna-se necessário desenvolver estruturas de carregamento com capacidade de comportar essa característica dos veículos considerando múltiplos fatores. Com isso, com o propósito de garantir segurança e conforto para os condutores, uma maior densidade de estações de recarga ao longo de uma rodovia torna-se vital para suprir as demandas relacionadas ao transporte interurbano. Consequentemente, essa concentração de postos de recarga requer projeções de demanda para que se possa analisar os impactos no sistema local de distribuição de forma a acatar com os padrões de qualidade de energia.

Dessa forma, o presente trabalho desenvolveu uma metodologia de modelagem de carga para estações de recarga rápida em rodovias, através do método de Simulação de Monte Carlo, para a realização da projeção do estado de carga dos VEs. Para a realização da metodologia, busca-se desenvolver um programa utilizando da linguagem de programação Matlab para o desenvolvimento de todos os métodos e cálculos relacionados à modelagem em questão.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objeto geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia para modelagem de curvas de carga de estações de recarga de VEs ao longo de um corredor elétrico, considerando uma previsão de estado de carga de cada veículo através de padrões de mobilidade, buscando assim replicar dinâmicas do transporte rodoviário.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral do trabalho, é necessário que certos objetivos específicos sejam atingidos, sendo estes:

- (a) Caracterizar os VEs conforme suas particularidades construtivas e autonomia;
- (b) Avaliar diferentes padrões de mobilidade no intuito de definir o mais condizente com dinâmicas rodoviárias;
- (c) Evidenciar a importância da projeção de carga, especificando para o cenário de VEs, e as possíveis metodologias para seu desenvolvimento;

- (d) Desenvolver um modelo *Top-Down* de projeção de carga para estações de recarga de VEs em rodovias.

1.3 DELIMITAÇÕES

É de grande importância apresentar de forma clara as principais premissas e hipóteses utilizadas para a construção da metodologia em questão. Desta forma, pode-se definir estas premissas:

- **Método estatístico:** Nesse estudo, utiliza-se a Simulação de Monte Carlo, que possui a característica de independência entre simulações;
- **Taxa de carregamento:** Considera-se nesse estudo de caso que a potência de carregamento de um VE é constante durante seu processo de carregamento;
- **Parada do VE:** Supõe-se que o VE sempre para na próxima estação de recarga em seu trajeto, em vez de ter liberdade de escolher qual irá carregar;
- **Sistema de filas:** O VE sempre espera a sua vez para o carregamento independentemente do tamanho da fila de espera.
- **Modelagem da estação:** A estação de recarga é considerada como tendo 100% de eficiência e fator de potência unitário.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Tendo definido as delimitações da metodologia desenvolvida, apresenta-se também as contribuições que busca-se fazer em relação ao estado da arte atual. Este trabalho busca contribuir no tema em questão com as seguintes questões:

- **Metodologia generalística:** Uma metodologia que possui uma grande gama de inputs, permitindo uma grande flexibilidade nos estudos que podem ser realizados;
- **Estudo sobre ciclos de condução:** Analisar os tipos de ciclo de condução e o seu efeito na autonomia declarada dos veículos elétricos.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Dessarte, o trabalho é dividido em um total de 5 capítulos. Sendo esses a introdução, o referencial teórico, o desenvolvimento da metodologia utilizada, um estudo de caso e conclusão do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta um referencial teórico sobre o trabalho. Apresentando os Veículos Elétricos e as suas características gerais, destacando a sua autonomia e os ciclos de condução utilizados para a definição da mesma. Depois, discorre-se sobre o atual estado da arte de tipos de recarga e suas características específicas. Posteriormente

analisa-se a sua interação com o sistema de potência no que se concerne a sua inserção no mesmo. Além disso, apresenta-se o método de Monte Carlo e as questões utilizadas no desenvolvimento da curva diária.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento da metodologia utilizada. Começa-se pela apresentação de suas entradas, sendo divididas entre as variáveis que não participam do sorteio realizado através da Simulação de Monte Carlo e as que participam. Partindo para o processamento dos dados, que é dividido entre parametrização das dinâmicas de veículos e levantamento das curvas de carga e terminando com a apresentação do método para apresentação em curva diária.

O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso realizado no trabalho. Primeiramente, caracteriza-se o estudo num geral, sendo o mesmo realizado no trecho Pelotas-Torres da BR-116. Posteriormente é apresentada uma análise dos resultados dos sorteios realizados através do método de Monte Carlo através de comparação com os dados de entrada para a sua validação e, após isso, os resultados do estudo de caso obtidos em forma de curvas diárias e uma análise sobre eles.

Por fim Capítulo 5 apresenta a conclusão geral do trabalho. Apresentando pontos sobre a metodologia desenvolvida, os resultados obtidos e discussões sobre os mesmos. Posteriormente, são apresentadas áreas para o aprimoramento da metodologia desenvolvida.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No intuito de atingir os objetivos do trabalho, é necessário um conhecimento sobre assuntos concernentes à mobilidade elétrica, modelagem de curva de carga, ao software MATLAB e aos métodos de Monte Carlo e de quantis. Assim, os tópicos subsequentes buscam apresentar os conceitos necessários para atingir estes objetivos.

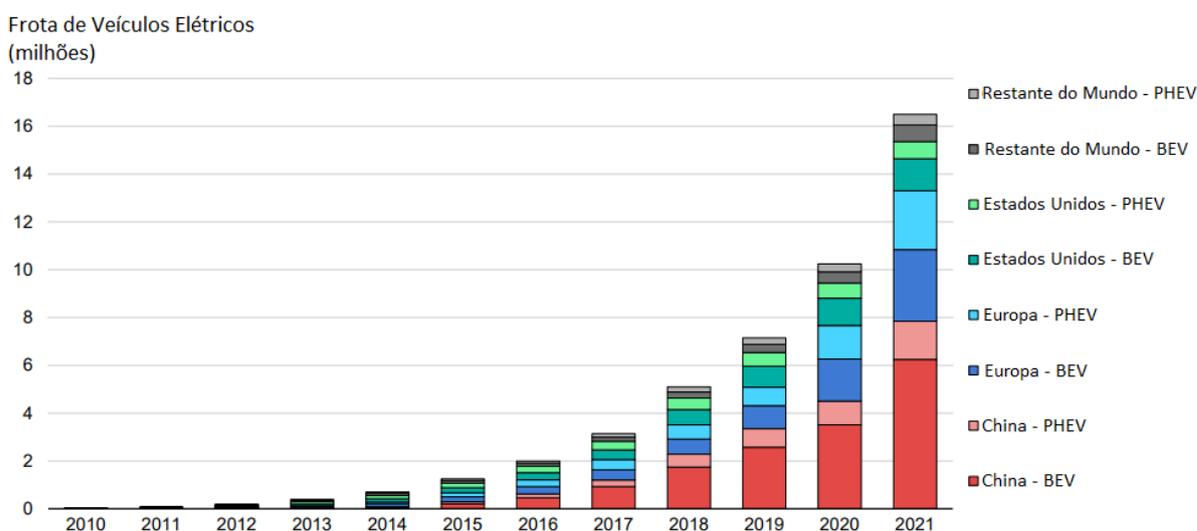
2.1 MOBILIDADE ELÉTRICA

Nas últimas décadas, questões relacionadas a redução de emissão de GEEs têm recebido cada vez mais notoriedade na comunidade internacional. Tratados como o Acordo de Paris, que integram 196 países, mostram a importância da redução mundial de poluição, mais especificamente da emissão do CO₂ (LUCCA, 2021).

No que se refere a emissão do gás CO₂, o setor mundial de transporte emite cerca de 12% do valor total (SEEG, 2021), como mencionado anteriormente, fator diretamente relacionado com a utilização de Veículos com Motores de Combustão Interna (VCI). Consequentemente, a comunidade internacional tem buscado múltiplas alternativas para o transporte com menores emissões de GEEs. Dentre essas alternativas, destaca-se a utilização de VEs, já que não precisam emitir GEEs através de processos de combustão para se locomover (SANGUESA *et al.*, 2021).

Destarte, medidas estão sendo tomadas ao redor do mundo para a expansão desse mercado, a Figura 2 apresenta dados sobre a frota de VEs no mundo nos últimos anos.

Figura 2 – Dados da frota mundial de VEs.



Fonte: (IEA, 2022)

Nota-se um aumento significativo nos últimos anos da frota de VEs. Representando assim que o mercado em questão tende a manter um certo nível de crescimento, tornando-

se cada vez mais relevante no cenário mundial. Um dos principais motivos para essa expansão está relacionado com o crescente incentivo no mercado de mobilidade elétrica a partir de políticas públicas em vários países (RAVI; AZIZ, 2022).

Dessa forma, à medida que aumenta a penetração de VEs no modal rodoviário, questões como os seus impactos no Sistema Elétrico de Potência crescem proporcionalmente, dado que é uma nova dinâmica de carga inserida no sistema (AHMAD; KHALID; PANIGRAHI, 2021). Logo, é necessário entender o comportamento de carga característico do carregamento de VEs em escala comercial.

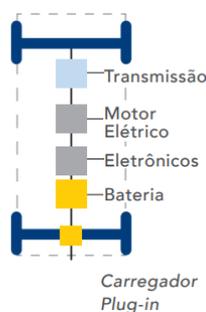
2.1.1 Veículos Elétricos

Ainda que o crescimento de VEs no mercado mundial seja um fenômeno relativamente recente (IEA, 2022), o primeiro protótipo de um VE foi criado há quase 200 anos. A preferência histórica por Veículos com Motores de Combustão Interna (VCI) foi causada pela disponibilidade abundante de combustíveis fósseis em relação à energia elétrica, o que favoreceu a adesão de VCIs (LUCCA, 2021).

Apesar de se considerar como veículo elétrico todo o veículo que possui como fonte energética, seja principal ou auxiliar, a energia elétrica, pode-se classificar esses veículos de acordo com a sua estrutura mecânica e dependência da eletricidade como fonte de energia. Dessa forma, pode-se dividir os VEs em um total de 3 categorias, sendo elas os *Pure-Electric Vehicles*, os *Plug-In Hybrid Vehicles* e os *Extended-Range Electric Vehicles* (DENTON, 2016).

Os *Pure-Electric Vehicles* (Pure-EVs) são veículos que têm como única fonte de energia a eletricidade, utilizando baterias como forma de armazenamento da mesma. Esses modelos possuem uma autonomia de pelo menos 160 quilômetros (DENTON, 2016). A Figura 3 apresenta a estrutura básica de um veículo desta categoria.

Figura 3 – Esquema Básico do Pure-EV.

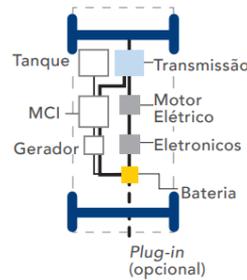


Fonte: (DELGADO *et al.*, 2017)

Destaca-se na Figura 3 a bateria, ou o sistema de baterias, do VE. Em que a análise de autonomia vem muito da capacidade de baterias, que vêm crescendo nos últimos anos.

Os Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) são veículos que possuem como principal força de locomoção o motor de combustão interna (MCI), no entanto, também possuem um motor elétrico auxiliar em conjunto com uma bateria. Esse sistema de locomoção elétrico adiciona quilômetros em autonomia para o veículo (DENTON, 2016). A Figura 4 apresenta a estrutura básica de um veículo dessa categoria.

Figura 4 – Esquema Básico do PHEV.

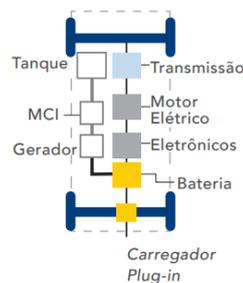


Fonte: (DELGADO *et al.*, 2017)

Destaca-se na Figura 4 a presença de um gerador, em que após a utilização da energia da bateria, o sistema elétrico se beneficia do movimento mecânico da parte à combustão, utilizando o motor como gerador para a bateria, aumentando assim a sua autonomia (LUCCA, 2021)

Os Extended-Range Electric Vehicles (E-REVs) são veículos que possuem como principal força de locomoção o motor elétrico, no entanto, também possui um MCI responsável por prover energia adicional para o sistema elétrico do veículo. Esse tipo de veículo possui uma autonomia de pelo menos 80 quilômetros, mas a característica de geração pelo motor de combustão interna pode aumentar esse valor (DENTON, 2016). A Figura 5 apresenta a estrutura básica de um veículo dessa categoria.

Figura 5 – Esquema Básico do E-REV.



Fonte: (DELGADO *et al.*, 2017)

Destaca-se na Figura 5 uma estrutura semelhante à da Figura 4, isso se dá por ambos serem veículos híbridos, diferenciando apenas em algumas estruturas internas como utilização da bateria e a recarga da mesma.

Existem outras variações de VEs, como por exemplo o *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV). No entanto, o funcionamento básico dessa e de outras variações ainda se encaixam dentro do princípio construtivo de algum dos três modelos citados (DENTON, 2016). Logo, não são necessárias análises detalhadas sobre as suas características.

Como os *PURE-EVs* são carregados exclusivamente por eletricidade, esses serão os veículos abordados na seção sobre autonomia e no restante do trabalho. Isso se dá pelo fato desta categoria de veículos possuir uma maior dependência de estruturas de carregamento de VEs em relação às outras, tornando assim a análise desse cenário mais relevante.

2.1.1.1 Autonomia

A principal questão que tem de ser abordada é a de sua autonomia, pois é o fator limitante na distância máxima a ser percorrida pelo veículo. Isso é uma característica de suma importância, pois a falta de estrutura de carregamento, juntamente da limitação de distância percorrida, pode ocasionar ansiedade nos condutores por medo de não alcançarem o seu destino (PEVEC *et al*, 2019). Desta forma, é necessário entender como o VE consome sua energia para que se entenda melhor o processo de estimativa de autonomia.

Ainda que os VEs estejam cada vez mais eficientes, fatores como o modo com que o veículo é conduzido e os sistemas de condicionamento térmico, iluminação e controle como também afetam a sua autonomia total (DENTON, 2016). Então, parte significativa do que se considera como cálculo de estimativa de autonomia de um veículo parte dos testes feitos em relação à condução do veículo.

Conseqüentemente, no intuito de padronizar o ciclo de condução para VEs, foram desenvolvidos diferentes ciclos de condução sob os quais os veículos são submetidos para uma melhor projeção da autonomia de cada modelo de veículo (LUCCA, 2021). Dentre esses, destacam-se três que são utilizados por montadoras de veículos para fornecer a autonomia de seus respectivos veículos, sendo esses o ciclo desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA), o *New European Drive Cycle* (NEDC) e o *Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure* (WLTP).

Dentre as principais diferenças entre esses ensaios ressaltam-se a porcentagem de condução em perímetro urbano e a velocidade média. A Tabela 1 apresenta a autonomia de alguns veículos em relação ao ciclo de condução utilizado.

Tabela 1 – Dados Técnicos de VEs em relação ao ciclo de condução

Veículo	Fabricante	Autonomia anunciada (km)	Ciclo Utilizado
BOLT	Chevrolet	416	EPA
E-TRON	Audi	436	WLTP
i3	BMW	335	WLTP
iEV 20	JAC	400	NEDC
iEV 330p	JAC	320	NEDC
I-PACE	JAGUAR	470	WLTP
LEAF	NISSAN	240/270/389	EPA/WLTP/NEDC
MODEL 3	TESLA	518	EPA
MODEL S	TESLA	630	EPA
MODEL X	TESLA	565	EPA
ZOE	RENAULT	300	WLTP

Fonte: Adaptado de (LUCCA, 2021).

Observa-se que, dentre os VEs apresentados na Tabela 1, apenas o Nissan Leaf possui as informações de autonomia sob todos os três ciclos de condução.

Destaca-se que existem vários fatores que devem ser considerados quando se analisa a autonomia de um veículo fora dos testes realizados, como por exemplo fatores ambientais e de ansiedade do condutor. Sendo estes:

- **Fatores Climáticos:** relacionados à utilização do sistema de condicionamento climático interno do veículo, o qual consome parte da bateria do VE e, conseqüentemente, reduzindo sua autonomia;
- **Fatores de ansiedade do condutor:** como VEs possuem uma limitada gama de locais nos quais podem ser carregados, geralmente condutores ficam ansiosos em relação à capacidade do veículo de alcançar esses destinos. Essa ansiedade pode causar uma redução na capacidade do condutor de conduzir o veículo em sua condição de máxima eficiência, reduzindo assim a sua autonomia total;
- **Fatores de paradas não programadas:** conta como um fator de segurança para caso o condutor tenha de realizar paradas não programadas com o seu veículo, como por exemplo congestionamento em rodovias.

Com relação à normativas brasileiras, o ciclo de condução para *PURE-EVs* já passou por atualizações pelo INMETRO, que reduziu cerca de 30% da autonomia prevista para VEs (*INSIDE-EVs*, 2023). No entanto, se tratando de *PHEVs*, a NBR 16567/2020 (ABNT, 2020) foi criada para aferir os valores relacionados aos veículos dessa categoria sob o ciclo de condução. Apesar do desenvolvimento de normas nacionais, os veículos vendidos em solo nacional ainda realizam os ensaios das normativas americanas e europeias.

Como observado, a definição da autonomia do veículo é vital para se entender as

limitações do mesmo. A partir disto, entende-se que, para contornar os problemas de autonomia, uma das principais soluções é a expansão da estrutura de carregamento para esse tipo de veículo. Assim, é necessário entender como funciona a estrutura geral de carregamento de VEs (AHMAD; KHALID; PANIGRAHI, 2021).

2.1.2 Estações de recarga rápidas

De acordo com a Agência Internacional de Energia, é necessário o investimento em cinco categorias de políticas diferentes para que ocorra a expansão do mercado mundial de eletromobilidade, sendo estas (IEA, 2022):

- Políticas de incentivo de compra de VEs;
- Retirar da inércia o mercado de veículos pesados;
- Promover a adoção de VEs em economias emergentes;
- Expandir estruturas para VEs e redes inteligentes;
- Garantir geração segura e sustentável para a recarga de VEs.

Diante disso, destaca-se a importância do quarto item, dado que a expansão e adesão de estruturas de carregamento para VEs encontra-se em um estágio de desenvolvimento. Assim, para se entender melhor como que pode se dar a ampliação e desenvolvimento destas estruturas, é necessário entender sobre os diferentes tipos de carregamento. A Tabela 2 apresenta os tipos de carregamento para VEs de acordo com a literatura disponível.

Tabela 2 – Modos de Recarga

Tipos	Potência (kW)	Corrente	Local de Utilização
Modo 1	3-7	CA	Residencial
Modo 2	10-22	CA	Residencial/Público
Modo 3	50-200	CC	Público

Fonte: Adaptado de (ALATISE *et al.*, 2021).

Pode-se observar que, dependendo da potência da estação de recarga, ocorre uma restrição dos locais disponíveis para a sua implementação (DAS *et al.*, 2020). Entretanto, atualmente cerca de 50% a 80% dos carregamentos de VEs ocorrem em carregadores residenciais e apenas 10% em locais públicos (HARDMAN *et al.*, 2018). Partindo das políticas recomendadas pela Agência Internacional de Energia, nota-se que a implementação de ambientes que possuam modo 3 de carregamento podem resultar numa expansão do mercado de eletromobilidade nacional (IEA, 2022).

Adicionalmente, ao se observar a Tabela 2, nota-se que essas estruturas demandam uma quantia de potência significativa. Ademais, devido a fatores relacionados à autonomia máxima de VEs, observa-se que é necessária uma longa sequência de estações

de recarga, denominada de corredor elétrico, para se suprir as demandas construtivas de autonomia dos VEs (AHMAD; KHALID; PANIGRAHI, 2021). Fazendo-se assim necessários estudos para analisar o impacto da implementação de estruturas de recarga de VEs no Sistema Elétrico de Potência.

2.2 INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Como mencionado na Seção 2.1.2, a inserção de estruturas de recarga condizentes com as necessidades de um corredor elétrico podem acarretar em muitos impactos no Sistema Elétrico de Potência. Assim, no intuito de otimizar o processo de implementação, estudos e análises são necessários para uma melhor compreensão das dinâmicas relacionadas com o comportamento das estações de recarga na rede. Nesse contexto, pode-se encontrar vários estudos retratando sobre modelagem, metodologias para alocação e análise de impactos de estações de carga no atual estado de arte.

Neste trabalho, serão focados aspectos relacionados a impactos causados a partir da implementação de corredores elétricos. Entretanto, para se analisar os possíveis impactos consequentes destes aspectos, primeiro é necessário entender a importância do planejamento do sistema de distribuição para, posteriormente, compreender o comportamento da estação de recarga (GONG; CAO; ZHAO, 2017). A forma com que se pode realizar isso é através da modelagem da curva de carga.

2.2.1 Planejamento e Operação do Sistema de Distribuição

No Brasil, empresas privadas e públicas são encarregadas de operar o sistema de distribuição. Todavia, essas empresas devem atuar sob condições de qualidade estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no intuito de garantir uma maior eficiência e segurança no fornecimento de energia (ANEEL, 2016).

Dentre os principais aspectos considerados na avaliação de controle de qualidade, destaca-se o parâmetro de Qualidade do Produto. Este parâmetro está relacionado com a análise da tensão em regime permanente fornecida para o cliente, analisando principalmente a severidade das perturbações ocorrentes na mesma (ANEEL, 2016).

Assim, foram estabelecidos no Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) todas as características da rede que devem ser monitoradas para se garantir um fornecimento de qualidade de energia para os consumidores. Destaca-se que, no descumprimento das normativas impostas pelo Módulo 8, as empresas devem compensar financeiramente de forma imediata os consumidores conectados em sua rede (ANEEL, 2016).

Desta forma, do ponto de vista das concessionárias, é de grande relevância garantir a qualidade do planejamento da rede, no intuito de se garantir a operação eficiente do sistema de distribuição. Dentre as etapas do planejamento realizado, destaca-se a de

projeção de carga no sistema, dado que condições de sobrecarga podem ocasionar, por exemplo, afundamento de tensão na rede de distribuição (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020).

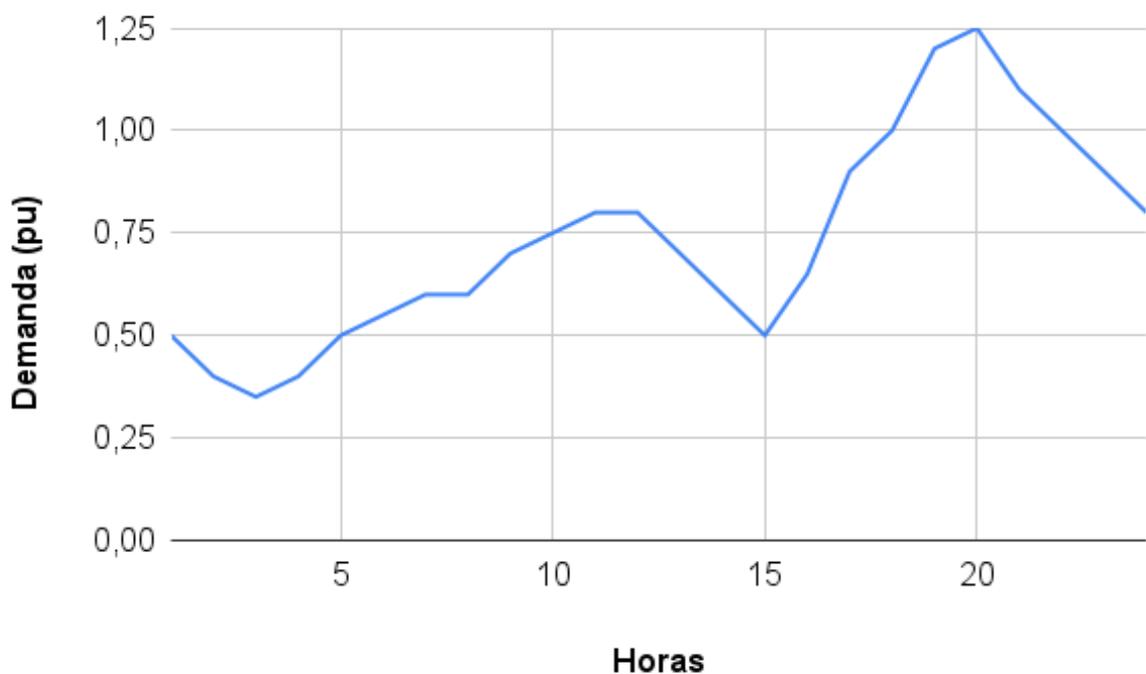
Conseqüentemente, observa-se a importância do conhecimento das dinâmicas de carga ocorrentes no sistema ao longo do tempo a fim de evitar descumprimentos ao PRO-DIST. Com isso, pode-se apresentar o conceito de curva de carga e as etapas para a sua definição.

2.2.2 Curva de carga

Define-se como curva de carga uma representação da variação de carga por um certo componente ou um conjunto de componentes elétricos e eletrônicos. Essas curvas são utilizadas, por exemplo, na análise de fluxo de potência de sistemas de distribuição, e representam a acumulação de demandas de diferentes consumidores acoplados à rede em questão (KNAK NETO, 2017).

Entretanto, existem por exemplo curvas típicas, que simulam comportamentos específicos de demanda de certos tipos de consumidores. Tratando-se de curvas de carga de consumidores de baixa tensão (BT), pode-se classificá-las em quatro subgrupos: Residenciais, Rurais, Demais Classes e Iluminação Pública (ANEEL, 2021). A Figura 6 demonstra um exemplo de uma curva de carga característica do subgrupo residencial.

Figura 6 – Exemplo de uma curva de carga residencial.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Algumas das principais características para a determinação da classificação de uma curva de carga podem ser observadas na constância do seu consumo, em quais horários do dia acontecem as variações de carga, entre outros fatores. No caso da Figura 6, pode-se considerar esta curva como característica do subgrupo residencial, devido ao seu pico durante as últimas horas do dia, comportamento comum de perfis de carga residenciais.

Entretanto, quando se trata de definição de curva de carga de estações de recarga de VEs, não pode-se definir o seu perfil de carga diretamente em uma das classificações previamente citadas. Isso se dá pelo fato de possuírem dinâmicas próprias de injeção e consumo que individualizam o seu perfil de carga (KNAK NETO, 2017).

Desta forma, é necessário realizar a definição da curva de carga de estações de recarga por outros métodos. Quando se retrata de modelagem de curvas de carga, podem ser utilizados dois métodos principais (ABREU, 2015):

- **Bottom-Up:** utilização de dados empíricos para modelagem das curvas de carga. Dados utilizados podem ser obtidos através de estudos de pesquisa na área ou por dados sociodemográficos disponíveis (ABREU, 2015);
- **Top-Down:** utilização de metodologias baseadas em dados estatísticos e as suas interações com o sistema para realizar uma representação probabilística da modelagem da carga em questão (KNAK NETO, 2017).

Destaca-se que o método utilizado neste trabalho é o *Top-Down*. Isso se dá pelo fato de não existirem dados em ampla disponibilidade para a construção de um modelo *Bottom-Up*. Logo, necessita-se desenvolver uma metodologia que, através de métodos probabilísticos, consiga realizar a modelagem de uma curva de carga que descreva os fenômenos condizentes com uma estação de recarga.

2.2.3 Modelagem de curva de carga em estações de recarga

No tocante a modelagem de curva de carga para estações de recarga, é necessário realizar uma revisão bibliográfica para se entender quais variáveis são utilizadas para a construção de um modelo *Top-Down*. Para isso, serão expostos trabalhos na área no intuito de se apresentar os principais parâmetros analisados.

Em Knak Neto (2017), são desenvolvidas curvas de carga para três estratégias diferentes de carregamento de VEs através dos Modos 1 e 2 de carregamento. Entretanto, essas estratégias alteram apenas os valores das variáveis utilizadas na modelagem da curva de carga. Independente da metodologia de carregamento adotada, a modelagem é a mesma da desenvolvida na Equação 1 (KNAK NETO, 2017).

$$L_{VE_{est}}(t) = \frac{\sum_{k=1}^n \int_{T_{part_k}}^{T_{cheg_k}} L_{VE_k}(t) dt}{L_{VE_{estmax}}} \quad (1)$$

Em que L_{VE_k} é a demanda de carregamento do veículo k, $L_{VE_{est}}$ é a curva de carga

resultante da estratégia utilizada, $L_{VE_{estmax}}$ é a demanda máxima obtida para a estratégia em questão e T_{part_k} e T_{cheg_k} representam o tempo de partida e o tempo de chegada do veículo elétrico no ponto de recarga.

Para definir o tempo de partida T_{part_k} presente na Equação 1, utiliza-se a Equação 2.

$$T_{part_k} = T_{cheg_k} + (SOC_{f_k} - SOC_{i_k}) \cdot \frac{C_{bat_k}}{TC_{bat_k}} \quad (2)$$

Em que SOC_{f_k} é o estado de carga da bateria do veículo após o carregamento, SOC_{i_k} é o estado de carga da bateria do veículo antes do carregamento, C_{BAT_k} é a capacidade de armazenamento da bateria BAT_k em kWh e TC_{BAT_k} é a taxa de carregamento da bateria BAT_k (KNAK NETO, 2017). Destaca-se que, para a escolha do valor de SOC_{i_k} , determina-se a partir de métodos estocásticos dentro de uma margem limite.

Apesar de esta ser uma metodologia para modelagem de recargas de consumidores de BT, que seria realizada em modos de recarga 1 e 2, o modelo matemático geral para obtenção do perfil de carga apresenta um desenvolvimento genérico o suficiente para ser aplicado em estações de recarga rápida em rodovias.

Em Gong, Cao e Zhao (2017) foi realizada a modelagem da curva de carga para qualquer modo de recarga, partindo de metodologias para análise de tráfego de veículos. A metodologia realizada é matematicamente semelhante à exposta nas Equações 1 e 2, com a adição de outros fatores. Dentre esses, destaca-se os parâmetros que definem a parada para recarga baseados na maior distância que pode ser percorrida sem que ocorra a descarga total do veículo. Nesta metodologia também observa-se a geração aleatória de valores de estado de carga.

Em Da Silva (2021), desenvolveu-se uma metodologia para alocação dos VEs na rodovia partindo de análise nodal, em que se divide o trecho em pontos nos quais se analisa o número de veículos presentes em cada um. A partir disso, realiza-se uma simulação de Monte Carlo para se determinar o número de veículos em cada estação de recarga e as frequências de distribuição percentual relacionadas com o tempo de recarga de cada veículo. Como valores de entrada para a simulação de Monte Carlo realizada, foram utilizadas informações relacionadas aos veículos e as frequências de distribuição percentual para a ansiedade do condutor, estado de carga inicial e de padrões origem-destino.

Em Ivarsøy, Torsæter e Korpås (2020) realizou-se a modelagem da curva de carga da estação de recarga considerando que o estado de carga do VE pode ser determinado, utilizando a distância percorrida além de uma degradação relacionada a fatores climáticos e logísticos. Para a definição da distância percorrida pelo VE, utiliza-se a distância da estação de recarga partindo do ponto inicial do sistema. Além disso, realiza-se o processo de simulação de Monte Carlo para definir o número de pontos para carregamento e a sua potência, o número e o modelo de VEs.

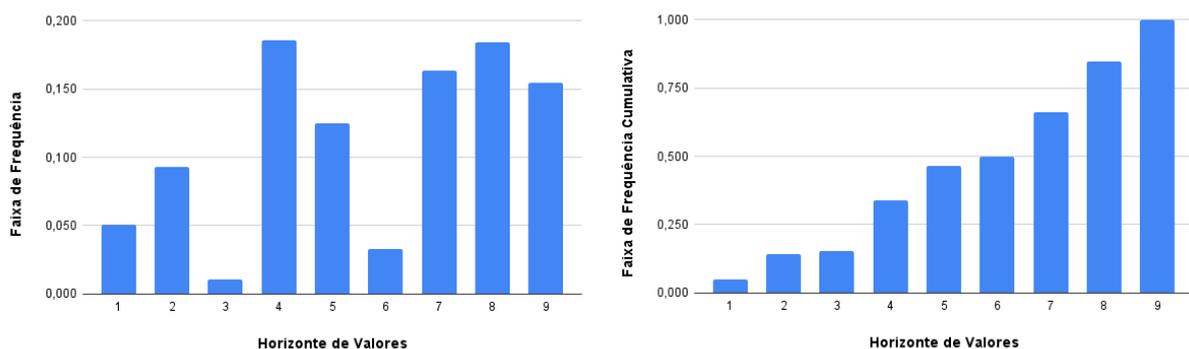
Observa-se que, dentre os trabalhos mencionados, a principal diferença encontra-se na forma de dimensionar o estado de carga dos VEs. Assim, o presente trabalho pretende desenvolver uma metodologia semelhante à proposta em Ivarsøy, Torsæter e Korpås (2020), através de uma abordagem semelhante para a definição do estado de carga, reconsiderando as variáveis logísticas utilizadas, além de adicionar outros fatores como padrões de mobilidade.

Tendo realizado a análise de várias metodologias do atual estado de arte, pode-se partir para a definição do método de Monte Carlo, que é utilizado no presente trabalho.

2.3 MONTE CARLO

O método de Monte Carlo é um método computacional que utiliza de números aleatórios para resolução de problemas estatísticos (PAULA, 2014). O seu principal conceito estatístico é da utilização de uma variável β , aleatoriamente variante entre 0 e 1, com uma certa distribuição aleatória que seja condizente à Função Cumulativa de Probabilidades (FCP) $F(\alpha)$, em que α seja a variável a qual se deseja encontrar. Resumidamente, utiliza-se β em conjunto com o comportamento apresentado em $F(\alpha)$ para se estipular valores de α (SAUSEN, 2022). O resultado dessa forma de caracterização é representada no histograma presente na Figura 7.

Figura 7 – (a) Distribuição padrão de um evento aleatoriamente sorteado; (b) cumulativa de um evento aleatoriamente sorteado.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Nas Figuras 7.(a) e 7.(b) pode-se observar as duas possíveis representações de uma distribuição de frequências de decisões. Na Figura 7.(a) apresenta-se a faixa de frequência de cada valor no horizonte de valores possíveis, enquanto que na Figura 7.(b) apresenta-se os valores cumulativos de cada faixa de frequência com as suas anteriores. As faixas apresentadas nas Figuras 7.(a) e 7.(b) são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados Técnicos de VEs em relação ao ciclo de condução

Horizonte de Eventos	Faixa de Frequência	Faixa de Frequência Cumulativa
1	0,043	0,000~0,042
2	0,109	0,043~0,152
3	0,073	0,153~0,225
4	0,184	0,226~0,409
5	0,153	0,410~0,561
6	0,118	0,562~0,679
7	0,041	0,680~0,720
8	0,160	0,721~0,880
9	0,120	0,881~1,000

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se que, de acordo com a Tabela 3, o valor do sorteio que vai definir qual dos 9 valores do horizonte será escolhido a partir da faixa cumulativa. Destaca-se que o valor sorteado é variante entre 0 e 1. Com isso, supondo que caia o valor 0,5, o evento número 5 seria o sorteado.

Dado que este é um método computacional, é necessário estipular critérios de parada no intuito de otimizar o gasto computacional concernente a sua execução. Dentre os principais, destaca-se a limitação por número de iterações totais no método. Como cada nova iteração é uma operação independente da mesma variação $F(\alpha)$, alterações no espaço amostral não alteram a estabilidade da FCP de α (SAUSEN, 2022).

Vale destacar que, como se trata de um método estatístico, o seu resultado possui uma certa variabilidade inerente. Desta forma, é necessária uma ferramenta para analisar os graus de variação existentes dentro do resultado obtido.

Tendo definido o método de Monte Carlo, parte-se para a apresentação da próxima ferramenta utilizado, sendo este o método dos Quantis. De grande valia na análise de variabilidades dentro de resultados (KNAK NETO, 2017), sendo interessante a sua utilização junto do método de Monte Carlo.

2.4 MÉTODO DOS QUANTIS

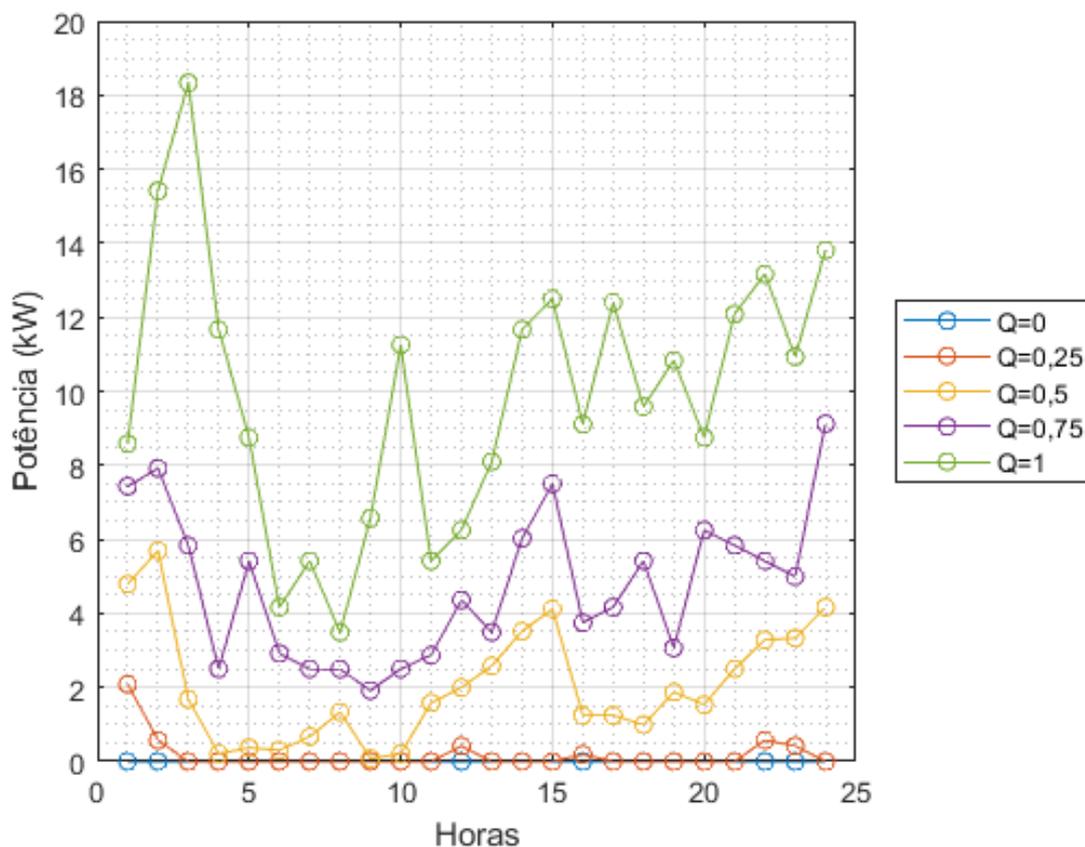
O método dos quantis é uma ferramenta para demonstrar faixas de resultados dentro de um espaço amostral específico. Neste caso, o método de quantis será utilizado para apresentar faixas de resultados obtidos através do método de Monte Carlo. O método funciona da seguinte forma:

- **Classificação de um espaço amostral:** etapa em que se pega o espaço amostral completo e se classifica os valores de forma crescente;

- **Desenvolvimento dos quantis:** realiza-se a análise do valor dos quantis a partir dos valores classificados, o quantil $Q = 0$ é um valor em que 100% do espaço amostral é maior, $Q = 0,5$ é um valor em que 50% do espaço amostral é maior e assim por diante.

Tendo realizado a descrição do que é realizado no método, parte-se para uma apresentação clássica. A Figura 8 apresenta uma demonstração de uma quantização de curva de carga de VEs.

Figura 8 – Quantização de uma curva de carga.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Na Figura 8 observa-se a divisão de uma previsão de curva de carga em 5 níveis de quantização. Pode-se notar também um aumento nas potências à medida que se aumenta o valor do quantil, demonstrando a divisão em faixas de menores valores até maiores valores.

Destaca-se que o valor de $Q = 0,5$ sempre representa a média entre os casos e os valores $Q = 0$ e $Q = 1$ apresentam o componentes mínimo e máximo, respectivamente.

Desta forma, tendo realizado toda análise relacionada com a literatura para a execução do trabalho, parte-se para as considerações gerais do capítulo. Em que se analisam características gerais do referencial teórico além de introduzir a metodologia desenvolvida.

2.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

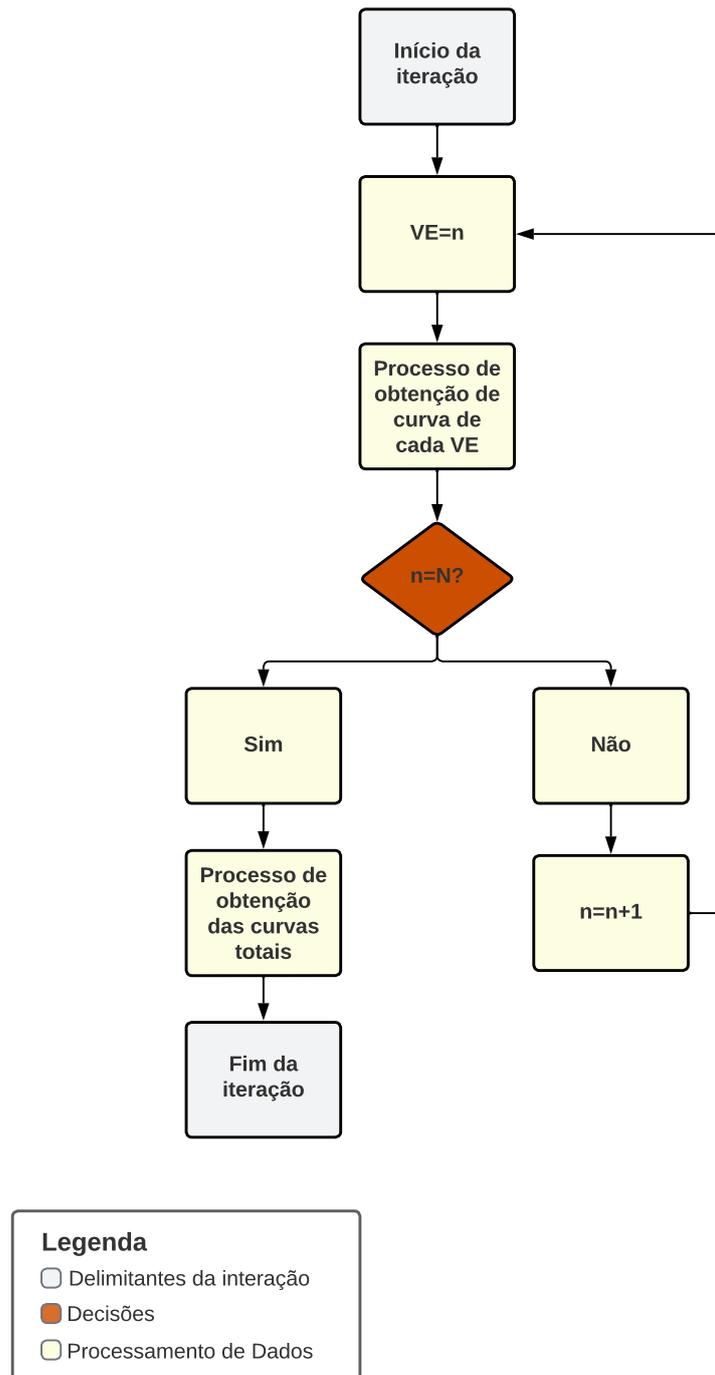
O capítulo apresentado buscou destacar as principais necessidades para a evolução do mercado da eletromobilidade e fundamentar as principais características para a previsão de carga em estações de recarga de VEs. Adicionalmente, foram apresentadas pesquisas do presente estado de arte para modelagem de curva de carga para VEs, buscando demonstrar a utilização das variáveis que foram expostas ao longo do capítulo. Além disso, foram analisados ciclos de condução através da apresentação estudos para se determinar com maior precisão a autonomia de um veículo sob condições específicas de condução.

Ademais, foram desenvolvidos os pontos principais do método de Simulação de Monte Carlo (SMC) e a sua praticidade em resolução de problemas que tenham dinâmica estatística, juntamente ao método de quantis para demonstração de resultados. Com essa apresentação, espera-se ter desenvolvido bases teóricas suficientes para fundamentar a metodologia desenvolvida neste trabalho. Metodologia esta que será abordada no seguinte capítulo, com todas as suas características.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo aborda o desenvolvimento da metodologia apresentada. Para isso, é necessário entender o seu funcionamento geral. A Figura 9 apresenta a metodologia geral da modelagem para a curva de carga de VEs.

Figura 9 – Metodologia para curva de carga.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Na Figura 9 são apresentados apenas os aspectos gerais da metodologia, sendo

a mesma apresentada com mais detalhamento posteriormente no texto. Destaca-se a importância da integração antes do fim de cada iteração para o desenvolvimento do método dos quantis.

3.1 PARÂMETROS INICIAIS

Nesta seção são apresentadas as entradas necessárias para o desenvolvimento do método, elas que vão definir o caso que será analisado através da metodologia. Elas são divididas em dois grupos, sendo eles o grupo das entradas estáticas e o grupo das entradas realizadas por Monte Carlo.

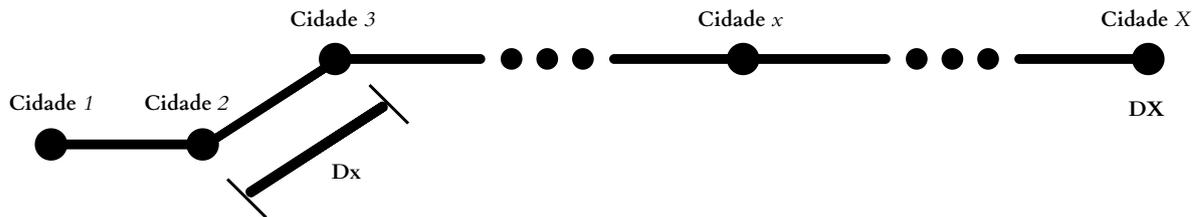
3.1.1 Entradas Estáticas

As entradas estáticas são as entradas que não participam de nenhum sorteio durante as iterações do código. As suas funções são variadas, servindo desde o controle geral do método até definição de variáveis intrínsecas ao funcionamento ideal da metodologia.

A primeira a se retratar é sobre o número total de VEs. Neste caso, basta definir um número N de VEs, em que cada valor n representa um veículo elétrico VE_n que é inserido na rodovia. Como mencionado anteriormente, a utilização do parâmetro de número de elementos não altera as características probabilísticas da SMC, dado que cada iteração é independente do resultado das outras. Além desta, define-se um valor It para o número total de iterações do código, isso é utilizado para a posterior quantização dos resultados obtidos.

Partindo disso, pode-se definir os pontos da rodovia. São considerados os pontos de recarga e as cidades como os pontos nodais que constituem a rodovia. Desta forma, pode-se determinar um número X de cidades, em que a primeira cidade representa o ponto inicial e a cidade X representa o ponto final, sendo cada cidade intermediária representada como um valor x , classificadas por ordem de distância em relação a cidade 1. Distância essa representada por D_x com a unidade de medida em quilômetros, em que D_1 apresenta o ponto inicial, ou distância de 0 quilômetro, e o ponto D_X apresenta o ponto final, tendo como distância o tamanho total da rodovia. A Figura 10 apresenta um esquema da representação de cidades na rodovia.

Figura 10 – Esquema Básico das cidades ao longo da rodovia.



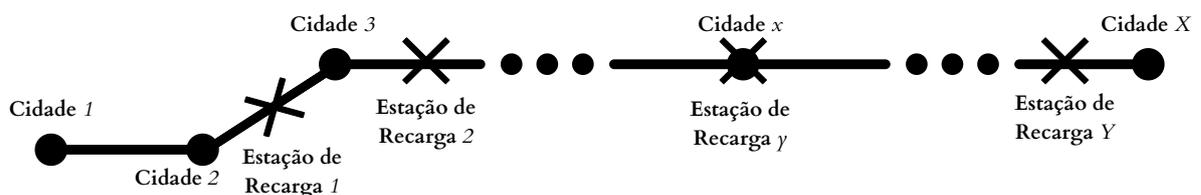
Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se na Figura 10 que, ao utilizar esse método, pode-se aplicar a qualquer tipo de estrutura, podendo estes pontos nodais serem cidades, pontos de recarga, estabelecimentos comerciais, entre outros. Fazendo com que seja uma característica generalística para o método.

Adicionalmente, um processo semelhante ocorre com a definição de estações de recarga. A diferença é que as estações de recarga são apenas pontos nodais no meio da rodovia e não demarcam início ou fim da rodovia. Neste caso, pode-se definir um número Y de estações de recarga, em que a metodologia para a determinação das distâncias D_y de cada estação de recarga, seja ela a primeira ou a de número Y , são referenciadas à cidade que foi proposta como ponto inicial.

Desta forma, pode-se alocar todos os pontos de acordo com uma distância absoluta, facilitando os cálculos das distâncias relativas entre pontos. A Figura 11 apresenta o esquema da rodovia completa com todos os seus elementos.

Figura 11 – Esquema Básico da rodovia com todos os componentes.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se na Figura 11 que, apesar de serem componentes diferentes, eles estarão no mesmo ponto na rodovia não é um fator impeditivo, visto que podem existir cidades com estações de recarga. Esse fato pode ser analisado na Figura 11, na qual nota-se que a cidade x e a estação de recarga y estão no mesmo ponto da rodovia. Com isso, pode-se definir outras variáveis, como as relacionadas à conversão e adaptação de autonomia dos VEs.

Como mencionado, nem todos os veículos possuem a sua autonomia declarada sob o ciclo de condução requisitado. Desta forma, faz-se necessária a utilização de algum mecanismo para conversão de autonomies. Em (LUCCA, 2021), utiliza-se um veículo elétrico, no caso o Nissan Leaf, que possui a sua autonomia declarada em todos os três ciclos para se realizar uma conversão por proporcionalidade neste veículo e utilizá-la como fator de conversão universal entre os outros veículos. Os fatores de conversão universal ζ de WLTP para EPA e NEDC para EPA podem ser determinados pelas Equações 3 e 4 respectivamente.

$$\zeta_{WLTP-EPA} = \frac{AC_{EPA}}{AC_{WLTP}} \quad (3)$$

$$\zeta_{NEDC-EPA} = \frac{AC_{EPA}}{AC_{NEDC}} \quad (4)$$

Em que os valores $\zeta_{NEDC-EPA}$ e $\zeta_{WLTP-EPA}$ são em valores decimais e os valores AC_{EPA} , AC_{NEDC} e AC_{WLTP} são os valores de autonomia do VE modelo em cada um dos ciclos mencionados, dados em quilômetros.

Assim, para se calcular a autonomia equivalente $A_{EQ_{VE_n}}$ de um certo veículo sob a metodologia, têm de se considerar três fatores redutores. Em Lucca (2021), utiliza-se os três diferentes fatores que afetam a autonomia total do veículo. Sendo estes Φ_{PNP} , Φ_A e Φ_C , que representam os fatores redutores de paradas não programadas, ansiedade do condutor e climáticos, respectivamente. Assim, parte-se para a definição do método de parada dos VEs.

Para isso, utiliza-se a variável denominada de δ_P , que define um valor limitante para a parada do veículo na estação de recarga. Destaca-se que esse valor é decimal, pois será comparado com o valor decimal das SoCs dos VEs. Pode-se notar que o valor δ_P pode representar também um valor variante para cada veículo simulado.

Esse valor serve como um limite mínimo do SoC, em que o condutor ao analisar seu estado de carga em relação ao seu destino, decide se tem o suficiente (SoC estipulado maior que o fator limitante) para completar o trajeto ou se precisa parar para carregar seu VE (SoC estipulado menor que o valor limitante). Isso foi considerado desta forma para se obter uma escolha de recarga para cada VE.

Além destes, pode-se definir também a velocidade V_{Vel} , sendo a variável que define a velocidade dos VEs ao longo das iterações. Destaca-se que, semelhante ao caso da variável δ_P , esse valor pode ser variante por veículo ou estático para todos os veículos calculados na metodologia.

Com isso, desenvolve-se todas as variáveis estáticas necessárias para a metodologia. Destaca-se que a interação delas com a metodologia é apresentada na seção 3.2. Dessarte, pode-se partir para o desenvolvimento das variáveis internas à cada VE e a utilização do processo de SMC em cada uma delas.

3.1.2 Entradas Variantes

Como observado na Figura 12, existem um total de quatro variáveis no método que são definidas por sorteio realizado por SMC em cada um dos VEs simulados. Sendo elas o ponto de partida, o ponto de chegada, o horário de partida e o modelo do VE. Desta forma, essa seção busca retratar cada uma delas e o processo de construção de suas Distribuições Cumulativas de Frequência.

Em primeiro lugar, serão apresentados os pontos de partida e chegada de cada VE. É de grande importância destacar que o VE, por particularidades da metodologia, só pode partir e chegar em lugares definidos por distância D_x , que por convenção, são consideradas cidades. Desta forma, no seguinte modelo de Distribuição Cumulativa de Frequências (DCF) utiliza-se o valor de população de cada cidade, pois permite tratar um número maior de VEs em cidade mais populosas, supondo um market share constante entre as cidades.

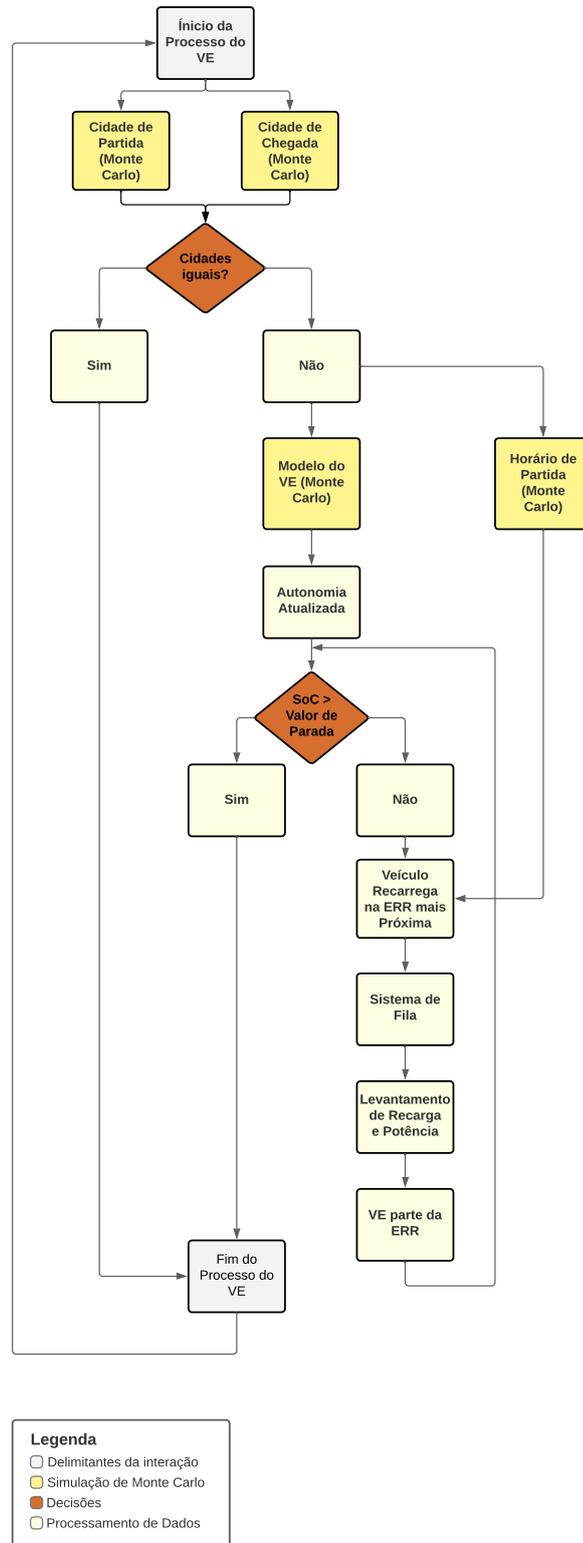
No que se refere ao horário de partida dos VEs, é de grande importância do método pois permite, auxiliado de outros fatores, definir um horário de recarga conforme a locomoção do mesmo na malha rodoviária. Para isso, utiliza-se dado de fluxo de veículos em rodovias, que datam o número de veículos que passam por certo ponto da rodovia em um intervalo de tempo. Desta forma, pode-se desenvolver o DCF supondo que os condutores de VEs sigam o mesmo padrão geral de mobilidade.

A definição do modelo de VE é de grande importância para a metodologia, pois é através do modelo do VE que se pode definir questões como a autonomia do mesmo, a sua potência de recarga e o seu tempo total de recarga. Fatores esses de grande influência no levantamento final da curva de carga das estações de recarga. Para esse caso, pode-se utilizar número de vendas de VEs para se ter uma DCF condizente com o panorama do market share de cada modelo de VE.

3.2 PROCESSO PARA A OBTENÇÃO DE CURVA DE CARGA

Nesta seção, é retratado o processo da metodologia para cada um dos VEs, conforme descrito na Figura 12. O intuito é de apresentar de forma genérica os processos utilizados.

Figura 12 – Processo de Obtenção da Curva de Carga.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se, na Figura 12, que existem certos limites internos ao código com relação ao fim da iteração envolvendo cada VE simulado. Com destaque à metodologia cíclica

de parada em recargas.

3.2.1 Definições iniciais do veículo

A primeira etapa da metodologia para cada novo veículo simulado é a definição dos pontos de partida $D_{x_{Part}}$ e chegada $D_{x_{Cheg}}$ do VE. Partindo disso, se utiliza a primeira operação lógica da metodologia, dada pela Equação 5

$$\Upsilon = D_{x_{Part}} \equiv D_{x_{Cheg}} \rightarrow \begin{cases} \text{VE não se locomove,} & \text{se } \Upsilon = 1 \\ \text{VE se locomove,} & \text{se } \Upsilon = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Essa lógica permite com que se subtraia os VEs que não se locomovem na malha rodoviária, dado que não tem como se locomoverem se sua cidade de partida for a mesma do que a cidade de chegada. Em que se encerra a simulação para o VE atual e inicia para o próximo VE em caso de $\Upsilon = 1$. Dessa forma, para os próximos passos da metodologia, supõe-se que $\Upsilon = 0$.

Posterior a essa etapa, realiza-se a definição dos valores de SMC concernentes ao horário de partida do VE. Adicionalmente, define-se também o modelo do veículo. Com esses dados, parte-se para a definição da autonomia do veículo simulado.

A primeira das análises de autonomia é concernente ao ciclo de condução que está definida a sua autonomia, e a posterior conversão caso não seja mesma da definida como base. Neste caso, utiliza-se a autonomia definida em EPA como base, com isso, pode-se definir com base na Equação 6.

$$\Xi = Cic_{VE_n} \rightarrow \begin{cases} A_{CIC_{VE_n}} = A_{VE_n}, & \text{se } \Xi = EPA \\ A_{CIC_{VE_n}} = A_{VE_n} \cdot \zeta_{NEDC-EPA}, & \text{se } \Xi = NEDC \\ A_{CIC_{VE_n}} = A_{VE_n} \cdot \zeta_{WLTP-EPA}, & \text{se } \Xi = WLTP \end{cases} \quad (6)$$

Em que A_{VE_n} é a autonomia declarada do modelo do VE sorteado em quilômetros, Cic_{VE_n} é o ciclo de condução em que é declarada a autonomia e $A_{CIC_{VE_n}}$ é a autonomia obtida na conversão do ciclo em quilômetros.

Desta forma, pode-se obter o valor de autonomia com a conversão de ciclos de condução de cada veículo. Depois disso, pode-se considerar o efeito de cada um dos fatores de redução de autonomia mencionados. A Equação 7 apresenta a remodelação para esse fator redutivo.

$$A_{EQ_{VE_n}} = A_{CIC_{VE_n}} \cdot (1 - \Phi_C) \cdot (1 - \Phi_A) \cdot (1 - \Phi_{PNP}) \quad (7)$$

Em que $A_{EQ_{VE_n}}$ é a autonomia final do VE após a adaptação para os fatores redutores e autonomia (LUCCA, 2021). Pode-se notar na Equação 7 que pode-se anular o

fator de cada uma das variáveis ao colocar um valor equivalente a 0%. Com esses fatores iniciais definidos, pode-se partir para a metodologia de parada e recarga do VE.

3.2.2 Metodologia de parada e de recarga do veículo

Com os fatores iniciais de cada VE definido, pode-se definir o processo de avaliação de paradas do VE. Em que se define se o veículo precisa parar para fazer recargas ou se consegue realizar o seu trajeto sem necessitar carregar. Entretanto, para isso, é necessário calcular o estado de carga do VE para realizar essa análise. A Equação 8 apresenta o cálculo para a estimativa de estado de carga do VE.

$$SoC_{f_n} = 1 - \left(\frac{|D_{xPart} - D_{xCheg}|}{A_EQ_{VE_n}} \right) \quad (8)$$

Em que SoC_{f_n} é o estado de carga do VE estimada para o fim de seu trajeto, em porcentagem. Com isso, pode-se ter uma estimativa do estado de carga do veículo ao chegar em seu destino. Nota-se que o método serve para fluxo bidirecional na rodovia, dado pela relação modular das distâncias. Destaca-se que, para o fluxo bidirecional, analisa-se cada veículo separadamente.

Pode-se notar também que o veículo sempre realiza esta lógica tendo 100% de estado de carga inicial, seja saindo da cidade de partida ou de uma estação de recarga. Partindo disso, pode-se desenvolver o método de parada em estações de recarga. Para isso, define-se esse método através da Equação 9.

$$DP_{VE_n} = \begin{cases} D_{VE_n}, & \text{se } SOC_{f_n} \geq \delta_P \\ D_{yprox}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (9)$$

Em que DP_{VE_n} é a distância que é percorrida pelo VE até sua próxima parada em quilômetros e D_{yprox} é a distância da próxima estação de recarga no trajeto percorrido pelo VE em quilômetros. Destaca-se aqui a escolha da variável δ_P como única definição de parada em estação, servindo como análise individual de cada condutor a cada momento em que se insere na rodovia, realizando sempre a análise lógica descrita na Equação 9.

Desta forma, pode-se observar que, caso o VE possua um estado de carga estimado maior do que o fator limitante para carregamento, o VE realiza o trajeto sem recarregar o veículo. Nesse caso, encerra-se a interação deste veículo específico na metodologia.

Entretanto, caso o veículo pare em uma estação para carregar, é necessário analisar os fatores relacionados a isso, como o tempo de recarga, a potência demandada e a hora em que o VE é inserido novamente na malha rodoviária. A primeira questão a se analisar é que, caso o veículo não consiga terminar o trajeto sem carregar, ele recarrega na estação mais próxima de sua localização atual no sentido em que está se dirigindo.

Com isso, é necessário analisar se o veículo consegue se inserir imediatamente nos

carregadores ou se tem de esperar pela disponibilidade de um deles. Isso é importante pois o comportamento de filas e saturação de carregados é uma situação que pode ocorrer em cenários reais.

Considerando que o VE está em processo de recarga, pode-se calcular o seu tempo de recarga e, junto a esse fator, a potência demandada da estação de recarga. Podendo-se definir o tempo de recarga de acordo com a Equação 10.

$$T_{CARG} = \frac{1 - SOC_{f_n}}{VE_{n_{TR}}} \quad (10)$$

Em que T_{CARG} é o tempo para a recarga do VE em minutos e $VE_{n_{TR}}$ é a taxa de recarga do VE simulado em porcentos por minuto. Com essa abordagem do tempo, pode-se calcular a potência de recarga de acordo com a Equação 11.

$$POT = \int_{T_{Carg}}^{T_{Part}} \frac{VE_{n_{PC}} \cdot \left(\frac{T_{Carg}}{60}\right)}{T_{Carg}} \quad (11)$$

Em que POT é uma matriz possuindo todos os valores de potência por minuto em kW, $VE_{n_{PC}}$ é a potência máxima em que o VE simulado consegue carregar e T_{Part} é o tempo que o VE parte da estação após a recarga em minutos, que pode-se definir através da Equação 12.

$$T_{Part} = T_{IC} + T_{Carg} \quad (12)$$

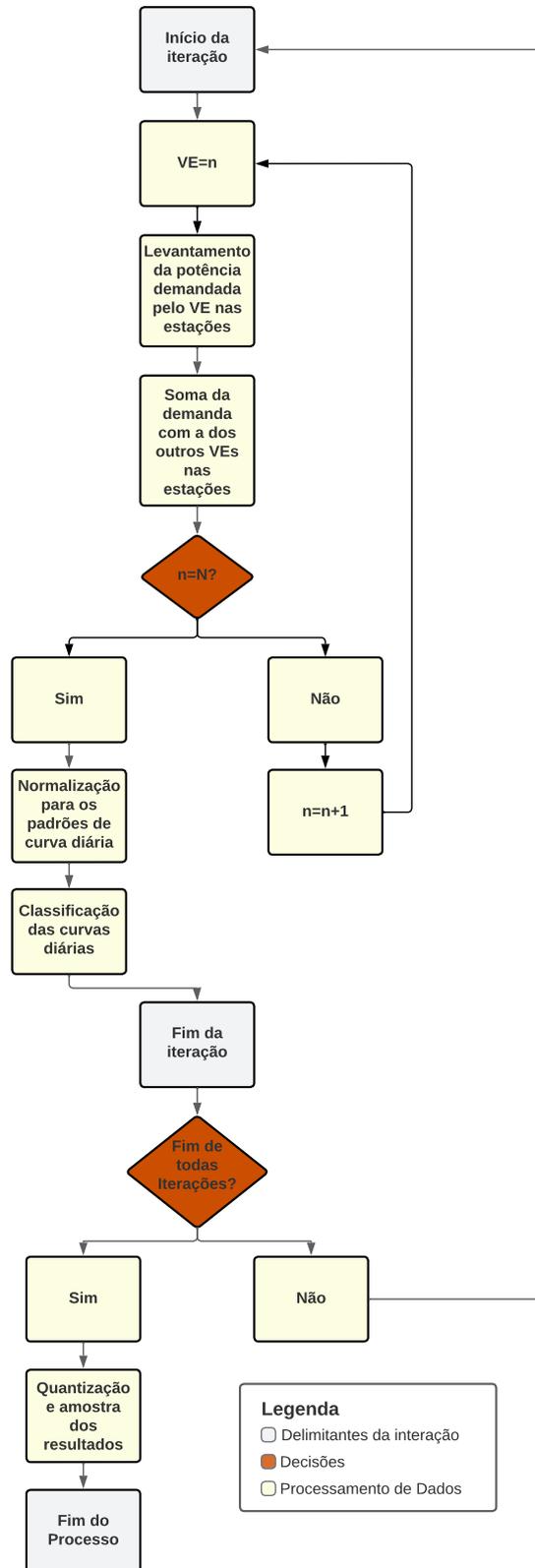
Em que T_{IC} representa o horário em que o veículo começou o seu processo de recarga em minutos. Denomina-se diferente do seu tempo de chegada à estação pois o mesmo pode demorar a se conectar no carregador caso haja ocorrência de filas. Observa-se que na Equação 11, nesta metodologia, supõe-se o carregamento enquanto linear ao longo do tempo.

Destaca-se que, após o processo de carregamento, o VE se insere de novo na malha rodoviária e repete o processo descrito até chegar em sua cidade destino. Com isso, tendo descrito o processo que passa cada VE, pode-se partir para a modelagem e normalização da curva de carga.

3.2.3 Modelagem da Curva de Carga

Com a demanda de potência definida para cada VE, também é necessário apresentar o processo de construção da curva de carga de cada estação. Para isso, pode-se dividir na etapa da modelagem da curva diária e na divisão por quantização. A Figura 13 apresenta o fluxograma da etapa de obtenção das curvas totais.

Figura 13 – Metodologia para obtenção e amostra da curva de carga.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se na Figura 13 que a etapa da curva diária está descrita de forma ge-

nérica, que escolheu-se apresentar assim afim de facilitar o entendimento do fluxograma. Essa etapa consiste na parametrização da curva em valores diários, em que se define da seguinte forma:

- Divisão de todos os 1440 minutos do dia em 96 faixas de 15 minutos, em que o valor de cada uma das faixas é definido pelo minuto de maior potência dentro de seus 15;
- Divisão de cada hora do dia em cada uma das suas 4 faixas de 15 minutos, em que o valor de cada hora é definido pela média de suas 4 faixas;

Destaca-se que essa normalização da curva de carga é realizada a partir dos padrões definidos pela ANEEL (ANEEL,2021).

A partir dessa parametrização, consegue-se modelar a curva de carga diária das estações a partir dos dados obtidos na variável *POT*. Além disso, pode-se analisar a variabilidade de carga em várias iterações do método.

O método dos quantis é aplicado para a análise dos resultados obtidos ao longo de *It* iterações do código. Isso é de grande importância devido a variabilidade estatística presente no SMC. Destaca-se que são escolhidos alguns valores para os quantis que podem apresentar características importantes a serem apresentadas.

Dentre esses valores, salienta-se a importância de analisar os quantis $Q = 0$, $Q = 0,5$ e $Q = 1$, pois demonstram o caso mínimo, a média e o caso máximo, respectivamente. Para maior visibilidade de padrões, pode-se escolher por apresentar quantis intermediários a esses, como $Q = 0,25$ e $Q = 0,75$ por exemplo.

Com isso, conclui-se a metodologia utilizada no trabalho. Adicionalmente, será realizada uma comparação com outros trabalhos do atual estado da arte para um maior entendimento do contexto de aplicação da metodologia.

3.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Em relação aos resultados esperados com esta metodologia, espera-se que seja possível a definição de curva de carga de *Y* estações de recarga em qualquer situação de transporte rodoviário. Entretanto, para se ter uma base qualitativa de resultados, é necessário observar diferenças entre a metodologia proposta neste trabalho em relação à outras disponíveis na literatura.

Ao analisar a metodologia presente em Knak Neto (2017), observa-se uma pequena área para comparação em relação à apresentada aqui. Isso é consequência dos cenários abrangidos, pois aquela apresenta estratégias para carregamento de VEs em situações residenciais de baixa potência.

Em relação à Gong, Cao e Zhao (2017), observa-se mudanças principalmente na parametrização dos veículos. Neste caso, todos os veículos possuem as mesmas características construtivas como potência da bateria e a taxa de descarregamento. Tendo

variação apenas na distância percorrida pelo VE e o seu estado de carga inicial. Assim, aqui apresenta-se uma menor variação de possíveis curvas de carga na estação causadas por cada veículo.

Além disso, por ser desenvolvida para o transporte intraurbano com o uso de inúmeros tipos de recarga, o seu resultado é dependente da estação analisada e, consequentemente, a sua dinâmica exclusiva. Dificultando assim a comparação direta, dado que a dinâmica de um ambiente interurbano é diferente da dinâmica de condução em transporte intraurbano. Isso se dá pelo fato de transporte intraurbano permitir a utilização de sequência de viagens, trazendo um grau de padronização para os cenários analisados.

Ao se comparar com a proposta desenvolvida em Da Silva *et al.* (2021), observa-se algumas principais diferenças, podendo-se destacar:

- A utilização de SMC em mais aspectos, como por exemplo na redução de autonomia causada pela ansiedade do condutor, estado de carga inicial, permanência na rodovia e o tempo de recarga;
- A parametrização da autonomia nominal dada pela montadora do VE, sem considerar as diferenças de ciclo de condução;

Desta forma, observa que a metodologia em questão apresenta uma melhor dinâmica para a representação da aleatoriedade condizente com dinâmicas de transporte rodoviário. Entretanto, também apresenta uma metodologia de autonomia que não representa sempre a autonomia do veículo sob condições ideais para transporte rodoviário, o que é importante, dado que isso é um fator relevante na autonomia do VE.

Ao comparar com o trabalho desenvolvido em Ivarsøy, Torsæter e Korpås (2020)) observa-se como principal diferença a definição de ciclos de condução, dado que muitos dos outros pontos são desenvolvidos de forma semelhante. Entretanto, neste trabalho também, observa-se a desconsideração do efeito de ciclos de condução na definição da autonomia nominal do VE. Fator importante na definição de autonomia nominal do VE e que, consequentemente, gera alterações nas dinâmicas de carregamento.

Assim, de forma geral, pode-se comparar o escopo geral de cada trabalho conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados Técnicos de VEs em relação ao ciclo de condução

Trabalhos	Simulação de Monte Carlo	Utilização em Rodovias	Determinação da SoC por distância percorrida	Ciclo de Condução
(KNAK NETO, 2017)	X			
(GONG; CAO; ZHAO, 2017)	X			
(DA SILVA <i>et al.</i> , 2021)	X	X	X	
(IVARSØY; TORSÆTER; KORPÅS, 2020)	X	X	X	

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se que, conforme apresentado na Tabela 4, dentre os trabalhos analisados

no atual estado de arte, apenas o desenvolvido neste apresenta certas características. Sendo elas o desenvolvimento do método de Monte Carlo, a viabilidade de aplicação em malhas rodoviárias, a determinação do estado de carga do VE conforme percorre o trajeto e o ciclo de condução.

Dessa forma, tendo apresentado a metodologia como um todo, em conjunto a realização de comparativas com outros estudos na área, destaca-se a importância da mesma no atual estado da arte. Dessarte, pode-se partir para a apresentação do estudo de caso desenvolvido, evidenciando a sua caracterização, a validação do método de Monte Carlo e a análise dos resultados obtidos.

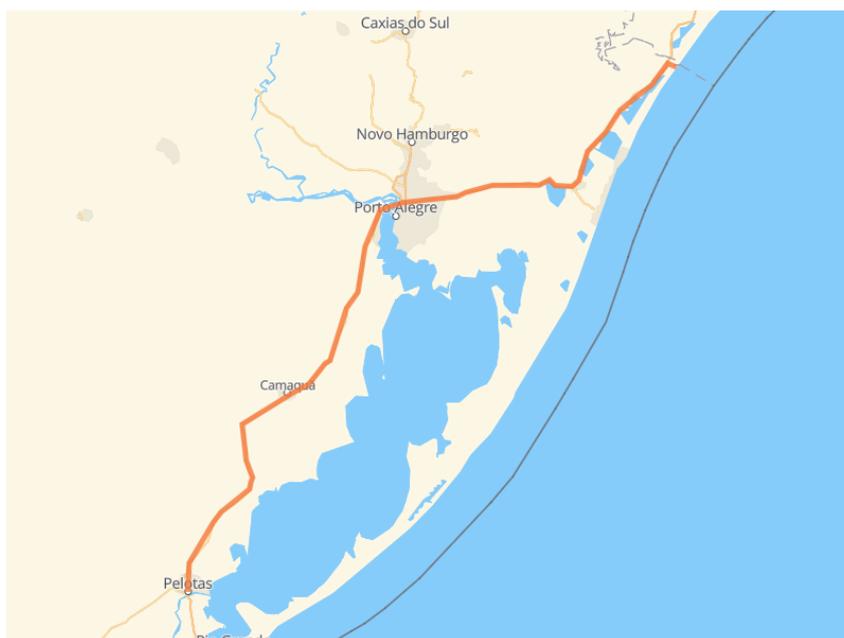
4 ESTUDO DE CASO

Nesta seção é abordado o estudo de caso que busca demonstrar a viabilização da metodologia apresentada. Desta forma, na mesma está presente a caracterização do estudo, uma análise para validar a utilização dos sorteios realizados com o método de Monte Carlo e uma apresentação da curva de carga, seguidos de considerações finais.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

O presente caso busca modelar a curva de carga de estações de recarga de VEs em uma rodovia real para analisar o comportamento do sistema. Desta forma, escolheu-se a rodovia BR-116 do trecho entre os municípios de Pelotas e Torres, conforme demonstrado na Figura 14.

Figura 14 – Mapa da rodovia analisada no estudo de caso.



Fonte: (MELHORES ROTAS, 2023).

No total o trecho analisado possui 15 municípios em um total de 435 km de rodovia. De acordo com o IBGE, todos os 15 somados possuem aproximadamente 5,2 milhões de habitantes (IBGE, 2020), o que demonstra um potencial grande de análise de impacto de VEs dado possível um aumento no *market share* de VEs na região.

A partir disso, pode-se analisar o impacto de um mercado de VEs para entender o comportamento das estações de recarga na malha rodoviária local. Desta forma, segue-se para a apresentação dos valores utilizados para o presente estudo de caso.

4.1.1 Entradas Unitárias

Nesta seção são abordadas as entradas unitárias utilizadas para o estudo de caso. Primeiro são apresentados os valores a serem utilizados para uma posterior explicação do porquê de cada valor. Os valores utilizados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados Unitários de Entrada Utilizados.

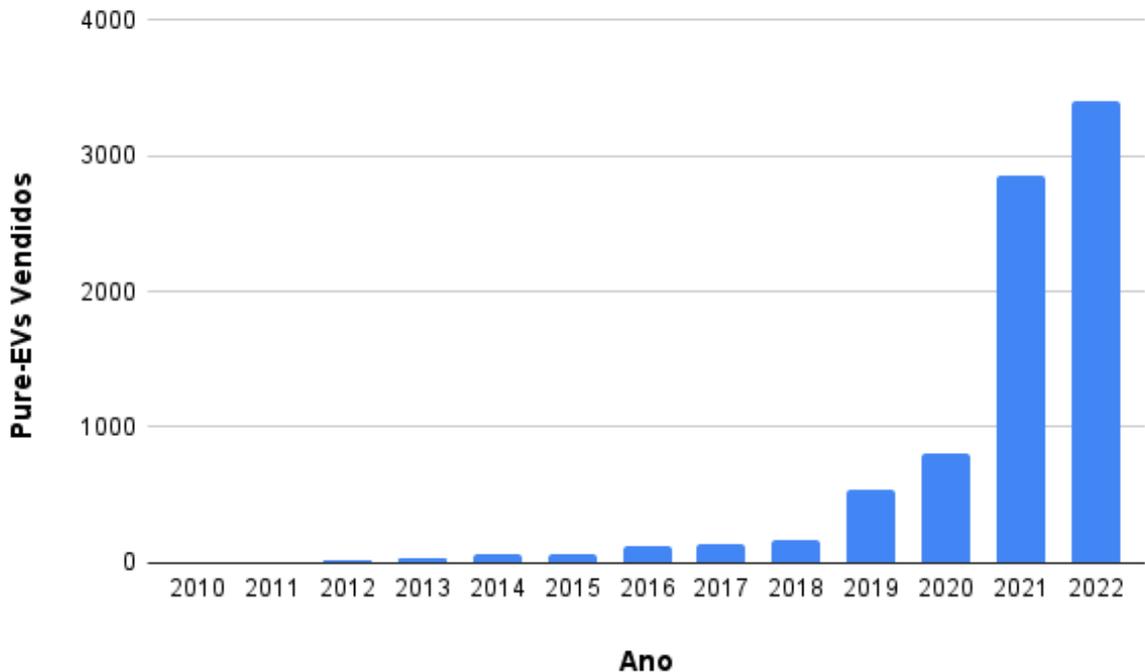
Variáveis	Valor	Unidade de Medida
N	926	Unidade
It	1000	Unidade
$\zeta_{WLTP-EPA}$	0,888	Decimal
$\zeta_{NEDC-EPA}$	0,616	Decimal
VE_{Vel}	128	km/h
$\delta_{P_{Max}}$	0,4	Decimal
$\delta_{P_{Min}}$	0,2	Decimal
Φ_C	0,25	Decimal
Φ_A	0,25	Decimal
Φ_{PNP}	0,25	Decimal

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se na Tabela 5 que o valor de parada δ_P possui um valor máximo e um valor mínimo, sendo utilizados para simularem padrões diferentes de recarga para cada VE simulado. Tendo apresentado os valores, o primeiro dado a ser analisado é o número de VEs, representado pela variável N , que é necessário realizar uma estimativa para o número de VEs que pode estar presente nessa região.

De acordo com a Associação Brasileira de Veículos Elétricos, o número de Pure-EVs vendidos no Brasil entre os anos de 2010 e 2022 foram 8231 (ABVE, 2022). O número de vendas ao longo dos anos está apresentado na Figura 16.

Figura 15 – Vendas de VEs por ano.



Fonte: (ABVE, 2022).

Como observado, pode-se obter os valores de 2022 em relação à vendas de VEs no Brasil. Entretanto, para o estudo de caso em questão busca-se obter os dados para 2023. Desta forma, apresenta-se uma projeção de caráter proporcional em relação às vendas realizadas até o mês de maio, que foram de 12269 Pure-EVs (ABVE,2023).

Assim, foi utilizada uma proporção com relação aos dados obtidos até maio para projetar o ano de 2023. Através dessa projeção, se obteve o valor de vendas de Pure-EVs de 29446 unidades. Totalizando assim uma estimativa de 37677 em território nacional.

Com este valor total de veículos, aplica-se uma proporcionalidade populacional da região em relação ao Brasil para se ter uma projeção do número de VEs. Desta forma, calcula-se uma proporção de 5,2 milhões de habitantes para um total de 211,8 milhões de habitantes (IGBE, 2020). Assim, obtém-se aproximadamente 926 VEs para a variável N como demonstrado na Tabela 5.

Para o valor de iterações, representado por It , foi-se realizado uma análise em que foram testados os valores de 10, 100, 1000 e 10000 para o método em questão. Os dois primeiros apresentaram uma dificuldade para a análise do estudo de caso, devido à instabilidade dos quantis. Em relação aos dois últimos valores, ambos apresentaram resultados satisfatórios e extremamente semelhantes, desta forma, optou-se pelo valor de $It = 1000$ para se reduzir o gasto computacional.

Para ambos os valores utilizados para $\zeta_{NEDC-EPA}$ e $\zeta_{NEDC-EPA}$ foram utilizados a partir do mesmo método apresentado em (LUCCA, 2021). Utilizando o Nissan Leaf, VE que

possui autonomia definida nos três ciclos. Desta forma, utiliza-se os valores apresentados conforme as Equações 3 e 4.

No que se concerne à velocidade dos VEs na rodovia, utiliza-se o valor de 128 km/h, dado que o modelo EPA possui essa velocidade como velocidade de pico durante o período de rodovia (CAPITAL ONE, 2022).

Em relação ao fator limitante para o carregamento do VE, é de interesse analisar a sua variabilidade. Isso se dá pelo fato de que a decisão é dependente do perfil do condutor. Desta forma, decidiu-se o valor $\delta_{P_{min}} = 0,2$ para evitar perfis de profundidade de descarga nas baterias dos VEs (SAUSEN, 2022), simulando assim cenários em que os condutores prezam pela preservação da vida útil do seu veículo.

Para o valor máximo do fator de parada, escolheu-se um valor que apresentasse uma grande variação em relação ao mínimo. Objetou-se isso no intuito de apresentar uma grande variedade nos perfis de condução, podendo existir alguns condutores mais conservadores e outros menos. Com isso, escolheu-se $\delta_{P_{max}} = 0,4$ para se obter uma variação em até 100% no perfil de cada condutor.

Para os valores de redução de autonomia de Φ_C , Φ_A e Φ_{PNP} foi-se denominado o valor de 0,25, para se observar uma diferença no comportamento das autonomies. O valor escolhido para Φ_A de acordo com o utilizado em Lucca (2021). As variáveis Φ_C e Φ_{PNP} foram escolhidos com o mesmo valor por simplificação.

Desta forma, foram tratadas todas as variáveis unitárias utilizadas no estudo de caso, restando apenas as variáveis utilizadas nas entradas matriciais do código. Podendo, posteriormente, analisar os resultados obtidos.

4.1.2 Entradas Matriciais

Nesta seção, são abordadas as entradas matriciais utilizadas para o estudo de caso. Neste caso, eles serão apresentados e posteriormente descritos. A primeira entrada matricial a ser analisada é a referente à entrada VE , que está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados referentes à matriz de entrada para os Veículos Elétricos.

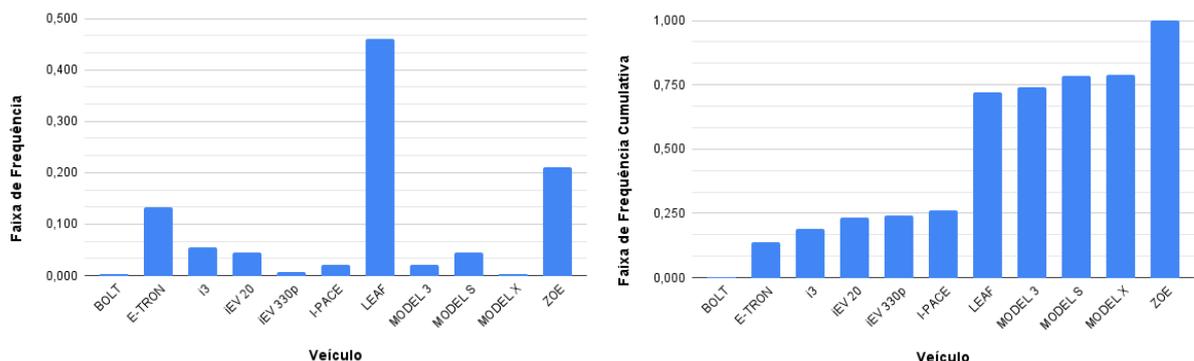
Modelo	Autonomia (km)	Ciclo	Taxa de Recarga (%/min)	Potência Máxima (kW)	Vendas	Faixa
Chevrolet BOLT	416	1 (EPA)	0,0110	53	1	0,000~0,003
Audi E-TRON	436	2 (WLTP)	0,0178	150	39	0,004~0,136
BMW i3x	335	2 (WLTP)	0,0222	150	16	0,137~0,190
JAC iEV 20	400	3 (NEDC)	0,0132	40	13	0,191~0,235
JAC iEV 330p	320	3 (NEDC)	0,0111	40	2	0,236~0,241
Jaguar I-PACE	470	2 (WLTP)	0,0178	100	6	0,242~0,262
Nissan Leaf	240	1 (EPA)	0,0229	100	135	0,263~0,721
Tesla Model 3	518	1 (EPA)	0,0363	200	6	0,722~0,741
Tesla Model 3	630	1 (EPA)	0,0250	200	13	0,742~0,786
Tesla Model 3	565	1 (EPA)	0,0250	200	1	0,787~0,789
Renault Zoe	300	2 (WLTP)	0,0143	46	62	0,790~1,000

Fonte: Adaptado de (ABVE, 2022; UCHARGE, 2023; LUGCA, 2021).

Observa-se na Tabela 6 a maior frequência na DCF referente ao Nissan Leaf, que possui o maior número de vendas no período (ABVE, 2022). Nota-se também que os veículos da Tesla possuem capacidade de carregamento acima de 200 kW (UCHARGE, 2023), porém escolheu-se delimitar à uma saturação de 200kW.

Partindo disso, pode-se apresentar a distribuição padrão e cumulativa de cada VE. Distribuição essa apresentada na Figura 16 em suas formas padrão e cumulativa.

Figura 16 – (a) Gráfico referente à Distribuição de Frequência dos Veículos Elétricos; (b) Gráfico referente à Distribuição Cumulativa de Frequência dos Veículos Elétricos.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se nas Figuras 16.(a) e 16.(b) a predominância dos veículos Nissan Leaf e Renault ZOE nas distribuições. Fato esse que se dá devido ao grande número de vendas, como pode ser observado na Tabela 6.

Com isso, pode-se partir para a análise da próxima entrada matricial. Assim, prossegue-se para os dados das cidades, que podem ser visualizados na Tabela 7.

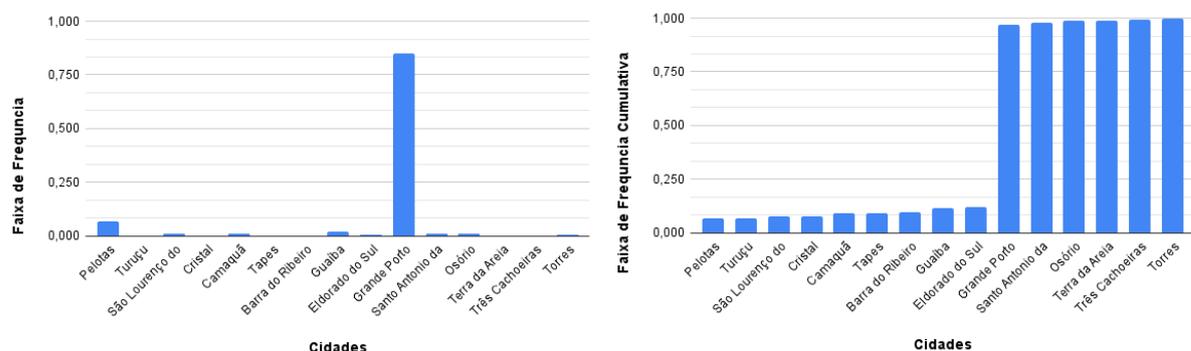
Tabela 7 – Dados referentes à matriz de entrada para as Cidades.

Cidade	Distância (km)	População (mil)	Faixa
Pelotas	0	343	0,000~0,065
Turuçu	44	3	0,066~0,067
São Lourenço do Sul	62	43	0,068~0,075
Cristal	100	8	0,076~0,077
Camaquã	129	66	0,078~0,089
Tapes	164	17	0,089~0,093
Barra do Ribeiro	207	13	0,094~0,095
Guaíba	228	98	0,096~0,114
Eldorado do Sul	241	42	0,115~0,122
Grande Porto Alegre	252	4400	0,123~0,971
Santo Antonio da Patrulha	321	43	0,972~0,979
Osório	348	46	0,980~0,988
Terra de Areia	389	11	0,989~0,990
Três Cachoeiras	411	11	0,991~0,992
Torres	435	39	0,993~1,000

Fonte: Adaptado de (IBGE, 2020).

Observa-se na Tabela 7 a proeminência de Grande Porto Alegre em relação aos outros municípios, isso se dá devido à grande diferença de população entre as cidades. Esse fator é de grande impacto na realização do SMC. Para evidenciar esse comportamento, apresenta-se a DCF relacionada ao sorteio das cidades na Figura 17.

Figura 17 – (a) Gráfico referente à Distribuição de Frequência das Cidades; (b) Gráfico referente à Distribuição Cumulativa de Frequência das Cidades.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se nas Figuras 17.(a) e 17.(b) a grande proeminência de Grande Porto Alegre nos casos, tendo também o município de Pelotas com um grau de participação.

Como já esperado, a partir da Tabela 7.

Adicionalmente, para completar os pontos existentes na rodovia, detalha-se as estações presentes no sistema. Desta forma, a Tabela 8 apresenta os dados concernente às estações de recarga rápida.

Tabela 8 – Dados referentes à matriz de entrada para as Estações de Recarga.

Distância (km)	Quantidade de Carregadores
50	4
100	4
150	4
200	4
250	4
300	4
350	4
400	4

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Nota-se na Tabela 8 que todas estão distanciadas 50 km entre si, isso foi escolhido de uma forma à facilitar a análise. Destaca-se a escolha de 4 carregadores por estação, esse valor foi escolhido arbitrariamente. O valor da potência de carregamento das estações não foi definido pois este depende apenas da potência máxima de carregamento de cada VE.

Agora, com os pontos D_x e D_y definidos para o estudo de caso, é necessário entender como estes se apresentam na rodovia. A Figura 18 apresenta a estrutura da rodovia com seus pontos definidos.

Figura 18 – Representação da rodovia analisada com os pontos alocados.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Tendo definido a rodovia que vai ser analisada e os VE, parte-se para a análise da entrada matricial relacionada aos horários de saída de cada veículo. Esses dados foram obtidos através do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, que tem medições do fluxo de veículos em um ponto na rota analisada. Os dados estão apresentados na Tabela 9.

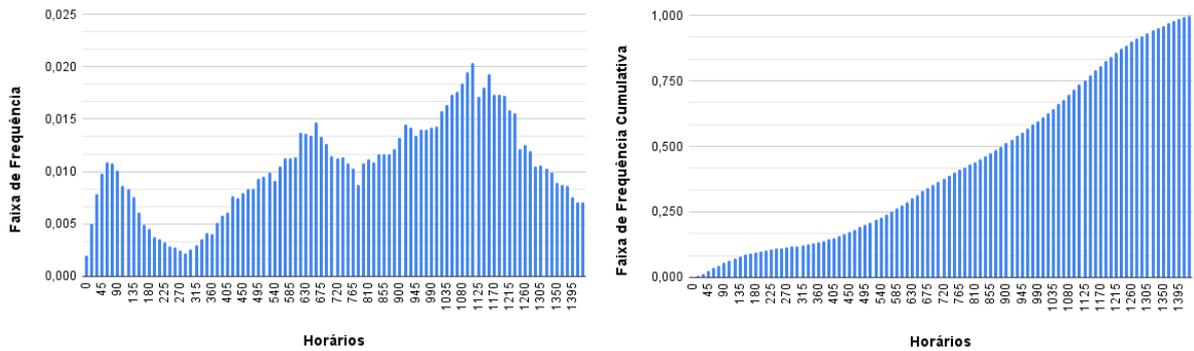
Tabela 9 – Dados referentes à matriz de entrada para os Horários de Partida.

Tempo (min)	Fluxo	Faixa	Tempo (min)	Fluxo	Faixa	Tempo (min)	Fluxo	Faixa
0	106	0,000~0,002	480	437	0,184~0,192	960	737	0,556~0,569
15	263	0,003~0,007	495	489	0,193~0,201	975	735	0,570~0,583
30	414	0,008~0,015	510	498	0,202~0,210	990	748	0,584~0,597
45	513	0,016~0,025	525	521	0,211~0,220	1005	749	0,598~0,611
60	573	0,026~0,036	540	479	0,221~0,229	1020	826	0,612~0,627
75	565	0,037~0,046	555	550	0,230~0,240	1035	858	0,628~0,643
90	528	0,047~0,056	570	592	0,241~0,251	1050	909	0,644~0,661
105	453	0,057~0,065	585	590	0,252~0,262	1065	924	0,662~0,678
120	437	0,066~0,073	600	599	0,263~0,274	1080	968	0,679~0,697
135	397	0,074~0,081	615	720	0,275~0,288	1095	1022	0,698~0,716
150	319	0,082~0,087	630	713	0,289~0,301	1110	1068	0,717~0,736
165	258	0,088~0,092	645	704	0,302~0,315	1125	902	0,737~0,754
180	236	0,093~0,096	660	770	0,316~0,329	1140	945	0,755~0,772
195	195	0,097~0,100	675	698	0,330~0,343	1155	1011	0,773~0,791
210	186	0,101~0,104	690	663	0,344~0,355	1170	908	0,792~0,808
225	172	0,105~0,107	705	601	0,356~0,367	1185	912	0,809~0,826
240	149	0,108~0,110	720	592	0,368~0,378	1200	903	0,827~0,843
255	144	0,111~0,113	735	597	0,379~0,389	1215	831	0,844~0,859
270	133	0,114~0,115	750	564	0,390~0,400	1230	819	0,860~0,874
285	116	0,116~0,117	765	542	0,401~0,410	1245	637	0,875~0,886
300	136	0,118~0,120	780	461	0,411~0,419	1260	657	0,887~0,899
315	158	0,121~0,123	795	565	0,420~0,430	1275	627	0,900~0,911
330	188	0,121~0,126	810	585	0,431~0,441	1290	549	0,912~0,921
345	218	0,127~0,131	825	573	0,442~0,452	1305	557	0,922~0,932
360	214	0,132~0,135	840	610	0,453~0,464	1320	543	0,933~0,942
375	271	0,136~0,140	855	613	0,465~0,475	1335	518	0,943~0,952
390	303	0,141~0,146	870	615	0,476~0,487	1350	467	0,953~0,961
405	320	0,147~0,152	885	640	0,488~0,499	1365	459	0,962~0,970
420	402	0,153~0,159	900	695	0,500~0,512	1380	451	0,971~0,978
435	392	0,160~0,167	915	760	0,513~0,527	1395	395	0,979~0,986
450	419	0,168~0,175	930	746	0,528~0,541	1410	373	0,987~0,993
465	440	0,176~0,183	945	706	0,542~0,555	1425	369	0,994~1,000

Fonte: Adaptado de (DNIT, 2022).

Observa-se na Tabela 9 um maior fluxo de veículos durante o horário da tarde. Como forma de elucidar melhor esse comportamento, apresenta-se na Figura 19 também gráficos com os modelos de distribuição padrão e cumulativa.

Figura 19 – (a) Gráfico referente à Distribuição de Frequência dos Horários; (b) Gráfico referente à Distribuição Cumulativa de Frequência dos Horários.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

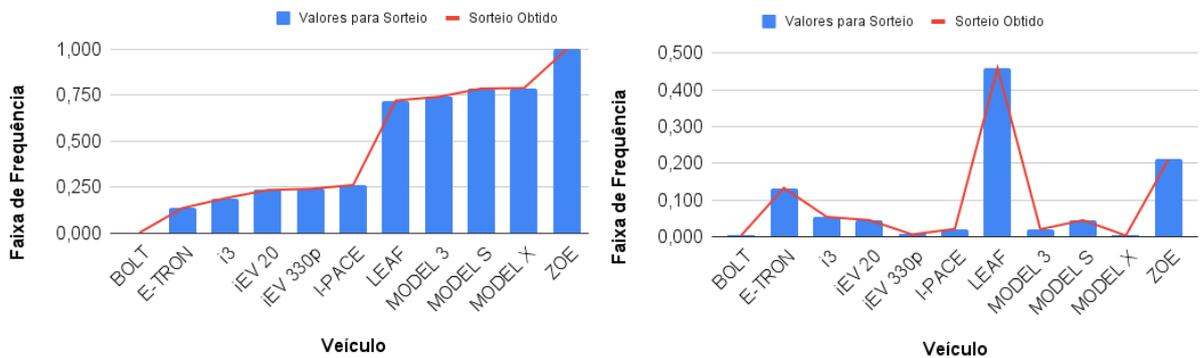
Nota-se na Figura 19 um aumento nas horas mais tardes do dia, comportamento tradicional na dinâmica da rodovia. É importante notar que foram utilizados dados em ambos os sentidos da rodovia, já que a própria metodologia permite um fluxo bidirecional.

Com isso, finalizou-se a caracterização do estudo e pode-se partir para a validação dos resultados obtidos através do SMC para apresentar a viabilidade do método.

4.2 VALIDAÇÃO DO MONTE CARLO

Para realizar a validação do sorteio de cada etapa do SMC, é comparado o resultado obtido através das simulações e a distribuição obtida com os dados fornecidos. Primeiramente, são comparadas as distribuições obtidas com o VE na entrada e nas simulações, sendo o resultado obtido demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – (a) Análise das faixas de distribuição de cada Veículo Elétrico; (b) Análise das faixas de distribuição cumulativa de cada Veículo Elétrico.



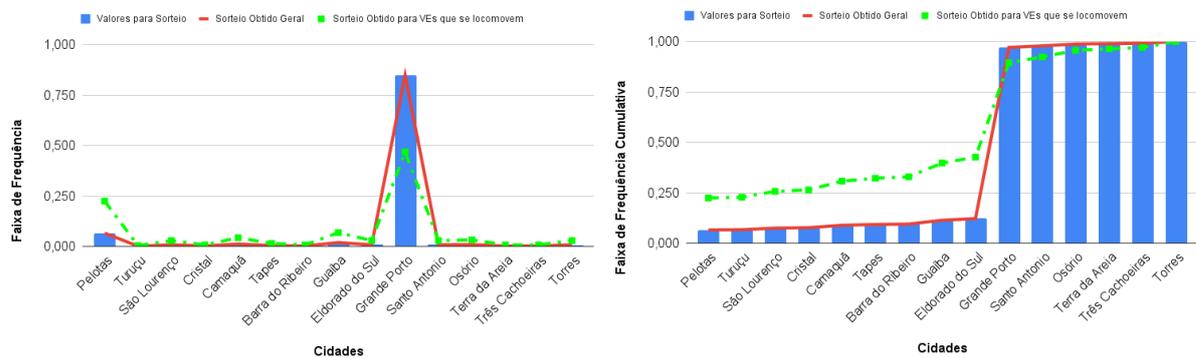
Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se na Figura 20 que os valores apresentam semelhanças no número de

casos, demonstrando que o sorteio apresenta o resultado esperado para a simulação dos veículos.

Tendo confirmado esta parte do método, compara-se os valores de entrada das cidades em relação às simulações, tanto para as de partida quanto para as de chegada nas situações totais e nas situações em que o veículo se locomove. Dessarte, a Figura 21 apresenta a diferença entre os dados de entrada e os simulados para as cidades de partida de cada VE.

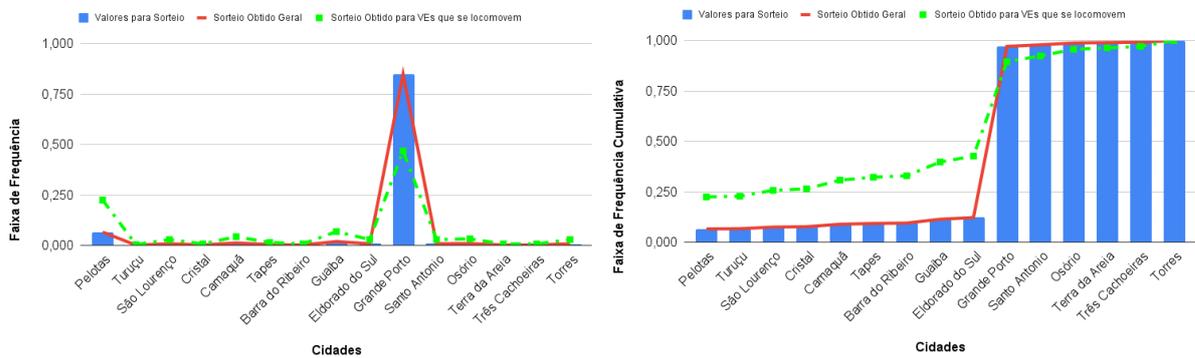
Figura 21 – (a) Análise das faixas de distribuição de cada Cidade de Partida; (b) Análise das faixas de distribuição cumulativa de cada Cidade de Partida.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se nas Figuras 21.(a) e 21.(a) uma grande semelhança em relação à curva teórica nos casos gerais. Entretanto, tratando-se dos casos em que ocorre locomoção do VE na rodovia existe uma diferença. Isso se dá pela eliminação de casos semelhantes, evitando assim combinações Grande Porto Alegre - Grande Porto Alegre e Pelotas - Pelotas, que compunham cerca de 75% da probabilidade total, causando assim um aumento percentual dos casos das cidades menores. O mesmo comportamento é observado na Figura 22 para as cidades de chegada.

Figura 22 – (a) Análise das faixas de distribuição de cada Cidade de Chegada; (b) Análise das faixas de distribuição cumulativa de cada Cidade de Chegada.

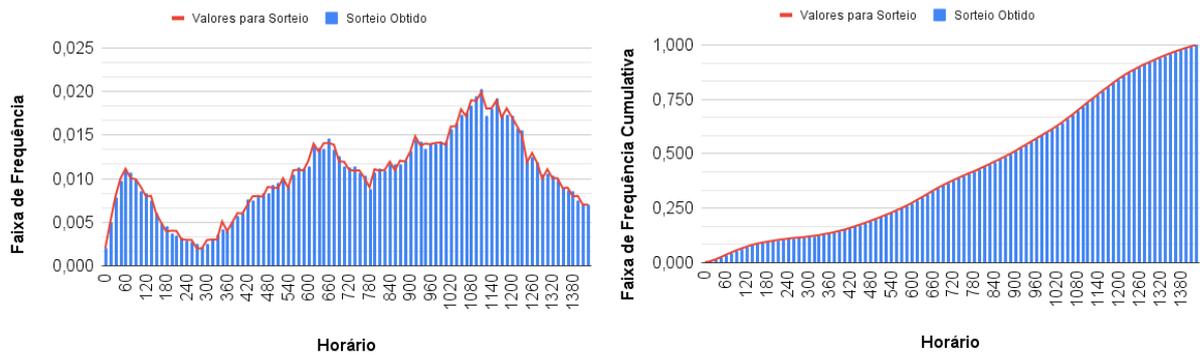


Fonte: Próprio Autor, 2023.

Pode-se observar na Figura 22 o mesmo comportamento da Figura 21. Com isso, entende-se o comportamento relativo da rodovia em relação às cidades, tanto de partida quanto de chegada.

Assim, pode-se partir para a análise do resultado obtido nos sorteios relacionado com o horário de partida dos VEs. Apresentado na Figura 23.

Figura 23 – (a) Análise das faixas de distribuição de cada Horário de Partida; (b) Análise das faixas de distribuição cumulativa de cada Horário de Partida.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

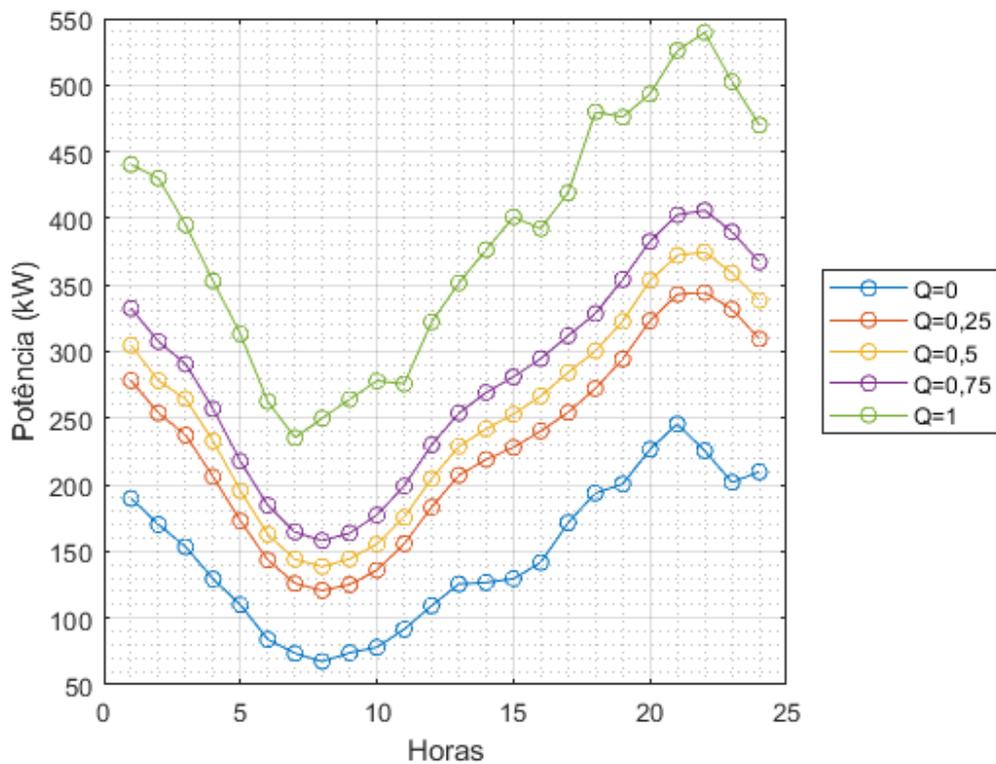
Pode-se notar na Figura 23 uma maior variabilidade entre os resultados teóricos e práticos, isso se dá pela menor proporção entre o número de sorteios e os resultados possíveis. Fazendo com que não tenha um valor grande o suficiente para o sorteio apresentar um comportamento 100% idêntico.

Desta forma, considera-se os resultados obtidos através da SMC condizentes com que se esperava deles na teoria. Explicando possíveis divergências que poderiam ocorrer no método. Assim, pode-se partir para a apresentação das curvas de carga e a análise de seus resultados.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, é abordado o resultado obtido de 2 estações de recarga, além de um caso geral com todas agrupadas, e os seus respectivos quantis. Adicionalmente, será realizada uma análise do porquê dos resultados obtidos. O primeiro resultado a ser demonstrado é o somatório da curva diária de todas as estações de recarga, que está apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Resultado obtido para todas as estações juntas.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Nota-se na Figura 24 que as estações de recarga apresentam um perfil de carga significativo em um sistema de distribuição. Isso pode ser observado na demanda de pico, podendo demandar mais do que 400 kW coletivamente do sistema de distribuição em horário de pico. A Tabela 10 apresenta alguns dados sobre o sistema envolvendo todas as estações.

Tabela 10 – Dados de demanda de todas as estações juntas em quantis

Quantil	Demanda Média (kW)	Demanda Máxima (kW)
Q=0	147,09	245,7
Q=0,25	229,44	344,40
Q=0,5	254,06	374,74
Q=0,75	280,22	405,98
Q=1	385,32	539,52

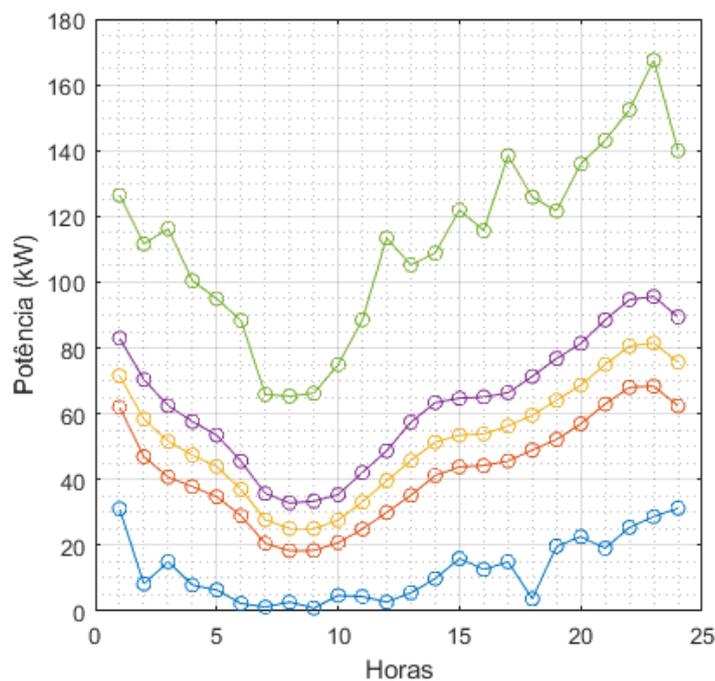
Fonte: Próprio Autor, 2023.

Pode-se observar na Tabela 10 uma demanda média acima de 200kW em mais de 75% das iterações, dado que o valor de demanda média em $Q = 0,25$ é maior do que essa faixa. Também é importante notar os valores de pico, que são altos relativamente a um sistema de distribuição, podendo causar múltiplos problemas como sobrecarga em transformadores e subtensão no sistema.

Desta forma, tendo analisado o sistema geral englobando todas as estações de recarga presentes na rodovia, pode-se partir para a análise individualizada de algumas estações. Com isso, busca-se apresentar alguns comportamentos específicos de potência relacionados com o padrão de mobilidade da rodovia.

Desta forma, pode-se partir para a análise concernente à estação de recarga 4. Tendo a sua carga apresentada na Figura 25.

Figura 25 – Resultado obtido para a Estação de Recarga 4.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Pode-se observar na Figura 25 um maior valor de potência durante a noite, assim como nos casos anteriores. Isso é uma questão importante pois ajuda a padronizar possíveis manipulações de carga pela concessionária de energia no intuito de evitar sobrecarga em transformadores. Para um melhor entendimento das dinâmicas, foram tabelados os valores de demanda média, máxima e total de cada quantil na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados de demanda da estação de recarga 4.

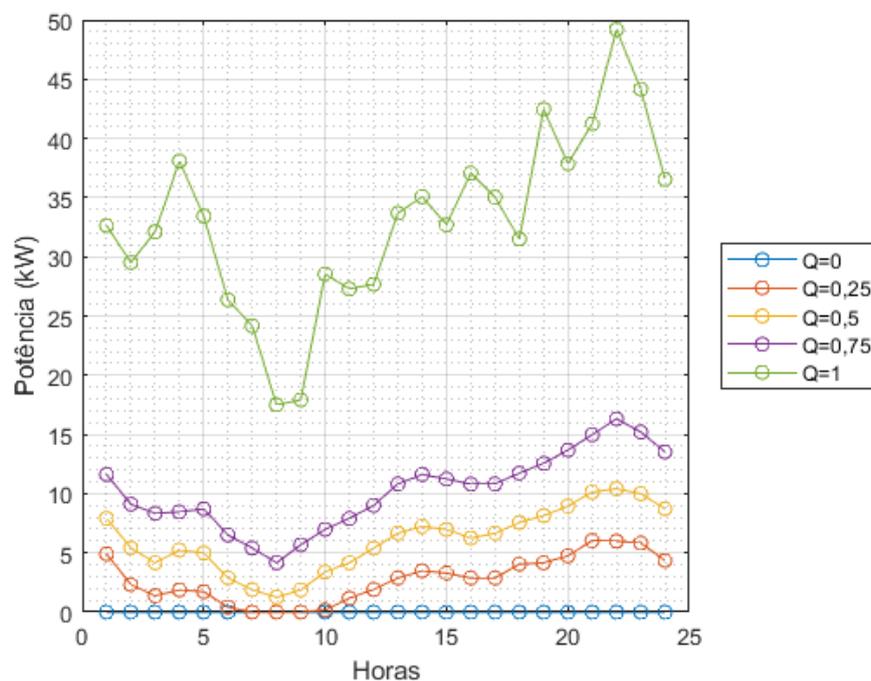
Quantil	Demanda Média (kW)	Demanda Máxima (kW)
Q=0	12,41	31,28
Q=0,25	42,27	68,39
Q=0,5	52,26	81,47
Q=0,75	63,16	95,65
Q=1	112,05	167,48

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Pode-se observar na Tabela 11 um valor de potência de pico maior que 95 kW em 25% dos casos. Um valor significativo a ser considerado por concessionárias durante os horários noturnos. Destaca-se também que, dentre as estações, esta é a que mais demanda potência do sistema.

Tendo analisado esta estação, analisa-se a estação de recarga 7. A sua curva de demanda pode ser observada na Figura 26.

Figura 26 – Resultado obtido para o Estação de Recarga 7.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Observa-se na Figura 26 que o quantil $Q = 0$ apresenta valores nulos de potência em todos os horários do dia, que apresenta uma clara mudança na dinâmica em relação à Figura 25. Isso se dá pela mudança de padrão de mobilidade na região da rodovia em que está situada cada uma dessas estações. Para apresentar melhor os dados da estação 7, apresenta-se a Tabela 12.

Tabela 12 – Dados de demanda da estação de recarga 7.

Quantil	Demanda Média (kW)	Demanda Máxima (kW)
Q=0	0	0
Q=0,25	2,77	6,04
Q=0,5	6,10	10,42
Q=0,75	10,22	16,32
Q=1	32,99	49,2

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Nota-se na Tabela 12 que em 75% dos casos a demanda média foi de 10 kW. O que apresenta um baixo fluxo de VEs nesta estação de recarga na maioria das iterações. Destaca-se também que essa foi a estação que teve os menores valores de potência em todos os quantis, o que significa que está em um trecho da rodovia com menor circulação de VEs.

Com isso, pode-se analisar que as estações de recarga possuem seu comportamento de demanda relacionado com o padrão de mobilidade. Como pode ser visualizado pela grande influência de Grande Porto Alegre nos estudos de caso, que basicamente classifica as estações em dois grupos. Sendo essas as das estações antes de Porto Alegre, com uma maior concentração de carga e as estações depois com uma concentração menor.

Dessa forma, nota-se a grande influência das cidades e, em última instância do padrão de mobilidade, tornando inviável a criação de uma curva típica para estações de recarga e, conseqüentemente, viabilizando apenas análises com o perfil individualizado de cada caso estudado.

Além disso, destaca-se a grande disparidade que pode haver em estações, também como a sua consideração na operação do sistema de distribuição, dado que podem demandar níveis significativos de potência em diferentes horários do dia.

Assim, observa-se que a metodologia apresenta características presentes em outros trabalhos do atual estado de arte. Dessarte, considera-se os resultados obtidos conidentes com o que se espera, validando assim a utilização da metodologia em questão.

5 CONCLUSÃO

Nesta seção, aborda-se algumas das considerações finais obtidas sobre o trabalho, retratando questões sobre o método utilizado. Posteriormente, apresenta-se também algumas opções de aprimoramento para o trabalho desenvolvido.

5.1 ANÁLISE SOBRE O MÉTODO

Dessarte, observa-se que a metodologia em questão apresentou funcionalidade e que apresenta dados condizentes com o esperado, dado que os seus resultados dependiam diretamente do padrão de mobilidade apresentado na rodovia. Demonstrando que o equacionamento desenvolvido está conforme o atual estado de arte.

Tratando-se da metodologia desenvolvida neste trabalho, destaca-se o fato da metodologia em questão permitir análises com vários fatores logísticos e técnicos. Entretanto, como o presente trabalho buscou contemplar a curva de carga diária, esses outros fatores não foram analisados.

Desta forma, nota-se que a metodologia foi capaz de modelar VEs conforme suas características construtivas como a sua autonomia, taxa de carregamento, potência de carregamento. Adicionalmente realizou-se uma análise sobre os ciclos de condução existentes, em que se escolheu o EPA, sendo o mais condizente com a dinâmica rodoviária, além de utilizar trabalhos do atual estado da arte para conversão de autonomia.

Analisou-se também a importância da projeção de carga para o funcionamento otimizado do sistema de distribuição. Apresentando possíveis metodologias para se realizar levantamento de carga, destacando a importância do modelo *Top-Down* para o modelo desenvolvido no trabalho.

Além disso, observa-se a facilidade de aplicação da metodologia em questão, dependendo apenas de dados de montadoras e sociodemográfico. Com isso, observa-se que esta metodologia é abrangente para casos com poucos histórico de dados, fornecendo uma grande base de dados.

Adicionalmente, destaca-se a utilização da Simulação de Monte Carlo como método de sorteio. Método esse que possui características próprias como a utilização das faixas de frequência como única condição do sorteio.

Dessa forma, observa-se que, apesar de ter algumas delimitações e características próprias, a metodologia aqui desenvolvida é capaz de apresentar resultados condizentes com o atual estado de arte. Entretanto, existem certas características que podem passar por processos de aprimoramento. Diante disso, são apresentadas algumas áreas de aprimoramento para a metodologia desenvolvida.

5.2 ÁREAS DE APRIMORAMENTO

Dentre os possíveis pontos de aprimoramento, destacam-se:

- **Troca do método de sorteio:** Neste ponto, destaca-se a mudança para o Método de Poisson, que pode apresentar resultados mais condizentes com as dinâmicas exibidas em questões de eletromobilidade;
- **Cálculo de eficiência e fator de potência:** Adicionar no método análises desses fatores para uma maior gama de resultados possíveis que podem ser retirados;
- **Troca da metodologia de parada de parada de cada VE:** Troca da metodologia de parada dos VEs nas estações para apresentar diferentes padrões de mobilidade em condutores na rodovia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 16567/2020 - Veículos rodoviários híbridos elétricos leves - Medição de emissão de escapamento e consumo de combustível e energia - Métodos de ensaio.** Agência Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2020;

ABREU, Thays *et al.* **Residential electric load curve profile based on fuzzy systems.** 2015. 2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America, ISGT LATAM 2015, 591–596. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2015.7381221>. Acesso em: 14 nov. 2022;

ABVE. **BEVs puxam crescimento de eletrificados no semestre.** 2022. Disponível em: <http://www.abve.org.br/bevs-puxam-aumento-de-eletrificados-no-semester/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

ABVE. **Confira os eletrificados mais vendidos em 2022.** 2022. Disponível em: <http://www.abve.org.br/veja-os-eletrificados-mais-vendidos-em-2022/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

ABVE. **50% das vendas de veículos eletrificados já são plug-in.** 2023. Disponível em: <http://www.abve.org.br/eletrificados-crescem-51-no-1o-quadrimestre/>, Acesso em: 20 jun. 2023.

AHMAD, Fukan; KHALID; Mohd; PANIGRAHI, Bijaya Ketan. **An enhanced approach to optimally place the solar powered electric vehicle charging station in distribution network.** 2021. Journal of Energy Storage, 42(August), 103090. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103090>. Acesso em: 29 out. 2022;

ALATISE, Olayiwola *et al.* **Expanding EV Charging Capacity in Distribution Networks: A Case Study for Charging EVs at Work.** 2021. September, 2945–2949. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/icp.2021.1919>. Acesso em: 05 jan. 2023;

ANEEL. **PRODIST - Módulo 1.** Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL, 2021;

ANEEL. **Qualidade de Produto - ANEEL.** 2016. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/qualidade-do-produto>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 1000.** 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/c edoc/ren20211000.html>. Acesso em: 22 jul. 2023.

CAPITAL ONE. **How Do EPA Highway Mileage Ratings Work?** 2022. Disponível em: <https://www.capitalone.com/cars/learn/finding-the-right-car/how-do-epa-highway-mileage-ratings-work/1731#:~:text=The%20highway%20test%20is%20combined,top%20speed%20of%2080%20mph>). Acesso em: 20 jun. 2023.

DA SILVA, Leonardo *et al.* **Proposal of a load curve modeling applied to highway EV Fast charging stations.** 2021. 2021 56th International Universities Power Engineering Conference: Powering Net Zero Emissions, UPEC 2021 - Proceedings, 1–6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/UPEC50034.2021.9548220>. Acesso em: 10 jan. 2023;

DAS, Himadry Shekhar *et al.* **Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review.** 2020. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 120). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109618>. Acesso em: 29 out. 2022;

DELGADO, F. *et al.* **Caderno FGV Energia: Carros Elétricos.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2017.

DENTON, Tom. **Electric and Hybrid Vehicles.** 1. ed. New York, NY: Routledge, 2016;

DNIT. **Confira os eletrificados mais vendidos em 2022.** 2022. Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/ContagemContinua>. Acesso em: 20 jun. 2023.

EPA. **Detailed Test Information.** 2022. Disponível em: https://www.fueleconomy.gov/feg/fe_test_schedules.shtml. Acesso em: 18 jan. 2023.

EPA. **Global Greenhouse Gas Emissions Data.** 2014. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>. Acesso em: 09 jan. 2023.

GONG, Lily; CAO, Wu; ZHAO, Jianfeng. **Load modeling method for EV charging stations based on trip chain.** 2017. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/EI2.2017.8245572>. Acesso em: 14 nov. 2022;

HARDMAN, Scott *et al.* **A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure.** 2018. In Transportation Research Part D: Transport and Environment (Vol. 62, pp. 508–523). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.04.002>. Acesso em: 29 out. 2022;

IBGE. **População.** 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao.html>

IEA. **Global EV Outlook 2022.** Agência Internacional de Energia - IEA. 2022;

INSIDE-EVs. **Nova regra para autonomia de carros elétricos no Brasil "não faz sentido".** 2023. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/633369/inmetro-autonomia-carros-eletricos-brasil/>

IVARSØY, Eirik; TORSÆTER, Bendyk Nybakk; KORPÅS, Magnus. **Stochastic load modeling of high-power electric vehicle charging - A norwegian case study.** 2020. SEST

2020 - 3rd International Conference on Smart Energy Systems and Technologies. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SEST48500.2020.9203102>. Acesso em: 10 jan. 2023;

KNAK NETO, Nelson. **Metodologias para modelagem de cargas de consumidores de baixa tensão considerando a integração da resposta da demanda, geração distribuída e veículos elétricos**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017;

LUCCA, Tiago Guterres. **Alocação Ótima de Estações de Recargas Rápidas em Rodovias Considerando Critérios de Diversas Naturezas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021;

MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2020;

MATHWORKS. **MATLAB Solutions**. 2023. Disponível em: https://www.mathworks.com/solutions.html?s_tid=gn_sol. Acesso em: 20 jun. 2023;

MELHORES ROTAS. **Distância entre Torres e Pelotas**. 2023. Disponível em: <https://www.melhoresrotas.com/distancia/torres-rs-br/pelotas-rs-br/>. Acesso em: 20 jun. 2023;

OLIVEIRA, Taís Tavares de. **Estudo de Distorção Harmônica em Redes de Distribuição de Baixa Tensão com Sistemas Fotovoltaicos e Veículos Elétricos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2019;

PAULA, Renato Ricardo de. **Método de Monte Carlo e Aplicações**. 2014. Dissertação (Graduação em Matemática com Ênfase em Matemática Computacional) - Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, 2014;

PEVEC, Dario *et al.* **Electric vehicle range anxiety: An obstacle for the personal transportation (r)evolution?** 2019. 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech 2019, i. Disponível em: <https://doi.org/10.23919/SpliTech.2019.8783178>. Acesso em: 30 out. 2022;

PROMOB-E. **Mobilidade elétrica padrões e regulamentação no brasil**. 2017. Disponível em: <http://www.promobe.com.br/wp-content/uploads/2017/11/Raul-Beck-CPqD-Fórum-Brasil-Alemanha-de-Mobilidade-Elétrica-19.10.2017.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2023.

RAVI, Sai Sudharshan; AZIZ, Muhammad. **Utilization of Electric Vehicles for Vehicle-to-Grid Services: Progress and Perspectives**. 2022. *Energies*, 15(2). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15020589>. Acesso em: 04 jan. 2023;

SANGUESA, Julio A. *et al.* **A review on electric vehicles: Technologies and challenges**.

2018. *Smart Cities*, 4(1), 372–404. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/smartsities4010022>. Acesso em: 29 out. 2022;

SAUSEN, Jordan Passinato. **Análise do carregamento de veículos elétricos na curva de carga do transformador de distribuição**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017;

SAUSEN, Jordan Passinato. **Estratégia de Gerenciamento Energético Consciente da Degradação de Baterias de Veículos Elétricos em Estacionamentos Inteligentes**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022;

SEEG. **Análise das emissões brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil**. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa - SEEG. 2021;

UCHARGE. **Informação de Veículos Elétricos**. 2023. Disponível em: https://www.ucharge.pt/pt_pt/centro-de-conhecimento/veiculos-por-marca/. Acesso em: 20 jun. 2023;

ANEXO A – DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

Neste anexo é retratado o código desenvolvido como intérprete para executar a metodologia apresentada. Primeiro serão retratadas as entradas para o código, depois será retratada a atuação do código rodando as suas iterações. Por fim, será apresentado o que o código fornece como saída para análise de resultados.

A.1 ENTRADAS

Nesta seção são apresentadas as entradas necessárias para o intérprete da metodologia, elas que vão definir o caso que será analisado através da metodologia. Elas são divididas em dois grupos, sendo eles o grupo das entradas unitárias e o grupo das entradas matriciais.

A.1.1 Entradas Unitárias

As entradas unitárias são utilizadas para controlar variáveis estáticas ao longo do código, sendo elas:

- **N_VE**: regula o número total de VEs utilizados em cada realização do código;
- **IT**: valor que representa quantas iterações do código serão realizadas;
- **VE_VEL**: o valor da velocidade definida para os VEs no código;
- **WLTP2EPA**: a taxa definida por $\zeta_{WLTP-EPA}$, que apresenta a conversão de autonomias definidas em WLTP para EPA;
- **NEDC2EPA**: a taxa definida por $\zeta_{NEDC-EPA}$, que apresenta a conversão de autonomias definidas em NEDC para EPA;
- **ALEATORIOMIN**: valor mínimo para parada de VE em uma estação de recarga;
- **ALEATORIOMAX**: valor máximo para parada e VE em uma estação de recarga;
- **PHI_PNP**: fator redutivo de autonomia relacionado à paradas não programadas;
- **PHI_C**: fator redutivo de autonomia relacionado a fatores climáticos;
- **PHI_A**: fator redutivo de autonomia relacionado à ansiedade do condutor.

Nota-se que, no caso do programa desenvolvido como intérprete da metodologia, o valor de δ_P como variante entre dois intervalos. Foi-se optada por essa variabilidade no fator limitante pois o perfil de cada condutor é variante no que se concerne à escolha de parar para recarregar seu veículo.

A.1.2 Entradas Matriciais

As entradas matriciais são entradas que possuem vários elementos unidos em uma única variável. Utiliza-se variáveis assim para facilitar a utilização da SMC no código. A primeira delas é a variável VE , descrita conforme a Equação 13.

$$VE = \begin{bmatrix} VE_AUT_1 & VE_CIC_1 & VE_TAX_1 & VE_CPOT_1 & VE_SMC_1 \\ VE_AUT_2 & VE_CIC_2 & VE_TAX_2 & VE_CPOT_2 & VE_SMC_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ VE_AUT_n & VE_CIC_n & VE_TAX_n & VE_CPOT_n & VE_SMC_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

Em que VE_AUT_n representa a autonomia dos VEs registrados em quilômetros, VE_CIC_n é o seu ciclo de condução, VE_TAX_n é a taxa de recarga do VE em por cento por minutos, VE_CPOT_n é a potência máxima de recarga do VE e VE_SMC_n a frequência do veículo na DCF utilizada para o SMC em decimal.

Tendo definido as entradas relacionadas aos VEs, pode-se também definir as entradas relacionadas aos outros elementos do sistema, como a rodovia. Primeiramente, definem-se as variáveis das cidades, descritas na Equação 14.

$$CID = \begin{bmatrix} CID_DIS_1 & CID_SMC_1 \\ CID_DIS_2 & CID_SMC_2 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ CID_DIS_n & CID_SMC_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

Em que CID_DIS_n é a distância absoluta D_x de cada cidade ao longo da rodovia em quilômetros e CID_SMC_n representa a frequência de cada cidade para o sorteio.

Tendo definido os pontos D_x na rodovia, agora são necessários os pontos D_y na rodovia, que representam estações de recarga. Desta forma, a Equação 15 apresenta os seus dados de entrada.

$$ERR = \begin{bmatrix} ERR_DIS_1 & ERR_N_CARG_1 \\ ERR_DIS_2 & ERR_N_CARG_2 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ ERR_DIS_n & ERR_N_CARG_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

Em que CID_DIS_n é a distância absoluta D_y de cada estação de recarga ao longo da rodovia em quilômetros e $ERR_N_CARG_n$ representa a quantidade de carregadores disponíveis em cada estação.

Com isso definido, basta realizar a entrada matricial dos horários para denominar o horário de partida de cada veículo, dado pela Equação 16.

$$ERR = \begin{bmatrix} HOR_1 & HOR_SMC_1 \\ HOR_2 & HOR_SMC_2 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ HOR_n & HOR_SMC_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

Em que HOR_n é o tempo representado em minutos e HOR_SMC_n é a frequência respectiva a cada tempo HOR_n dentro da DCF.

A.2 PROCESSAMENTO

Nesta etapa, são descritos os procedimentos no processamento de cada iteração do código intérprete da metodologia em questão.

A.2.1 Limites de iteração

Para os limites de iteração, são estabelecidos dois grandes limites, sendo eles o de cada iteração e o geral. Eles são dependentes das variáveis N_VE e IT , que representam o número de VEs na iteração e quantas iterações serão realizadas, respectivamente.

A.2.2 Os Monte Carlo de cada iteração para o código

Para cada iteração do código, se realizam quatro escolhas a partir do método de Monte Carlo, sendo elas:

- **Local de partida do VE:** utiliza os valores representados por CID_SMC dentro da matriz CID descrita na Equação ??, para se chegar na cidade em que o VE é inserido na rodovia;
- **Local de chegada do VE:** da mesma forma como apresentada na variável anterior, utiliza os valores representados por CID_SMC dentro da matriz CID descrita na Equação ??, para se chegar na cidade destino do VE na rodovia;
- **Horário de partida do VE:** valores descritos em HOR_SMC na matriz HOR descrita na Equação 16 para se conseguir a hora em que o VE é inserido na rodovia;
- **Modelo do VE:** valores descritos em VE_SMC na matriz VE descrita na Equação 13 para desenvolver qual veículo é utilizado na iteração.

A.2.3 Determinação da autonomia do Veículo

Dentro do que se refere a autonomia do VE, existem duas variáveis a serem analisadas no intuito de se retratar dentro do código. Sendo, primeiramente, a normalização das autonomies para o ciclo de condução EPA.

Tendo realizado a normalização dos valores para EPA, pode-se utilizar os valores de redução de autonomia descritos durante a metodologia. Sendo eles os fatores de ansiedade do condutor, condições climáticas e paradas não programadas.

A.2.4 Metodologia de parada do VE

A metodologia do VE ocorre conforme descrito no fluxograma apresentado na Equação 9. Entretanto, no programa realizado, o valor de δ_P é variante entre *ALEATORIOMIN* e *ALEATORIOMAX* para cada veículo inserido na rodovia.

Pode-se observar que a escolha da estação que o VE irá carregar é diretamente relacionada ao seu sentido na rota, parando para recarregar na estação mais próxima do seu local atual no sentido em que está seguindo a rota.

A.2.5 Cálculo de tempo das recargas

A primeira coisa é saber a hora em que o VE é inserido no carregador, para isso, utiliza-se a análise de filas para saber se o VE possui capacidade de ser inserido na rodovia no momento em que chega ou se tem que esperar um momento vago.

A partir disso, utiliza-se o SOC com que o VE chegou à estação e a sua taxa de carregamento *VE_TAX* para se estimar um tempo de recarga. Após esse tempo, o VE volta a participar da malha rodoviária e repete seu processo.

A.2.6 Cálculo da Demanda pela ERR

Com o VE_n em processo de carregamento, o que resta agora é calcular a potência demandada da estação. Para isso, se tabela a potência a partir da Equação 11. Com esta, pode-se obter o valor de potência demandado a cada minuto da metodologia.

Entretanto, na metodologia para para obtenção da curva diária de potência, utiliza-se o seguinte método:

- Divisão de 15 em 15 minutos, no qual o valor utilizado é o da maior potência neste intervalo de tempo;
- Divisão horária, em que se utiliza a média entre os 4 grupos de 15 minutos existentes na hora analisada;
- Confeção da curva diária, utilizando os valores obtidos para cada hora do dia.

Destaca-se que esse método é o normalizado pela ANEEL para levantamento de perfil diário (ANEEL,2021). Assim, pode-se obter a curva característica das estações de recarga após todas as simulações dos VEs.

Após esse processo, utiliza-se ferramentas internas do MATLAB para construção do quantil. No presente caso da metodologia, escolhe-se os valores referentes a $Q = 0$, $Q = 0,25$, $Q = 0,5$, $Q = 0,75$ e $Q = 1$. Esses quantis vão demonstrar diferentes comportamentos de carga ao longo de múltiplas iterações da metodologia.