



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTONIO GUSTAVO LIMA FERREIRA

**IMPACTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS INFRAESTRUTURAS ELÉTRICAS
E URBANAS, OTIMIZAÇÃO NO CARREGAMENTO E GERENCIAMENTO DE
TRÁFEGO: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE FORTALEZA**

FORTALEZA-CE

2023

ANTONIO GUSTAVO LIMA FERREIRA

IMPACTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS INFRAESTRUTURAS ELÉTRICAS E
URBANAS, OTIMIZAÇÃO NO CARREGAMENTO E GERENCIAMENTO DE
TRÁFEGO: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE FORTALEZA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Energias Renováveis e Sistemas Elétricos.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.

FORTALEZA-CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F439i Ferreira, Antonio Gustavo Lima.
Impacto dos veículos elétricos nas infraestruturas elétricas e urbanas, otimização no carregamento e gerenciamento de tráfego: estudo de caso na cidade de Fortaleza / Antonio Gustavo Lima Ferreira. – 2023.
142 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.
1. Mobilidade Urbana. 2. Rede Elétrica. 3. Engenharia de Tráfego. 4. Eletropostos. 5. Níveis de Qualidade de Energia. I. Título.

CDD 577

ANTONIO GUSTAVO LIMA FERREIRA

IMPACTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS INFRAESTRUTURAS ELÉTRICAS E
URBANAS, OTIMIZAÇÃO NO CARREGAMENTO E GERENCIAMENTO DE
TRÁFEGO – ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE FORTALEZA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Energias Renováveis e Sistemas Elétricos.

Aprovada em __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso (Interno ao PPGEE)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Paulo de Hollanda Cavalcante (Externo ao PPGEE)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Externo ao PPGEE)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico esta Dissertação a Deus.

AGRADECIMENTOS

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

Ao Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes por me orientar em minha Dissertação.

A Universidade Federal do Ceará por me proporcionar uma ótima infraestrutura de aprendizado, desde laboratórios de excelência até uma das mais completas bibliotecas do Brasil.

A minha namorada, aos meus familiares, e aos meus amigos por sempre estarem comigo nos momentos de felicidade e me apoiarem nos momentos mais difíceis.

Agradeço a todos os professores da instituição que com todo o seu conhecimento me proporcionaram a construção de um caminho bem trilhado ao aprendizado, buscando tanto lecionar a teoria como a prática do modo mais didático possível buscando nos preparar para como o mercado de trabalho exigirá nossos ensinamentos.

“Todos morremos. O objetivo não é vivermos para sempre. O objetivo é criarmos algo que viverá.” (Chuck Palahniuk)

RESUMO

As mudanças climáticas têm levado governos, empresas e a sociedade a buscar processos e tecnologias que mitiguem os impactos de tais alterações do clima, buscando manter um desenvolvimento sustentável. A matriz elétrica e a mobilidade urbana são dois setores que mais rapidamente podem influenciar na transição energética. A matriz elétrica pela crescente presença das fontes renováveis e a mobilidade urbana com a participação dos veículos elétricos contribuirão definitivamente para uma sociedade com baixo carbono no ar. Os veículos elétricos (VEs) neste milênio se tornarão uma solução eficiente para tais questões, já que 25% das emissões de gases do efeito estufa são oriundas de veículos movidos a combustíveis fósseis. A rápida adesão da população para esse transporte (VE) em alguns países europeus, nos EUA e na China surpreendeu os órgãos governamentais, pois a infraestrutura da rede de distribuição elétrica e a infraestrutura do trânsito das cidades não estavam preparadas para tão rápido crescimento. Isso tem causado gargalos de estação de recarga (eletropostos) em relação ao número de veículos elétricos em circulação. Em alguns lugares dos Estados Unidos essa relação já chega a 100 (VEs) para 1 posto de recarga. Importante observar que, mesmo para uma recarga rápida do VE, exige-se o tempo mínimo de 30 minutos. Esta dissertação tem como objetivo apresentar a avaliação do impacto dos veículos elétricos nas infraestruturas elétricas e urbanas, otimização no carregamento e gerenciamento de tráfego – estudo de caso na cidade de Fortaleza. Foi feita uma breve análise dos impactos que os VEs irão causar na arquitetura e urbanismo das cidades, bem como na engenharia de tráfego, buscando uma integração inteligente, entre as diversas infraestruturas urbanas. A partir disso, primeiro foram realizadas simulações envolvendo os postos elétricos com recargas rápidas e a rede de distribuição elétrica, visando analisar como a rede foi afetada pela presença dos VEs em recarga. Em um segundo momento, foi levado em consideração o tráfego urbano, de modo a se analisar como um novo polo gerador de viagem (PGV) poderia interferir no trânsito da região estudada. Para as análises, foram utilizados os métodos de Monte Carlo e Voronoi, auxiliados pelos softwares OpenDSS® e Matlab®. Uma área de aproximadamente 5 km², no bairro Aldeota, da Secretaria Regional 2, da cidade de Fortaleza, no Ceará, foi utilizada para a validação da metodologia proposta.

Palavras-chave: mobilidade urbana; rede elétrica; eletropostos; engenharia de tráfego; níveis de qualidade de energia.

ABSTRACT

Climate change has led governments, companies and society to seek processes and technologies that mitigate the impacts of such climate changes, seeking to maintain sustainable development. The electrical matrix and urban mobility are two sectors that can most quickly influence the energy transition. The electrical matrix, through the growing presence of renewable sources, and urban mobility with the participation of electric vehicles will definitely contribute to a society with low carbon in the air. Electric vehicles (EVs) in this millennium will become an efficient solution to such issues, as 25% of greenhouse gas emissions come from vehicles powered by fossil fuels. The population's rapid adoption of this transport (EV) in some European countries, the USA and China surprised government bodies, as the infrastructure of the electrical distribution network and the traffic infrastructure of cities were not prepared for such rapid growth. This has caused bottlenecks at charging stations (electric stations) in relation to the number of electric vehicles in circulation. In some places in the United States this ratio already reaches 100 (EVs) for 1 charging station. It is important to note that, even for a quick EV recharge, a minimum time of 30 minutes is required. This dissertation aims to present the assessment of the impact of electric vehicles on electrical and urban infrastructure, charging optimization and traffic management – a case study in the city of Fortaleza. A brief analysis was made of the impacts that EVs will cause on the architecture and urbanism of cities, as well as on traffic engineering, seeking intelligent integration between the various urban infrastructures. From this, simulations were first carried out involving electric stations with fast recharges and the electrical distribution network, aiming to analyze how the network was affected by the presence of EVs being recharged. In a second step, urban traffic was taken into account, in order to analyze how a new trip generating hub (PGV) could interfere with traffic in the studied region. For the analyses, the Monte Carlo and Voronoi methods were used, assisted by the OpenDSS® and Matlab® software. An area of approximately 5 km², in the Aldeota neighborhood, in Regional Secretariat 2, in the city of Fortaleza, Ceará, was used to validate the proposed methodology.

Keywords: urban mobility; electric grid; charging stations; traffic engineering; energy quality levels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Venda dos veículos elétricos no mundo e no Brasil	21
Figura 2 – Relação de veículos elétricos para um ponto de recarga.....	22
Figura 3 – Diagrama Unifilar do sistema elétrico de potência.....	28
Figura 4 – Curva de carga típica residencial do SIN.....	34
Figura 5 – Curva de carga típica comercial do SIN.....	35
Figura 6 – Curva de carga típica industrial do SIN.....	35
Figura 7 – Carregador de baterias para VEs – diagrama de blocos (circuitos típicos): carregador embarcado.....	39
Figura 8 – Carregador de baterias para VEs – diagrama de blocos (Circuitos típicos): carregador externo.....	39
Figura 9 – Afundamento na tensão monofásica (220 V), quando conectados 3 veículos em recarga média, 12,2 kW, na rede entre as 9h e 13h, mínimo permitido pela ANEEL é de 202 V:.....	40
Figura 10 – Análise da migração pendular de Origem e Destino.....	43
Figura 11 – Cenário de Smart Grid com pontos de recargas em vários locais.....	47
Figura 12 – Capa da lei complementar nº 236, de 11 de agosto de 2017, Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo.....	49
Figura 13 – Mapas de eixos (ou “mapa axial”) de Fortaleza, assinalando a direita a área estudada	51
Figura 14 – Imagem de satélite georreferenciada	51
Figura 15 – Malha viária de Fortaleza georreferenciada.....	52
Figura 16 – Camada ‘Trânsito’ do Google Maps para a área de estudo.....	53
Figura 17 – Faixa de velocidades em uma via durante um dia da semana, V_{up} igual à máxima velocidade média, V_{down} igual a mínima velocidade média, V_m a velocidade média.....	54
Figura 18 – Divisão das áreas populacionais por tipo de atividade.....	56

Figura 19 – Divisão das áreas populacionais por consumo.....	57
Figura 20 – Divisão das áreas e distribuição de eletropostos após utilização de Voronoi.....	58
Figura 21 – Padrão de tráfego em tempo real.....	59
Figura 22 – Considerações para implementação de um eletroposto.....	60
Figura 23 – Acesso aos eletropostos.....	61
Figura 24 – Perdas por efeito Joule no Sistema de Potência: a) Sem Veículos Elétricos conectados à rede; b) Com 25% de Veículos Elétricos conectados à rede; c) Com 50% de Veículos Elétricos conectados à rede...	62
Figura 25 – Integração entre a rede elétrica e a rede urbana.....	63
Figura 26 – Ideia Genérica do Método de Monte Carlo.....	67
Figura 27 – Exemplo de Diagrama de Voronoi.....	68
Figura 28 – Polígono de Voronoi.....	71
Figura 29 – Diagrama de Voronoi Ordinário para dois pontos.....	71
Figura 30 – Construção de Mediatrizes para 3 pontos.....	72
Figura 31 – Eliminação dos segmentos invasivos para 3 pontos.....	72
Figura 32 – Diagrama de Voronoi Ponderado Multiplicativo para dois pontos.....	75
Figura 33 – Exemplo Diagrama de Voronoi Ponderado Multiplicativo.....	75
Figura 34 – Delimitação da área de estudo.....	77
Figura 35 – Divisão da área de estudo por zonas.....	78
Figura 36 – Identificação das SEDs.....	79
Figura 37 – Pólos geradores de viagem na área de estudo.....	80
Figura 38 – Eletropostos.....	81
Figura 39 – Divisão da rede de distribuição no QGIS.....	82
Figura 40 – Divisão da rede de distribuição no AutoCAD.....	83
Figura 41 – Divisão da rede de distribuição no OpenDSS.....	83

Figura 42 – Mapa de trânsito da cidade de Fortaleza no Google Maps.....	89
Figura 43 – Matriz de características dos shapes no QGIS.....	90
Figura 44 – Exemplo da Teoria dos Grafos para 4 páginas na web.....	92
Figura 45 – Distribuição da frequência das zonas por aleatoriedade.....	100
Figura 46 – Curva de carga do sistema.....	104
Figura 47 – Curva de carga das recargas dos VEs em escritórios.....	106
Figura 48 – Curva de carga das recargas dos VEs em residências.....	107
Figura 49 – Irradiação durante 24h para a cidade de Fortaleza.....	111
Figura 50 – Tensão de fase em uma das barras com o impacto das recargas.....	111
Figura 51 – Tensão de fase em uma das barras com o impacto das recargas, e a mitigação da geração distribuída.....	112
Figura 52 – Diagrama de Voronoi na área de estudo às 0h.....	113
Figura 53 – Diagrama de Voronoi na área de estudo às 6h.....	113
Figura 54 – Diagrama de Voronoi na área de estudo às 12h.....	114
Figura 55 – Diagrama de Voronoi na área de estudo às 18h.....	114
Figura 56 – Arquitetura de Telecomunicação das redes inteligentes.....	125
Figura 57 – Arquitetura da Infraestrutura de Medição Avançada.....	127
Figura 58 – Identificação das 5 piores barras do sistema em Tensão.....	128
Figura 59 – Fluxograma da Entrada VEs em uma área com comunicação 5G.....	130

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Três veículos elétricos conectados à rede elétrica, em recarga média, 12,2 kW, na rede entre as 9h e 13h.....	41
Quadro 2 – Três veículos elétricos conectados à rede elétrica, em recarga média, 12,2 kW, na rede entre as 9h e 13h, com auxílio de microgeração solar, 70 kW, na rede.....	41
Quadro 3 – Estabelecimentos considerados para a zona 1.....	90
Quadro 4 – Estabelecimentos considerados para a zona 2.....	90
Quadro 5 – Estabelecimentos considerados para a zona 3.....	91
Quadro 6 – Estabelecimentos considerados para a zona 4.....	91
Quadro 7 – Estabelecimentos considerados para a zona 5.....	91
Quadro 8 – Métodos de recargas utilizados na simulação.....	99
Quadro 9 – Frequência de entrada de veículos elétricos por hora nas zonas.....	100
Quadro 10 – Características dos VEs na Zona 1.....	101
Quadro 11 – Características dos VEs na Zona 2.....	101
Quadro 12 – Características dos VEs na Zona 3.....	101
Quadro 13 – Características dos VEs na Zona 4.....	101
Quadro 14 – Características dos VEs na Zona 5.....	102
Quadro 15 – Características dos VEs que integram o sistema.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de tensão de atendimento segundo o módulo 8 do Prodist.....	29
Tabela 2 – Cargas típicas por metro quadrado.....	30
Tabela 3 – Métodos de recarga pelas IECs 61851, 62196 e 62752.....	38
Tabela 4 – Dados do sistema sem VEs.....	105
Tabela 5 – Dados do sistema com VEs em todas as zonas	108
Tabela 6 – Diferenças das variações dos resultados sem e com VEs em todas zonas.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ABVE	Associação Brasileira de Veículos Elétricos
AIE	Agência Internacional de Energia
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BP	British Petroleum
CA	Corrente Alternada
CBA	Código Brasileiro de Aeronáutica
CC	Corrente Contínua
CENAPAD	Centro Nacional de Processamento de Alto Desempenho
CPPD	Comissão Permanente de Avaliação do Plano Diretor
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DVPM	Diagrama de Voronoi Ponderado Multiplicativo
FDP	Funções de Densidade de Distribuição de Probabilidade
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de efeito estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GR	Green Real Time
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
OpenDSS	Open Distribution System Simulator
ORR	Orange Real Time
PE	Projeto Especial
PGV	Pólos Geradores de Viagem
Prodist	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema
RR	Red Real Time
SED	Subestação de Distribuição
SEP	Sistema elétrico de potência
SEUMA	Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente
SIG	Sistema de Informação Geográfica

V2G	Vehicle to grid
VEs	Veículos Elétricos
ZEDUS	Zonas Especiais de Dinamização Urbanística
ZIA	Zona de Interesse Ambiental
ZO	Zona da Orla
ZRA	Zona de Recuperação Ambiental

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização	19
1.2	Objetivos	23
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	23
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	23
1.3	Contribuições	23
1.4	Organização do Trabalho	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	Histórico	26
2.2	Infraestrutura Elétrica	27
<i>2.2.1</i>	<i>Subestação de Distribuição e a Capacidade da rede</i>	27
<i>2.2.2</i>	<i>Curvas de carga, e demanda de recarga</i>	33
<i>2.2.3</i>	<i>Mobilidade elétrica e o conceito de imprevisibilidade na infraestrutura elétrica</i>	37
2.3	Infraestrutura Urbana	42
<i>2.3.1</i>	<i>Sintaxe</i>	43
<i>2.3.2</i>	<i>Semântica</i>	47
<i>2.3.3</i>	<i>Validação</i>	49
<i>2.3.4</i>	<i>Mobilidade elétrica e o conceito de imprevisibilidade na infraestrutura urbana</i>	58
2.4	Aquisição de Dados	63
<i>2.4.1</i>	<i>Dados Elétricos</i>	63
<i>2.4.2</i>	<i>Dados Urbanos</i>	64
2.5	Modelos Matemáticos	65
<i>2.5.1</i>	<i>Modelo de Monte Carlo</i>	65
<i>2.5.2</i>	<i>Diagrama de Voronoi</i>	68

2.5.2.1	<i>Definições matemáticas para o Diagrama de Voronoi Ordinário</i>	72
2.5.2.2	<i>Definições matemáticas para o Diagrama de Voronoi Ponderado</i>	743
2.5.2.3	<i>Definições matemáticas para o Diagrama de Voronoi Ponderado Multiplicativo</i>	754
3	METODOLOGIA	76
3.1	Área de Estudo	76
3.1.1	<i>Limites e divisão da área de estudo</i>	77
3.1.2	<i>Locais de interesse na área de estudo</i>	79
3.1.3	<i>Alocação de eletropostos</i>	80
3.1.4	<i>Redes de distribuição</i>	81
3.2	Espaço Amostral	83
3.3	Modelagem no OpenDSS	84
3.3.1	<i>Circuito</i>	85
3.3.3	<i>Transformador</i>	87
3.3.4	<i>Carga</i>	87
3.4	Modelagem no QGIS	89
3.5	Modelagem para o Diagrama de Voronoi	91
3.5.1	<i>Lógica de relevância para o Diagrama de Voronoi</i>	92
3.5.2	<i>Lógica de peso para o Diagrama de Voronoi</i>	95
4	ESTUDO DE CASO	98
5	RESULTADOS	104
5.1	Simulação sem VEs e sem os estabelecimentos, e eletropostos	104
5.2	Simulação com VEs e sem os estabelecimentos, e eletropostos	106
5.3	Simulação com o auxílio da geração distribuída	110
5.4	Simulações com o Diagrama de Voronoi	112
6	CONCLUSÃO	116
6.1	Trabalhos Futuros	117
	REFERÊNCIAS	118
	ANEXO A – PROPOSTAS PARA O USO DA TECNOLOGIA 5G	125

ANEXO B – MATRIZES DE FORWARDLINKS DA MALHA VIÁRIA DE FORTALEZA PARA O ESTUDO DE CASO.....	133
APÊNDICE A – LEI DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO, COMPLEMENTOS DOS CAPÍTULOS DOS TÍTULOS V E VII.....	138

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O tema sustentabilidade vem ganhando notória relevância nos últimos anos, e isso envolve setores governamentais, sociais e econômicos no mundo inteiro. A sustentabilidade passa necessariamente pela redução dos gases de efeito estufa (GEE), entre os quais está o dióxido de carbono (CO₂). Essa redução contribui para a diminuição do aquecimento global, como observado no Relatório sobre a Lacuna de Emissões do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2021).

Desde o Protocolo de Kyoto, há mais de 25 anos, que teve como principal objetivo o estabelecimento de metas e acordos para a redução da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera, a humanidade tem buscado uma transição na direção de um mundo livre das emissões de carbono, embora já existam diversas soluções tecnológicas e econômicas. Esta não é uma tarefa simples. A transição para uma sociedade de baixo carbono é, sem sombra de dúvida, o maior desafio desta atual geração, IEA-USP (2022).

A escala para a transição energética é muito significativa e envolve todos os setores da economia, indústria, comércio, agroindústria, setor elétrico, mobilidade urbana, transporte de cargas, construção civil e o próprio consumidor.

Atualmente o setor de eletricidade está fazendo a transição mais rápida e tem como compromisso descarbonizar-se antes de 2050, auxiliando outros setores a se descarbonizarem utilizando a eletrificação, EPE (2022).

A transição para uma sociedade sustentável passa também por uma mudança na sua frota de veículos, lembrando que o setor dos transportes (privado, público e o de cargas) tem uma forte contribuição para as emissões de CO₂, portanto a eletrificação na mobilidade é de extrema relevância e já se configura uma realidade, Agência Brasil (2023); ou seja, um caminho sem volta. Somente assim haverá ar menos insalubre.

A União Europeia, como iniciativa para diminuir em 55% a emissão de gases do efeito estufa até 2030, proibirá a comercialização de qualquer veículo que não seja elétrico (VE), estes proibidos de serem vendidos a partir de 2035, e com o objetivo de zerar as emissões até 2050. Também será proibida a circulação de veículos movidos à combustão interna (VCI), CNN Brasil (2022).

A indústria automotiva vem realizando modificações em suas linhas de produção que vão desde a alteração dos projetos de tração motriz (powertrain) de seus veículos ao

investimento em segurança, em pesquisas de baterias e em comunicação veicular, tudo com o objetivo de promover a redução dos custos e o aumento da autonomia.

A indústria petrolífera, ciente da inevitável transição para uma sociedade de baixo carbono, vem estimulando pesquisas em tecnologias de armazenamento de energia em larga escala, além das pesquisas envolvendo centrais de recarga, de modo a reaproveitar a sua grande rede de postos de reabastecimento de combustíveis fósseis, migrando para postos de recarga elétrica ou os chamados eletropostos.

Como exemplo, a British Petroleum (BP) visa ampliar sua rede de recarga que atualmente conta com 11 mil eletropostos para mais de 70 mil VEs até o final desta década, e já é previsto que até 2025 as estações de recarga darão mais lucro que as bombas de combustível, conforme matéria da revista britânica *Autocar* (2022).

Observa-se um esforço mundial dos governos, das instituições de ciência e tecnologia, da indústria automobilística, petrolífera e da sociedade para garantir uma infraestrutura sustentável para este novo cenário que se aproxima.

O crescimento das vendas dos veículos elétricos no mundo vem sendo uma realidade. Em setembro de 2021, de acordo com a consultoria Jato Dynamics, pela primeira vez na história o veículo mais vendido em um mês na Europa foi um elétrico. Com aproximadamente 25 mil unidades do Model 3 da Tesla, essas vendas representaram 58% a mais que o mesmo mês para o ano de 2020. No Brasil não é diferente, embora ocorra em menor escala.

Segundo estudo da Agência Internacional de Energia (AIE), mostrado na Figura 1, em 2021, a venda de VEs, no mundo, ultrapassou 6,5 milhões de unidades, enquanto, aqui no Brasil, apenas 0,5% da venda de carros novos é de VEs. O estudo indica que a inserção dos VEs na mobilidade urbana, tanto pública quanto privada já pode ser considerada uma realidade.

Figura 1 – Venda dos veículos elétricos no mundo e no Brasil



Fonte: Agência Internacional de Energia (2022).

Diante desta realidade, precisa-se responder à seguinte questão: qual o impacto de tal mudança na infraestrutura dos grandes centros urbanos?

A primeira parte da questão abordará o setor elétrico, em particular a distribuição de energia elétrica, setor tradicionalmente estruturado como um monopólio natural, com consumidores cativos. Esta abordagem deverá analisar as unidades consumidoras (UCs), que possuem estações de recarga; ou seja, onde será realizado o reabastecimento domiciliar, bem como deverá também analisar as redes de distribuição das concessionárias de energia.

Para as distribuidoras, a análise do carregamento dos alimentadores, em função da imprevisibilidade desta nova carga, torna-se um grande desafio. Outro fator importante são os circuitos eletrônicos para o processamento da energia para a recarga, que despertam questionamentos sobre a qualidade de energia e o desempenho das redes de distribuição. Nesta linha, os trabalhos de Pedro (2020), de Deb *et al.* (2018) e de Souza (2020) abordam o impacto das componentes harmônicas, o desequilíbrio nos níveis de tensão, a sobrecorrente em condutores e sobrecarga de transformadores, gerando o aumento de perdas e até mesmo a não continuidade do fornecimento de energia.

Outros estudos feitos na área, como, por exemplo, Bitencourt (2018), abordam a alteração nos modelos tarifários em função do tipo de recarga e horário do reabastecimento, e Salvatti (2020) trata da integração da geração distribuída e de microrredes para a otimização das redes de distribuição.

O impacto sobre o sistema elétrico, como mostrado no estudo da Bloomberg NEF (2022), em que os eletropostos não estão acompanhando o rápido crescimento dos VEs em circulação, mostra que nos EUA há mais de 20 VEs para um eletroposto, como pode ser visto

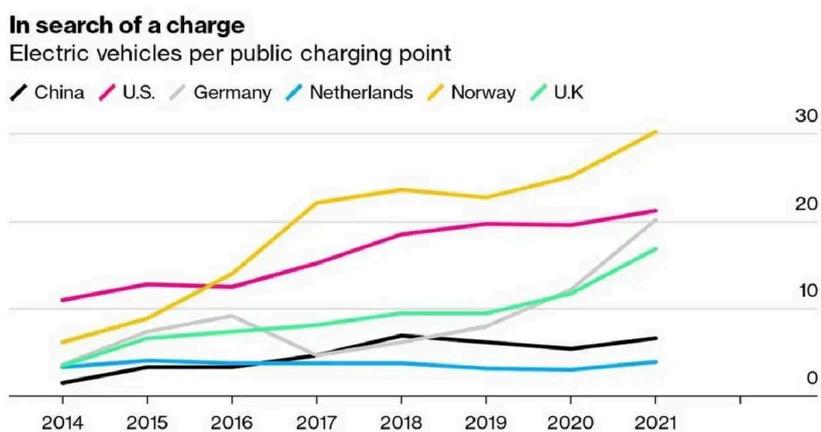
na Figura 2. Quando se refere à recarga ultrarrápida, esse número aumenta de 100 VEs para uma central de recarga, causando considerável superlotação nos eletropostos.

Os altos custos do investimento nas redes elétricas e o elevado custo dos terrenos imobiliários nas grandes cidades para a alocação das novas estações de recarga são os principais fatores da incipiência na infraestrutura de recarga.

É estimada uma mudança de fluxo do tráfego urbano, pois novos polos atrativos de veículos surgirão em função da oferta de recarga, lembrando que o reabastecimento de um veículo elétrico leva no mínimo 30 minutos, podendo chegar a 1 hora; ou seja, o condutor do veículo assumirá outra atividade para o benefício de uso.

A oferta de uma boa infraestrutura de recarga dos VEs é tema constante no planejamento urbanístico e no planejamento eletroenergético das grandes cidades ao redor do mundo. Surgirão situações e a solução passará necessariamente por um conjunto de tecnologias, ações e ocorrências, entre elas o aumento dos sistemas de armazenamentos (baterias), o aumento dos níveis de carregamento, em particular o ultrarrápido com maior corrente e potência e o surgimento de novas tecnologias voltadas às redes inteligentes (*Smart Grid*), com o consórcio da geração distribuída, de transformadores de estado sólido, do sistema de comunicação de dados de alta velocidade, de softwares de gerenciamento da rede elétrica e de engenharia de tráfego inteligente.

Figura 2 – Relação de veículos elétricos para um ponto de recarga



Fonte: Bloomberg NEF (2022).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo apresentar a avaliação do impacto dos veículos elétricos nas infraestruturas elétricas e urbanas, otimização no carregamento e gerenciamento de tráfego – estudo de caso na cidade de Fortaleza.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o conceito da imprevisibilidade da recarga nas infraestruturas elétrica e urbana com a inserção dos veículos elétricos;
- Analisar do comportamento das cargas das unidades consumidoras e suas curvas, antes e após os veículos elétricos conectados à rede;
- Estudar o gerenciamento dos veículos elétricos recarregando na região, bem como a tomada de decisões do usuário e do sistema;
- Analisar como as microrredes com presença das gerações distribuídas poderão ser utilizadas como auxiliares na interconexão entre as regiões.

1.3 Contribuições

Com o intuito de realizar simulações de cenários de recarga de veículos elétricos em eletropostos e estações de recarga em locais privados (centros comerciais, estudantis e hospitalares), e objetivando o impacto na rede de distribuição elétrica e no tráfego urbano, serão utilizados softwares que englobem essas duas infraestruturas, de modo que, pela aquisição de dados em campo e modelos matemáticos, sendo possível relacionar suas distintas grandezas.

O trabalho para se obter os dados será dividido em duas partes. Em virtude de não se ter obtido os dados reais da concessionária na área de estudo, a rede elétrica é representada da forma mais real possível, utilizando literaturas especializadas (Mamede, 2013; Kagan, 2017) e legislações vigentes (ANEEL, 2020).

A segunda parte será ligada diretamente aos dados de fluxo de trânsito e de uso e ocupação do solo da área do estudo. Sua aquisição será feita por meio da legislação da prefeitura de Fortaleza, Lei nº 236/2017 - Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo, além do

georreferenciamento obtendo o fluxo de trânsito de veículos e pedestres por meio do Webscrapping, do Google Maps.

Dessa forma, a divisão da construção e implementação dos cenários ficará dividida em três etapas.

Etapa 1 – Raspagem de dados

- Para a raspagem de dados do fluxo de trânsito e de pedestres serão utilizadas duas ferramentas: a primeira o Google Mobility, ferramenta do Google Maps, um aplicativo de Sistema de Posicionamento Global (GPS) com o intuito de se obter a velocidade de tráfego, a quantidade de agentes, e seus diferentes comportamentos de acordo com os horários. Em sequência, a segunda ferramenta que será utilizada é software de georreferenciamento, QGIS, um Sistema de Informação Geográfica (SIG) que viabiliza as informações do uso e ocupação do solo.

Etapa 2 - Montagem da infraestrutura

- Para a montagem da infraestrutura elétrica, por não haver a obtenção de dados reais por parte da concessionária, utilizará-se o software de programação OpenDSS, com ênfase na montagem de sistemas de rede de distribuição elétrica. Para a montagem da infraestrutura urbana da área de estudo também será utilizado o QGIS para a edição dos dados obtidos na raspagem (etapa 1).

Etapa 3 - Conectar as duas redes

- Nesta etapa, serão introduzidos os modelos matemáticos para que a rede de distribuição elétrica e a infraestrutura urbana sejam integradas, a fim de que pela correlação de grandezas dos diferentes dados obtidos sejam feitas as conexões necessárias para a construção de cenários de recarga.

Utilizará-se o método de Monte Carlo para a aleatoriedade das recargas e o Diagrama de Voronoi para a tomada de decisão; a partir da construção da rede elétrica no OpenDSS utilizou-se o software PyCharm, ferramenta que conta com a linguagem Python para a extração de dados, sendo útil para a criação da rede inteligente, e o Matlab, software responsável por inserir os modelos matemáticos, capaz de integrar as camadas, resultando na integração dos dados elétricos e urbanos.

1.4 Organização do Trabalho

A presente Dissertação será desenvolvida em 5 capítulos, a saber:

No Capítulo 2 será apresentada a Fundamentação Teórica, abordando os conceitos que serão utilizados para se entender melhor essa nova realidade, indo desde a compreensão da origem dos dados até sua raspagem e seu tratamento, com o intuito de se entender a rede elétrica e o tráfego urbano antes e depois da integração dos VEs, incluindo os modelos matemáticos responsáveis pela conexão entre as camadas.

No capítulo 3 será apresentada a área de estudo de caso, explicando as tomadas de decisões do autor e incluindo a motivação para fazer esta pesquisa, além das ideias e dos conceitos apresentados no capítulo 2 para implementar os diferentes cenários.

No capítulo 4 serão apresentadas as simulações numéricas dos cenários propostos e analisados os resultados, de modo a se interpretar para identificar os gargalos envolvendo a infraestrutura elétrica e urbana, bem como apresentando possíveis soluções para melhorar o planejamento urbanístico.

No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões provenientes da análise dos resultados e das propostas de trabalhos futuros para a continuidade desta pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas as duas infraestruturas, a elétrica e a de mobilidade urbana, e como será a junção para promover um planejamento sustentável com a adesão dos VEs, e sua imprevisibilidade por meio de conceitos matemáticos.

2.1 Histórico

No início do século XXI, o mundo buscou alternativas tecnológicas mais sustentáveis, de forma que foi despertado o interesse para minorar os malefícios causados pelos gases de efeito estufa; assim surgiram novos produtos e métodos de gestão que pudessem mitigar o impacto das grandes fontes poluidoras, sendo elas, principalmente, as indústrias, a geração de energia e os veículos movidos a motor de combustão interna.

Para as indústrias, houve os incentivos governamentais e as práticas do *Environmental, Social and Governance* (ESG), que defende a sustentabilidade ambiental, social e de governança corporativa. Estes foram idealizados para que as empresas adotassem medidas sustentáveis, como a eficiência energética e o uso de sistemas de gestão de energia.

No setor de geração de energia, houve um significativo avanço com a entrada de fontes renováveis, entre elas a energia eólica e a fotovoltaica nos sistemas elétricos de potência.

Entretanto, a grande mudança seria na mobilidade urbana, sendo essa a maior geradora dos gases emitidos na atmosfera. Pode-se afirmar que para este setor a solução veio com a mobilidade elétrica (ME). Veículos elétricos não são novidade visto que foram utilizados no início da indústria automotiva, mas sucumbiu perante a facilidade de reabastecimento, infraestrutura mais adequada, e pela força das indústrias de petróleo e gás.

Com o agravamento das mudanças climáticas, a ME retornou na virada do século passado com ênfase na tecnologia dos veículos híbridos, inicialmente no Japão, e rapidamente se difundiu para a Europa e a América do Norte. Usuários e governos observaram que tal mudança seria essencial para se obter os níveis de sustentabilidade necessários para o futuro, logo novas legislações foram criadas para que os veículos elétricos se tornassem obrigatórios nas próximas décadas.

Do início do século XX até a presente data foi possível observar essa mudança de forma concreta, por exemplo, na China, onde já existem cidades, como Shenzhen, em que todos os transportes públicos são elétricos. Nos países nórdicos, a frota de veículos elétricos já

ultrapassa 50% da sua totalidade; em setembro de 2020, o veículo mais vendido na União Europeia foi um elétrico, Jato Dynamics (2021).

Se por um lado houve melhoras nos indicadores de sustentabilidade, por outro lado começaram a surgir problemas oriundos da massiva adesão em curto espaço de tempo.

As concessionárias de energia pelo mundo inteiro estão revendo sua infraestrutura de distribuição de energia para evitar problemas com relação ao abastecimento dos VEs

Já na infraestrutura do tráfego urbano, o número de eletropostos, ou de estações de recarga em locais comerciais, se tornam insuficientes, o que gera filas e congestionamentos que podem complicar ainda mais o já caótico fluxo do trânsito urbano nas grandes cidades.

Essas infraestruturas (elétrica e tráfego urbano) que antes pareciam não se comunicar, atualmente são assuntos correlatos para aqueles que cuidam do planejamento urbanístico dos grandes centros populacionais.

O planejamento urbanístico busca construir espaços que diminuam os problemas oriundos da urbanização, tais como poluição, congestionamentos, impactos ecológicos e adensamentos urbanos, entre outros.

2.2 Infraestrutura Elétrica

Para se entender melhor sobre a infraestrutura elétrica e a inserção da mobilidade elétrica serão desenvolvidos subcapítulos com o intuito de abordar os dados e as variáveis que serão considerados nesta dissertação, estabelecendo uma relação entre o sistema elétrico e a imprevisibilidade da recarga.

2.2.1 Subestação de Distribuição e a Capacidade da rede

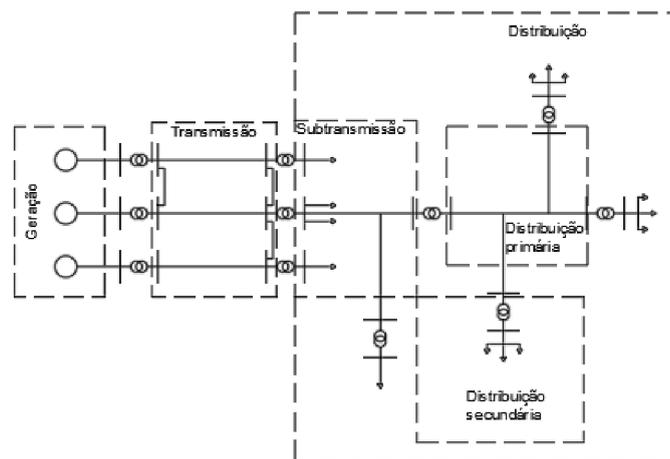
Os primeiros dados elétricos que serão utilizados para compor o sistema da tese são oriundos das subestações de distribuição (SED) da concessionária, como o próprio nome diz. As SEDs serão responsáveis por promover o elo no sistema de potência, nesse caso a subtransmissão para a alimentação final dos consumidores, podendo ser esses atendidos em baixa ou em média tensão.

Na Figura 3 é apresentado o diagrama unifilar simplificado de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) composto dos subsistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. No Brasil, o sistema de transmissão, denominado também de rede básica, possui níveis de tensão maior ou igual a 230 kV. O sistema de distribuição são compostos do

subsistema de transmissão ou sistema de distribuição de alta tensão (níveis de tensão 69 ou 138 kV), sistema de distribuição primário ou de média tensão – MT (13,8 ou 34,5 kV) e sistema de distribuição secundário ou de baixa tensão – BT com diferentes níveis de tensão no Brasil.

As subestações distribuidoras de energia (SED) possuem transformadores de potência responsáveis pelo suprimento dos consumidores de MT e BT. Ao longo dos alimentadores de distribuição estão presentes as subestações secundárias de distribuição compostas de um ou mais transformador do tipo distribuição, responsáveis pelo suprimento dos consumidores de BT (380/220 V no Ceará). Na Tabela 1 é definida a Tensão de Atendimento (TA) e sua faixa de variação definida pela Aneel.

Figura 3 – Diagrama Unifilar do sistema elétrico de potência



Fonte: Kagan, Oliveira e Robba (2017).

A capacidade da rede será totalmente atrelada à potência da SED primária, os valores reais que serão utilizados como dados de entrada nas simulações têm que ser capazes de suprir todos os consumidores da área de atendimento da subestação, tudo sob respaldo legal e baseado na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que assiste aos consumidores.

Tabela 1 – Níveis de tensão de atendimento segundo o módulo 8 do Prodist

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: Prodist (2021).

Primeiramente serão introduzidos os dados de construção, que são pertinentes à capacidade da rede, até porque uma subestação será feita para atender certa demanda; obviamente não será levada em conta a construção civil, mas sim o estudo de planejamento elétrico.

Essa demanda é essencial para entender como se comportarão as curvas de carga da região, podendo serem elas de características residenciais, comerciais, industriais ou mistas, quando há mais de uma no local. No caso de consumidores comerciais, ou industriais, há maior possibilidade de essa demanda ser atendida em média tensão.

Quando ocorrer de unidades consumidoras de média tensão estarem presentes na área de atendimento da SED primária, um novo tipo de elemento será introduzido nesse sistema, que são as linhas expressas; estas, por terem maiores níveis de potência, são tratadas como consumidoras especiais, de modo que a sua conexão com a SED primária será direta. É importante evidenciar esse tipo de conexão, pois este consumidor tem uma subestação abaixadora própria para sua demanda específica, logicamente com potência necessária para atender somente à sua demanda.

No momento temos duas capacidades de rede distintas, uma voltada a atender unidades consumidoras particulares, devido à sua demanda, e outra voltada à rede de distribuição secundária de baixa tensão; logo, quando mais à frente na tese a mobilidade elétrica for inserida nesse ambiente, o mais rapidamente será possível observar os comportamentos que ambas terão separadamente e em conjunto.

Definida essa particularidade das linhas de distribuição expressas, o estudo agora se voltará aos parâmetros elétricos necessários para a construção de um sistema elétrico de distribuição de tensão, são eles:

- Demanda do circuito

A demanda do circuito que será construído e a arquitetura da rede escolhida levarão em consideração os aspectos geográficos e elétricos de certa área, logo quando uma

nova SED é inserida a um sistema já existente, ou é construída do zero para atender a uma nova carga, ela terá que ser capaz de atender à demanda até à área de atuação de outra SED.

Esse dado da demanda será extraído do número de possíveis unidades consumidoras nessa região, e quais as possíveis potências instaladas nesses locais, além da curva de carga que será capaz de dizer qual o comportamento diário que as cargas terão. Curvas de cargas diferentes definirão o uso de equipamentos distintos, como, por exemplo, o banco de capacitores, ou reservas girantes para equilíbrio do fator de potência dependendo das características da demanda.

O número de unidades consumidoras pode ser definido pelo uso e ocupação do solo do município, identificados com o auxílio de softwares de georreferenciamento, pelo número de unidades consumidoras da região estudada, e por quais atividades ela possui, podendo ser residencial, comercial ou industrial.

Definido o número de consumidores em uma área, e sabendo das atividades que são realizadas nesses locais, poderão ser calculadas as médias de consumo por iluminação e força por metro quadrado, como pode ser visto na Tabela 2 adaptado de McFadyen (2016).

Tabela 2 – Cargas típicas por metro quadrado

Local	Iluminação (W/m ²)	Força (W/m ²)
Banco	16	54
Sala de aula	15	15
Restaurante	15	10
Escritório	12	28
Centro comercial	18	42

Fonte: Adaptado de McFayden (2016).

Utilizando-se desta tabela, com uma simples multiplicação de área por watt para iluminação e força, será possível saber quanto é a potência instalada. Com isso é possível obter-se o consumo de energia, portanto uma demanda estimada a partir de duas fórmulas, a do fator de carga e a do fator de demanda:

Fator de carga:

$$Fct = \frac{c}{D_{max} * 730} \quad (1)$$

Fator de demanda:

$$Fdt = \frac{Dmax}{Pinst} \quad (2)$$

Consumo de energia:

$$C = Fdt * Fct * Pinst * 730 \quad (3)$$

Onde:

C= Consumo de energia estimada, em kWh;

Fdt= Fator de demanda de instalação;

Fct= Fator de carga de instalação;

Pinst= Potência instalada do consumidor

O cálculo será feito para se encontrar uma demanda estimada que este circuito precisaria atender, logo os outros valores para a construção de uma SED para simulação serão oriundos dessa primeira estimativa.

- Potências de curto-circuito

As potências de curto circuito monofásica e trifásica na barra da SED são calculadas para que seja definido o produto entre as tensões e as correntes anteriores à falta de potência quando ocorre uma falha no sistema. Isso gera uma interrupção no fornecimento da rede elétrica.

Esses valores serão utilizados para se calcular e dimensionar as linhas de distribuição, os equipamentos de proteção e de medição de todo o sistema, para caso venha a ocorrer uma falha, esses instrumentos não sejam danificados, assim como para analisar variações de tensão e corrente nas barras e fases do circuito, sendo essencial para se monitorar a qualidade da energia, como, por exemplo, afundamento de tensão. Medeiros (2017).

Para minimizar os efeitos que uma falta simples pode ocasionar em termos de interrupção de serviço, as empresas distribuidoras de energia têm adotado a solução técnica de operar suas redes de distribuição de forma fracamente malhada. A análise do efeito destas faltas em sistemas de distribuição é realizada através do cálculo de

curto-circuito. O cálculo de curto-circuito determina a magnitude da corrente que um sistema é capaz de produzir em situações de faltas, sendo utilizado para a seleção e dimensionamento de equipamentos, assim como para estabelecer uma adequada seletividade e coordenação da proteção... Estes modelos são importantes para estudos onde é necessário observar o desequilíbrio nas variáveis de estado como ocorre num sistema de distribuição, que é inerente e construtivamente desequilibrado (Vergara, 2022).

Esses dados são essenciais na simulação para se definir a robustez de um sistema, e como dito anteriormente para o dimensionamento dos equipamentos com base nessas potências de curto-circuito.

- Transformador de Subestação

O transformador de distribuição da SED primária ele será responsável por realizar duas tarefas, a primeira será efetuar o abaixamento da tensão, já que esses equipamentos recebem do sistema de subtransmissão tensão de 69 ou 138 kV, logo ele reduzirá para 13,8 kV, e a segunda, assim como o próprio nome diz, para realizar a distribuição da energia da SED para cargas particulares também de média tensão, ou para os alimentadores de baixa tensão.

Esses transformadores possuem como dados, além dos valores de entrada e de saída de tensão, a potência de base para que ele possa fornecer energia para as cargas mais distantes e capilarizadas do seu sistema, de acordo com a demanda do circuito.

Essa potência de base, ou a potência aparente, medida em VA, de uma SED, será definida pela quantidade de energia elétrica que a demanda do circuito irá exigir da rede, ou seja, para certo consumo haverá um fornecimento igual ou maior para atender esse sistema. Essa potência será fornecida por este transformador de distribuição.

Sabendo da demanda, ou consumo que o sistema precisará atender, poderá ser calculada a potência aparente do circuito, e do transformador da SED que dar-se-á pela fórmula:

Potência aparente:

$$S = \frac{P_{inst}}{FP} \quad (4)$$

Onde:

S = potência aparente

P_{inst} = Potência instalada

FP = fator de potência

A potência instalada que foi encontrada utilizando a Tabela 2 será dividida pelo fator de potência requisitado pela ANEEL respeitando os níveis de qualidade necessários para o consumidor, desse modo a potência de base do circuito irá fornecer o mínimo exigido para atender o consumo.

- Linhas de distribuição

As linhas de distribuição são responsáveis, nesse caso, por realizar o transporte da eletricidade das SEDs para os consumidores finais, elas podem ser divididas de acordo com o seu material e ampacidade previamente calculada, podendo ser trifásicas, mais utilizadas na transmissão e distribuição, e monofásicas, essas exclusivas aos consumidores de baixa tensão.

Para as linhas de distribuição serão necessários os valores da seção dos condutores, número de fases, comprimento e valores de impedância de acordo com o material e ampacidade que serão utilizados para se atender as cargas.

2.2.2 Curvas de carga e demanda de recarga

As proteções deste sistema serão dimensionadas para se proteger tanto o alimentador quanto as linhas, logo elas serão calculadas utilizando os valores nominais da barra onde está a subestação, e serão utilizados os dados de curto circuito anteriormente abordados. Tais proteções podem ser diversas, mas as principais são as de curto circuito, de sobrecarga.

Já as linhas de distribuição de baixa tensão não irão diferir em conceito das linhas de distribuição de média tensão, a grande diferença obviamente será no dimensionamento dos condutores, que agora terão valores de tensão de até 380 V trifásico.

- Curvas de carga

Cada alimentador irá atender uma área, podendo ser específica ou não, já que dependerá das suas limitações de dimensionamento, como afirmado anteriormente, questões geográficas, ou do comportamento das cargas, que podem ser definidas como as curvas de

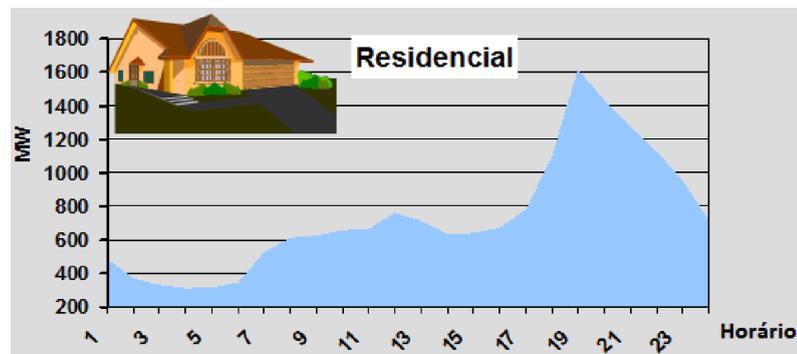
carga do sistema. Essas curvas irão sintetizar o consumo durante o dia exigido no alimentador; ou seja, cada um terá sua curva.

Essas curvas podem ser divididas em três diferentes categorias:

Residenciais:

As curvas residenciais que podem ser observadas em um modelo hipotético na Figura 4 têm como principais características um consumo pequeno durante a manhã e o período da tarde, e um elevado consumo no começo da noite; isso ocorre pelas movimentações pendulares em centros urbanos, a população deixa suas residências para ir estudar e trabalhar, por exemplo.

Figura 4 – Curva de carga típica residencial do SIN

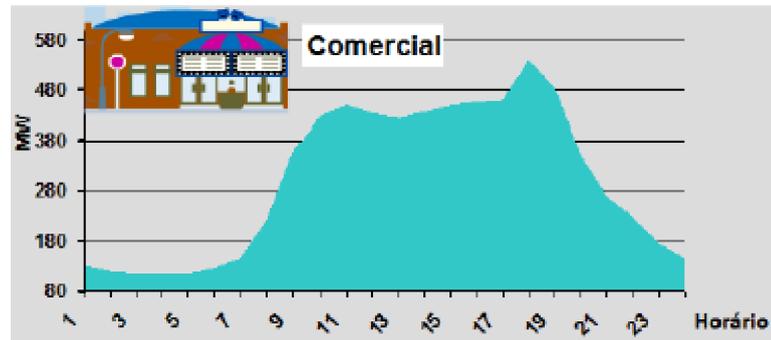


Fonte: Queiroz (2012).

Comerciais:

Nas curvas comerciais é possível se observar o inverso da curva residencial, como no modelo hipotético na Figura 5. Pelo mesmo motivo afirmado anteriormente, durante boa parte da manhã e toda à tarde, a população está exercendo alguma atividade, seja em centros estudantis, centros comerciais ou escritórios, entre outros, logo no período da noite e da madrugada esse consumo diminui bastante, restrito somente a restaurantes, bares e outros estabelecimentos noturnos.

Figura 5 – Curva de carga típica comercial do SIN

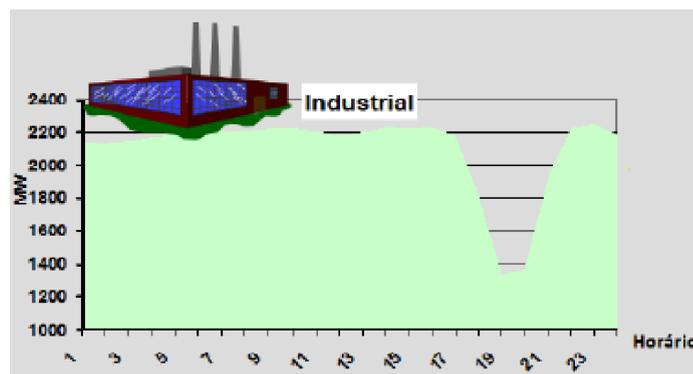


Fonte: Queiroz (2012).

Industriais:

Nas curvas de demandas industriais, Figura 6, o comportamento é mais linear, com uma leve queda no fim da tarde e começo da noite; isso se dá por muitas fábricas trabalharem por turnos, ou tendo que deixar suas máquinas ligadas durante o período da noite, como, por exemplo, em empresas que possuam refrigeradores, que são também as maiores consumidoras. Por conta disso, necessitam de maior potência, portanto boa parte das médias e grandes indústrias entra no caso especial de serem atendidas diretamente em média tensão por linhas particulares, logo são classes diferentes de atendimento, permitindo contratarem demanda junto à concessionária ou mesmo no mercado livre.

Figura 6 - Curva de carga típica industrial do SIN



Fonte: Queiroz (2012).

Um alimentador, dependendo da área de atuação do sistema, pode ter como características uma ou mais curvas, principalmente a combinação entre residencial e comercial, muito comum em grandes centros urbanos; ou seja, a soma dessas curvas poderá ser a curva do alimentador. Esse estudo é essencial para se definir como será projetada e desenvolvida toda essa rede de distribuição secundária, como atuarão seus sistemas de

proteção, o monitoramento dos níveis de qualidade, além da expansão para inserção de futuras cargas e seus impactos, como, por exemplo, a mobilidade elétrica, que será introduzido no subcapítulo a seguir.

Quando os veículos elétricos voltaram a ser pauta recorrente no cenário automobilístico, vários estudos foram realizados para se abordar o impacto que esse tipo de mobilidade traria, principalmente pela mudança no reabastecimento, onde os postos de combustíveis fósseis dariam lugar aos eletropostos e o surgimento de novos locais de recarga não convencionais, como residências, shoppings e universidades, entre outros.

O planejamento das concessionárias de energia tem que se adaptar a essas novas cargas entrando em seu sistema, cargas essas que têm como principal característica sua imprevisibilidade; tal qual um celular, o usuário do veículo elétrico pode escolher em qual local ele quer efetuar a recarga, independente da capacidade da bateria restante, entretanto, diferente do aparelho de telefonia móvel, o VE possui baterias maiores e sistemas de recarga mais complexos, criando-se assim um novo agente de impacto nas redes elétricas.

Inicialmente, a preocupação ficou restrita às centrais de recarga, as primeiras pesquisas surgiram no final do século XX, sobre os harmônicos que são injetados na rede por esses equipamentos eletrônicos de alta frequência, como se veem nos trabalhos de Berisha *et al.* (1996), Staats e Arpostathis (1998), Yanxia e Jiuchun (2005). Já no século XXI surgiram as soluções, como os filtros de harmônicos que diminuiriam a severidade do problema. Outras soluções foram abordadas em Yang *et al.* (2012) e Nguyen *et al.* (2013).

Foram estudados os perfis de recarga, Marques (2014), e sua imprevisibilidade de acordo com a evolução das baterias, que vão ficando maiores para permitir mais autonomia para o tempo de uso, Hannan *et al.* (2018), Rodrigues *et al.* (2014), e Kashima (2018), porém com baterias de maior capacidade de carga são necessários centros de recarga de maior potência, o que exige maior demanda da rede.

Outro fator se dá pela imprevisibilidade da recarga, de forma que não se sabe onde será realizada, ou em uma rede mais robusta ou em um sistema mais sobrecarregado, Kashima (2018). Esses estudos foram iniciados na década de 2010 e culminaram na inserção da infraestrutura urbana nas pesquisas.

2.2.3 Mobilidade elétrica e o conceito de imprevisibilidade na infraestrutura elétrica

A mobilidade elétrica não é uma novidade das últimas décadas. No começo do século XX o cenário era diferente, segundo Husain (2003), os veículos elétricos tinham maior

percentual de vendas que os movidos a combustíveis fósseis e os até então movidos a vapor, entretanto a incipiente infraestrutura de recarga, além de tecnologias elétricas e eletrônicas em estágios muito iniciais fizeram com que esse tipo de transporte fosse descartado, isso devido à facilidade de reabastecimento de combustíveis fósseis e a criação da partida rápida para os VCIs, que dominaram e ainda dominam o mercado há 100 anos.

Na década de 1970, e mais efusivamente na virada do milênio, iniciativas governamentais e das próprias montadoras levadas pelo crescente embate sobre a sustentabilidade fizeram com que a mobilidade elétrica voltasse a ser pauta de estudos, logicamente isso foi impulsionado pelas novas tecnologias elétricas e eletrônicas, como sistemas de armazenamentos (baterias) e conversores de corrente (eletrônica de potência), os quais permitiram naquele primeiro momento uma grande aceitação para veículos híbridos não plug in; ou seja, o sistema motriz do veículo é um conjunto entre motor elétrico e motor a combustão sem que haja necessidade de recarga das baterias, pois isto já é realizado pelo motor a combustão funcionando como gerador.

Com o decorrer do século XXI vários autores, como Kempton e Tomic (2005) e Su (2013) entendiam que para se atingir os níveis de sustentabilidade desejados seria necessário que a mobilidade fosse 100% livre de emissão de gases do efeito estufa (GEE).

Desse modo, os veículos puramente elétricos, que são plug in e necessitam se conectar à rede elétrica para recarregar seu sistema de armazenamento, se tornaram o principal referencial para o desenvolvimento da mobilidade elétrica; logo, ocorreu o empecilho para a consolidação dos VEs ainda no século XX, que não poderiam mais ser no século XXI devido à infraestrutura precária de recarga.

Obviamente ainda continuam os estudos para as tecnologias embarcadas dos VEs, como nos sistemas de armazenamento, abordado por Hannan *et al.* (2018), e Marques (2014), visando ao aumento da capacidade carga da bateria e seu gerenciamento para se obter maior autonomia, ou na evolução da eletrônica de potência, abordado por Rodrigues *et al.* (2014), e Kashima (2018), com o intuito de se diminuir as perdas e assim aperfeiçoar o conforto para o usuário, ou permitir a conexão bidirecional entre rede e veículo elétrico. Entretanto, o impacto dessas recargas, e como a infraestrutura elétrica da concessionária, por sua capacidade de rede, seriam capazes de lidar com essas novas cargas, tornou-se um grande desafio.

As recargas de um veículo elétrico são classificadas em quatro diferentes modos pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), são elas as normas responsáveis por regular este processo de recarga IECs 61851, 62196 e 62752, conforme pode ser observado na Tabela

3. Elas são diferenciadas pelos seus níveis de tensão e corrente e pela conexão entre a rede elétrica e o sistema de armazenamento, podendo ser em corrente alternada (CA), Figura 7, ou corrente em contínua (CC), Figura 8.

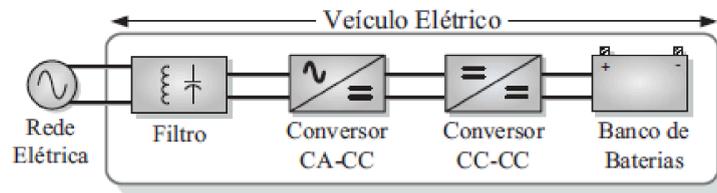
Tabela 3 - Métodos de recarga pelas IEC's 61851,62196 e 62752

Modo de Recarga	Descrição	Máximas correntes e tensões	Duração
Modo 1	conexão condutora entre um padrão de tomada de uma rede de alimentação CA e o veículo elétrico (VE) sem comunicação ou recursos de segurança adicionais	16 A, 250 V CA, 1 fase A, 480 V CA, 3 fases	16 8 - 12 horas
Modo 2	conexão condutora entre um padrão de tomada de uma rede de alimentação CA e o veículo elétrico (VE) com comunicação e recursos de segurança adicionais	32 A, 250 V CA, 1 fase A, 480 V CA, 3 fases	32 3 - 8 horas
Modo 3	conexão condutora entre um veículo elétrico (VE) e a uma central de recarga em CA com comunicação e recursos de segurança adicionais	1: 32 A, 250 V CA, 1 fase 70 A, 250 V CA, 1 fase 480 V CA, 3 fases 16/32 A, 250 V CA, 1 fase, 63 A, 480 V CA, 3 fases	2: 63 A, 3: 1 - 3 horas
Modo 4	conexão condutora entre um veículo elétrico (VE) e a uma central de recarga em CC com comunicação (de alto nível) e recursos de segurança adicionais	AA: 200 A, 600 V CC BB: 250 A, 600V CC 200 A, 600 V CC 200 A, 1000V CC	EE: FF: Menor que 1 hora

Fonte: Adaptado de Hanauer (2018).

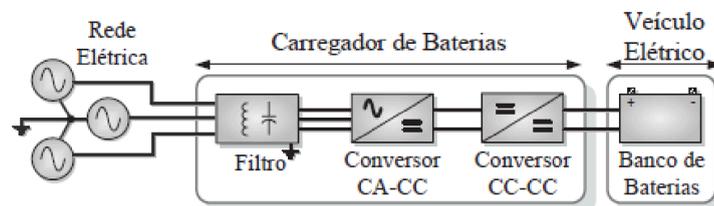
Essa conexão entre a rede elétrica (em CA) e a bateria do VE (em CC) pode ser feita em corrente alternada, ou contínua. Nas recargas lentas e intermediárias os conversores são embarcados, Figura 7; logo, a conversão de CA para CC é realizada no veículo elétrico, pois a complexidade da eletrônica de potência e os custos ainda são relativamente mais simples. Nas recargas ultrarrápidas, o sistema de conversão é fora do veículo elétrico, em uma estação de recarga. Desse modo, sua saída será em CC e será conectada diretamente ao veículo, Figura 8.

Figura 7 - Carregador de baterias para VEs - diagrama de blocos (circuitos típicos): carregador embarcado



Fonte: Rodrigues *et al.* (2014).

Figura 8 - Carregador de baterias para VEs - diagrama de blocos (Circuitos típicos): carregador externo



Fonte: Rodrigues *et al.* (2014).

Desse modo, já se conclui que existem três imprevisibilidades nessas novas cargas. Enfim, qual será a recarga efetuada e onde isso ocorrerá? As recargas lentas e as intermediárias podem ser realizadas em ambiente residencial, mas as outras duas mais rápidas não, já que por serem mais caras estão presentes em áreas comerciais. Junto a esses dois pontos também se pode levar em consideração o “quando”; ou seja, em qual período do dia seria feita essa recarga.

Esses três fatores são os principais tópicos do conceito de imprevisibilidade das novas cargas conectadas à rede elétrica. Diferentemente de um eletrodoméstico que exige maior carga da rede, essas novas cargas não estarão fixadas em um só lugar; elas são movimentadas e desse modo pode ser feito um paralelo com os celulares, já que são bem comuns os usuários desse item efetuarem a recarga em diferentes locais, entretanto os veículos elétricos causando sobrecarga na rede; sendo assim, já pode ser observada a primeira dúvida a partir desse conceito: a rede ela será capaz de fornecer, naquele local, naquela hora, uma recarga rápida, por exemplo?

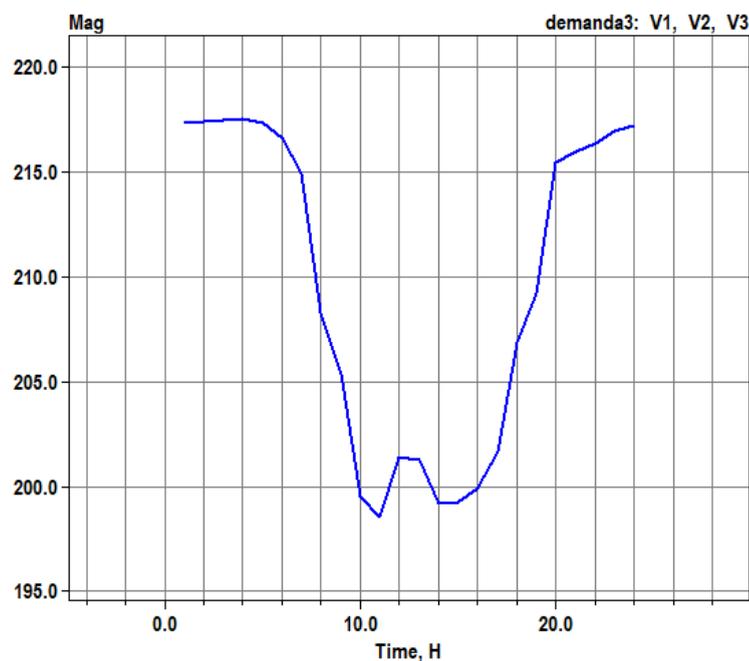
Tal questionamento fez com que novos estudos surgissem levando em conta quais os impactos que essas cargas migratórias exercem sobre a rede elétrica, bem mais complexa que somente a sua conexão à rede.

Alguns desses impactos podem ser vistos na Figura 9, que apresenta um cenário de três veículos sendo recarregados no modo intermediário de 12,2 kW, entre 9h e 13h de um dia de semana, de modo a se entender como os níveis de qualidade do serviço e do produto seriam afetados, por exemplo, devido ao afundamento da tensão.

Esses valores de tensão de atendimento seguem o módulo 8 do Prodist como pode ser observado na Tabela 1. Além disso, ocorreu também aumento das perdas, piora no fator de potência, sobrecarga nas linhas de distribuição de baixa tensão, e no alimentador. Alguns desses dados podem ser observados no Quadro 1, que vem com o mesmo cenário da Figura 9, sendo que a visão agora não será na carga, mas sim de todo o sistema de potência.

Tal impacto também foi constatado nas curvas de carga que tiveram alterações em seu comportamento. Nas curvas residenciais houve um aumento de consumo, mesmo que mínimo, durante o período da noite e da madrugada, enquanto que nas curvas comerciais e industriais houve um aumento além dos picos de consumo, logo saturando estes sistemas.

Figura 9 – Afundamento na tensão monofásica (220 V), quando conectados 3 veículos em recarga média, 12,2 kW, na rede entre as 9h e 13h, mínimo permitido pela ANEEL é de 202 V, como vista na tabela 1:



Fonte: Dados de pesquisa (2020).

Quadro 1 – Três veículos elétricos conectados à rede elétrica, em recarga média, 12,2 kW, na rede entre as 9h e 13h

Com carregador de 12,2 kW					
Cenário 2.3 - 9h-13h	9	10	11	12	13
max.pu	0,99903	0,99897	0,99893	0,99906	0,99906
min.pu	0,8941	0,88901	0,88494	0,89741	0,89683
potência ativa (kW)	202,56	213,3	221,9	195,553	196,8
potência reativa (kvar)	95	100,57	105	115,48	92
perdas ativas %	6,072	6,329	6,536	5,9	5,935
perdas reativas (kvar)	14	15,45	16,67	13,08	13,24

Fonte: Dados de pesquisa (2020).

Viu-se aqui a necessidade de se entender melhor o conceito de imprevisibilidade e como a criação de sistemas inteligentes e a inserção de novas tecnologias na rede elétrica seriam essenciais para mitigar os problemas havidos.

No Quadro 2, onde há inserção de microgeração solar no mesmo cenário, ocorreram melhoras significativas.

Quadro 2 – Três veículos elétricos conectados à rede elétrica, em recarga média, 12,2 kW, na rede, entre 9h e 13h, com auxílio de microgeração solar, 70 kW na rede

Com carregador de 12,2 kW com planta solar					
Cenário 2.3 – 9h-13h	9h	10h	11h	12h	13h
max.pu	0,99916	0,9991	0,99906	0,99919	0,99906
min.pu	0,92686	0,92164	0,91751	0,93023	0,92964
potência ativa(kW)	135,6	146,67	155,43	128,4	129,71

Fonte: Dados de pesquisa (2020).

Essas soluções são fundamentais para que problemas voltados ao sistema elétrico sejam mitigados, entretanto, como será estudado no subcapítulo 2.3, o impacto da mobilidade elétrica ultrapassou a infraestrutura elétrica e começou a afetar a dinâmica de fluxo no meio urbano; desse modo, houve o surgimento de novos agentes que integram e tornam mais complexo o conceito de imprevisibilidade. Isso ocorre pelas centrais de recargas que irão se encontrar não somente na figura de postos, mas também dentro de estabelecimentos não

usuais para o reabastecimento, caso dos veículos elétricos movidos à combustão interna, como escritórios, hospitais ou universidades, por exemplo.

2.3 Infraestrutura Urbana

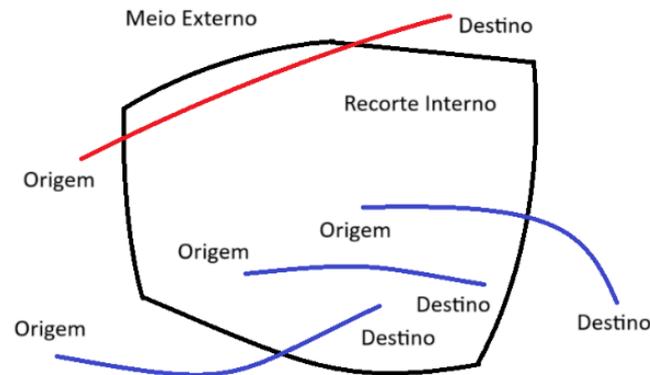
Do mesmo modo que a infraestrutura elétrica, a infraestrutura urbana irá interagir ou sofrer interação da mobilidade elétrica para com ela, entretanto, diferentemente dos sistemas elétricos, o meio urbano somente nos últimos anos virou alvo de estudo, o conceito de imprevisibilidade, que antes tratava o VE como única e exclusivamente uma carga, agora aborda o impacto que essa nova tecnologia causará em um ambiente mais macro.

A infraestrutura urbana será composta não somente pelo conceito de ruas, avenidas, calçadas, prédios, iluminação ou paisagismo, entre outros, mas principalmente pela influência que a população irá exercer sobre eles. Referido impacto vai desde a valorização ou desvalorização de certos imóveis até à ampliação de vias públicas, sempre acompanhadas de estudos de viabilidade e do planejamento da cidade. Desse modo, observa-se o aumento do número de pesquisas voltadas a entender a dinâmica de vários agentes do meio urbano, como, por exemplo, a mobilidade elétrica envolvendo desde o fluxo do tráfego, a localização dos pontos de recarga, até seus acessos.

Para se entender como essa nova tecnologia irá interagir com a infraestrutura urbana, é necessário dividir a metodologia em três diferentes pilares.

O primeiro referente à Sintaxe, em que a estrutura viária define a hierarquia dos movimentos e a escolha do uso e da ocupação sendo responsável por fazer a análise topológica de oferta de origem e destino, observada na Figura 10, e estimar pontos potenciais de congestionamento apresentando cenários diante do avaliado.

Figura 10 – Análise da migração pendular de Origem e Destino



Fonte: Adaptado de Cavalcante *et al.* (2009).

Logo, percebe-se pela Figura 10 que a origem e destino do fluxo de uma pessoa pode começar ou terminar dentro da área especificada, pode começar e terminar dentro da área, ou nem pode começar e nem terminar, demonstrando a dificuldade de se estudar esses movimentos e seus impactos no espaço.

O segundo se refere à Semântica, que parte das restrições de leis de uso e ocupação, limites dos terrenos existentes e continuidade de vias e capacidades de ocupação desenvolvendo possibilidades de uso do solo (via algoritmos genéticos).

O terceiro, a Validação, em que se realiza uma validação dos fluxos potenciais da técnica da Sintaxe Espacial, com a comparação com os fluxos em tempo real obtidos a partir da camada 'Trânsito' do Google Maps em determinado local e horário das áreas estudadas (esquinas, bairros e outros).

2.3.1 Sintaxe

O primeiro tópico tratará da Sintaxe, que se pauta na dinâmica do fluxo de tráfego com a estrutura urbana; ou seja, o estudo da movimentação de pessoas, sejam elas ciclistas, motoristas, ou mesmos pedestres, nas diferentes horas do dia, indo e vindo de diferentes locais. Desse modo, será abordado o conceito de migração urbana dividida em dois fatores: a relação origem x destino e a variação durante o dia.

a) Origem e destino:

O primeiro fator que será considerado é em relação às viagens urbanas, mais especificamente de onde a pessoa está saindo e para onde ela está indo. No meio urbano esses movimentos migratórios são definidos como pendulares, em certo horário do dia há um fluxo

de pessoas se movimentando de um ponto A para um ponto B, e em outro horário do dia do ponto B para o ponto A, assim como um pêndulo.

O estudo desses movimentos é de muito interesse dos órgãos governamentais para que seja possível entender as realidades das grandes cidades, refletindo vários aspectos que vão desde os espaciais, como o impacto nas vias, até os sociais, como, por exemplo, qual a divisão nos meios de transportes utilizados, desse modo compreendendo quais os desafios e as oportunidades para se adequar um planejamento abrangente tanto nas regiões de origem quanto nas de destino, segundo Aranha (2005).

Logo, é importante se definir quais são esses pontos A e B, e se existem mais pontos incluídos no dia a dia da população, que serão exceções, mas que influenciam no entendimento de serem locais que irão atrair a população. Esses pontos A e B em dias de semana costumam ser o ponto A as residências e o ponto B seus locais de trabalho ou de estudo, gerando assim o principal fluxo migratório em um meio urbano.

As exceções que fogem à regra, ou que são um derivado do fluxo pendular, são as viagens para locais voltados para serviços, ou para entretenimento. No primeiro caso é possível se destacarem os postos de combustíveis e supermercados, entre outros; no segundo caso, os shoppings ou praças esportivas demonstram gerar maior interesse da população. Esses locais se diferem do fluxo principal, pois são voltadas às necessidades, em relação aos serviços, ou são casos de oportunidade em relação ao entretenimento, por exemplo. Ninguém vai para um posto de combustível se o tanque do carro estiver cheio, ninguém vai para um estádio de futebol se não houver jogo.

A partir disso, surge uma estrutura dividida em duas camadas para os fluxos de origem-destino, o principal voltado às viagens com relação à residência – atividades, e o secundário relacionando necessidades e serviços, entretanto nesse último caso o ponto de origem pode ser tanto o das residências quanto o das atividades. Desse modo, para se aprofundar um pouco mais no tema é importante abordar como a análise temporal irá influenciar nesse fluxo, definido pelos horários e dias da semana, e a intensificação de habitantes dirigindo-se a esses locais.

b) Horário:

O segundo fator considerado é em relação ao horário, que será similar às curvas de carga introduzidas no subcapítulo da infraestrutura elétrica, pois o consumo de energia e o movimento da população para certas áreas são paralelas; ou seja, onde há maior consumo é porque há maior fluxo de pessoas, logo para se chegar a esse local o trânsito está correlacionado. Assim, as migrações pendulares ganham um novo aspecto além da origem e

do destino, pois em certo período do dia, na maioria das vezes pela manhã, ocorre a saída de casa para ambientes de trabalho, ou escolares, e ao final do dia retorna-se para o ponto de origem, funcionando assim como um pêndulo; no caso do fluxo secundário os dias da semana também irão interessar, pois é, por exemplo, nos finais de semana que há maior interesse para o consumo do entretenimento ou para ir à procura de serviços.

O fluxo principal será orientado no sentido periferia – centro – periferia; ou seja, as periferias são onde a maioria da população reside, e o centro é onde a maioria da população trabalha ou estuda, logo é nesses horários entre 6h e 9h da manhã, e 18h e 21h que ocorrerá a maior incidência de tráfego, não somente de veículos particulares, mas também de veículos públicos, e também de pedestres, principalmente em dias úteis da semana, o que será possível ser observado por meio de softwares, como o Google Maps, com o fluxo de pessoas nesses sentidos.

O fluxo secundário poderá ser orientado tanto no sentido residencial – atividade – lazer/serviço – residencial, como no sentido residencial – lazer/serviço – residencial. Essa diferença dar-se-á principalmente por dois fatores, o primeiro será em relação às oportunidades; por exemplo, um jogo de futebol em pleno dia útil, e o segundo será relacionado à comodidade, em que grande parte da população deixa para fazer as compras, ou ir ao cinema, aos finais de semana. Portanto, esse fluxo secundário será mais imprevisível, mesmo com o fluxo dividido, pois vários desses serviços podem ser realizados em diversos locais mais próximos dos pontos de origem.

Logo, todos esses aspectos que vão desde essa relação origem/ destino, levando em conta as migrações pendulares, até os horários e as obrigações pessoais de um habitante, serão condicionados para qual local haverá deslocamento para realizar suas atividades, sendo estas responsáveis por atrair a população e integrar o fluxo de tráfego de pessoas. Para esses locais se dá o nome de polos geradores de viagem (PGV), que será mais bem definido no próximo tópico.

c) Polos atratores de viagens:

Desse modo, por último é necessário entender de onde e para onde essas pessoas estão se movimentando, esses locais são conhecidos como pontos atratores, ou polos geradores de viagem.

Os Polos Geradores de Viagens (PGVs) são locais ou instalações de distintas naturezas que têm em comum o desenvolvimento de atividades em um porte e escala capazes de exercer intensa atratividade sobre a população, produzir um contingente significativo de

viagens e necessitar de grandes espaços para estacionamento, carga e descarga e embarque e desembarque, promovendo, conseqüentemente, potenciais impactos.

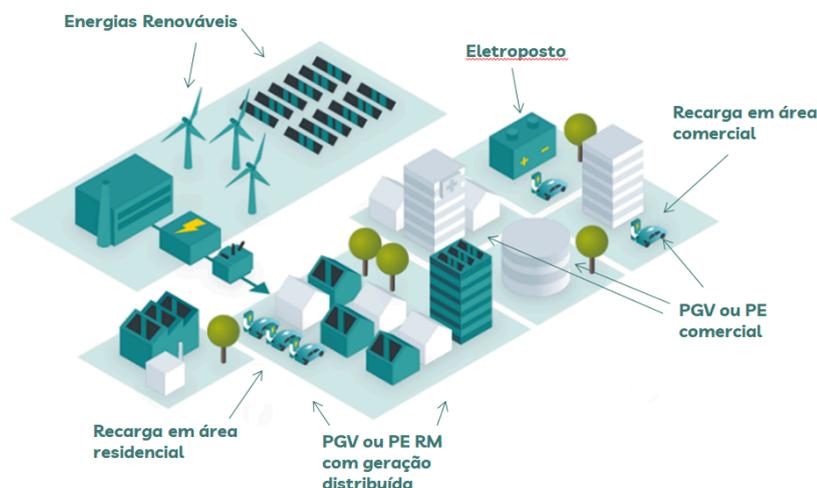
Os shopping centers, hipermercados, hospitais, universidades, estádios, terminais de carga, estações de transportes público e mesmo áreas protegidas do tráfego de passagem com múltiplas instalações produtoras de viagens são alguns tipos de PGVs. Esses pontos podem ser definidos em dois diferentes momentos segundo Belato *et al.* (2001). O primeiro é o ponto atrator periódico, que se adequa à dinâmica de horário já especificado, esses pontos são os locais de trabalho, as escolas, os supermercados, os shoppings e os postos de combustíveis, entre outros que fazem parte do hábito periódico da população; o segundo é o ponto atrator caótico. Como o próprio nome diz, são eventos não costumeiros que atraem pelo seu potencial grande tráfego de pessoas, como, por exemplo, grandes eventos esportivos, ou apresentações musicais, ou também as grandes festas, como Natal, virada de ano e carnaval, que geram aglomerações em locais específicos, principalmente nos de compra em períodos específicos do ano e horários do dia.

No caso dessa tese os pontos atratores abordados serão os periódicos, na nova dinâmica da mobilidade elétrica novos polos geradores de viagem surgem nos meios urbanos, de modo que certa atividade irá influenciar em outras áreas, neste caso são os pontos de recarga para veículos elétricos.

Diferentemente dos postos de combustíveis que tinham locais definidos, as estações de recarga podem ser adaptadas em locais não usuais para a antiga realidade de reabastecimento, as recargas atualmente podem ser feitas em qualquer local que seja dotado de uma estação de recarga, podendo ser localizadas em prédios comerciais, shoppings, universidades e hospitais, entre outros locais que possuem estacionamento e fazem parte das migrações pendulares, Figura 11.

Logo, os pontos atratores entram no conceito de imprevisibilidade que antes eram específicos para o cenário elétrico e agora também envolverão a infraestrutura urbana.

Figura 11 – Cenário de Smart Grid com pontos de recargas em vários locais



Fonte: Adaptado da Siemens.

2.3.2 Semântica

A segunda parte da metodologia abordará um aprofundamento nessa parte dos pontos atratores, mais especificamente nas legislações envolvendo o uso e a ocupação do solo. Essa legislação é específica de cada cidade, no caso dessa tese será abordada a da cidade de Fortaleza, pela lei complementar nº 236, de 11 de agosto de 2017, Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo, sendo parte da regulamentação do Plano Diretor de Fortaleza, Figura 12.

A Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo é uma legislação municipal que visa estabelecer regras, normas e parâmetros para o uso do solo; ou seja, cada cidade irá utilizar essa legislação para realizar o controle do espaço urbano por meio de padrões, definindo o que será ou não permitido em cada ambiente público.

Por ser uma legislação municipal, fica a critério de o órgão governamental responsável adequar as normas para a realidade da sua cidade, levando em conta aspectos geográficos, como proximidades a encostas, praias e vegetação natural, entre outros, considerando as licenças ambientais e a proteção à natureza, bem como os aspectos culturais e patrimônios da cidade, os aspectos socioeconômicos e o planejamento para o que se deseja para o futuro, sintetizando-se, assim, no Plano Diretor que estabelece padrões para estes casos, evitando que os limites definidos não sejam ultrapassados e que as atividades neles exercidas não sejam prejudiciais à infraestrutura da cidade e à natureza no presente e para futuro.

Essas atividades podem ser no âmbito civil no que se refere a construções, elas são analisadas pela lei para que tudo esteja correto entre o comprador e o futuro construtor do terreno, bem como o município elas ocorrerão. Do mesmo modo acontece para atividades comerciais, em que empresas dos mais diversos setores precisam estar regularizadas com a lei do uso e a ocupação do solo, desde as instalações físicas, até como cada empresa funciona; caso contrário, será negada tal atividade.

A Lei do Uso e Ocupação do Solo é fundamental para se estipular o desenvolvimento sustentável e socioeconômico da cidade para o presente e para a projeção e expansão no futuro, desse modo são estabelecidos alguns parâmetros que devem ser seguidos para a construção do Plano Diretor do município, alguns deles podem ser vistos a seguir:

- Atualização, organização e padronização dos espaços públicos e da infraestrutura urbana;
- Definição de estratégias de proteção ambiental;
- Delimitação das áreas de restrição à ocupação urbana;
- Padronização do zoneamento e dos conceitos de parâmetros dos terrenos;
- Facilidade de acesso ao transporte público, com geração de trabalhos e arrecadação de impostos;
- Definição de novos grupamentos e de critérios para a ocupação das calçadas.

Figura 12 – Capa da lei complementar nº 236, de 11 de agosto de 2017, Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo



Fonte: Fortaleza¹ (2017).

Este projeto é dividido em sete títulos, dispostos no Apêndice.

2.3.3 Validação

Na validação, a sintaxe e a semântica se encontram, combinando os processos migratórios e envolvendo todas as variáveis já descritas, bem como a Lei do Uso e Ocupação do Solo. Logo, os locais de origem e de destino, e toda a normatização por legislação e dados oriundos geram um conceito de rede morfológica da sociedade em uma área urbana.

Desse modo, realiza-se uma validação dos fluxos potenciais da técnica da Sintaxe Espacial. A sintaxe espacial pode ser definida como um ramo da teoria do urbanismo. Hillier define a Sintaxe especial em duas questões.

¹ Lei complementar nº 236, de 11 de agosto de 2017, Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo, sendo parte da regulamentação do plano diretor de Fortaleza.

1) o desenho do espaço origina consequências para o padrão de vida espacial ao qual ela pertence? e; 2) a vida espacial sofre consequências da patologia social? A resposta à primeira questão é claramente arquitetônica. A resposta à segunda questão é mais sociológica! Caso o projeto espacial não tenha nenhuma consequência para a vida espacial em um primeiro momento, então o problema da relação entre vida espacial e patologia social estará relacionado apenas aos domínios das ciências sociais. A SE demonstra que é possível identificar os 'padrões espaciais' de movimentos, em resposta à primeira indagação (Hillier, 1987).

Logo, essa dissertação visa entender quais efeitos essa inserção de VEs irá gerar ao originar um novo padrão de vida espacial, tanto em relações a padrões de movimentos, quanto às ocupações em áreas urbanas.

Portanto, enquanto a sintaxe está diretamente relacionada ao arranjo dos espaços, ou à configuração de sua estrutura, a semântica está relacionada ao seu significado. Por arranjo semântico do espaço de uma cidade entende-se a disposição, o tipo e a intensidade do uso e ocupação do solo e suas atividades sociais, classificadas segundo critérios próprios, Cavalcante e Jales (2008).

A validação se inicia com os processos de georreferenciamento, este se baseia no trabalho de introduzir informações geográficas, sociais e econômicas, entre outras no mapa de acordo com as coordenadas às quais essas informações pertencem; ou seja, serão desenvolvidos sistemas de referência para cada caso e seu conteúdo será sobreposto no mapa de acordo com sua área; esse mapa pode ser uma imagem de satélite, ou a estrutura de estradas de rodagem; a Figura 14 representa uma imagem de satélite, obtendo um mapa geográfico de relevos. Já na Figura 15 será introduzida no mapa das ruas da cidade de Fortaleza a velocidade do trânsito representada por cores em um determinado horário.

Na base de dados do georreferenciamento, todas essas variáveis obtidas da sintaxe e semântica na dissertação foram inseridas no mapa da cidade, esses dados são oriundos tanto do censo nacional demográfico, quanto de empresas fornecedoras de serviços básicos que tem a necessidade de mapear seus usuários, como concessionárias de saneamento básico, energia elétrica e água, entre outros, até empresas privadas, como o Google que oferta o aplicativo Maps, que é seu serviço de GPS. A Figura 13 é um exemplo da integração entre estes dados para a cidade de Fortaleza.

Figura 13 – Mapas de eixos (ou “mapa axial”) de Fortaleza, assinalando a direita a área estudada

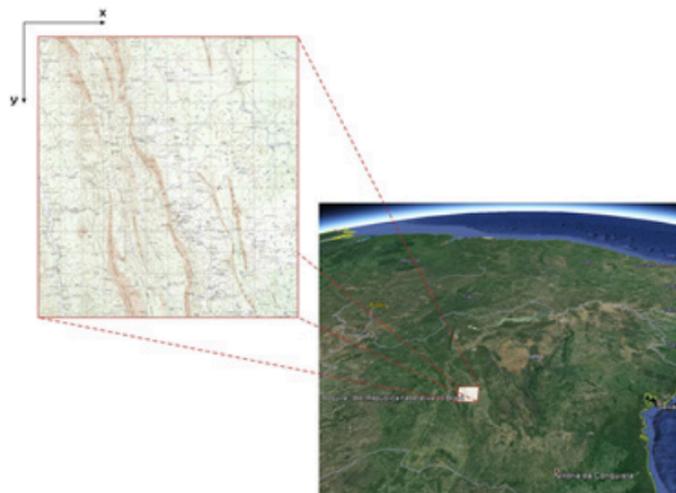


Fonte: Cavalcante *et al.* (2009).

Esses dados serão integrados e como resultado procura-se obter os fluxos em tempo real no meio urbano e como a estruturação operacional da cidade será moldada ou impactada.

O georreferenciamento nas cidades ainda é muito incipiente, ainda iniciando com estudos realizados separadamente por setores da sociedade, que evitam interagir com outros assuntos que não fazem parte do seu escopo de trabalho, logo há um número ainda muito limitado de sistemas de referência criados para se estudar além de somente uma disciplina.

Figura 14 – Imagem de satélite georreferenciada



Fonte: Melo *et al.* (2014)

Figura 15 – Malha viária de Fortaleza georreferenciada



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

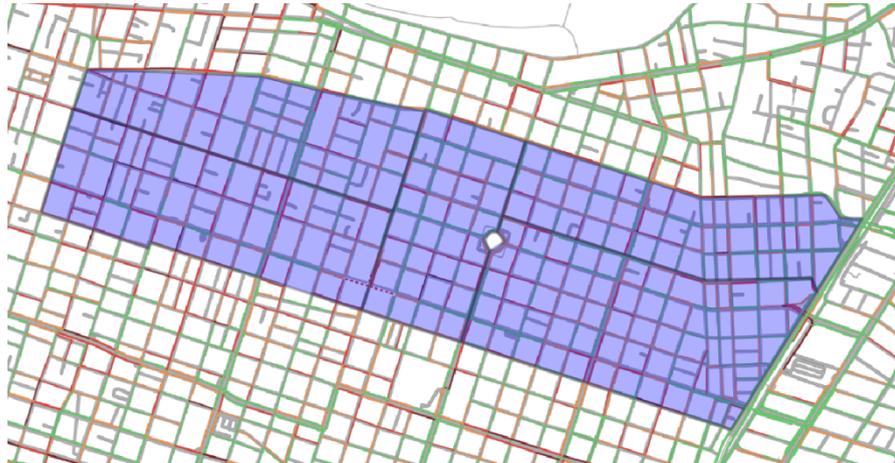
Um dos critérios próprios atribuídos a encontrar esses padrões será observado por meio do estudo no Google Maps, onde se vê a comparação com os fluxos em tempo real, obtidos a partir da camada ‘Trânsito’ em determinado local e horário das áreas estudadas (esquinas, bairros e vielas, entre outros). Será realizada a validação dos valores encontrados em bases de dados dos institutos de pesquisa para com o georreferenciamento; ou seja, uma análise da Semântica espacial utilizando o software QGIS para unir os dados de satélite, ou coordenadas, com a base de dados desses institutos e com a Lei de Uso e Ocupação do Solo, de modo a integrar esses três cenários para melhor interpretação.

Primeiramente, será avaliado o tráfego do Google Maps usando uma camada desse produto do Google conhecida como ‘Trânsito’, que capta os sinais de GPS compartilhados pelos smartphones dos usuários e outros dispositivos conectados, permitindo aos usuários do Google Maps verificar como está o trânsito em diferentes cidades. De acordo com a documentação da plataforma, esta camada fornece informações em tempo real sobre o tráfego, bem como o comportamento típico do tráfego para uma região desejada. A carga de tráfego é classificada em três categorias empregando um esquema de cores, como segue:

- Verde (rápido): 85 - 100% das velocidades de fluxo livre.
- Laranja (lento); 45 - 85%
- Vermelho (parar e ir): 0 - 45%

Pode ser vista sua representação na Figura 16, obtida do Google Maps para a área que será utilizada para o estudo de caso.

Figura 16 – Camada ‘Trânsito’ do Google Maps para a área de estudo



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

O cálculo aproximado da velocidade da via é realizado pela média considerando o intervalo superior V_{up} e o intervalo inferior V_{down} :

$$V_m = \frac{V_{up} + V_{down}}{2} \quad (5)$$

Onde V_{up} , ou a máxima velocidade média é obtida por:

$$V_{up} = 50 * gr + 24 * or + 8 * rr \quad (6)$$

E V_{down} , ou a mínima velocidade média é obtida por:

$$V_{down} = 24 * gr + 8 * or + 0 * rr \quad (7)$$

Onde:

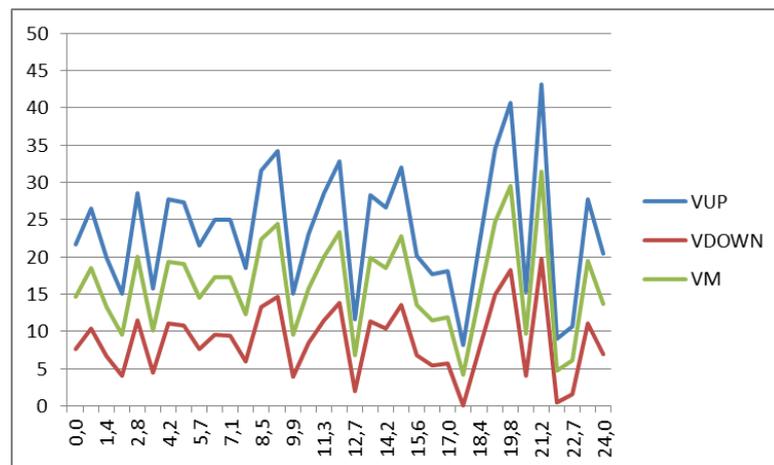
Para o tráfego na categoria vermelha, ou lenta, será adotado o termo rr (*red real time*);

Para o tráfego na categoria laranja, ou intermediária, será adotado o termo orr (*orange real time*);

Para o tráfego na categoria verde, ou rápida, será adotado o termo gr (*green real time*).

Existe um intervalo de incerteza em virtude das medidas, de modo que ao final desses cálculos serão obtidas as faixas da velocidade máxima e da mínima, bem como a média nessa via em específica, Figura 17.

Figura 17 – Faixa de velocidades em uma via durante um dia da semana, VUP igual à máxima velocidade média, VDOWN igual à mínima velocidade média, VM a velocidade média



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Vale ressaltar que na camada de tráfego do Google Maps são considerados todos os modos de mobilidade (pedestres, bicicletas e veículos, entre outros). Nesse contexto, do ponto de vista humano, um adulto jovem caminha a velocidades de 0,8 a 1,2~m/s, variando com a idade, o que corresponde a velocidades de até 4,32~km/h típicas em vias de trânsito locais DENATRAN (2001).

Uma bicicleta dentro da mesma amostra de pessoas desenvolve velocidades entre 20 e 60~km/h, caracterizando assim um trânsito lento a moderado, com rotas coletoras DENATRAN (2001).

Para velocidades acima de 80km/h é natural inferir que apenas veículos circulam nas vias correspondentes, já que apenas os veículos devem atingir tais velocidades. Supõe-se, portanto, conforme DENATRAN (2001), que tais vias correspondem àquelas de grande dimensão e capacidade de tráfego, como as vias arteriais e as expressas.

A classificação apresentada anteriormente em três categorias de tráfego é adotada neste trabalho. A partir deste pressuposto é realizada uma análise para as três categorias de tráfego dentro de uma determinada delimitação do polígono.

Por meio das técnicas aplicadas, ocorre a capturas de tela da camada de tráfego e se torna responsável pelo percentual de deslocamentos realizados pelos pedestres em cada

bairro estudado. A data de horário escolhida foi das 8h às 20h; entretanto, como nesse caso as simulações ocorrem durante as 24 horas do dia, nos horários em que não há valores disponíveis do trânsito foi aderida a maior velocidade média dentre os valores disponíveis, adotando-se um intervalo de 15 minutos entre cada captura de tela.

Ao final de cada dia são geradas 72 imagens com resolução de 1280x720 para cada bairro, totalizando 2016 imagens capturadas ao final do estudo, que serão utilizadas como entrada para o algoritmo, e, ao final do processo, um arquivo .csv é obtido para cada bairro contendo os dados de mobilidade no intervalo estudado. O processo para estimar esses valores é realizado inicialmente definindo os limiares de filtragem para cada cor no sistema RGB (gr, orr, rr).

No software QGIS será utilizada uma imagem da área georreferenciada na mesma resolução, porém com a camada de tráfego desabilitada, o resultado da subtração da imagem coletada com esta imagem fixa é utilizado para o processo de filtragem de cores, este processo é realizado pela função *removemarker*. A filtragem de vermelho, laranja e verde é realizada pelas funções *greenfilter*, *orangefilter* e *redfilter*. Tais funções promovem a filtragem com base nos limites estabelecidos, ao final o número de pixels de cada cor é obtido, a taxa de mobilidade do pedestre é então definida como a porcentagem de pixels vermelhos em relação ao total.

Desenvolvendo assim a semântica espacial, nesse caso será estudado o georreferenciamento e a inserção de dados utilizando imagens de satélite, e do zoneamento da cidade, identificando assim as coordenadas de ruas e avenidas, entre outros; no segundo momento, utilizando o cadastro na prefeitura atendendo a lei do uso e ocupação do solo, e do censo municipal de Fortaleza realizado em 2010, serão implementados os dados referentes aos estabelecimentos, podendo ser residências, comércios, parques, indústrias e terrenos baldios, entre outros locais designados pelo governo municipal.

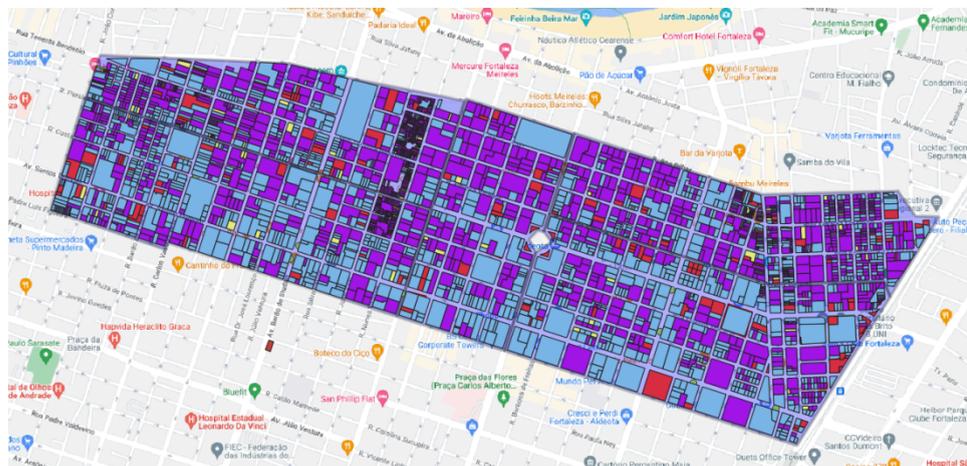
Esses dados que são inseridos no georreferenciamento são obtidos pelo Centro Nacional de Processamento de Alto Desempenho (CENAPAD), responsável como o próprio nome diz em processar esses dados, criar uma base e formular algoritmos para que tais valores não sejam somente números, mas sim que tenham uma interpretação para serem utilizados em futuras pesquisas.

No caso dessa dissertação, os valores do censo municipal serão utilizados para definir qual atividade será realizada no determinado local, logo irão se mapear todos os estabelecimentos da cidade na área de estudo, identificando, assim, o número de unidades consumidoras que exista nessa área, os locais habitados, ou que exercem alguma atividade.

Esses valores são essenciais para se definir, ao menos por estimativas, qual o consumo de energia daquele recinto, valores esses que já foram abordados no subcapítulo 2.2, Tabela 2.

As duas figuras a seguir, 18 e 19, já são as representações desses dados na cidade de Fortaleza na área em estudo; no primeiro caso a determinação de qual atividade há naqueles locais e, no segundo caso, já com a utilização do algoritmo de cálculo em que será estimado qual o consumo de energia nesses locais, desse modo podendo se definir quais os locais que são atendidos em baixa tensão devido a um consumo inferior a 5000 kWh, e aqueles que podem ser atendidos em média tensão, pois sua energia consumida ultrapassa os 5000 kWh.

Figura 18 – Divisão das áreas populacionais por tipo de atividade



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Legenda:

- Misto
- Não Residencial
- Residencial
- Territorial

Figura 19 – Divisão das áreas populacionais por consumo



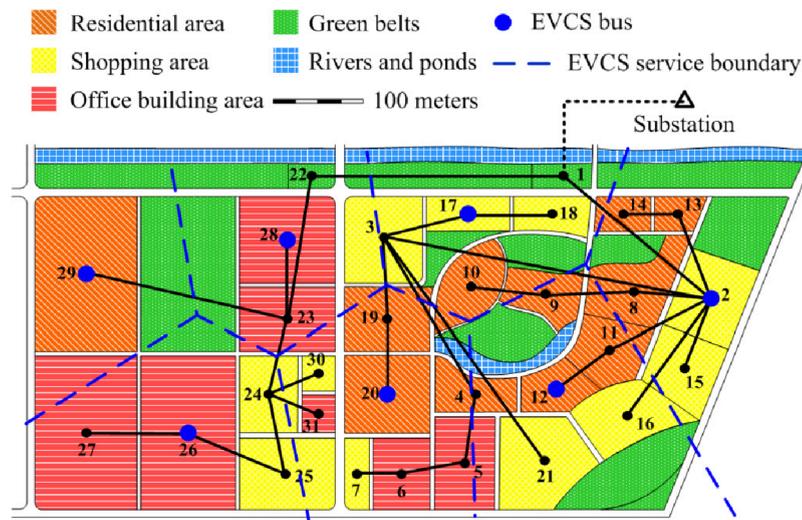
Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Legenda:

- 0 kWh
- Até 130,2 kWh
- 130,2 - 900 kWh
- 900 – 2000 kWh
- 2000 - 5000 kWh
- 5000 – 10000 kWh
- > 10000 kWh

Esses dados são fundamentais para se definir quais os parâmetros que serão inseridos no Diagrama de Voronoi e como eles serão interpretados depois de feitas as simulações, pois há como ser aplicada a influência desses dados, e o impacto que poderá ser mitigado. Esse estudo foi utilizado por Luo *et al.* (2019), de modo que ele identificou a diferença entre as áreas, e por meio de Voronoi, que definiu as zonas de maior e menor influência, e assim pode-se designar quais os locais ótimos para a inserção de carregadores para os veículos elétricos, Figura 20.

Figura 20 – Divisão das áreas e distribuição de eletropostos após utilização de Voronoi



Fonte: Luo *et al.* (2019).

2.3.4 Mobilidade elétrica e o conceito de imprevisibilidade na infraestrutura urbana

No subcapítulo 2.2 pode ser abordado o impacto dos VEs na rede elétrica, assunto que frequentemente foi e é tema de estudos durante o século XX, entretanto até o final da década de 2020, poucos estudos saíam dessa esfera, pois se pensava que não ocorreria outro impacto que não fosse sobre a infraestrutura elétrica, entretanto o aumento exponencial de vendas de veículos elétricos não esperados por pesquisadores fez com que um sinal de alerta acendesse, a dinâmica de recarga dos veículos elétricos começou a influenciar o fluxo de trânsito, concluindo-se que não somente a capacidade da rede necessitasse de constante reestruturação, mas também o tráfego nas cidades e os locais onde serão efetuadas as recargas.

Os eletropostos e as centrais de recarga já estão se tornando pontos atratores de fluxo do trânsito, logo gerando aumento de veículos elétricos em certas áreas, e conseqüentemente o de consumo de energia. Surgem assim dois novos agentes para esse conceito de imprevisibilidade, a mudança no comportamento dos padrões de tráfego nos centros urbanos, Figura 21, e o acesso às estações de recarga, Figura 22.

Padrões de tráfego:

As mudanças nos padrões de tráfego dar-se-ão pelo surgimento ou intensificação de polos geradores de viagem, logo como resultado ocorrem três mudanças no que concerne à sintaxe do ambiente.

A primeira delas será com relação às viagens, os movimentos pendulares irão continuar, porém agora novos locais serão concentradores de tráfego durante essas viagens, que são os eletropostos. Diferentemente do reabastecimento de um VEI feito dentro de 5 minutos, as recargas elétricas mais rápidas são feitas em 30 minutos, logo usuários que optam por realizar essa recarga em eletropostos estarão prolongando a duração desse movimento migratório.

Desse modo, será atrelado o segundo fator que se refere ao horário, como essa ação, de recarga em eletropostos, na maioria das vezes só poderá ser realizada durante os horários de pico, 6h às 8h da manhã e 18h às 20h, novos congestionamentos surgirão admitindo que os eletropostos sejam implementados onde antes eram postos de combustível, devido a sua demora na recarga, entretanto ainda há a opção de realizar a recarga nos locais de trabalho, ou nas residências, caso assim deseje o usuário. Se esses estabelecimentos possuírem tais centrais de recarga, não ocorrerá mudança no tráfego, porém se um usuário que trabalha em um suposto local A, e esse local não possuir infraestrutura de recarga, ele terá que se dirigir a um suposto local B, o que fará surgir assim um local atrator de viagens.

Figura 21 – Padrão de tráfego em tempo real

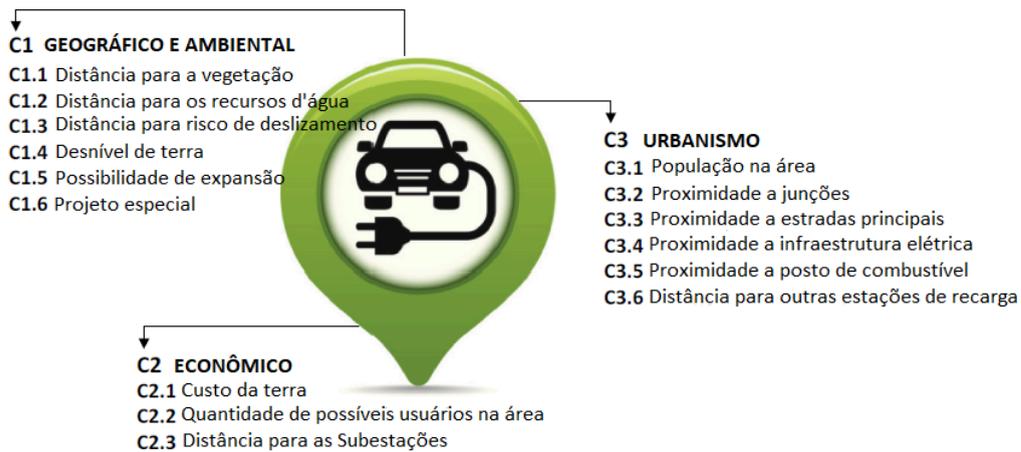


Fonte: Dados de pesquisa (2023).

O terceiro agente, dessa forma, estará relacionado aos polos geradores de viagem e será estudado por Ermas *et al.* (2018). Em seu trabalho ele define quais as especificações gerais de que o local precisa atender para que ali seja construído um eletroposto, analisando assim aspectos geográficos e ambientais, que vão de encontro a leis municipais como a de uso e ocupação do solo, aspectos urbanísticos; ou seja, a infraestrutura de vias, para atender a demanda do eletroposto, aspectos elétricos, como por exemplo a distância desse posto para as SEDs, ou para outros postos, e por fim os custos, que vão desde o custo da terra até essa distância das redes elétricas que podem se tornar muito onerosas de acordo com a lonjura.

Entretanto, além desses aspectos há também que ser considerada a necessidade de certas zonas para atender a população e evitar pontos incipientes gerando o descontentamento da população como o que está ocorrendo na Europa atualmente, que foi abordado no capítulo 1 dessa tese, evitando superlotações e repulsa por parte da população pela adesão à mobilidade elétrica.

Figura 22 – Considerações para implementação de um eletroposto

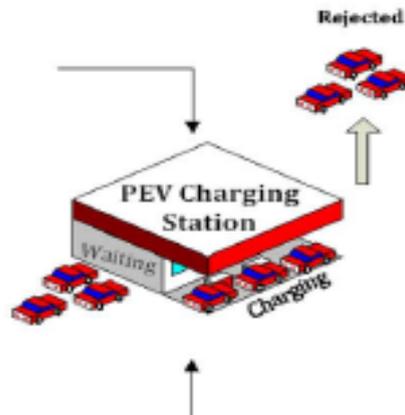


Fonte: Adaptado de Erbas *et al.* (2018).

Esse descontentamento é abordado por Hafez e Bhattacharya (2018), que identificaram a natureza desses novos fatores do conceito de imprevisibilidade e os inseriram em conjunto aos fatores da infraestrutura elétrica, criando assim um algoritmo em que em um hipotético eletroposto todos esses fatores sejam levados em consideração, de modo que os usuários dos VEs que se dirijam a esses estabelecimentos tenham consciência de que haverá vagas para recarga, vagas para espera e outros que serão rejeitados, Figura 23, que já é realidade nos grandes centros que tiveram significativa adesão à mobilidade elétrica.

Tal rejeição pode ser relacionada no caso da infraestrutura elétrica ao saturamento da rede elétrica que não poderá atender um número maior de recargas com probabilidade que o sistema elétrico venha a cair por meio da atuação das suas proteções. Já no caso da infraestrutura urbana, essa rejeição pode ser voltada a congestionamentos, gerando assim um aumento de fluxo para aqueles que irão recarregar por meio da saturação de vagas de recarga desses polos geradores de viagem.

Figura 23 – Acesso aos eletropostos

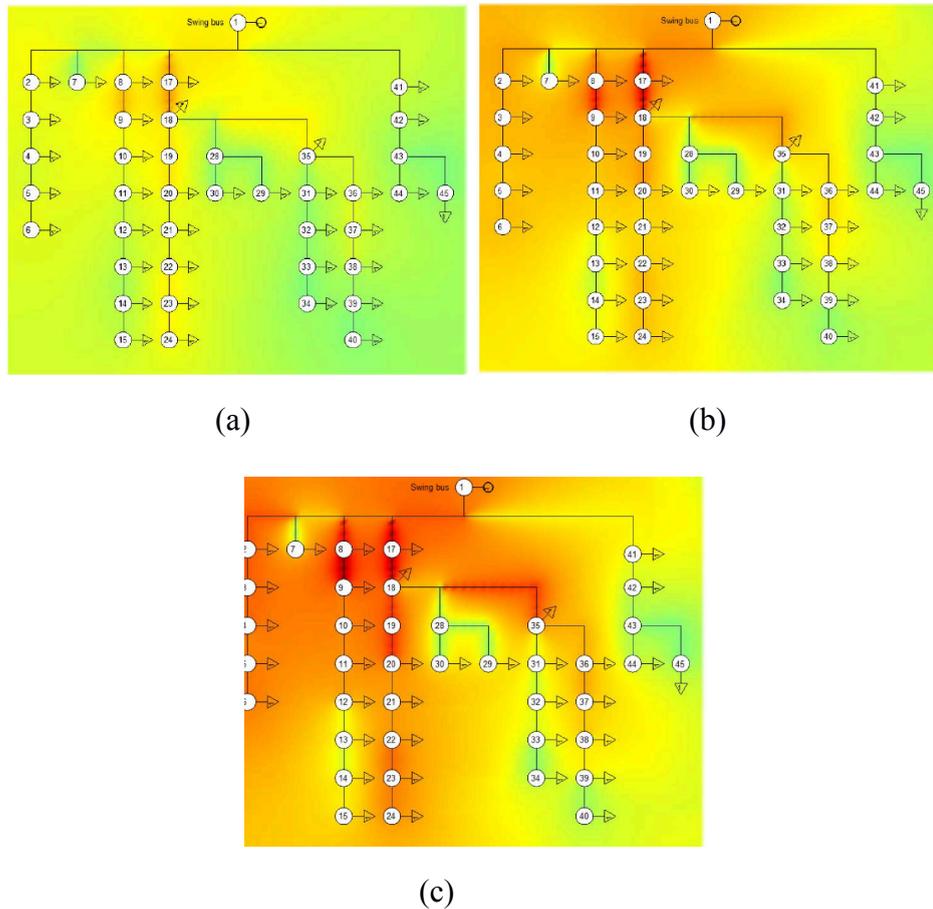


Fonte: Hafez e Bhattacharya (2018).

Portanto, essa Dissertação tem como objetivo identificar quais serão os locais de maior interesse e como o conceito de imprevisibilidade irá impactar tanto esses fatores elétricos quanto os urbanísticos e a interação entre eles; ou seja, em certo cenário, um veículo elétrico seria impossibilitado de recarregar no local, pois a capacidade da rede não suportaria mais uma recarga, também a aproximação deste usuário pode ser dificultada pelo tráfego intenso, logo esse usuário teria que ser rejeitado, ou redirecionado para outro local; ou seja, isso devido à imprevisibilidade de uma carga elétrica interferindo no urbanismo da cidade.

Um novo polo gerador de viagens que possui estações de recarga pode gerar uma alteração no comportamento da rede elétrica diferente do que era anteriormente, pois locais que não exigiam tanta demanda passariam a exigi-la; em outras palavras, a imprevisibilidade urbanística age sobre a imprevisibilidade elétrica, esse conceito é abordado por Soares *et al.* (2010) que faz um antes e depois da inserção da mobilidade elétrica considerando o aumento das perdas por efeito joule, como pode ser visto na Figura 24.

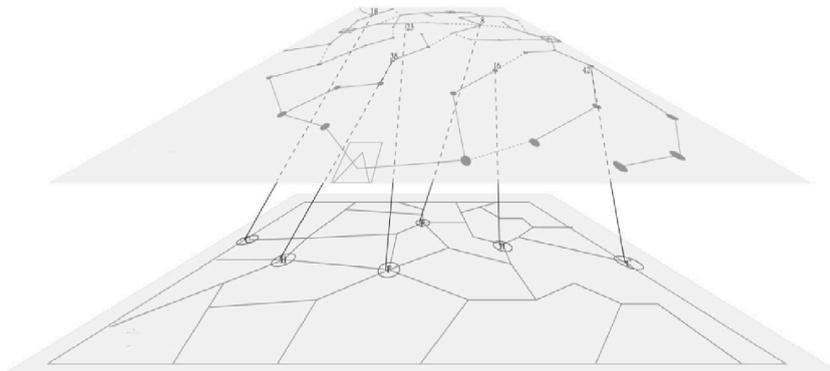
Figura 24 – Perdas por efeito Joule no Sistema de Potência: a) Sem Veículos Elétricos conectados a rede; b) Com 25% de Veículos Elétricos conectados a rede; c) Com 50% de Veículos Elétricos conectados a rede



Fonte: Soares *et al.* (2010).

A partir dessa primeira conclusão, iniciou-se um debate sobre como o planejamento da cidade e da infraestrutura urbana sofreriam impactos dessa nova realidade. Atualmente em países europeus já ocorre uma superlotação em postos devido a um aumento considerável de veículos no ambiente urbano que exigem melhor infraestrutura não somente na parte elétrica, mas também na urbana em todos os setores abordados neste capítulo, subcapítulo 2.2 e subcapítulo 2.3. Logo, é fundamental que esses dois cenários estejam interligados e cooperem entre si, como aborda Xiang *et al.* (2016) na Figura 25.

Figura 25 – Integração entre a rede elétrica e a rede urbana



Fonte: Xiang *et al.* (2016).

2.4 Aquisição de Dados

Serão citados os dados elétricos e de onde eles serão oriundos. O mesmo será feito para os dados urbanos.

2.4.1 Dados Elétricos

Devido a não cooperação da concessionária de energia local para contribuir com dados e estatísticas, os valores utilizados nas simulações elétricas foram retirados de literatura especializada, Mamede (2013), e normas de distribuição, Aneel (2018), além de modelos já construídos, que são utilizados como exemplo no software OpenDSS.

Para construção da infraestrutura elétrica foram utilizados os seguintes parâmetros para a construção da rede elétrica, tendo alguns dados sido mesclados entre circuitos imaginários e reais.

Dados de SE:

- SED Abaixadora de 69 kV para 13,8 kV – Circuito;
- Potência de curto-circuito trifásica;
- Potência de curto-circuito monofásica;
- SED abaixadora de 13,8 kV para 0,38 kV – SEs distribuidoras;
- Potência de curto-circuito trifásica;
- Potência de curto-circuito monofásica.

Dados dos transformadores:

- Corrente de magnetização;

- Perdas;
- kVA.

Dados das Linhas, sendo todas trifásicas:

- Reatâncias em ohm/km para MT e BT
- Para linhas de 16,25,50 e 95 mm² de BT
- Para linhas de 16,25,120 e 300 mm² de MT

Por último, as cargas associadas às barras de toda a rede, que foram consideradas tendo potências instaladas de 1 a 12 kW, sendo assim essencial para a criação da curva de carga mista para a região.

2.4.2 Dados Urbanos

Os dados urbanos têm como fonte o Google Maps, especificamente sua ferramenta Google Mobility, através da camada Trânsito. Dessa ferramenta será extraído o fluxo populacional de certa área, e isso se dá por meio da raspagem de dois dados, um se refere às velocidades dos transeuntes, e, respectivamente, o segundo, o horário no qual eles estão realizando esse fluxo; logo, a partir dessa raspagem poderá ser feita não somente a definição das rotas, como também a análise do comportamento dos movimentos migratórios. No segundo momento serão feitos os gráficos apresentado na Figura 17, que serão calculados por meio das equações 5, 6 e 7. Esses gráficos serão essenciais para se definir os parâmetros que serão implementados nos métodos matemáticos.

O intervalo de tempo que é raspado vai das 6h às 21h dos 7 dias da semana, entretanto as simulações neste trabalho ocorrem durante as 24 horas do dia; logo, nos horários em que não há valores disponíveis do trânsito foi aderida a maior velocidade média dentre os valores disponíveis. Do mesmo modo, a velocidade que agrega todo tipo de transeunte, pedestres, ciclistas, usuários de veículos públicos e particulares foi considerada única como referência para veículos automotores de uso particular.

No segundo momento são utilizados os dados para o georreferenciamento, esses dados foram obtidos da base do CENAPAD, censo da prefeitura de Fortaleza, e da lei do uso e parcelamento do solo. Esses dados foram tratados para se obterem diferentes valores essenciais para se identificarem as atividades que a população exerce em uma área, onde, e

quais são esses estabelecimentos; desse modo, definindo as suas áreas, as quantidades de unidades consumidoras e o consumo de energia, como é observado nas Figuras 18 e 19.

Sendo assim, esse mapeamento será utilizado mais a seguir neste trabalho de pesquisa para se encontrar e identificar quais são os polos geradores de viagem que possuem relação direta com os itens citados no parágrafo anterior, e como seus comportamentos de fluxo serão alterados de acordo com a inserção dos VEs.

2.5 Modelos Matemáticos

Para se entender melhor a infraestrutura elétrica e a inserção da mobilidade elétrica, serão desenvolvidos subcapítulos com o intuito de abordar os dados, ou variáveis que serão utilizados nessa pesquisa, de modo que por meio deles possa-se relacionar o sistema elétrico com a imprevisibilidade da recarga.

2.5.1 Modelo de Monte Carlo

O método de Monte Carlo foi formalmente definido por Halton (1970), no qual o embasamento deste modelo matemático se apresenta como uma técnica de representação para resolver um problema por meio de um parâmetro levando em conta uma população hipotética, logo, sendo assim, números aleatórios são utilizados para construir uma amostra utilizada em um estudo de caso, em que estatísticas que o trabalho está buscando poderão ser encontradas.

O método de Monte Carlo é assim chamado porque se refere ao cassino Monte Carlo, em Mônaco, mundialmente conhecido pelas corridas automobilísticas, mas nesse caso, é por se tratar de um cassino, onde a aleatoriedade e a probabilidade são o fundamento para os jogos. Esse nome foi escolhido para designar uma simulação computacional de Jon Von Neuman e Stanislaw Ulam (1947), esse trabalho fazia parte do projeto Manhattan, também conhecido como projeto da construção da bomba atômica. Ulam e Jon Von Neumann consideraram a possibilidade de utilizar o método, que envolvia a simulação direta de problemas de natureza probabilística relacionados com o coeficiente de difusão do nêutron em certos materiais. Logo, compara-se a aleatoriedade e a natureza repetitiva que são encontrados nos cassinos.

Atualmente, Monte Carlo é utilizado em estudos probabilísticos, em que sistemas de múltiplas variáveis precisam ser considerados, pois a incerteza, ou a falta de dados aproximados, faz com que números aleatórios sejam gerados para suprir esses valores,

tornando-se assim muito presente nas áreas de estudo voltadas para engenharia, economia, ciência e estudos populacionais, entre outros com muitas vantagens quando comparados a outros métodos, pois é possível fornecer informações exatas, por exemplo (existem alguns erros estatísticos, mas que podem ser minimizados). Desse modo, incógnitas que podem ser consideradas inesperadas ganharão valores aleatórios de qualquer distribuição de probabilidade com o objetivo de avaliar de forma numérica, indireta ou artificialmente um modelo matemático que permite estimar o comportamento de um sistema ou de um processo que envolve variáveis estocásticas, segundo Paixão *et al.* (2021).

O método de Monte Carlo é um procedimento numérico que utiliza números aleatórios para a obtenção de valores não necessariamente aleatórios, com base na Lei dos Grandes Números e no Teorema do Limite Central. Este método tem como princípio a geração de números aleatórios de qualquer distribuição de probabilidade com o objetivo de avaliar de forma numérica, indireta ou artificialmente um modelo matemático que permite estimar o comportamento de um sistema ou processo que envolve variáveis estocásticas. De um modo geral, a modelagem de sistemas pode ser mais precisamente caracterizada utilizando a Simulação de Monte Carlo do que por análise teórica. Geralmente, simulações de Monte Carlo (ou simulações computacionais em geral) são frequentemente utilizadas para a verificação da precisão e de intervalos de validade de modelos analíticos (Sadiku, 2009).

O método de Monte Carlo tem sido utilizado há bastante tempo como forma de obter aproximações numéricas de funções complexas. Estes métodos tipicamente envolvem a geração de observações de alguma distribuição de probabilidades e o uso da amostra obtida para aproximar a função de interesse. O método é também referido como simulação estocástica e é um método relativamente simples e fácil de implementar (Paula, 2014).

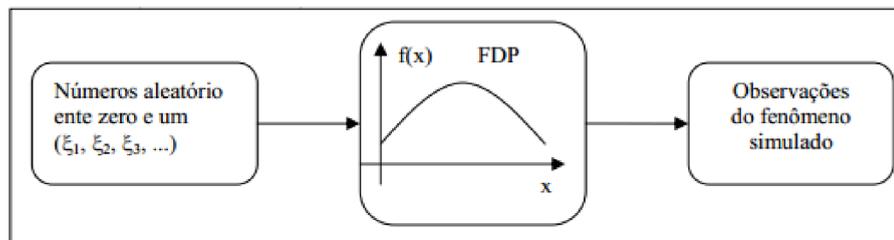
Segundo Nasser (2012), uma das vantagens de se utilizar Monte Carlo é que se torna desnecessário escrever as equações diferenciais que descrevem o comportamento de sistemas complexos. Logo, percebe-se fundamental que o sistema seja modelado no que se chama de funções de densidade de distribuição de probabilidade (FDP). Uma vez conhecidas essas distribuições, a Simulação de Monte Carlo pode ocorrer fazendo as amostragens aleatórias a partir das mesmas.

Outra vantagem abordada por Burbán (2008) é relacionada à complexidade dos modelos que podem ser solucionados encontrando valores que podem gerar a incerteza para sistemas mais próximos de valores reais, isso ocorre quando se possui maior aparato computacional, aumentando a capacidade de processamento, logo otimizando os resultados

objetivados. Entretanto, quanto mais complexo esse modelo for, o erro proporcionalmente aumentará devido a um excesso de interações. Logo, quanto maior for a complexidade do sistema, mais elevado o número de interações pode ser obtida por meio de maior processamento, possibilitando a obtenção de sistemas mais reais, porém por causa dessa desvantagem é necessários se estimar a prévia do número mínimo de simulações necessário.

A ideia genérica do Método de Monte Carlo pode ser assim dividida segundo Nasser (2012) para ser descrita por meio de só uma FDP, em que se tem como pré-requisito a definição de uma variável aleatória, que tem uma distribuição uniforme dentro de um intervalo (0 a 1) que tem como finalidade a obtenção da amostra aleatória. Esse método genérico pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Ideia Genérica do Método de Monte Carlo



Fonte: Nasser (2012).

Desse modo, Nasser (2012) usa esse método dividido em 4 etapas, assim representados diante de um problema envolvendo incertezas para aproximar sua solução:

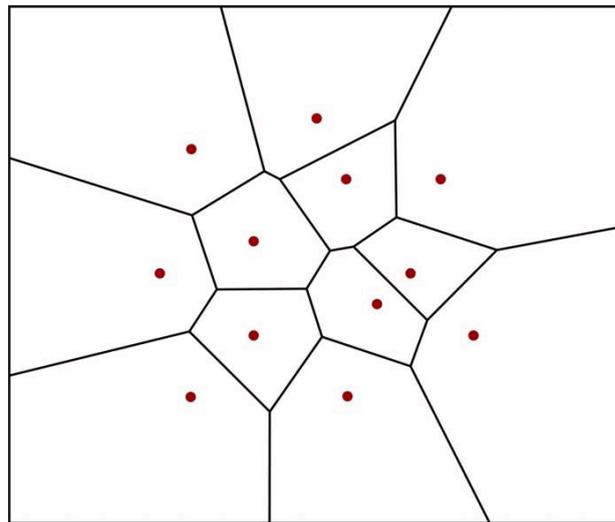
- A) A primeira etapa se baseia em modelar o problema definindo uma FDP para representar o comportamento de cada uma das incertezas do sistema proposto.
- B) O segundo passo é gerar valores pseudoaleatórios aderentes à FDP de cada incerteza.
- C) A terceira etapa é calcular, utilizando a substituição das incertezas pelos valores gerados, o resultado probabilístico, repetindo, assim, os passos B e C até se obter uma amostra com o tamanho desejado de realizações levando em conta as desvantagens do excesso das interações, como dito anteriormente.
- D) Finalmente, serão obtidos os resultados da amostra de forma, os quais serão integrados para se ter a estimativa da solução do problema. Este método apenas proporciona uma aproximação da solução; portanto, é fundamental analisar o erro de aproximação, que é $3\sigma/(N^{1/2})$, em que “ σ ” é o desvio padrão da amostra

e “N” o tamanho da amostra. Logo, é evidente que quanto maior o tamanho da amostra, menor é o erro de aproximação.

2.5.2 Diagrama de Voronoi

O Diagrama de Voronoi pode ser definido como a decomposição de uma certa área ou plano para se obter a construção de polígonos, esses polígonos são dotados de pontos geradores, de modo que qualquer ponto dentro da área do polígono estará mais próximo do ponto gerador desse polígono do que de outro, como pode ser observado na Figura 27; ou seja, esses pontos geradores serão pontos de influência sobre toda a região que abrange seu polígono, logo os pontos dentro desta região irão estar mais próximos de sua fonte geradora do que da fonte geradora de outra região. Desse modo, em poucas palavras se tem como resultado um polígono em que as distâncias entre a fonte e o ponto gerador, ou de influência, são os menores possíveis (Moura, 2003).

Figura 27 – Exemplo de Diagrama de Voronoi



Fonte: Sácristan (2014).

A primeira utilização do diagrama de voronoi registrada, porém não utilizada formalmente, foi de Descartes, em 1644. Dirichlet utilizou esse princípio para estudar polígonos quadráticos nos meados do século XX. Em 1854 o médico britânico John Snow utilizou essas aplicações para analisar a epidemia de cólera em Soho, local onde havia uma bomba de água mais próxima do que qualquer outra região, definindo assim o ponto gerador,

ou de influência, que teve como resultado mostrar a correlação entre essa fonte d'água com maior número de mortes.

Entretanto, segundo Preparata e Shamos (2012), o Diagrama de Voronoi só foi assim nomeado em 1908, pelo russo Georgy Voronoy, em que estes polígonos foram estudados em um tratado sobre formas quadráticas. Alfred Thiessen utilizou esses diagramas nos estudos relacionados à geofísica. Nos estudos da física voltadas ao estado sólido, o diagrama de Voronoi foi utilizado como princípio para construções de células unitárias de material condensado como pontos geométricos por Eugene Wigner e Frederick Seitz, segundo Kittel (2005). Desse modo, surgiram nomes alternativos ao Diagrama de Voronoi, são eles: regiões de Dirichlet, polígonos de Thiessen ou células Wigner-Seitz.

O Diagrama de Voronoi pode ser assim utilizado para se definir com precisão a influência de uma ou mais variáveis em certo plano no que se diz respeito à proximidade, assim definindo toda a área, geograficamente falando, buscando-se como exemplos básicos qual é a maior região desocupada, qual o local mais próximo de um dado ponto e qual é o vizinho mais próximo de um local, entre outros.

Logo, esses diagramas ganharam relevante importância para os estudos voltados ao georreferenciamento ou às aplicações de Sistemas de Informações Geográficas (SIG); o diagrama tem como funcionalidade básica à resolução de problemáticas ligadas à proximidade, desde que haja um volume numeroso de consultas envolvendo os mesmos dados. Portanto, pode ser utilizado como exemplo o mapeamento dos postos de saúde e os dados secundários, como trânsito, população nessa área e tamanho dos postos, entre outros fatores para a definição de qual o posto de saúde seria o mais recomendado para o usuário de acordo com a localização de sua residência.

Esse conceito é utilizado para o planejamento urbano de várias cidades, onde, de acordo com diversos fatores geográficos, socioeconômicos, comportamento do trânsito de pessoas, entre outros, definir a locação ótima de escolas, centros comerciais e hospitais, facilitando, assim, pelo uso do diagrama o acesso da população para estes serviços, promovendo maior comodidade e evitando focos aglomeradores de pessoas ou de veículos públicos e particulares, por exemplo.

Geometricamente como são definidas as construções destes polígonos? Segundo Anad (2003) funciona da seguinte maneira:

- Conectando cada ponto amostral ao seu vizinho mais próximo, por meio de segmentos de reta;

- Construindo bissetrizes, formando nos segmentos de retas que conectam os pontos;
- Unindo todas as bissetrizes nas retas que conectam os pontos; e
- Unindo retas bissetrizes, formando o polígono que delimitam a área de influência de um ponto amostral.

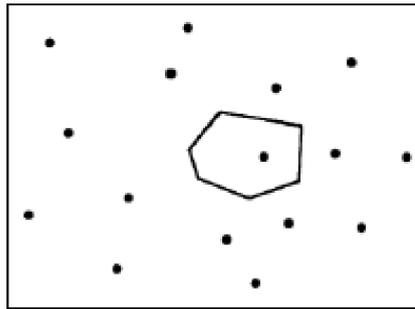
Assim, os sete polígonos externos se estendem infinitamente no plano e, por isso, são desenhados como figuras abertas. Cada aresta do diagrama constitui um lugar onde os pontos são equidistantes em relação a dois locais. Os vértices dos polígonos estão ligados a três ou mais arestas e, portanto, são pontos de equidistância entre três ou mais locais.

A construção do Diagrama de Voronoi pode ser dividida de acordo com o algoritmo computacional que o usuário deseja estabelecer baseada no seu estudo de caso. Sacristán (2014) faz uma revisão destes algoritmos, que irão variar desde a divisão no plano geométrico, quanto à construção de novos pontos em áreas já diagramadas, e até na varredura de interações que está sendo realizada no processo para inserção de novos pontos. Neste trabalho, o algoritmo será fundamentado nas variáveis que serão inseridas nas simulações. Para isso existem dois métodos.

O primeiro conhecido como Diagrama de Voronoi ordinário tem como base a utilização de incógnitas com somente uma variável; nesses casos os trabalhos são mais simples, a construção deste método irá depender somente da distância entre os pontos, partindo de um ponto gerador com relação aos outros, como, por exemplo, a distância de um posto de saúde em relação a outras unidades hospitalares; ou seja, a análise será feita utilizando um polígono principal que determinará as outras zonas, Figura 28.

Autores apontam como limitações em seus estudos o fato de utilizarem somente uma variável como fator de ponderação ou análise estatística por meio de componentes principais, segundo Santos (2010). Entretanto, para estudos de caso menos complexos com somente uma variável já satisfaz o pesquisador, podendo ela ser utilizada.

Figura 28 – Polígono de Voronoi



Fonte: Preparata e Shamos (2012).

O segundo método conhecido como Diagrama de Voronoi Ponderado tem como princípio a utilização de incógnitas com diversas variáveis; ou seja, as grandezas serão consideradas para a construção do diagrama, logo é necessário se implementar o uso de pesos, como, por exemplo, em um estudo sobre trânsito, poderão ser inseridas no diagrama a velocidade em km/h, a distância em metros e os postos de combustíveis como pontos geradores, de modo a relacionar como os dois primeiros irão definir as áreas delimitantes para cada posto, desse modo refletindo a propriedade variável dos pontos geradores.

A seguir será feita a comparação matemática entre os dois métodos.

Na construção do Diagrama de Voronoi Ordinário, em que, como dito anteriormente, as distâncias entre os pontos será a única variável, desse modo será traçada a mediatriz entre esses dois pontos para assim obter a linha que irá delimitar as duas zonas que sofrerão influência de cada ponto, como pode ser observado na Figura 29, em que os pontos A e B serão estudados para se obter a análise da região.

Figura 29 – Diagrama de Voronoi Ordinário para dois pontos

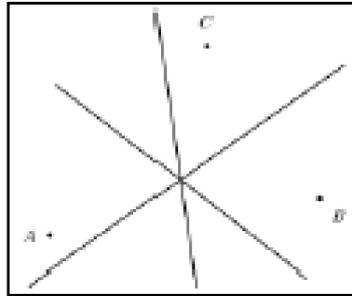


Fonte: Preparata e Shamos (2012)

Aqui vê-se a possibilidade de o estudo envolver mais do que dois pontos. Nesses casos, Santos *et al.* (2016) abordaram o seguinte passo a passo para a definição da construção do diagrama, levando em conta que as mediatrizes criem zonas conflitantes:

1. Construção das mediatrizes entre os pontos:

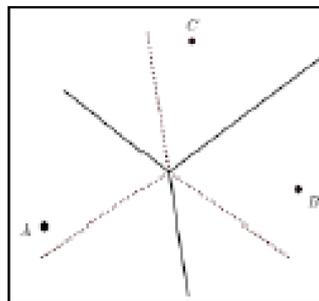
Figura 30 – Construção de Mediatrizes para 3 pontos



Fonte: Santos *et al.* (2016).

2. Eliminação dos segmentos que invadem as regiões de influência:

Figura 31 – Eliminação dos segmentos invasivos para 3 pontos



Fonte: Santos *et al.* (2016).

2.5.2.1 Definições matemáticas para o Diagrama de Voronoi Ordinário

Todas as definições a seguir foram baseadas em Boots *et al.* (2009), que dizem:

Definição 1. Dado um conjunto de dois ou mais pontos, finito, distintos no Plano Euclidiano, tem-se associadas todas as localizações naquele espaço com os membros mais próximos do ponto.

Segundo Galvão *et al.* (2003), considerado um número finito de pontos n no Plano Euclidiano, assume-se que $2 \leq n < \infty$. Os n pontos são classificados por p_1, p_2, \dots, p_n com coordenadas cartesianas $(x_{11}, x_{12}), (x_{21}, x_{22}), \dots, (x_{n1}, x_{n2})$ ou vetores de posição x_1, x_2, \dots, x_n . Os n pontos são distintos de tal forma que $x_i \neq x_j$ para $i \neq j, i, j$

$\in I_n = \{1, 2, \dots, n\}$. Sendo p um ponto arbitrário com coordenadas (x_1, x_2) ou vetor de posição x , então a distância euclidiana de p para p_i é dada por:

$$d(p, p_i) = \|x - x_i\| = \sqrt{(x_1 - x_{i1})^2 + (x_2 - x_{i2})^2} \quad (8)$$

Definição 2 Dado um conjunto de dois ou mais pontos, finito, a região definida como polígono de Voronoi, conforme Figura 31, é definida.

Se p_i é um dos pontos próximos de p , para $j \neq i$ e $j \in I_n$, tem-se a relação:

$$\|x - x_i\| \leq \|x - x_j\| \quad (9)$$

Logo, define-se a mediatriz como:

$$b(p_i, p_j) = \{x / \|x - x_i\| = \|x - x_j\|\}, \text{ para } j \neq i \quad (10)$$

Seja $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, onde $2 \leq n < \infty$ e $x_i \neq x_j$ para $i \neq j$ e $i, j \in I_n$ o polígono de Voronoi, conforme ilustra Figura 31 é dado por:

$$V(p_i) = \{x / \|x - x_i\| \leq \|x - x_j\|, \text{ para } j \neq i, j \in I_n\} \quad (11)$$

O Diagrama de Voronoi Ordinário é formado pelos polígonos dados em Equação 12, logo a seguinte expressão valida o diagrama:

$$V = \{V(p_1), V(p_2), \dots, V(p_n)\} \quad (12)$$

2.5.2.2 Definições matemáticas para o Diagrama de Voronoi Ponderado

No algoritmo do Diagrama de Voronoi Ordinário, é implícito que os pontos fixos (pontos geradores do polígono de Voronoi, conforme Equação 12, possuem os mesmos pesos; ou seja, não há diferença de influências entre pontos; logo, para um conjunto de pontos $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, o conjunto de parâmetros pesos associados é: $W_i = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$. Com esses pesos, é definida uma distância ponderada $d_w(p, p_i)$ de para p para p_i .

De forma geral, a região de domínio de p_i sobre p_j é definida como:

$$Dom(p_i, p_j) = \{p/dw(p, p_i) \leq dw(p, p_j)\}, j \neq i \quad (13)$$

Assim, o polígono generalizado do Diagrama de Voronoi Ponderado, considerando $i, j \in In = \{1, 2, \dots, n\}$ e a interseção de todo o conjunto de In é dado por:

$$V(p_i) = \cap_{i=1 \rightarrow n} Dom(p_i, p_j) \quad (14)$$

2.5.2.3 Definições matemáticas para o Diagrama de Voronoi Ponderado Multiplicativo

A forma apresentada em subseção 2.5.2.2 permite a interpretação de muitas formas funcionais para caracterização do diagrama. O Diagrama de Voronoi Ponderado Multiplicativo (DVPM), segundo Galvão *et al.* (2003), é uma metodologia utilizada com maior frequência e trabalha principalmente em R^2 .

A distância ponderada multiplicativa é definida por:

$$dmw(p, p_i) = \frac{1}{w_i} \|x - x_i\|, w_i > 0 \quad (16)$$

A região de domínio de p_i sobre p_j é definida por:

$$Dom(p_i, p_j) = \{x / \frac{1}{w_i} \|x - x_i\| \leq \frac{1}{w_j} \|x - x_j\|\}, i \neq j \quad (17)$$

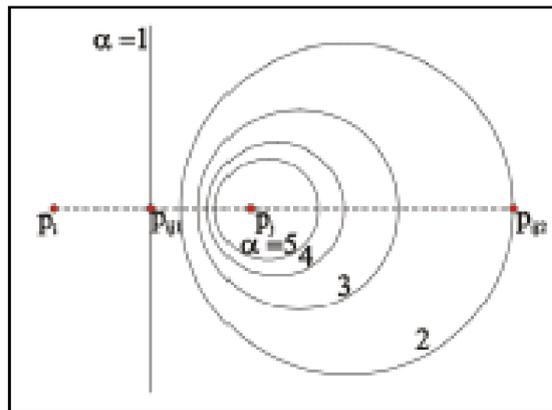
A mediatriz ponderada, para este caso, tem a seguinte expressão:

$$b(p_i, p_j) = \left\{ x / \left\| x - \frac{w_i^2}{w_i^2 - w_j^2} x_j + \frac{w_j^2}{w_j^2 - w_i^2} x_i \right\| = \frac{w_i w_j}{w_i^2 - w_j^2} \|x_j - x_i\| \right\}, w_i \neq w_j, i \neq j \quad (18)$$

Se considerarmos $\alpha = w_i/w_j$, nota-se que para $\alpha = 1$, a mediatriz é uma reta e, esta passa a obedecer à expressão da mediatriz do Diagrama de Voronoi Ordinário, conforme

Equação 18. A Figura 32 exemplifica o Diagrama de Voronoi Ponderado Multiplicativo para dois pontos p_i e p_j , com $\alpha = \{1,2,3,4,5\}$:

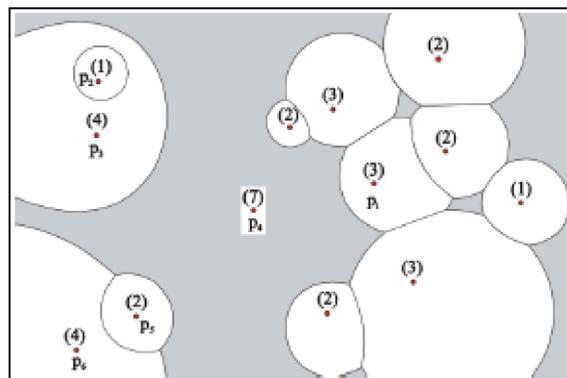
Figura 32 – Diagrama de Voronoi Ponderado Multiplicativo para dois pontos



Fonte: Galvão *et al.* (2023).

No diagrama da Figura 33, ilustra um Diagrama de Voronoi ponderado multiplicativo, com seus respectivos pontos e pesos indicados:

Figura 33 – Exemplo Diagrama de Voronoi Ponderado Multiplicativo²



Fonte: Galvão *et al.* (2003)

² Nota 1: Os pontos fixos são caracterizados pelos pontos em vermelho. Nota 2: Os pesos associados aos pontos estão caracterizados pelo número entre parênteses.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos, os cenários de simulação do estudo de caso e as modelagens e simulações computacionais.

3.1 Área de Estudo

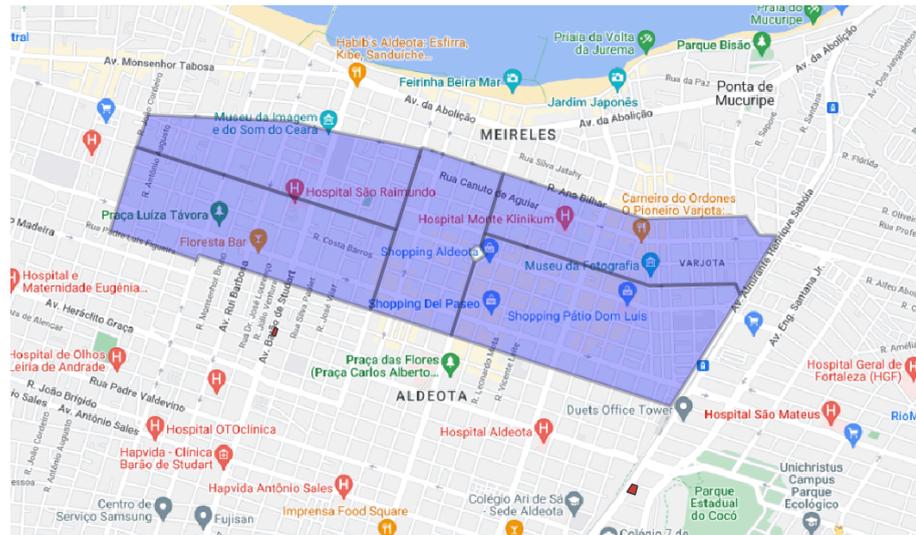
A primeira etapa da metodologia foi designar certa área para que o estudo de caso fosse realizado; desse modo, foi necessário que fossem atendidos alguns pré-requisitos de acordo com o que foi dito até esse momento, isso no caso da infraestrutura elétrica, subestações próximas, alimentadores com diferentes características curvas de carga, possíveis futuros usuários de mobilidade elétrica e geração distribuída.

Já no caso da infraestrutura urbana, observou-se fluxo de tráfego variado contando com avenidas principais e diversidade de atividades realizadas nos locais, sejam elas pequenas residências, ou grandes prédios, e até hospitais, centros estudantis e comerciais, de modo que o conceito de imprevisibilidade devido à grande população residente neste local ou a migração pendular de trabalhadores nessa área fosse significativa.

Com isso, foi escolhida a área da Figura 34, de 3 km², que está localizada na cidade de Fortaleza - CE, Brasil, devido à facilidade para obter-se dados e realizar estudos de campo. Essa área está dentro de uma região nobre da cidade, contando com vida diurna e noturna bem movimentada.

Ademais, existem duas subestações relativamente próximas que são responsáveis por fornecer energia para mais de 3000 unidades consumidoras, que vão desde residências, atendidas na baixa tensão, até shoppings com linhas expressas conectando a SED a esses locais. Portanto, esta área não foi definida aleatoriamente, pois cumpre atender os pré-requisitos estipulados. O software utilizado para as primeiras análises da área de estudo foi o QGIS.

Figura 34 – Delimitação da área de estudo



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

3.1.1 Limites e divisão da área de estudo

Para facilitar a análise dos dados e a construção dos cenários para as simulações pós-mobilidade elétrica com e sem mitigação, a área foi dividida em 5 zonas numeradas de acordo com a Figura 35, de modo que os limites entre as zonas ficaram dessa forma:

- Zona 1:
 - Acima: rua Pereira Valente
 - Abaixo: rua Desembargador Leite Albuquerque
 - À direita: avenida Almirante Henrique Sabóia
 - À esquerda: avenida Desembargador Moreira
- Zona 2
 - Acima: rua Ana Bilhar
 - Abaixo: rua Pereira Valente
 - À direita: avenida Almirante Henrique Sabóia
 - À esquerda: avenida Desembargador Moreira
- Zona 3
 - Acima: rua Ana Bilhar
 - Abaixo: rua Desembargador Leite Albuquerque

À direita: avenida Desembargador Moreira
 À esquerda: rua Tibúrcio Cavalcante

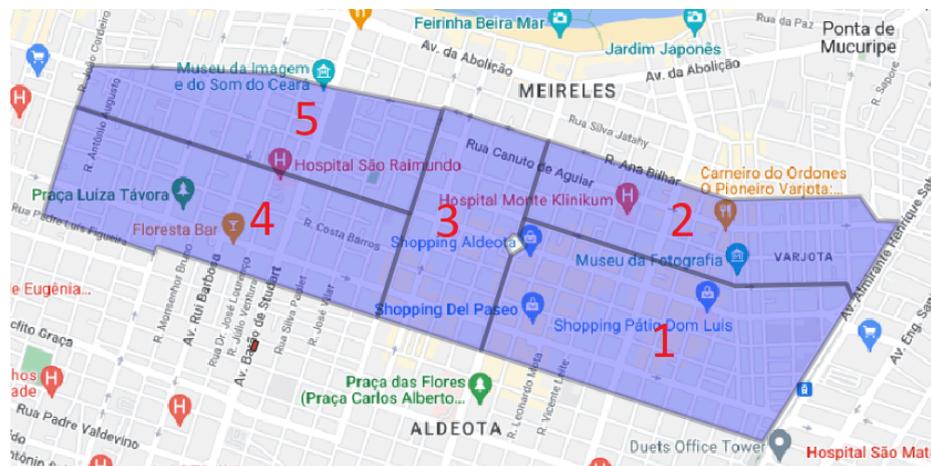
- Zona 4

Acima: rua Pereira Filgueiras
 Abaixo: rua Desembargador Leite Albuquerque
 À direita: rua Tibúrcio Cavalcante
 À esquerda: rua João Cordeiro

- Zona 5

Acima: rua Deputado Moreira da Rocha
 Abaixo: rua Pereira Filgueiras
 À direita: rua Tibúrcio Cavalcante
 À esquerda: rua João Cordeiro

Figura 35 – Divisão da área de estudo por zonas



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Essa divisão é importantíssima para se incorporar os métodos matemáticos e tomadas de decisões que serão abordados mais a seguir neste capítulo, de mesmo jeito que será utilizada para implementação das redes inteligentes. Entretanto, já se pode adiantar que essas zonas já serão independentemente conectadas a cinco diferentes sistemas elétricos; ou seja, cada zona terá seu sistema único, que não irá se conectar com nenhuma das outras zonas, por isso independente, porém esses subsistemas serão derivados de dois diferentes sistemas

que são as SEDs que suprem essa área, essas SEDs reais podem ser observadas na Figura 36, onde os quadriláteros vermelhos irão representá-las.

Figura 36 – Identificação das SEDs



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

3.1.2 Locais de interesse na área de estudo

Definidas as SEDs que irão fornecer energia às unidades consumidoras, agora é necessário dizer quem são elas, ou, nesse caso, quais foram as escolhidas. Primeiramente, para os casos da rede de baixa tensão foram condensadas mais de 2000 unidades consumidoras em 450 barras conectadas em 380 V trifásicos aos alimentadores, logo a subestação de distribuição secundária, essas cargas terão características majoritariamente residenciais, entretanto ainda assim serão conectadas a elas os VEs.

No segundo caso foram selecionadas as maiores cargas, que irão demandar das SEDs linhas expressas de distribuição, desse modo com características estritamente comerciais atendidas em média tensão; as atividades selecionadas para representarem este tipo de demanda são 3: shoppings e supermercados, centros estudantis e hospitais ou clínicas, como pode ser observado na Figura 37. Esses locais serão os favoritos para a mobilidade elétrica, pois além de possuírem subestação próxima, que não divide demanda com a rede de baixa tensão, também são espaços atratores de tráfego com área de estacionamento onde os usuários podem ficar por horas efetuando a recarga.

Figura 37 – Polos geradores de viagem na área de estudo



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Legenda:

- Shoppings ou supermercados
- SED's primárias
- Centros Estudantis
- Hospitais ou clínicas

3.1.3 Alocação de eletropostos

A alocação dos 9 eletropostos nesse primeiro momento será a substituição dos postos de combustíveis opcionais, por eletropostos, Figura 38, ou seja, não serão levadas em consideração aspectos elétricos, ou urbanísticos de planejamento para melhor remanejamento destes pontos de recarga rápida e ultrarrápida para que se possam observar quais os impactos que uma simples substituição ocasionará. Lembrando que devido aos modos de recarga 3 e 4 da Tabela 3 exigirem maiores níveis de tensão, corrente e potência, esses nove eletropostos terão linhas expressas com a SED primária para suprir as exigências.

Figura 38 – Eletropostos



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Legenda:

● Eletropostos

3.1.4 Redes de distribuição

Sabendo quais SEDs integram esse sistema, e as cargas que são atendidas, o próximo passo é promover a conexão entre rede e consumidor, e isso se dá por meio das redes de distribuição, desse modo elas foram desenhadas de acordo com imagens aéreas do software Google Earth, e as que não foram possíveis de identificação tiveram sua representação feita por meio de literatura, como Kagan (2017) e Mamede (2013).

Importante relembrar que essas redes serão divididas para atender as 5 zonas de forma independente; ou seja, não haverá conexão entre as linhas de distribuição de diferentes zonas com o intuito de se observar melhor a interação entre a mobilidade elétrica e cada zona, pois como pôde ser observado na Figura 37, existem zonas com maior presença de grandes cargas e outras com menos, ou, de acordo com a figura 38, zonas que possuem mais de um eletroposto, e outras zonas que não. A divisão destas redes pode ser observada na Figura 39, extraída da raspagem de dados do QGIS.

Para as zonas 1 e 2 a SED1 que será dividida em 2 sistemas independentes fornecerá energia para essas regiões de modo a atender suas respectivas capacidades da rede.

As linhas da zona 1 estão representadas pela cor amarela.

As linhas da zona 2 estão representadas pela cor vermelha; a ligação entre essa rede e a SED1 está sobreposta pela linha amarela da zona 1, mas repetindo não há qualquer ligação, somente facilidade geográfica.

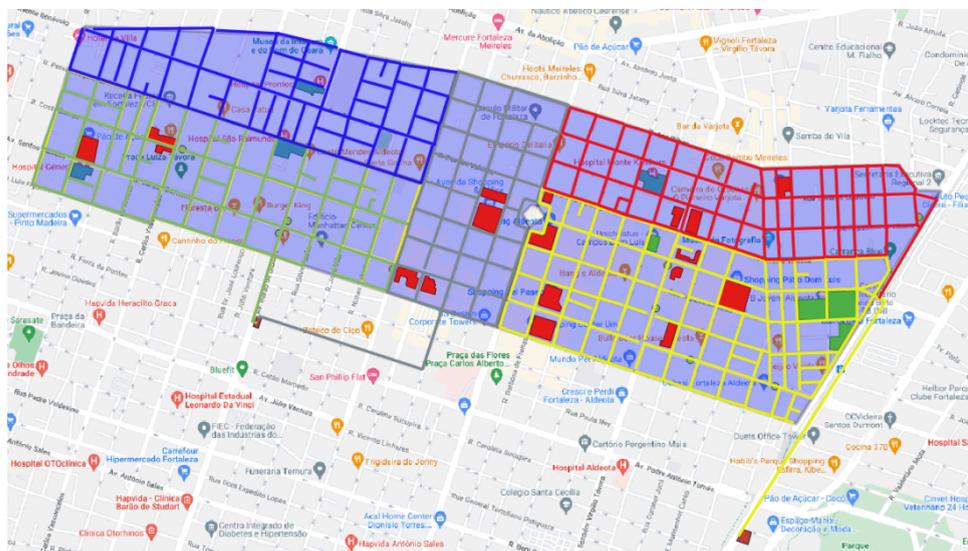
Para as zonas 3, 4, e 5 a SED2 que será dividida em 3 sistemas independentes fornecerá energia para essas regiões de modo a atender suas respectivas capacidades da rede.

As linhas da zona 3 estão representadas pela cor cinza.

As linhas da zona 4 estão representadas pela cor verde.

As linhas da zona 5 estão representadas pela cor azul, a ligação entre essa rede e a SED2 está sobreposta pela linha verde da zona 1, mas repetindo não há qualquer ligação, somente facilidade geográfica.

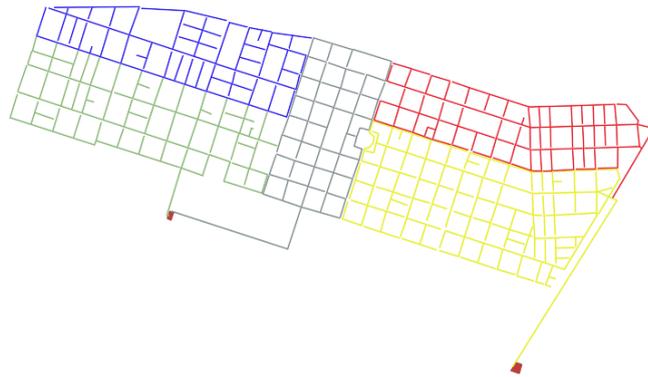
Figura 39 – Divisão da rede de distribuição no QGIS



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

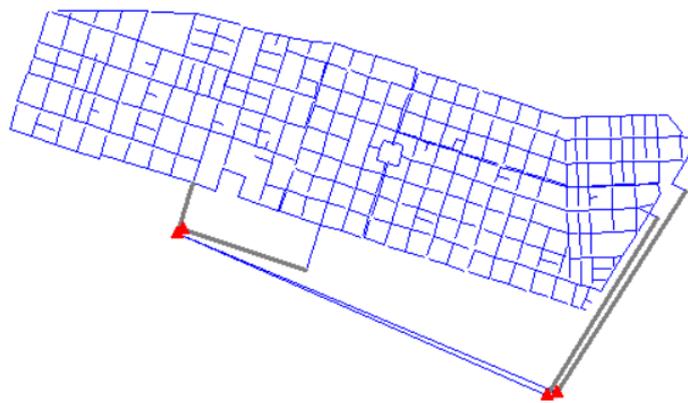
Após a construção das linhas de distribuição, o próximo passo é promover a montagem delas no software OpenDSS para a modelagem elétrica do sistema, entretanto antes é necessário obter as coordenadas geográficas de cada linha, ou o equipamento elétrico que fará parte desse sistema. Logo, esse desenho obtido será convertido para o programa AutoCAD, Figura 40, onde cada linha terá seu ponto de origem e de destino devidamente georreferenciado, isso é essencial para que as simulações fiquem mais factíveis. Na Figura 41 já é possível adiantar como a plotagem do sistema no OpenDSS ficou.

Figura 40 – Divisão da rede de distribuição no AutoCAD



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Figura 41 – Divisão da rede de distribuição no OpenDSS



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

3.2 Espaço Amostral

Serão duas SEDs primárias compostas de cinco diferentes subsistemas isolados para atender cada um uma área. São mais de 500 linhas de distribuição atendendo 450 cargas em baixa tensão e mais 20 em média tensão por redes expressas de energia. Serão ainda estudadas as quedas de tensão, o aumento nas perdas e a variação das curvas de cargas de acordo com o comportamento dos usuários de veículos elétricos e suas demandas de recarga utilizando-se do método de Monte Carlo para obter a aleatoriedade das frequências e com quais essas ações ocorrerão.

Já para a infraestrutura urbana serão analisados os mapas de georreferenciamento obtidos por meio do CENAPAD, e de raspagem de dados do Google Maps, onde serão colocados em prova os conceitos introduzidos no capítulo 2.3; ou seja, a mobilidade elétrica

participando do trânsito e também dos locais aos quais seus usuários irão para que sua recarga seja efetuada ou não.

Além dos eletropostos que serão o principal ponto atrator de recarga, os locais mostrados na Figura 37 serão também potenciais pontos geradores de viagem para a recarga dos VEs; desse modo, também será utilizado o método de Monte Carlo para se definir os padrões dessas atividades e o Diagrama de Voronoi será utilizado para entender como esses pontos de influência terão impacto na rede elétrica e na rede urbanística das zonas estudadas.

A construção destas simulações e a inserção dos métodos matemáticos serão feitas nos seguintes passos:

1. Definição da área do estudo e delimitação das zonas para o estudo de caso no QGIS, já identificando os principais locais de ordem da infraestrutura elétrica (SEDs) e os principais estabelecimentos de diversos setores econômicos;
2. Modelagem do uso e ocupação do solo, identificando quantas unidades consumidoras existem na área estabelecendo quais os níveis de tensão aos quais os locais pré-determinados para melhor estudo estão sendo atendidos;
3. Modelagem da rede elétrica no software do OpenDSS por meio dos dados obtidos pela concessionária e literatura e desenho da rede no QGIS;
4. Realização da aquisição de dados das variáveis que serão utilizadas para objeto de estudo, tanto no âmbito elétrico quanto no urbanístico, desse modo definindo por meio do método de Monte Carlo a aleatoriedade dos eventos que serão fundamentais para que sejam criados os cenários por meio do Matlab;
5. Após a criação dos cenários, será feita a programação e a inserção tanto dos dados quanto dos eventos probabilísticos no Diagrama de Voronoi por meio do Matlab, levando em conta como cada incógnita causará impacto e sofrerá para outra, de modo a se entender como os pontos geradores de influência; neste caso, os pontos de recarga da mobilidade elétrica irão conturbar a rede elétrica e de tráfego no meio urbano destacado.

3.3 Modelagem no OpenDSS

Esse software de programação se utiliza de componentes e dados de um sistema de distribuição, logo a modelagem de um sistema será baseado nas mesmas características de um sistema real, e o detalhamento das funções utilizadas no código serão descritas nos

subtópicos a seguir, o código completo encontra-se no link do github; <https://github.com/AntonioGustavoLF/CodigomestradoOpenDSS.git>

3.3.1 Circuito

No diagrama unifilar do sistema elétrico pode ser observado que existem três partes bem definidas: geração, transmissão e distribuição. Para facilitar os cálculos é adotada uma redução dos dois primeiros objetos, logo todo o sistema elétrico antes da distribuição será unido em um só, desde o SIN até o sistema da concessionária, para uma única barra, ou como é definido no software um elemento chamado Circuit, que nada mais é do que um Equivalente de Thévenin para todo o sistema, possuindo assim resistência e reatância de sequência positiva, ou as potências de curto circuito, como se observa a seguir:

Newcircuit.Sistema bus1=Sistema basekV=13.8 phases=3 mvasc3=145.8 mvasc1=144.6.

Onde:

Bus: barra de conexão;

BasekV: tensão de linha nominal;

Phases: número de fases do trecho;

Mvasc3: potência de curto-circuito trifásico;

Mvasc1: potência de curto-circuito monofásico.

3.3.2 Linhas

As linhas do sistema são as responsáveis por fazer o transporte de energia, a sua disposição entre uma barra de saída e uma de entrada é comumente definida como trecho. No programa ela está modelada como “Pi” para linhas curtas, ela pode estar equilibrada ou desequilibrada, composta por três (entrada em delta de um transformador), quatro (saída em estrela de um transformador com neutro disponível) ou dois fios (monofásica fase e neutro).

Para facilitar a montagem do circuito, o comando linecode é criado agregando todos os valores de impedância do circuito, assim como a frequência, mantendo um padrão para que não seja utilizada a repetição desses valores, logo o comando line chama em sua linha de código esse arranjo.

Os cabos utilizados neste trabalho serão para média tensão de 16 mm², 25 mm², 120 mm², 300 mm² e, para a baixa tensão, 16 mm², 25 mm², 50 mm², 95 mm².

Caso seja uma linha equilibrada, são necessários apenas os valores mostrados a seguir:

```
//Linha trifásica equilibrada 95 mm2
new linecode.arranjo1 nphases=3 basefreq=60 units=km
~ r1=0.2352 x1=0.1090 r0=2.0352 x0=2.5325 ! ohm/km
//Linha trifásica equilibrada 16 mm2 BT
new linecode.arranjo4 nphases=3 basefreq=60 units=km
~ r1=1.3899 x1=0.1173 r0=3.189 x0=2.7173 ! ohm/km
```

Onde:

Nphases: número de fases do arranjo;

Basefreq: frequência de base do sistema;

R1: resistência de sequência positiva;

X1: Reatância de sequência positiva;

R0: Resistência de sequência zero;

X0: Reatância de sequência zero.

A partir da criação de arranjos padrões, o comando `line` irá chamar o comando `linecode`. Como se observa a seguir, essa linha estará conectada entre duas barras, caracterizando um trecho com distância bem definida.

```
new line.linha1 phases=3 bus1=Sistema bus2=231178732 linecode=arranjo5 length=2
units=m
```

Onde:

Lenght: comprimento da linha;

Units: unidade de distância.

3.3.3 Transformador

A modelagem do transformador poderá ter várias configurações de acordo com a situação para a qual ele esteja sendo utilizado; no caso de um alimentador, o padrão é ele possuir a entrada em média tensão em delta, e a saída em estrela em baixa tensão com o neutro disponível, logo para cada enrolamento serão definidas as tensões e a ligação, e, para o equipamento como um todo, as suas perdas seguindo os dados reais para simulação, os valores são mostrados a seguir.

```
//Trafo 30 delta estrela aterrada saindo o neutro
new transformer.Trafo1 xhl=3.5 windings=2 %loadloss=1.1267 %noloadloss=0.28
%imag=0.5
~ wdg=1 bus=231178732 kv=13.8 kva=150 conn=delta
~ wdg=2 bus=4659740 kv=0.38 kva=150 conn=wye
```

Onde:

Xhl: reatância percentual do primário para o secundário;

Windings/wdg: número de enrolamentos/ enrolamento a ser caracterizado;

%loadloss: percentual de perda total;

%noloadloss: percentual de perda a vazio;

%imag: percentual de corrente de magnetização;

kV: tensão para cada enrolamento;

Conn: conexão do Trafo com o sistema.

3.3.4 Carga

Para a construção das cargas, primeiramente terá que ser definida a curva de carga do sistema que irá definir por horário qual a demanda que as cargas estão exigindo do sistema. Logo na madrugada teremos a curva com valores menores, pois têm poucas cargas; já no horário de ponta, como o início da noite, esses valores serão maiores devido à entrada de mais cargas. Essa curva pode ser modelada pelo comando loadshape, que será integrada ao comando load, que é a carga, também com várias possibilidades de conexão e configuração. Abaixo, tem-se a demonstração das linhas de código desses comandos.

//Curva de carga comercial

New Loadshape.CurvadecargaA npts=24 interval=1

~ mult=(0.1251 0.1235 0.1195 0.1163 0.1249 0.1701 0.2759 0.6768 0.8599 0.9376 1 0.8093
0.8186 0.9581 0.9550 0.9103 0.7934 0.4591 0.3168 0.2454 0.2128 0.1876 0.1494 0.1355)

//Cenário 6.1kW 1.1

//New Loadshape.Curvadecarga1 npts=24 interval=1

//~ mult=(0.877 0.877 0.876 0.876 0.877 0.024 0.039 0.095 0.121 0.132 0.141 0.114 0.115
0.135 0.135 0.128 0.112 0.065 0.045 0.894 0.89 0.886 0.88 0.878)

Onde:

Npts: número de pontos, nesse caso o número de horas em um dia;

Interval: intervalo entre cada período dos pontos;

Mult: multiplicador.

new load.carga1 phases=3 model=1 bus=4659730 kV=0.38 kw=8 conn=wye pf=0.92
daily=CurvadecargaA

Onde:

Model: definir como a carga irá variar com a tensão, nesse caso igual a um significa que ela é impedância constante;

KW: potência instalada da carga;

KVar: potência reativa da carga;

Daily: chama a curva de carga para o período de um dia.

Para a utilização dos valores em 'pu' é necessário indicar para o programa quais os valores de base que serão levados em consideração, logo nesse caso 69kV, 13,8 kV e 0,380 kV serão os valores de base. Desse modo, o software transformará esses valores por unidade.

Set voltagebases=[69 13.8 0.38]

Calc voltagebases

3.4 Modelagem no QGIS

No software QGIS, a criação do cenário é composta primeiramente pelo download do tipo mapa que será utilizado na pesquisa, desse modo podem ser definidas as características a serem estudadas, como, por exemplo, em casos de pesquisas envolvendo elevação de terrenos pode ser utilizado já o mapa com características de altitude bem definidas; no caso dessa Dissertação, a inserção do mapa do software Google Maps é essencial não só pra definir as ruas e avenidas do estudo, mas também os estabelecimentos, como já foi abordado nas figuras 35 a 38. De tal modo, o georreferenciamento já é característico para se definir onde serão os locais que possuem maior fluxo de pessoas devido à sua atividade realizada, como um Supermercado, por exemplo, que apresenta uma rotatividade altíssima.

Outro tipo de mapa que pode ser utilizado é uma ferramenta do próprio Google Maps, que é o Google Traffic. Nessa ferramenta fica explícito o uso das cores já abordados no subcapítulo 2.3; ou seja, pode ser observada a dinâmica do fluxo de acordo com as cores que estão representando o período das velocidades especificadas: laranja, verde e vermelho, que indicarão o tráfego de acordo com o horário do dia, como pode ser visto na Figura 42.

Figura 42 – Mapa de trânsito da cidade de Fortaleza no Google Maps



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

A partir desses mapas é construído o espaço amostral da pesquisa utilizando a ferramenta do QGIS, shape; nela, são definidas as delimitações das zonas que serão estudadas, como também podem ser feitas as definições dos estabelecimentos. No caso desta Dissertação, cada atividade teve uma cor, como já pôde ser vista na figura 37. Nesse shape podem ser integradas as informações que serão importantes para a pesquisa, como área do local e perímetro, como pode ser observado na Figura 43.

Figura 43 – Matriz de características dos shapes no QGIS

	id	Zona	Area	Perimetro	Área km ²
1	1 1		798,987597	4021	0,79899
2	2 2		511,544191	3736	0,51154
3	3 3		418,033924	2795	0,41803
4	4 4		509,522440	3586	0,50952
5	5 5		673,756994	3880	0,67418

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Também pode ser feito inserção de dados e estatísticas extraídos de pesquisas municipais, estaduais ou federais.

No QGIS também foram definidos quais os estabelecimentos que seriam utilizados no trabalho de acordo com as zonas da área de estudo, Quadros 3 a 7, esses locais terão influência na relevância que as zonas possuem em relação com as outras no que se refere ao sistema elétrico, e ao tráfego urbano, e os polos geradores de viagem.

Quadro 3 – Estabelecimentos considerados para a zona 1

Zona 1
Centro Estudantil
FB
Unichristus
Comércio
Pátio Dom Luís
Guará
Del Paseo
Center um
Shopping Aldeota
Shopping Alamanda
Palladium Business Center
Pátio Dom Luís – Virgílio Távora

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Quadro 4 – Estabelecimentos considerados para a zona 2 (continua)

Zona 2
Comércio
Frangolândia
Mercadinho São Luiz
Casas Freitas

Quadro 4 – Estabelecimentos considerados para a zona 2 (conclusão)

Zona 2
Hospital
Monte Klinikum

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Quadro 5 – Estabelecimentos considerados para a zona 3

Zona 3
Comércio
Avenida Shopping
Casas Freitas
Frangolândia
Edifício Plaza Tower

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Quadro 6 – Estabelecimentos considerados para a zona 4

Zona 4
Comércio
Pão de Açúcar
Plus Buffet
Coco Bambu
Hospital
Hospital São Raimundo
Hospital Gênese

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Quadro 7 – Estabelecimentos considerados para a zona 5

Zona 5
Hospital
Hospital Prontocardio

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

3.5 Modelagem para o Diagrama de Voronoi

A modelagem do Diagrama de Voronoi utilizada na Dissertação seguirá a lógica de pagerank, criada pelo Google para diferenciar a relevância das páginas da internet, e assim distribuir o peso que cada uma teria de acordo com a pesquisa realizada pelo usuário.

3.5.1 Lógica de relevância para o Diagrama de Voronoi

Essa lógica surgiu como uma medida que calculasse a relevância das páginas da web, com o intuito de diferenciar e ranquear as que são altamente reconhecíveis e relevantes, das que não, desse modo surgiu o algoritmo do pagerank, que é utilizado por Costa Filho (2022), para construir a lógica do Diagrama de Voronoi.

O algoritmo de pagerank pode ser representado pela teoria dos grafos, explicado a seguir:

Em um espaço amostral de quatro páginas na WEB descritas como 1, 2, 3 e 4, denominadas nós dos grafos, as páginas podem possuir, ou não, links que referenciam as outras páginas deste mesmo espaço amostral, e a estes links denomina-se arestas. Forwardlinks são os links da página de referência para outras páginas, backlinks são links de outras páginas para a página de referência, como pode ser observado na Figura 44.

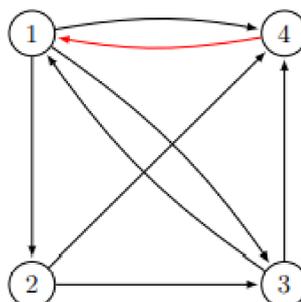
Quanto maior o número de links que uma página da web receber maior é a relevância em comparação às outras páginas.

X_k é a relevância da página k , onde seus forwardlinks são definidos como d_k . Cada forwardlink da página k terá um peso igual a x_k/d_k . Segundo Filho (2022), intuitivamente isto significa que a página doará $1/d_k$ de sua importância para cada página referenciada por forwardlink da página k .

A Equação 19 calcula a importância da página, onde F é um conjunto de páginas da web que possuem forwardlink para a página k .

$$x_k = \sum_{i \in F} \frac{x_i}{d_i} \quad (19)$$

Figura 44 – Exemplo da Teoria dos Grafos para 4 páginas na web



Fonte: Filho (2022).

Primeiro leva-se em consideração os valores iniciais de relevância para todos os nós, neste caso igual a 1, onde em x_{mn} , "m" é a iteração, e "n" o nó.

$$x_{11} = \frac{x_{03}}{2} + x_4 \quad (20)$$

$$x_{12} = \frac{x_{01}}{3} \quad (21)$$

$$x_{13} = \frac{x_{01}}{3} + \frac{x_{02}}{2} \quad (22)$$

$$x_{14} = \frac{x_{01}}{3} + \frac{x_{02}}{2} + \frac{x_{03}}{2} \quad (23)$$

No formato matricial, se considera que X_0 corresponde a matriz de valores iniciais de cada nó, enquanto X_1 a matriz de valores da primeira iteração de cálculos. O H referencia a matriz de valores ponderados de forwardlinks, de modo que:

$$X_1 = H * X_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \\ x_{04} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \end{pmatrix} \quad (24)$$

O conjunto X_0 corresponde aos valores iniciais de cada nó, sendo que cada nó teria valor igual a 1, temos que:

$$X_1 = H * X_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,5 \\ 0,33 \\ 0,83 \\ 1,33 \end{pmatrix} \quad (25)$$

O equacionamento da segunda iteração é apresentado a seguir:

$$X_2 = H * X_1 = H * H * X_0 = H^2 * X_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1,5 \\ 0,33 \\ 0,83 \\ 1,33 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,75 \\ 0,5 \\ 0,666 \\ 1,083 \end{pmatrix} \quad (26)$$

Observa-se que para a obtenção dos valores da iteração y , utilizam-se os valores obtidos na iteração $y-1$, logo a equação matricial para y iteração pode ser deduzida na Equação 26:

$$X_y = H^y * X_0 \quad (26)$$

Caso na matriz "H" exista alguma coluna com todos os valores iguais a 0, todos os valores desta coluna devem ser substituídos por $1/u$, onde u corresponde ao número total de nós analisados. Segundo Filho (2022), isto previne que o grafo analisado seja desconexo.

Segundo Filho (2022), um fator de amortecimento "p" ou damping factor foi inserido no algoritmo que Page e Brin criaram. Uma nova matriz, denominada matriz do Google, foi considerada:

$$X_y = \left\{ (H^y * X_0) * p + \left(\frac{p-1}{u} \right) \right\}, 0 \leq p \leq 1 \quad (27)$$

Este fator considera evasões que possam ocorrer dentro do grafo analisado, caso o usuário vá para outra página que não está dentro do modelo, ou caso ele saia.

Os forwardlinks da matriz viária são apresentados no Anexo 2.

3.5.2 Lógica de peso para o Diagrama de Voronoi

A lógica para o cálculo do fator de peso do Diagrama de Voronoi desta Dissertação é o resultado do produto entre dois fatores: o primeiro está relacionado ao peso do trânsito de veículos, e o segundo ao peso do sistema elétrico de potência.

Para o peso do fluxo de veículos é considerada a velocidade média das vias durante um dia, conforme Equação 28, quanto menor a velocidade durante um período de tempo em comparação à velocidade média do dia, menor será o fator de peso relacionado ao tráfego de veículos.

$$V_m = \frac{\sum V(t)}{24}, t = 1 \rightarrow 24 \quad (28)$$

Onde:

V_m = Velocidade média geral do dia, em km/h;

$V(t)$ = Velocidade média da hora “t”, em km/h.

$$P_n(t) = \frac{V(t)}{V_m} \quad (29)$$

Onde:

$P_n(t)$ = Peso calculado, no horário “t”, para velocidade média do tráfego de veículos na rua “n”.

O peso calculado em $P_n(t)$ supõe que todas as avenidas e ruas possuem o mesmo peso entre si, o que não é verdade. Uma avenida que possui mais de uma avenida e com dois sentidos diferentes de tráfegos, não pode possuir o mesmo peso que uma rua de sentido único sem saída, por exemplo.

Desse modo, utiliza-se o algoritmo de pagerank para se classificar o grau de importância, onde cada rua e avenida foram definidas como um nó.

O cálculo do fator de peso utilizado no Diagrama de Voronoi, é referente aos eletropostos analisados, levando em consideração as vias que dão acesso a eles, conforme Equação 30.

$$Pw1(t) = (Rw11 * P1(t)) + (Rw12 * P2(t)) + \dots + (Rw1n * Pn(t)) \quad (30)$$

Onde:

$Pw1(t)$ = Peso calculado, no instante de tempo "t", para o posto analisado (ou ponto fixo) dentro da área de estudo para traçado do Diagrama de Voronoi considerando ruas que dão acesso direto a este posto;

$Rw11, Rw12, \dots, Rw1n$ = Relevância calculada para as ruas (identificadas como "1", "2", ..., "n") que dão acesso direto ao posto analisado; $P1(t), P2(t), \dots, Pn(t)$ = Peso calculado, no horário "t", para tráfego de veículos considerando ruas que dão acesso direto a este posto (identificadas como "1", "2", ..., "n");

Já para a rede de distribuição primária e secundária, a lógica utilizada é similar, pois do mesmo modo irá influenciar na área de abrangência de um eletroposto, ou das estações de recarga dos estabelecimentos comerciais.

Cada barramento que atende uma unidade consumidora foi classificado conforme sua importância na rede de distribuição utilizando o algoritmo pagerank.

Logo, os barramentos de média tensão que atendem diretamente os eletropostos, e as cargas comerciais são de maior importância para toda a rede elétrica na área de estudo, diferentemente das unidades consumidoras atendidas em baixa tensão

Cada barramento possui valores de tensão em p.u que variam ao longo do dia. Um fator logarítmico foi aplicado à tensão dos barramentos para que os níveis precariedade e criticidade rebaixe o peso. A Equação 31 apresenta o cálculo realizado.

$$Pw2(t) = (1 + \log \log (Vpu(t))) * Rw2 \quad (31)$$

Onde:

$Pw2(t)$ = É o peso calculado que corresponde a tensão no barramento de média tensão que atende ao eletroposto ou estabelecimento analisado;

$Vpu(t)$ = É a tensão do barramento em média tensão que atende ao posto analisado no instante "t", em PU;

$Rw2$ = É o fator de relevância, calculado pelo algoritmo pagerank, do barramento em média tensão que atende ao posto analisado;

Com as equações demonstradas neste subcapítulo referente à construção da lógica utilizada no Diagrama de Voronoi, o fator de peso geral ou fator de peso aplicado é:

$$Pw(t) = Pw1(t) * Pw2(t) \quad (32)$$

Onde:

$Pw(t)$ = É o peso calculado a ser inserido no Diagrama de Voronoi.

4 ESTUDO DE CASO

Introduzida a fundamentação teórica e a metodologia, o próximo passo é a construção de cenários com os assuntos já abordados para a realização do estudo de caso, desse modo com o embasamento já instruído dos VEs, infraestrutura da rede elétrica e urbana, o intuito é agregar essas camadas para possibilitar a execução das simulações.

Na figura 35 já foi determinada qual seria a área onde serão realizados os estudos, essa área foi dividida em cinco zonas com o intuito de analisar como a probabilidade de aleatoriedade do modelo de Monte Carlo irá influenciar na dinâmica do fluxo elétrico e do fluxo do tráfego de veículos.

Para simplificação da simulação foi adotada uma redução de barras, em que as barras mais capilares dos consumidores foram agrupadas em um número de 582 barras, somando suas cargas e compactando os trechos, todos eles atendidos em baixa tensão, com tensão trifásica de 380 V, de modo que os centros de recarga também sejam agrupados nessas barras para as diferentes montagens de cenários, ou em eletropostos, domiciliares ou estabelecimentos.

As barras terão cargas conectadas a ela e irão variar de 1 a 12 kW de potência instalada; logo, se em uma dessas barras houver a inclusão da recarga do VE, esse valor será a soma da carga já existente e da nova que está se conectando.

Com relação aos veículos elétricos e sua recarga, será elaborada uma tabela seguindo a Tabela 3 com quatro tipos diferentes de recarga, que também serão determinadas por Monte Carlo, assim como o porcentual de bateria restante dos VEs, levando em consideração qual a maior probabilidade de estar realizando e qual velocidade de recarga de acordo com sua necessidade.

Seguindo a IEC 61851, que tem como função padronizar os modos de recarga que as estações devem disponibilizar, variando a tensão e corrente, a potência, além da forma de onda da corrente, pode ser alternada ou contínua, isso para o aspecto construtivo dos veículos elétricos. Como afirmado anteriormente, a transmissão de energia para a bateria pode ser indiretamente em corrente alternada pelo inversor, ou diretamente já que as baterias são alimentadas em corrente contínua, entretanto devido a limitações do software OpenDSS, todas as transmissões serão em corrente alternada.

Outro fator determinante é a capacidade da rede e as instalações fixadas, portanto o maior nível de baixa tensão disponível para um consumidor no estado do Ceará é de 380 volts trifásicos; logo, valores acima de 480 V que são especificados na norma só podem ser

utilizados caso o consumidor possua permissão para instalar equipamentos capazes de realizar essa transformação; desse modo, o valor da tensão adotado para a recarga será os 380 V.

Portanto, foi determinado que o modelo de VE possui uma bateria de 60 kWh, com autonomia de 300 km, dado esse que não será tão relevante, pois o estado de carga da bateria já será dado pelo veículo a partir do modelo de Monte Carlo.

Desse modo, ficam definidos os níveis de tensão, corrente, potência, duração e o tipo de recarga para facilitar o entendimento, levando em consideração as quatro diferentes velocidades de recarga: lenta, média, rápida e ultrarrápida, Quadro 8.

Quadro 8 – Métodos de recargas utilizados na simulação

Tipo de recarga	Velocidade	Tensão	Corrente (A)	Potência (W)	Duração
1	Lenta	380 Vac	16 A	6080	1-10h
2	Média	380 Vac	32 A	12160	1-5h
3	Rápida	380 Vac	82 A	31160	1-2h
4	Ultrarrápida	600 Vcc	120 A	72000	<30 min

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Definidos os tipos de recargas utilizadas no trabalho, agora é entender a aleatoriedade para cinco diferentes variáveis. Todos esses valores serão gerados pela probabilidade aleatória de Monte Carlo, esses números foram extraídos de iterações no software Excel, por meio tanto da distribuição normal quanto a Poisson. Essas variáveis são:

- Zona de destino
- Número de VEs entrando na zona
- Veículo realizará a recarga? Se sim, qual o tipo
- Local da recarga
- Duração da recarga, influenciada pelo tipo

Primeiramente, foram definidas seis diferentes incógnitas para a variável da zona de acordo com a numeração de cada uma delas definida na figura 35, de modo que o valor 0 quer dizer que o VE simplesmente não entrou em nenhuma das zonas para estacionar.

O total de veículos da probabilidade foi de 30 VEs por hora, de modo que a divisão por zona, levando em conta a área e número de estabelecimentos na zona, ficou definida como pode se observar no Quadro 9.

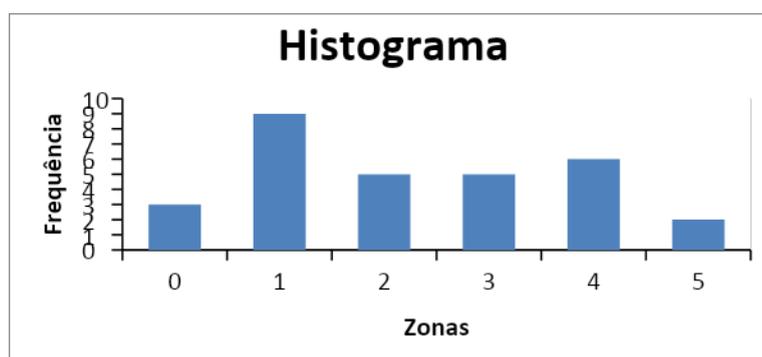
Quadro 9 – Frequência de entrada de veículos elétricos por hora nas zonas

Zona	Quantidade de VEs por hora
0	3
1	9
2	5
3	5
4	6
5	2

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Como resultado da distribuição de Poisson, assim ficou o Histograma que pode ser observado na Figura 45, para a divisão de carros por zona.

Figura 45 – Distribuição da frequência das zonas por aleatoriedade



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Realizadas as entradas de VEs por zona, foram definidas as outras variáveis, lembrando que os valores levam em conta os tipos de atividades, eletropostos por zona e os tipos de recarga mais indicada para cada estabelecimento, logo não será possível fazer uma recarga ultrarrápida na zona 5 em uma faculdade visto que, primeiramente, não há centro estudantil na zona 5 e muito menos a recarga ultrarrápida será disponibilizada nesse tipo de local, portanto a recarga ultrarrápida ficou limitada aos eletropostos, de modo que esses também ficaram limitados, pois somente pode ser realizado esse tipo de recarga no local.

Definidas essas características, exceções e limitações, os Quadros de 10 a 14 apresentam os tipos de recarga que serão feitos nos VEs, o percentual de bateria no estado da carga que está sendo conectando à rede, qual a duração e em qual local será realizada por cada zona.

Quadro 10 – Características dos VEs na Zona 1

Zona 1			
% de bateria	Tipo de recarga	Local	Duração
36	4	Eletroposto	<30 min
66	2	Mercado	1h
60	0	Não	0h
90	1	Estudantil	2h
45	2	Mercado	3h
24	3	Estudantil	2h
51	2	Mercado	5h
54	3	Estudantil	3h
15	4	Eletroposto	<30 min

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Quadro 11 – Características dos VEs na Zona 2

Zona 2			
% de bateria	Tipo de recarga	Local	Duração
21	2	Mercado	2h
75	4	Eletroposto	<30 min
30	1	Hospital	6h
21	2	Mercado	5h
84	0	Não	0h

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Quadro 12 – Características dos VEs na Zona 3

Zona 3			
% de bateria	Tipo de recarga	Local	Duração
51	2	Mercado	2h
39	4	Eletroposto	<30 min
72	2	Mercado	1h
15	4	Eletroposto	<30 min
51	0	Não	0h

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Quadro 13 – Características dos VEs na Zona 4

Zona 4			
% de bateria	Tipo de recarga	Local	Duração
93	0	Não	0h
72	2	Mercado	2h
78	0	Não	0h
45	3	Eletroposto	<30 min
90	2	Hospital	3h
15	4	Eletroposto	<30 min

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Quadro 14 – Características dos VEs na Zona 5

Zona 5			
% de bateria	Tipo de recarga	Local	Duração
54	2	Hospital	2h
18	0	Não	0h

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Logo, já foram determinadas as recargas em eletropostos e as recargas em estabelecimentos que exercem alguma atividade comercial, restando assim a taxa de VEs que são dos residentes dessa área, ou dos trabalhadores de longa duração em escritórios, por exemplo, pois até agora foram considerados somente os usuários que têm como seu destino essas zonas. Para facilitar as simulações, será considerado um número uniforme de VEs sendo recarregados nessas zonas, 10 em cada zona, distribuída de forma aleatória nas barras do sistema. Aleatório também serão o horário e a duração de carga, porém será levada em consideração a incógnita do conceito de imprevisibilidade mais básico, que é o usuário recarregando seu VE à noite, após chegar ao seu domicílio e recarregar no modo lento por toda a noite e madrugada, ou no caso de um escritório em que a recarga é lenta durante a manhã e à tarde. Desse modo, os cenários para recarga lenta irão englobar em sua maioria essas situações, como pode ser visto no Quadro 15.

Quadro 15 – Características dos VEs que integram o sistema

Recarga Residencial ou em Escritório			
% de bateria	Tipo de recarga	Local	Duração
36	2	Escritório	5h
66	1	Residencial	8h
60	1	Residencial	9h
90	1	Escritório	7h
45	1	Residencial	10h
24	2	Residencial	5h
51	1	Residencial	10h
54	1	Escritório	8h
33	1	Residencial	8h
15	2	Escritório	4h

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Esses valores serão levados em consideração para que sejam construídas as simulações no OpenDSS e para analisar qual o impacto na rede elétrica que essas recargas causarão, tanto pela queda de tensão quanto pela sobrecarga nos alimentadores. Serão

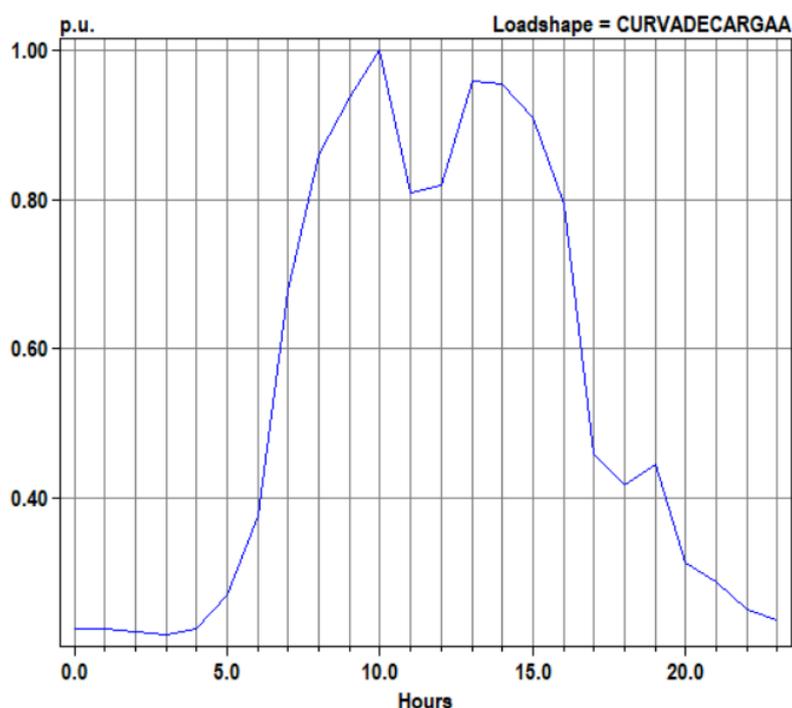
observados os níveis de qualidade para os consumidores, assim como também serão levadas em consideração para os 9 eletropostos de todo o sistema, como pôde ser observado na Figura 38, entretanto por tratar-se de um eletroposto, todas as recargas serão ultrarrápidas.

5 RESULTADOS

5.1 Simulação sem VEs e sem os estabelecimentos, e eletropostos

Primeiramente foi simulado o sistema inteiro como um só antes da inserção dos VEs; ou seja, com as cargas já existentes; desse modo, foi utilizada uma curva de carga, como pode ser visto na Figura 46. Essa curva de carga com características mais comerciais, também apresenta de modo mais tímido uma leve presença residencial. Essa curva de carga também será utilizada nas outras simulações com a inserção de VEs para aquelas cargas sem a presença de recarga.

Figura 46 – Curva de carga do sistema



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Seguindo os passos mostrados na metodologia, foi modelado o sistema sem a inserção dos VEs. Tal simulação sofre iteração de hora em hora considerando a curva de carga e suas potências já pré-estabelecidas. O resultado foi a tabela 4, que mostra os valores de máxima tensão em PU, mínima tensão em PU, e a potência ativa circulando em MW, além das perdas ativas em percentual. Nesse primeiro momento não foram incluídas as cargas

especiais dos estabelecimentos, pois essas cargas são alimentadas por vias expressas da SED para sua localização.

Tabela 4 – Dados do sistema sem VEs

Hora	Máxima Tensão em PU	Mínima Tensão em PU	Potência Ativa (MW)	Tensão de Linha (V)	Perdas
1	0,9993	0,98017	2,09264	372,4646	5,596%
2	0,9993	0,98031	2,07862	372,5178	5,627%
3	0,99931	0,98065	2,04357	372,647	5,706%
4	0,99932	0,98092	2,01551	372,7496	5,772%
5	0,9993	0,98019	2,09088	372,4722	5,60%
6	0,99976	0,98533	2,53523	374,4254	4,883%
7	0,99894	0,96725	3,40832	367,555	3,952%
8	0,99823	0,94122	5,99847	357,6636	3,27%
9	0,99779	0,92636	7,54308	352,0168	3,31%
10	0,99761	0,92016	8,18899	349,6608	3,36%
11	0,99746	0,91525	8,70357	347,795	3,425%
12	0,99791	0,93043	7,11917	353,5634	3,283%
13	0,99789	0,92968	7,19725	353,2784	3,287%
14	0,99756	0,91854	8,35841	349,0452	3,385%
15	0,99756	0,91879	8,33283	349,1402	3,382%
16	0,99767	0,92233	7,96278	350,4854	3,345%
17	0,99795	0,93172	6,91944	354,0536	3,277%
18	0,99875	0,96001	4,12937	364,8038	3,589%
19	0,99885	0,9637	3,76321	366,206	3,747%
20	0,99878	0,96121	4,01087	365,2598	3,635%
21	0,99909	0,97269	2,85919	369,6222	4,416%
22	0,99915	0,97484	2,63934	370,4392	4,672%
23	0,99924	0,97811	2,30545	371,6818	5,176%
24	0,99928	0,97929	2,18376	372,1302	5,405%

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

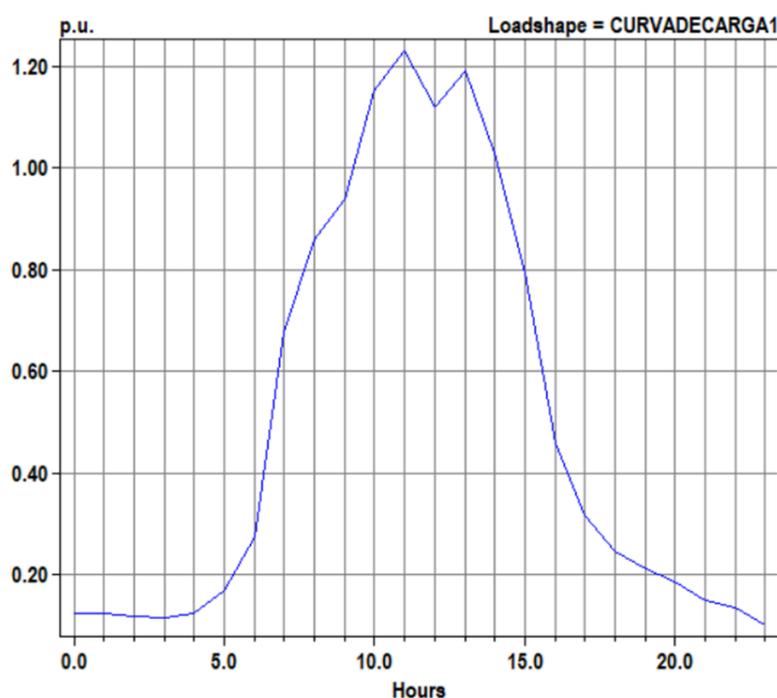
Podem ser extraídas dessa tabela dados para se analisar se a qualidade de tensão está de acordo com o módulo 8 do Prodist, como pôde ser visto na tabela 3. Para tensão de linha, o mínimo para estar adequado é de 350 V; ou seja, o sistema sem VEs está no limite de ser adequada para precária em alguns horários, tipo às 11h e às 14h. Também pode ser analisado como a potência ativa do sistema está se comportando de acordo com a curva de carga introduzida, e principalmente vê-se a existência de dados para serem comparados quando os VEs forem inseridos.

5.2 Simulação com VEs e sem os estabelecimentos, e eletropostos

Para a simulação inicial inserindo os VEs, o sistema está recebendo essas novas cargas de forma aleatória; ou seja, não se sabe quais são as barras já existentes que terão recarga, entretanto se sabe que são 10 em cada zona; desse modo, novas curvas de carga precisaram ser criadas para dois ambientes, os escritórios, e as residências.

Na Figura 47 pode ser observada uma figura muito parecida com a Figura 46, pois se trata da curva de um VE recarregando no sistema em horário comercial, em um escritório, como mostrado no Quadro 15, nesse caso, durante 5h, agora combinando o horário comercial da curva do sistema com o de recarga, de modo que o alimentador tenha a sobrecarga se saturando.

Figura 47 – Curva de carga das recargas dos VEs em escritórios

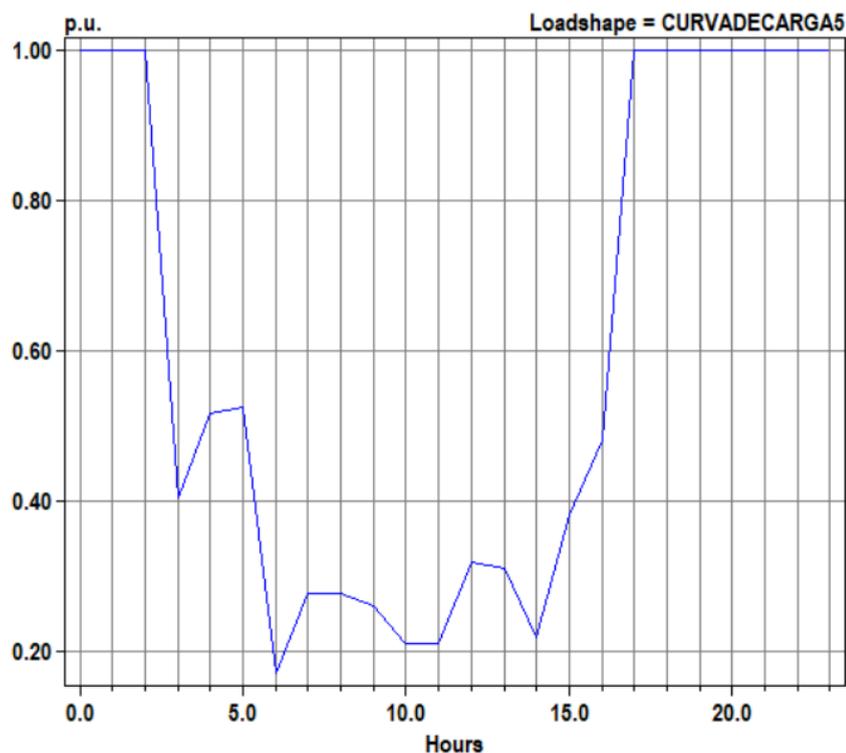


Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Já a Figura 48 apresenta a curva de carga do VE recarregando em uma residência seguindo a lógica de ele ser reabastecido durante a noite e pela madrugada, de modo que durante a manhã e à tarde isso não ocorra devido à probabilidade de a recarga nesse horário diminuir em área residencial e aumentar em áreas comerciais.

Assim pode ser observado um contraponto com relação à Figura 47; há uma elevação de carga nos horários noturnos, em que existe pouca presença de cargas comerciais e mais residenciais, de modo que ocorre maior demanda para as recargas.

Figura 48 – Curva de carga das recargas dos VEs em residências



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Como resultado será feita a simulação com 10 VEs recarregando em cada zona. De acordo com o Quadro 15, esses veículos não estão entrando de hora em hora no sistema, mas sim durante o dia. Essa iteração é fundamental para se estipular quais os níveis de qualidade serão gerados, dependendo somente de usuários que frequentam aquela área diariamente, ou por trabalhar nela, ou por ter seu domicílio nela, de modo a se considerar o movimento pendular migratório dos usuários, e não a origem/ destino.

Os resultados são demonstrados na Tabela 5 com as mesmas variáveis vistas na tabela 4, entretanto agora com a inserção dos VEs.

Tabela 5 – Dados do sistema com VEs em todas as zonas

Hora	Máxima Tensão em PU	Mínima Tensão em PU	Potência Ativa (MW)	Tensão de Linha (V)	Perdas
1	0,99924	0,96197	2,3113	365,5486	5,319%
2	0,99926	0,96446	2,25155	366,4948	5,387%
3	0,99927	0,96528	2,1986	366,8064	5,476%
4	0,99929	0,97265	2,14773	369,607	5,555%
5	0,99926	0,97032	2,23343	368,7216	5,392%
6	0,99917	0,96824	2,57853	367,9312	4,805%
7	0,99892	0,957	3,5152	363,66	3,941%
8	0,99818	0,92347	6,18466	350,9186	3,369%
9	0,99773	0,90421	7,75315	343,5998	3,446%
10	0,99754	0,89634	8,40418	340,6092	3,513%
11	0,99739	0,88999	8,91994	338,1962	3,577%
12	0,99785	0,90904	7,34878	345,4352	3,427%
13	0,99782	0,90803	7,44772	345,0514	3,445%
14	0,99749	0,89406	8,59679	339,7428	3,548%
15	0,9975	0,8948	8,54088	340,024	3,529%
16	0,99761	0,8998	8,18166	341,924	3,488%
17	0,99788	0,91186	7,21686	346,5068	3,410%
18	0,99866	0,93725	4,43149	356,155	3,667%
19	0,99877	0,94279	4,04163	358,2602	3,791%
20	0,9987	0,94132	4,28789	357,7016	3,703%
21	0,99902	0,95239	3,12727	361,9082	4,339%
22	0,99908	0,95507	2,90183	362,9266	4,548%
23	0,99917	0,95844	2,56317	364,2072	4,954%
24	0,99922	0,96089	2,40808	365,1382	5,165%

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Já se torna perceptível a queda nos níveis de tensão e o aumento da potência ativa no sistema, a tensão de linha que antes se encaixava no nível adequado de atendimento de tensão agora já se encontra em situação precária.

Na Tabela 6 ficarão mais perceptíveis essas variações de acordo com as diferenças de antes e depois de os VEs estarem entrando nessa área, lembrando que somente as recargas 1 e 2 foram utilizadas nessa primeira simulação, 7 kW e 12 kW de recarga, respectivamente.

Tabela 6 – Diferenças das variações dos resultados sem e com VEs em todas as zonas (continua)

Hora	Variação em PU	Variação em Tensão de Linha (V)	Variação na Potência (MW)	Perdas
1	0,0182	6,916	0,21866	-0,277%
2	0,01585	6,023	0,17293	-0,240%
3	0,01537	5,8406	0,15503	-0,230%

Tabela 6 – Diferenças das variações dos resultados sem e com VEs em todas as zonas (conclusão)

Hora	Variação em PU	Variação em Tensão de Linha (V)	Variação na Potência (MW)	Perdas
4	0,00827	3,1426	0,13222	-0,217%
5	0,00987	3,7506	0,14255	-0,208%
6	0,01709	6,4942	0,0433	-0,078%
7	0,01025	3,895	0,10688	-0,011%
8	0,01775	6,745	0,18619	0,099%
9	0,02215	8,417	0,21007	0,136%
10	0,02382	9,0516	0,21519	0,153%
11	0,02526	9,5988	0,21637	0,152%
12	0,02139	8,1282	0,22961	0,144%
13	0,02165	8,227	0,25047	0,158%
14	0,02448	9,3024	0,23838	0,163%
15	0,02399	9,1162	0,20805	0,147%
16	0,02253	8,5614	0,21888	0,143%
17	0,01986	7,5468	0,29742	0,133%
18	0,02276	8,6488	0,30212	0,078%
19	0,02091	7,9458	0,27842	0,044%
20	0,01989	7,5582	0,27702	0,068%
21	0,0203	7,714	0,26808	-0,077%
22	0,01977	7,5126	0,26249	-0,124%
23	0,01967	7,4746	0,25772	-0,222%
24	0,0184	6,992	0,22432	-0,240%

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Com as variações é possível ter uma visão melhor do que está acontecendo com a inserção dessas cargas no sistema. Primeiramente houve uma queda considerável nas tensões trifásicas do sistema, de modo que o sistema não esteja adequado para os níveis de atendimento estabelecidos no Prodist.

Outro ponto que pode ser observado é o aumento de potência ativa no sistema em alguns horários, principalmente à tarde, esse aumento ficou próximo de 300 kW, lembrando que somente foram consideradas recargas lentas e médias, e somente 10 VEs durante todo o dia. Desse modo, espera-se que a entrada de VEs recarregando em outros locais, com recargas rápidas ou ultrarrápidas em eletropostos, gere a ocorrência uma elevação na potência do sistema.

Quanto às perdas, percebem-se dois cenários distintos. No período noturno e da madrugada há uma redução das perdas, isso acontece porque esse sistema fica subdimensionado com a diminuição de cargas comuns, de modo que com a inserção dos VEs essas perdas diminuem, pois o sistema ganha maior robustez. Um sistema com pouca carga

gera efeitos capacitivos que elevam a tensão e conseqüentemente ocorrem perdas, pois a ampacidade dos cabos se encontra subdimensionada. Esse cenário se inverte nos períodos da tarde, pois o sistema já com presença substancial das cargas tende a causar mais perdas com os VEs carregando, seja por conta da sobrecarga em condutores, seja pelos alimentadores, gerando também uma queda de tensão.

Há de se esperar que essa rede acabe por acionar as suas proteções contra subtensão, ou sobrecarga, nos alimentados, causando a piora nos níveis de qualidade do serviço, como também um aumento na frequência de interrupções ou na duração das mesmas, exigindo, a partir dessa constatação, uma reforma na infraestrutura.

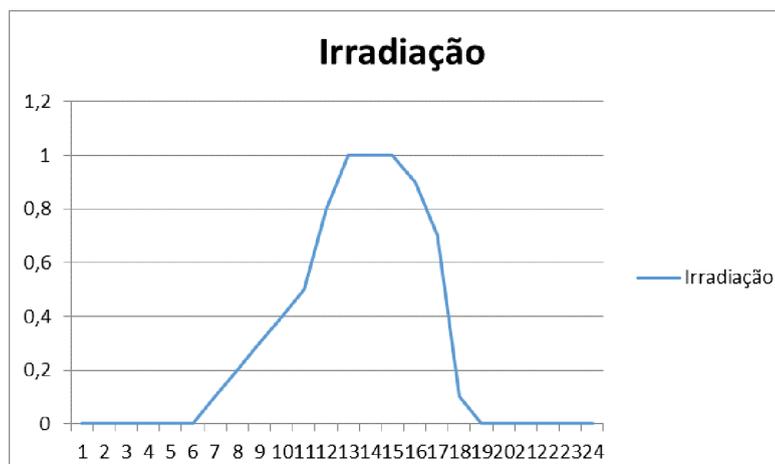
5.3 Simulação com o auxílio da geração distribuída

Uma forma de se auxiliar a rede durante períodos de precariedade ou criticidade nos níveis de qualidade é a inserção de geração distribuída compartilhada, obviamente que para um cenário onde isso seja possível é necessária uma rede inteligente capaz de identificar a piora na qualidade do produto da rede de distribuição, e conseqüentemente a disponibilidade da geração, isso pode se tornar possível com uma planta fotovoltaica, por exemplo, que possa injetar energia na rede da concessionária.

Desse modo, foi considerada uma planta fotovoltaica com potência instalada de 70 kW na zona 5, com única e exclusiva função de injetar toda sua geração de energia nas zonas de 1 a 4, de acordo com a necessidade destas em mitigar suas pioras nos níveis de tensão.

Na Figura 49 pode se observar como é a curva de irradiação dessa usina solar, se for levada em consideração a curva de carga na Figura 46, o pico de geração de energia é paralelo ao pico de consumo.

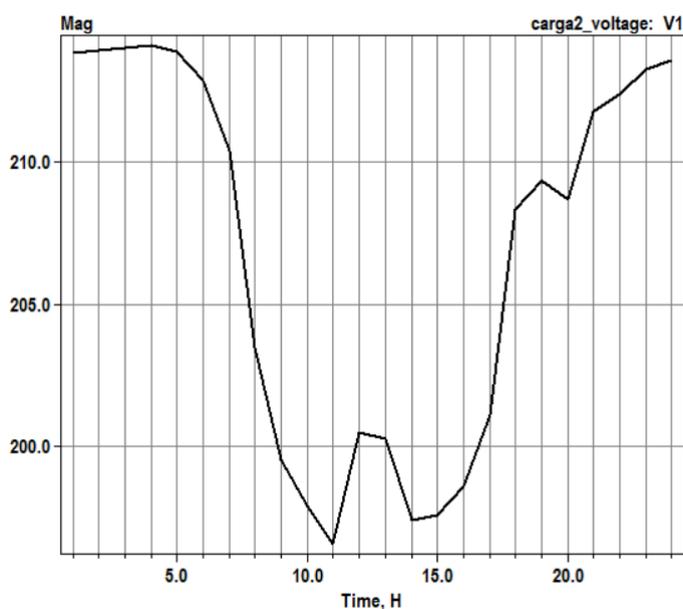
Figura 49 – Irradiação durante 24h para a cidade de Fortaleza



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Sendo assim, foi identificado por meio dos resultados que as barras de baixa tensão da zona 1 apresentavam os níveis mais precários de tensão de atendimento, como pode ser observado Figura 50, a tensão de fase. Logo, a zona 5 e a zona 1 que possuem sistemas independentes, passou a ter uma linha expressa ligando a usina solar até o alimentador onde as barras são mais deficitárias em relação a tensão.

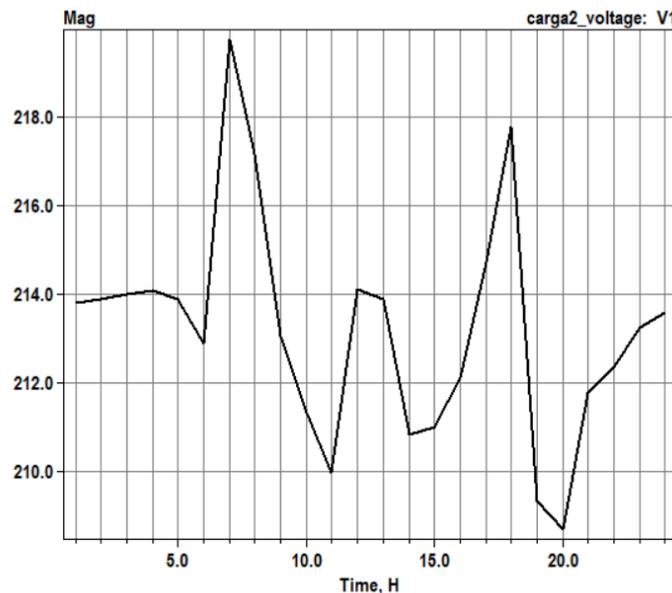
Figura 50 – Tensão de fase em uma das barras com o impacto das recargas



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Com essa interligação, a tensão de atendimento que antes se encontrava abaixo de 200 V, como pôde ser observada na Figura 50, passou a ser de 210 V, Figura 51, de modo que agora o nível de qualidade se adequa ao módulo 8 do Prodist, como pôde ser observada na Tabela 1.

Figura 51 – Tensão de fase em uma das barras com o impacto das recargas, e a mitigação da geração distribuída



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Esse modelo é funcional caso a zona de origem da fonte não apresente problemas com a qualidade do produto, logo poderia realizar essa distribuição para zonas deficientes de demanda.

5.4 Simulações com o Diagrama de Voronoi

Por último é apresentado o Diagrama de Voronoi, os resultados encontrados nesse modelo matemático são essenciais para se entender as junções das camadas da rede elétrica e do tráfego urbano, e como as variáveis de diferentes grandezas irão influenciar na dinâmica dos usuários na área de estudo.

Nesses resultados foram introduzidas as diferentes curvas de carga referente aos comportamentos dos eletropostos, e das estações de recarga presentes nos estabelecimentos,

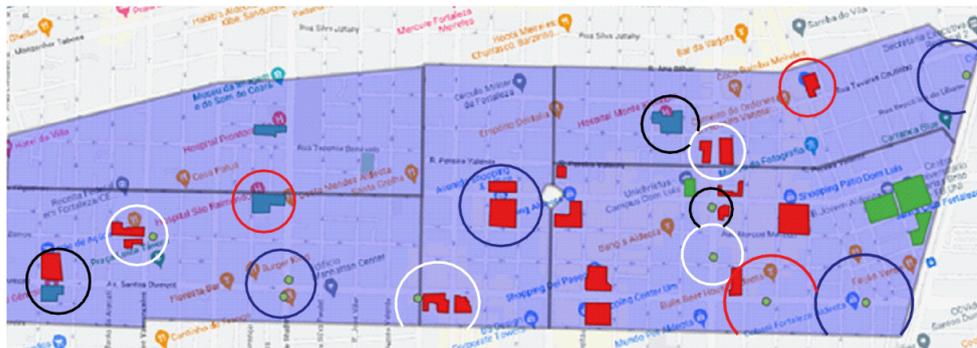
correspondente aos níveis de tensão e de potência que foram introduzidos no diagrama, levando em conta as relevâncias e os pesos.

O mesmo foi feito para o tráfego urbano, onde foi levado em consideração não somente a velocidade média das vias presentes nas áreas, mas também os novos pólos geradores de viagem, que agora apresenta uma nova atividade, a recarga do VE.

Desse modo, foram feitas quatro simulações, em quatro horários diferentes de um dia da semana, os quatro horários selecionados foram 0h, 6h, 12h, e 18h, logo com intervalo de 6 horas entre cada simulação.

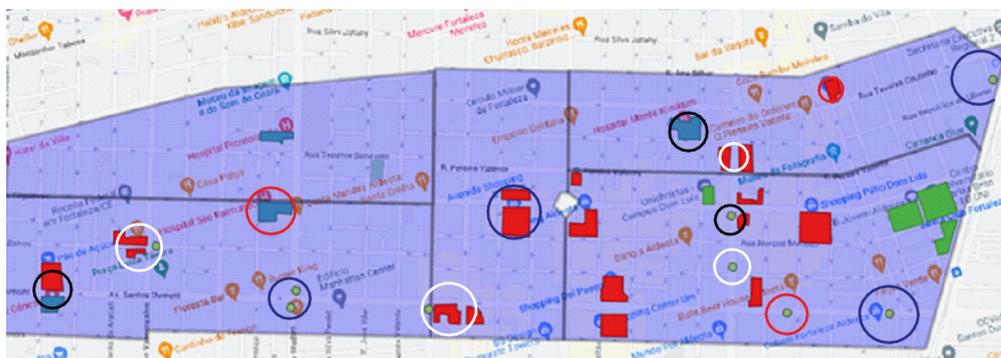
O intuito de realizar essas simulações é analisar o comportamento do Diagrama de Voronoi ampliando ou reduzindo de acordo com o acesso aos estabelecimentos considerados na área de estudo, como podem ser observados nas figuras 52 a 55.

Figura 52 – Diagrama de Voronoi na área de estudo às 0h



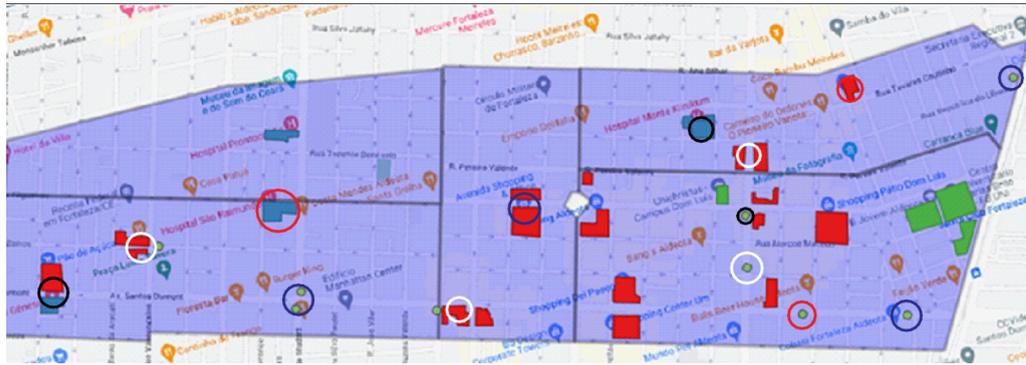
Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Figura 53 – Diagrama de Voronoi na área de estudo às 6h



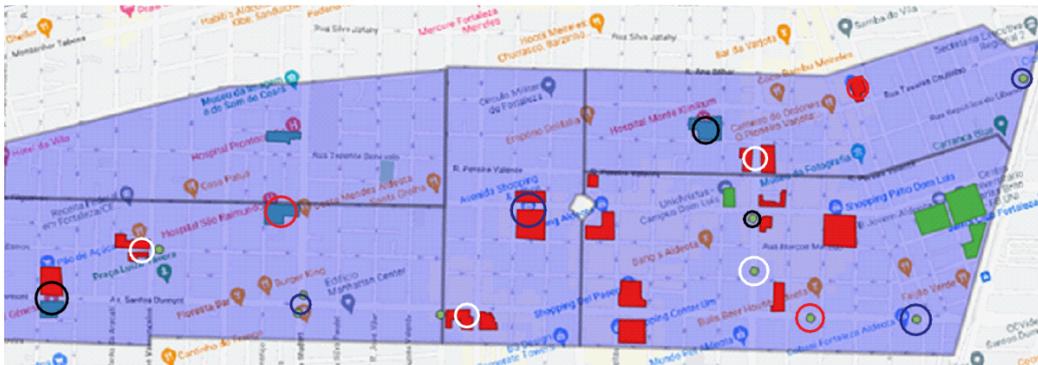
Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Figura 54 – Diagrama de Voronoi na área de estudo às 12h



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Figura 55 – Diagrama de Voronoi na área de estudo às 18h



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Os resultados apresentados no Diagrama de Voronoi podem ser interpretados de acordo com cada horário, estas interpretações estão conectadas diretamente ao sistema elétrico, e comportamento das cargas e usuários, ao tráfego urbano, e aos polos geradores de viagem, e por último as recargas dos VEs, como será feito a seguir:

No horário de 0h, observou-se que o Diagrama de Voronoi esteve receptivo, pois nesse horário as velocidades médias são maiores, e maioria dos estabelecimentos se encontram fechados, já no que se refere ao sistema elétrico, há um consumo bem reduzido devido a característica comercial da curva na Figura 46.

No horário de 6h, observou-se que o Diagrama de Voronoi teve uma redução quanto a sua área de abrangência referente aos locais, pois nesse horário as velocidades médias começam a diminuir, já que começam os fluxos migratórios pendulares, enquanto os estabelecimentos começam a abrir, já no que se refere ao sistema elétrico, há um aumento no consumo, porém ainda pequeno.

No horário de 12h, observou-se que o Diagrama de Voronoi manteve a redução quanto a sua área de abrangência, nesse horário as velocidades médias estão muito baixas, os fluxos migratórios pendulares estão ocorrendo no sentido reverso, e por ser uma área de estudo comercial os estabelecimentos ainda continuam aberto, e agora recebendo usuários que já não estão mais em horário de trabalho, por exemplo, , já no que se refere ao sistema elétrico, o pico de maior consumo está menor, pois os escritórios estão finalizando seu expediente, assim como nos centros estudantis, entretanto o acesso aos eletropostos, ou centros de recarga continuam de difícil acesso.

Lembrando que nessas simulações não possui qualquer processo mitigatório, como foi apresentado no subcapítulo 5.4, pois os resultados encontrados neste subcapítulo já são referentes a um sistema capaz de unir as camadas elétricas e de trânsito e através da junção dos dados destas duas diferentes infraestruturas analisar o impacto do VE, e das recargas caso não haja um plano diretor voltado a entender as consequências geradas nestes cenários, e por fim sem o devido planejamento levando a piora nos níveis de qualidade da rede elétrica e do trânsito.

6 CONCLUSÃO

Os veículos elétricos se tornaram uma realidade na Europa e na Ásia antes do tempo, previsões apontavam para uma consolidação somente ao final da década de 2030, ou início de 2040, entretanto a busca por sustentabilidade e redução de emissão de gases do efeito estufa pelos países, bem como a promoção de maior economia para o usuário, fizeram com que uma grande demanda desses veículos tomasse conta das ruas e dos postos de recarga.

Entretanto, o crescimento não esperado gerou problemas e trouxe à tona maior preocupação no tocante à superlotação em locais que vieram a se tornar PGVs

A inserção desses veículos nas infraestruturas foi apresentada neste trabalho utilizando-se simulações para que fosse possível analisar as operações de recarga em diferentes horários, locais e com diferentes níveis de carregamento. Foram idealizados vários cenários de comportamento dos usuários dos VEs, com modelos matemáticos que pudessem auxiliar na construção desses cenários; um deles foi Monte Carlo, que possibilitou a determinação da distribuição dos valores para cada variável, permitindo assim uma aleatoriedade.

Esses cenários foram construídos levando em conta as migrações pendulares dos usuários; ou seja, o fluxo de pessoas e de VEs indo em direção às zonas por dois motivos: ou por trabalharem no local, ou por residirem lá. As outras movimentações são aquelas periódicas, como ida à faculdade, ao hospital ou a supermercados e shoppings, onde se analisam a origem e o destino desses movimentos.

Os resultados das simulações mostraram que, durante a noite e madrugada os parâmetros de nível de qualidade de atendimento não sofreram grandes alterações por conta das zonas escolhidas serem mais comerciais, de modo que houve até benefícios, como a diminuição das perdas. Entretanto, durante o dia e a tarde, chegou-se a níveis de qualidade precários com sobrecarga no sistema, causando aumento de perdas ativas.

Depois foram feitas as simulações onde uma geração distribuída, nesse caso, uma planta fotovoltaica, localizada em uma microrrede, poderia fornecer energia da sua zona para outra microrrede que apresentasse níveis mais precários, desse modo viu-se uma melhoria, além da interligação entre zonas.

E por último foram feitas as simulações utilizando o Diagrama de Voronoi, nestas simulações as duas camadas, elétrica e urbana se interligaram com o objetivo de se analisar quais os impactos que as recargas dos VEs em diferentes locais, e em diferentes horários poderiam apresentar na infraestrutura. Como resultado obteve-se que a curva de carga, e os

horários de pico tanto da rede elétrica, como do fluxo de trânsito afetam bastante a inserção das recargas e a comodidade do usuário em realizá-las.

Para contornar essa situação e definir como a rede pode apresentar melhorias, o uso de novas tecnologias pode ser essencial; uma delas é a utilização do 5G, que permite comunicações rápidas entre equipamentos de comunicação, em que a própria rede pode identificar pontos críticos em seu sistema. Outra possibilidade é a criação de padrões de comunicação, em que o usuário de um VE possa enviar suas necessidades de recarga para o sistema tanto elétrico quanto urbano, levando a conferir pontos como demanda da rede, carregadores disponíveis e o fluxo de trânsito, com o intuito de encontrar o melhor local para o usuário efetuar a recarga ou até mesmo rejeitá-lo.

Lógico que para a obtenção desses tipos de solução é essencial que a infraestrutura avance, pois os VEs já são uma realidade, assim como seus problemas caso não haja planejamento. Portanto, que o presente trabalho de pesquisa não seja o derradeiro sobre o tema, possa ser útil a fim de que os estudos, as fontes de pesquisa e a evolução continuem para que o progresso possa atender satisfatoriamente e em favor de todos.

6.1 Trabalhos Futuros

- Realizar o estudo do Diagrama de Voronoi para toda a cidade de Fortaleza.
- Estudar a integração automatizada das microrredes entre si.
- Implementar de modo mais amplo as gerações distribuídas como soluções mitigatórias, agora incluindo os sistemas de armazenamento, inserindo também os presentes nos VEs.
- Breve análise de como a tecnologia 5G pode ser utilizada para auxiliar na estruturação dos tópicos anteriores. Anexo 1 apresenta o início deste estudo.

REFERÊNCIAS

ABNETT, Kate. UE aprova proibição contra veículos novos movidos a combustíveis fósseis a partir de 2035. **CNN Brasil**, 14 fev. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/ue-aprova-proibicao-contra-veiculos-novos-movidos-a-combustiveis-fosseis-a-partir-de-2035/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: módulo 8 – qualidade do fornecimento de energia elétrica**. Brasília: ANEEL, 2017. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em: 2 jul. 2020.

ANDRADE, E. L. de. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

ANDRADE, J.; TORQUATO, R.; FREITAS, W. A Granular Monte Carlo Based Methodology to Estimate PV Generation Impacts on the Utility Long-Term Energy Planning. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)**, New York, p. 1-6, 2015.

ARANHA, V. Mobilidade Pendular na Metrópole Paulista. **São Paulo Perspectiva**, São Paulo, v. 19, n. 4, p. 96-109, dez. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. Redes de energia elétrica. **ABRADEE**, Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 12 jan. 2023.

BELATO, D. *et al.* Chaotic Vibrations of a nonideal eletro-mechanical system. **International Journal of Solids and Structures**, Amsterdam, v. 38, p. 1699-1706, 2021.

BERISHA, S. H. *et al.* Current harmonics generated by electric vehicle battery chargers. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, DRIVES & ENERGY SYSTEMS FOR INDUSTRIAL GROWTH, PEDES'96*, 1., 1996, New Delhi, India. **Proceedings**. New Delhi, India: IEEE, 1996, p. 584-589. DOI: 10.1109/PEDES.1996.539678.

BITENCOURT, Leonardo de Arruda. **Otimização da carga e descarga de veículos elétricos considerando diferentes modelos tarifários**. 2018. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica Engenharia Elétrica e Telecomunicações) – Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.

BOOTS, B. *et al.* Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams. **Wiley Series in Probability and Statistics**, New Jersey, 2009. ISBN 9780470317853.

BURBAN, P. A. C. **Apreçamento de opções exóticas: uma abordagem pela simulação de Monte-Carlo**. 2008. Tese (Doutorado em Finanças) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

CAMPBELL, Peter; MILLER, Joe. A revolução dos carros elétricos finalmente chegou. **Valor Econômico**, Rio de Janeiro, 5 out. 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/mundo/noticia/2021/10/05/revolucao-do-carro-eletrico-ja-e-realidade.ghtml>. Acesso em: 16 jan. 2023.

CAVALCANTE, A. P. de H. **Contribuição da morfologia urbana na análise de congestionamentos**: estudo de caso da cidade de Fortaleza, Ceará. 2009. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2009, em andamento.

COSTA FILHO, A. M. P. **Análise dos impactos de postos de recarga para veículos elétricos, em uma área de Fortaleza, utilizando a técnica do diagrama de Voronoi ponderado multiplicativo**. 2022. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2022.

DEB, Sanchari *et al.* Impact of electric vehicle charging station load on distribution network. **Energies**, Basel, v. 11, n. 1, p. 178, 15 Jan. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en11010178>.

DENATRAN (Brasil). **Manual de procedimentos para o tratamento de pólos geradores de tráfego**. Brasília: DENATRAN/FGV, 2001.

ERBAS, Mehmet *et al.* Optimal siting of electric vehicle charging stations: a GIS-based fuzzy multi-criteria decision analysis. **Elsevier**, Ankara, p. 1017-1031, Aug. 2018.

FILETI, E. E. **Implementação e aplicações do método Monte Carlo reverso para líquidos homogêneos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Departamento de Física dos Materiais e Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

FORTALEZA. **Lei complementar nº 236, de 11 de agosto de 2017**. Dispõe sobre o parcelamento, o uso e a ocupação do solo no Município de Fortaleza, e adota outras providências. Fortaleza, 11 ago. 2017. Disponível em: https://portal.seuma.fortaleza.ce.gov.br/fortalezaonline/portal/legislacao/Consulta_Adequabilidade/1-Lei_Complementar_N236%20de_11_de%20agosto_de_2017_Lei_de_Parcelamento_Uso_Ocupacao_do_Solo-LUOS.pdf. Acesso em: 29 jan. 2023.

GALVÃO, L. C. **Dimensionamento de sistemas de distribuição através do diagrama multiplicativo de Voronoi com pesos**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

HAFEZ, Omar; BHATTACHARYA, Kankar. Integrating EV charging stations as smart loads for demand response provisions in distribution systems. **IEEE Transactions On Smart Grid**, Canadá, p. 1096-1106, Mar. 2018.

HALTON, J. A retrospective and prospective survey of the Monte Carlo method. **SIAM Review**, Philadelphia, v. 12, n. 1, p. 1-63, Jan. 1970.

HANAUER, D. Mode 2 charging testing and certification for international market access. **World Electric Vehicle Journal**, Basel, v. 9, n. 26, 2018.

HANNAN, M. A. *et al.* State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: issues and recommendations. **IEEE Access**, New York, v. 6, p. 1-1, 2018.

HERMINIO, Beatriz. Caminhos para a construção de uma economia de baixo carbono no Brasil. **IEA-USP**, São Paulo, 29 abr. 2022. Disponível em: <http://www.iea.usp.br/noticias/caminhos-para-a-construcao-de-uma-economia-de-baixo-carbono-no-brasil>. Acesso em: 29 fev. 2023.

HILLIER, Bill *et al.* Creating life: or, does architecture determine anything. **Architectural & Comportamental/Architectural Behavior**, Great Britain, UK, v. 3, n. 3, p. 233-250, 1987.

HUSAIN, Iqbal. **Electric and hybrid vehicles: design fundamentals**. New York: CRC Press LLC, 2003.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61851-1:2017-02** – Electric vehicle conductive charging system – part 1: general requirements. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2017.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62196-1:2014-6** – Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets – conductive charging of electric vehicles – part 1: general requirements. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62196-2:2016-02** – Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets – conductive charging of electric vehicles – part 2: dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2016.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62752:2016-03** – In-cable control and protection device for mode 2 charging of electric road vehicles (IC-CPD). Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2016.

JALES, W. **Uso da sintaxe espacial e rede neural para simulação de tráfego**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

JATO DYNAMICS. EVs: a pricing challenge 2021. **Jato**, 2021. Disponível em: <https://www.jato.com/evs-a-pricing-challenge-2021-report/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni de; ROBBA, Ernesto João. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2017.

KASHIMA, M. **Projeto de um inversor bidirecional aplicado em carregadores de veículos elétricos para configuração g2v e v2g**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

KEMPTON, W; TOMIC, J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 144, n. 1, p. 280-294, Jun. 2005.

KITTEL, C. **Introduction to solid state physics**. 8 ed. New Jersey: Wiley, 2004.

LUO, Lizi *et al.* Optimal planning of electric vehicle charging stations comprising multitypes of charging facilities. **Elsevier**, Nanjing, p. 1087-1099, Jun. 2018.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARQUES, J. M. B. **Battery management system (BMS) for lithium-ion batteries**. 2014. 98 f. Dissertação (Mestrado em Energia para a Sustentabilidade) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2014.

MCFADYEN, S. Estimating electrical power demand in buildings. **CreateSpace Independent Publishing Platform**, 2016. ISBN 9781530062270. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DpOnjwEACAAJ>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

MCKERRACHER, Colin *et al.* Electric Vehicle outlook. **BloombergNEF**, New York, 2022.

MEDEIROS, C. **Curtos-circuitos trifásicos no sistema elétrico**. Goiânia: PUC Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, 2017. Disponível em: [https://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/18795/material/05\)SistEltricosCap05-CurtoTrif.pdf](https://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/18795/material/05)SistEltricosCap05-CurtoTrif.pdf). Acesso em: 8 jan. 2023.

MELO, Danilo Heitor Caires Tinoco Bisneto *et al.* Decifrando o georreferenciamento. **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 18, n.3, p. 85-102, set./dez. 2014.

MORAES, Jorge. Carro elétrico será centro de uma nova economia, diz presidente da ABVE. **Uol**, 2022. Disponível em: <https://www.uol.com.br/carros/colunas/jorge-moraes/2022/05/14/carro-eletrico-sera-centro-de-uma-nova-economia-diz-presidente-da-abve.amp.htm>. Acesso em: 20 jun. 2022.

MOURA, A. C. M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. Belo Horizonte: Ed. da autora, 2003. 294p.

NASSER, Rafael Barbosa. **McCloud service framework**: arcabouço para desenvolvimento de serviços baseados na simulação de Monte Carlo na Cloud. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Programa de Pós-Graduação em Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

NGUYEN, V. L.; TRAN-QUOC, T.; BACHA, S. Harmonic distortion mitigation for electric vehicle fast charging systems. **IEEE Grenoble Conference**, Grenoble, France, p. 1-6, 2013. DOI: 10.1109/PTC.2013.6652435.

ORTIZ, Pablo Silva. Descarbonização do setor de energia no Brasil. **E+ Transição Energética**, 7 jul. 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/descarbonizacao-do-setor-de-energia-no-brasil/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

PAIXÃO, Joelson Lopes da *et al.* Métodos matemáticos de modelagem e otimização: teoria e aplicações do método de Monte Carlo. *In: SALÃO DO CONHECIMENTO UNIJUÍ 2021*, 26., 2021, Santa Maria. **Jornada de Pesquisa**. Santa Maria: UFSM, 2021, p. 1-15.

PAULA, Renato Ricardo de. **Método de Monte Carlo e aplicações**. 2014. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Matemática Computacional) – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2014.

PEDRO, Cândido Guilherme de Almeida. **Impacto da integração de veículos elétricos em redes de baixa tensão**. 2021. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Energias Renováveis e Sistemas de Potência, Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, 2021.

PEDUZZI, Pedro. Carros elétricos são prioridade para transição energética. **Agência Brasil**, Brasília, 14 jun. 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-06/carros-eletricos-sao-prioridade-para-transicao-energetica>. Acesso em: 19 abr. 2022.

PREPARATA, F. P.; SHAMOS, M. I. Computational geometry. **Springer Science & Business Media**, Berlin, German, Dec. 2012, p. 1-400. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1098-6>.

QUEIROZ, Patrícia Valéria Sathler de. **Mensuração do consumo de energia elétrica: algoritmo para detecção de potenciais usuários da termoacumulação como alternativa para deslocamento de carga**. 2012. 98 f. Tese (Doutorado em Metrologia) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

RAHMAN, Syed; KHAN, Irfan Ahmad; AMINI, M. Hadi. A review on impact analysis of electric vehicle charging on power distribution systems. *In: 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART POWER & INTERNET ENERGY SYSTEMS*, 2., 2020, Bangkok. **Proceedings**. New York: IEEE, 2020. p. 420-425.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Relatório sobre a Lacuna de Emissões**. Nairóbia: United Nations Environment Programme, 2021. ISBN: 978-92-807-3890-2. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/resources/emissions-gap-report-2021>. Acesso em: 20 nov. 2022.

RODRIGUES FILHO, José Rufino. **A matemática por trás do algoritmo Pagerank do Google**. 2022. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Licenciatura em Matemática) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Cajazeiras, Cajazeiras, 2022.

RODRIGUES, M. do C. B. P. *et al.* Conexão de veículos elétricos à rede de energia elétrica para recarga de baterias: uma visão geral. **Eletrôn. Potên.**, Campo Grande, v. 19, n. 2, p. 193-207, mar./mai. 2014.

RODRIGUES, W. B. **Análise da utilização do 5G em aplicações de redes elétricas inteligentes**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí, Santa Rita do Sapucaí, 2022.

SACRISTAN, V. **Algorithms for constructing Voronoi diagrams**. Barcelona: Computational Geometry, Facultat d'Informàtica de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 2003. Disponível em: <https://www.ic.unicamp.br/~rezende/ensino/mo619/Sacristan,%20Voronoi%20Diagrams.pdf>. Acesso em: 2 set. 2022.

SADIKU, M. N. O. **Monte Carlo methods for electromagnetics**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

SALVATTI, Gabriel Antonio. **Integração de veículos elétricos em redes inteligentes para otimização e suporte à geração distribuída**. 2020. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

SAMEER, M. **Enabling the future of transportation with 5G: a holistic analysis**. Presentation. Dhahran: King Fahd University of Petroleum and Minerals, Department of Civil and Environmental Engineering, 2023.

SANTOS, Ana Maria dos. Determinação de áreas de abrangência de pontos pelo diagrama de Voronoi com obstáculos. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, v. 17, n. 4, p. 645-647, out./dez. 2011.

SANTOS, Paula Roberta Scaburi dos. **Diagrama de Voronoi: uma exploração nas distâncias Euclidiana e do Táxi**. 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional) – Programa de Pós-Graduação em Matemática em Rede Nacional, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SOARES, F. J. *et al.* A Monte Carlo method to evaluate electric vehicles impacts in distribution networks. **IEEE**, Porto, p. 365-372, out. 2010.

SÓBOL, I. M.; VEGA, C. **Método de Montecarlo**. Moscou: Mir, 1983.

SOUZA, L. S. O. **Análise dos impactos decorrentes da integração de veículos elétricos em uma rede de distribuição PPGENE.TD-741/20**. Brasília: Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2020.

STAATS, P. T. *et al.* A statistical analysis of the effect of electric vehicle battery charging on distribution system harmonic voltages. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 13, n. 2, p. 640-646, Apr. 1998, DOI: 10.1109/61.660951.

SU, W. **Smart grid operations integrated with plug-in electric vehicles and renewable energy resources**. 2013. Tese (Doutorado em Filosofia) – Electrical Engineering, Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2013.

SYLVESTRE, Rebecca. EV chargers almost as profitable as fuel pumps, says BP. **AUTOCAR**, 18. Jan. 2022. Disponível em:

<https://www.autocar.co.uk/car-news/business-environment-and-energy/ev-chargers-almost-profitable-fuel-pumps-says-bp>. Acesso em: 27 set. 2022.

UNITED NATIONS. **Five ways to jump-start the renewable energy transition now**. [s. n.], [2021]. Disponível em:

https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy-transition?gclid=Cj0KCQjw9fqkBhDSARIsAHlcQYQGt2Sgr63FTxFj128L740SXLU1aT54RciMu0-Hx2wtYt5xXTI2oGAaAmpBEALw_wcB. Acesso em: 15 jan. 2023.

VERGARA, Raúl Alejandro Levano. **Modelagem de componentes de sistemas de distribuição de energia elétrica para cálculo de fluxo de Po**. 2022. 305 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2022.

VON NEUMANN, J.; RICHTMYER, R. D. Statistical methods in neutron diffusion. **LAMS-551**, 9 Apr. 1947.

XIANG, Yue *et al.* Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates. **Elsevier**, Chengdu, p. 647-659, Jun. 2016.

YANG, W. *et al.* Simulation of electric vehicle charging station and harmonic treatment. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS AND INFORMATICS (ICSAI2012), 2012, Yantai, China. **Proceedings**. Yantai, China: IEEE, 2012, p. 609-613. DOI: 10.1109/ICSAI.2012.6223071.

YANXIA, L. JIUCHUN, J. Harmonic-study of electric vehicle chargers. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, 3., Nanjing, China, 2005. **Proceedings**. Nanjing, China: IEEE, 2005, p. 2404-2407. DOI: 10.1109/ICEMS.2005.203002.

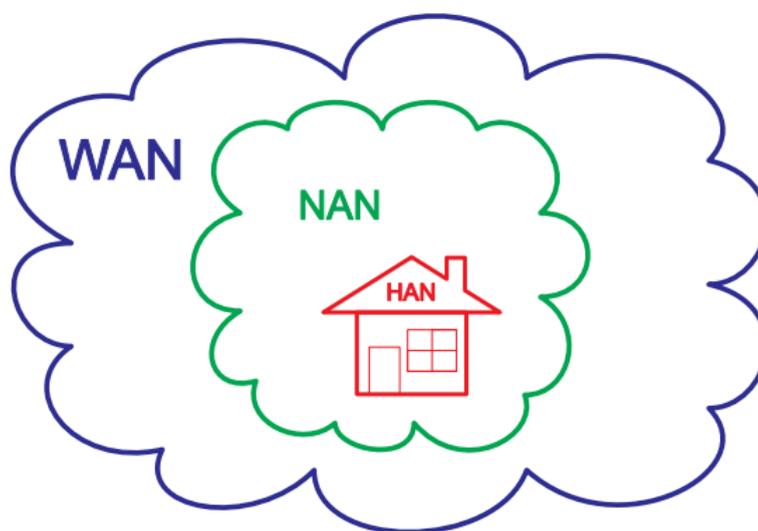
ZAPATA, C. J. **Análisis probabilístico y simulación**. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo de Investigación en Planeamiento de Sistemas Eléctricos, 2010.

ANEXO A – PROPOSTAS PARA O USO DA TECNOLOGIA 5G

A partir dos resultados, e do conteúdo abordado nesta dissertação, é essencial que exista uma rede de comunicação, que possa realizar a integração das tecnologias que compõem as redes elétricas inteligentes, Smart Grid, Veículos Elétricos, estações de recarga, entre outras, de modo rápido, seguro, e com o mínimo de interferência humana, para isso é necessário o uso de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) garantindo a operação e a eficácia da rede em todos os níveis de alcance.

Sendo assim, pode-se dividir a telecomunicação das redes elétricas inteligentes em camadas, tais como a Home Area Network (HAN), que representa as comunicações do lado do consumidor, a Neighbourhood Area Network (NAN), que representa a parte da comunicação que coleta os dados dos medidores inteligentes através de pontos de acumulação de dados e a Wide Area Network (WAN), que interconecta toda a estrutura com os centros de controle. (Rodrigues,2022)

Figura 56 – Arquitetura de Telecomunicação das redes inteligentes



Fonte: Rodrigues (2022).

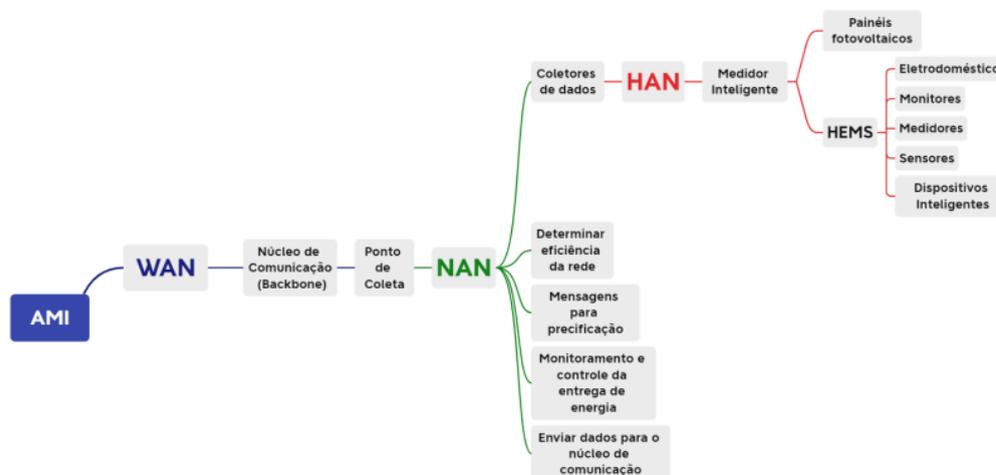
No caso da HAN pode ser utilizado um SmartMeter, equipamento que afere por meio de medições as características do consumo de uma residência, comércio, ou indústria, sendo assim essencial para compreender o comportamento das cargas nestes locais, e quais são elas, e como elas interagem com o sistema. Criando assim um memorial necessário para a ampliação da rede, ou aprimoramento, por exemplo, de acordo com a especificidade do local.

Já para a NAN, assim como foi feita nessa dissertação, a divisão em zonas se faz essencial, de modo a se executar um monitoramento dedicado para todo o conjunto de HAN's que há em uma mesma área no mesmo subsistema elétrico, de modo a se integrar os alimentadores, e como está o comportamento da curva de carga da região. Em um futuro não tão distante essas NAN's poderão até se isolar da rede da concessionária, evento conhecido como ilha off grid, caso essa área possua uma infraestrutura local de geração distribuída, não somente de solar, mas também dos sistemas de armazenamento.

E por último a WAN, que interconectará essas NAN's, obviamente aqui já se aproxima mais do que é realizado nas concessionárias, com o monitoramento geral de todas as SED's do sistema elétrico de um município, porém na WAN, o intuito é realizar a interligação entre as NAN's, de modo que a WAN identifique, por exemplo, qual NAN está mais sobrecarregada, e qual NAN está em excesso de geração, em certo horário, permitindo assim a distribuição de energia local.

Para que esse sistema exista e possa ser operado é necessário à criação de uma Infraestrutura de Medição Avançada (Advanced Metering Infrastructure - AMI) que é a integração de dispositivos capazes de medir e enviar dados, sendo eles o Smartmeter, ou medidores inteligentes, sistemas de controle, as interfaces de softwares padronizados, dotadas de protocolos de segurança, e os núcleos de gerenciamento de informações, permitindo a coleta de dados e estatísticas, e o envio de informações do usuário para a concessionária de energia, e vice versa

Figura 57 – Arquitetura da Infraestrutura de Medição Avançada



Fonte: Rodrigues (2022).

Mas como será feita essa integração, qual tecnologia poderá suportar tantos dados, em velocidade ultrarrápida, de modo que os dispositivos se comuniquem entre si, sem a necessidade de um operador humano?

Atualmente a resposta é o 5G, para Sameer (2023), o 5G não é somente a atualização de seu antecessor 4G, porém uma mudança de paradigma na comunicação sem fio que oferece ultra velocidade, ultra-baixa latência, além de capacidades de comunicação massivas do tipo máquina – máquina, sem interferência humana.

O 5G se baseia em um padrão de comunicação móvel fundamentado primeiramente, em ganhos de desempenho quando referente ao 4G, e isso se traduz em uma velocidade de taxa de dados 100 vezes maior, duração de bateria 10 vezes maior, e latência 5 vezes menor, também conhecido como PING, que é a oscilação na internet.

Como resultado, a tecnologia 5G tem potencial para permitir uma nova era de transporte, e sistemas inteligentes interconectados, levando a benefícios como o gerenciamento de tráfego aprimorado e a comunicação veículo a veículo em tempo real (V2V), além da comunicação de veículo para infraestrutura (V2I), buscando melhorar as experiências do usuário, e a operação e controle da concessionária de energia.

5G e a Concessionária de Energia

Para a concessionária de energia o 5G seria a solução para a implantação eficaz da Smart Grid, capaz de operar e manter a rede elétrica com a comunicação rápida entre os seus dispositivos, e as cargas dos clientes, que também seriam dotados de medidores inteligentes.

Uma dessas soluções é a leitura de barras em tempo real, apresentando ao operador quais barras estão apresentando falta de fase, por exemplo, ou até mesmo os padrões de qualidade do módulo 8 do PRODIST em tempo real.

Entretanto a grande utilização dessa tecnologia seriam os dados e estatísticas gerados pela infraestrutura da rede, sendo capaz de comunicar consigo mesmo e apresentar soluções aos operadores, sem precisar de estudos, ou pesquisas, somente através do próprio reconhecimento, como pode ser vista na Figura 58, que apresenta 5 barras onde estão os piores níveis de qualidade de tensão por meio da leitura de todas as barras da região, e parâmetros de comparação.

Figura 58 – Identificação das 5 piores barras do sistema em Tensão



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

5G e os Veículos Elétricos

Para os VEs a possibilidade é que essa tecnologia possa ser um auxiliador em encontrar soluções referentes ao aumento de carga, e problemas na qualidade de energia que a rede enfrenta com a inserção de múltiplas recargas, para isso já surgem alternativas como a cobrança de tarifas dinâmicas, que incentivem ou não a recarga durante certos horários, principalmente os de pico.

Outro ponto que já vem sendo estudado por fabricantes e autoridades governamentais é a conexão vehicle to grid (V2G), veículo para a rede, que significa a injeção de energia da rede por meio dos sistemas de armazenamento dos VEs, com isso a rede em

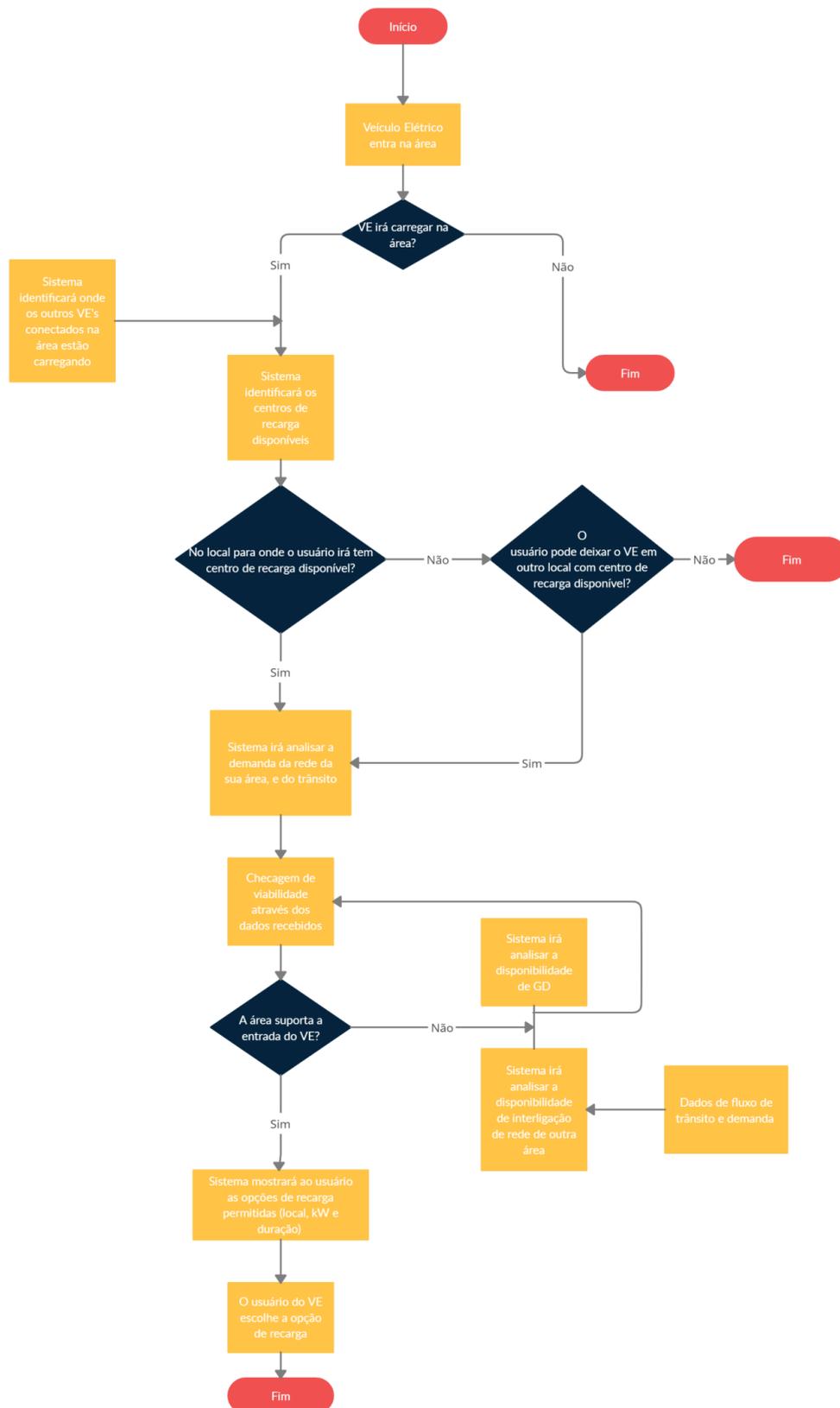
horários de pico receberia energia dos VEs, auxiliando na grande demanda, e no horário de menor intensidade de carga, eles se recarreguem.

Mas a finalidade principal do 5G nos veículos elétricos seria a intercomunicação entre os VEs, o VE e a rede, o VE e as estações de recarga, e a rede de energia com as estações de recarga, criando assim um cenário, onde informações em tempo real seriam distribuídas entre si para identificação do estado de carga do VE, a disponibilidade da estação de recarga, e se a rede de energia suporta a demanda que se encaminhará em direção de um alimentador, por exemplo.

Essas exigências do usuário que moldarão como as outras variáveis desse cenário irão responder, se a autonomia do VE é suficiente para mais uma rota, caso a estação de recarga não esteja disponível, pois a rede não conseguirá atender sua demanda, ou seja, planejamento de rotas, estados de carga, posicionamento, e curvas de cargas serão de grande importância para a criação de um fluxo que não cause nem insatisfação no usuário, nem prejuízos para a rede.

Desse modo, foi criado um fluxograma de como este cenário iria se comportar dependendo das respostas de todas as incógnitas, que pode ser observado na Figura 59.

Figura 59 – Fluxograma da Entrada VEs em uma área com comunicação 5G



Fonte: Dados de pesquisa. (2023).

Para o VE, as montadoras já estão fabricando veículos com conexão à internet inclusa e funcionalidades de conectividade. O V2G é outro caso que demandaria conexão para um funcionamento mais eficiente. A utilização do veículo como fonte geradora precisa ser medida e monitorada pela concessionária de energia. A tecnologia 5G deve ser considerado em novas implementações de VEs, para que estes se integrem com as cidades inteligentes.

Logo, a tecnologia 5G é aplicável como um catalisador para viabilizar estes tipos de informações em tempo real, desde a integração dos pontos de origem-destino dos usuários mais afastados dos centros urbanos, até o controle dos veículos elétricos, e carregadores, em relação à rede, devido às suas características funcionais, levando assim ao último ponto da interação máquina-máquina, que é o machine learning, ou seja, as máquinas conversando entre si para apontar as necessidades de planejamentos de ampliação, ou reestruturação da rede, de modo a designar onde seriam, e como seriam para tornar o ambiente sustentável para todos, sem a necessidade de um operador.

5G e a Geração Distribuída

No caso da geração distribuída, a tecnologia já possui um alto grau de conectividade, é possível monitorar de longas distâncias, os dados como a geração de energia em certo horário do dia, a curva de geração, podendo ser observados diminuição da potência, seja ocasionado por chuva, ou sombreamento, dados meteorológicos, e até mesmo a falta de fase na rede, pois os inversores, por exemplo, das usinas solares, leem tanto os módulos fotovoltaicos, como oscilações na rede. Tais dados não são exclusivos da energia solar, a energia eólica já apresenta também alta conectividade, permitindo soluções off grid.

Outro benefício do monitoramento da GD é a previsão de geração. Isto é um fato importante porque valores indeterminados de geração podem prejudicar a qualidade de energia elétrica, tais como alterações de tensão e falha no controle de energia reativa.

Esses dados e estatísticos permitem criar um banco de dados com médias históricas, de modo que o sistema já alimentado com esses valores necessite de pouca interação humana para projetar novas plantas, levando em conta o melhor posicionamento dos módulos, ou pra qual direção o vento se desloca durante o ano em determinada região, a detecção destes problemas permite que a geração seja cada vez menos prejudicada por fatores externos permitindo se criar uma análise de viabilidade socioeconômica mais assertiva.

Essas informações das GDs devem ser acessadas tanto pelos proprietários quanto pelas concessionárias, em caso de sistemas conectados à rede de distribuição (on-grid). Para que esta premissa se cumpra, é importante no caso da fotovoltaica que os inversores e os medidores estejam conectados. De acordo com o PRODIST, através do seu módulo 3, as

concessionárias precisam utilizar medidos com leitura bidirecional, devido à necessidade de conhecimento de qual energia foi injetada na rede. Sendo assim, a medição remota, que é estabelecida pelo módulo 5 do PRODIST, pode utilizar a rede 5G.

Desse modo, a geração distribuída surge como um mitigador para proporcionar maior robustez à rede elétrica da concessionária, de modo a auxiliar também os VEs, pois permite uma recarga com custos menores, dependendo se o horário da recarga coincide com o da geração. Logo, a comunicação em tempo real e rápida, permitindo, por exemplo, que zonas com maior demanda de carga, possam emitir um sinal para que essa seja auxiliada com outra zona que tenha excedente de energia, levando a um equilíbrio da rede elétrica, e mais comodidade para os usuários.

Zona 3																
ID	Via	ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Rua Ana Bilhar	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0,13	0
2	Rua Canuto de Aguiar	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,13	0,13	0,2
3	Rua República do Libano	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,14	0,13	0,13	0
4	Rua Pereira Valente	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,13	0,13	0,2
5	Avenida Dom Luís	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,14	0,13	0,13	0
6	Rua Marcos Macêdo	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,13	0,13	0,2
7	Rua Maria Tomásia	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,14	0,13	0,13	0
8	Avenida Santos Dumond	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,13	0,13	0,2
9	Rua Desembargador Leite Albuquerque	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13	0	0,2
10	Avenida Desembargador Moreira	10	0	0,33	0	0,25	0,2	0,25	0	0,25	0	0	0	0	0	0
11	Rua Visconde de Mauá	11	0	0	0,25	0,25	0,2	0,25	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0	0
12	Rua Osvaldo Cruz	12	1	0,33	0,25	0,25	0,2	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0	0	0
13	Rua Joaquim Nabuco	13	0	0,33	0,25	0,25	0,2	0,25	0,25	0,25	0,50	0	0	0	0	0
14	Rua Tibúrcio Cavalcante	14	0	0	0,25	0	0,2	0	0,25	0	0	0,2	0	0	0	0

**APÊNDICE A – LEI DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO, COMPLEMENTOS DOS
CAPÍTULOS DOS TÍTULOS V E VII**

**LEI DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO, COMPLEMENTOS DOS CAPÍTULOS DOS
TÍTULOS V E VII**

O Título I – Do Ordenamento Territorial – Dispõe das diretrizes e da estratégia para o plano diretor, com ênfase na preservação, principalmente em evitar distorções no crescimento urbano, do meio ambiente, desse modo avalia a espacialização das atividades, e estudos setoriais de planejamento, levando em conta os aspectos sociais e econômicos.

O Título II - Do Zoneamento Urbano - dispõe sobre a divisão da cidade em duas zonas territoriais, definidas como Macrozonas, sendo uma delas responsável pela proteção ambiental, e a outra pela ocupação urbana. A primeira, Macrozona de Proteção Ambiental é constituída por ecossistemas de interesse ambiental, bem como por áreas destinadas à proteção, preservação, recuperação ambiental e ao desenvolvimento de usos e atividades sustentáveis. A segunda, Macrozona de Ocupação Urbana corresponde às porções do território caracterizadas pela significativa presença do ambiente construído, a partir da diversidade das formas de uso e ocupação do solo.

O Título III - Do Parcelamento do Solo - é resultado da necessidade de inserir neste Projeto de Lei as normas referentes ao parcelamento do solo urbano, ora dispostas nos Capítulos I a IV, baseadas nas diretrizes gerais fixadas pela Lei Federal n. 6.766, de 19 de dezembro de 1979 e nas diretrizes específicas firmadas pela Lei Municipal n. 5122-A/1979, e suas respectivas alterações e complementações. O presente Projeto apresenta, portanto, nova proposta de parcelamento do solo em conformidade com o zoneamento estabelecido pelo PDPFOR, se adequando às condições naturais e infraestrutura ofertada; daí a pertinência de que esta regulamentação ocorra de forma conjunta com as normas de uso e ocupação do solo do Município.

O Título IV - Do Uso e da Ocupação do Solo, em seu Capítulo I - Das Disposições Preliminares - dispõe que os usos e as atividades no Município são classificados em grupos e subgrupos, e são subdivididos em classes, de acordo com o porte, natureza e/ ou nível de incomodidade que geram ou produzem. Firma, ainda, que a adequação das atividades em todo o Município de Fortaleza se dará em função do zoneamento nas Zonas Especiais de Dinamização Urbanística e Socioeconômica (ZEDUS), Zona da Orla (ZO) - Trechos I, II, III,

IV, VI e VII -, Zona de Recuperação Ambiental (ZRA) e Zona de Interesse Ambiental (ZIA), e em função da classificação viária, para as demais Zonas, observando-se dois Anexos específicos deste Projeto de Lei.

O Título V - do Sistema Viário e do Estacionamento - estabelece em seu Capítulo I que o Sistema Viário Básico do Município é composto pelos Sistemas Viário Estrutural e Complementar. O primeiro é composto por vias expressas e vias arteriais I e II e o segundo por vias coletoras, comerciais, paisagísticas e locais. Estes sistemas constam dos Mapas integrantes desta minuta de Projeto de Lei.

O Título VI - Do Exercício de Poder de Polícia - refere-se às normas inerentes ao exercício do poder de fiscalização e controle da Administração Pública, dispondo sobre a aplicação das sanções a que os infratores (pessoas, físicas ou jurídicas, que, por ação ou omissão, violem as normas relativas ao parcelamento, uso e ocupação do solo) estão sujeitos.

Por fim, o Título VII - Das Disposições Finais e Transitórias - trata das últimas disposições pertinentes ao uso e a ocupação do solo, destacando as limitações estabelecidas por normas específicas, tais como a revenda de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), as restrições de ocupação em áreas de influência de monumentos, edificações, sítios ou parques tombados pelo patrimônio histórico, nas faixas de altitudes em relação ao Farol do Mucuripe e nas áreas de influência das Linhas de Metro. Dispõe também sobre as disposições transitórias necessárias até a data de vigência da Lei.

Após verificada a adequabilidade, a implantação das atividades no Município se dará em função da classificação da via onde se situa o imóvel, em obediência aos recuos e normas constantes de Anexo específico deste Projeto de Lei.

Quanto às atividades classificadas como Projeto Especial (PE) e como Polo Gerador de Viagens (PGV), antes de ser implantadas no Município, deverão receber parecer técnico da Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente (SEUMA), referendado pela Comissão Permanente de Avaliação do Plano Diretor (CPPD).

O Capítulo II - Das Normas Gerais -, deste Título, normatiza o uso e a ocupação nas Macrozonas de Ocupação Urbana e de Proteção Ambiental, ressalvadas as Normas Específicas estabelecidas para as Zona de Proteção Ambiental, Zona da Orla e Zonas Especiais, contidas nos Capítulos III, IV e V. Já os parâmetros estabelecidos para cada Zona estão designados em conformidade com os Anexos deste Projeto de Lei.

No Capítulo de Normas Gerais também se prevê a obrigatoriedade da efetivação da Cota de Habitação Social para os empreendimentos com área de construção computável superior a 20.000m² (vinte mil metros quadrados). A Cota de Habitação Social, inovação

normativa já adotada em outras capitais do Brasil, consiste na destinação de 10% (dez por cento) da área de construção computável para fins de Habitação de Interesse Social, a ser executada pelo próprio empreendedor e destinada a atender famílias com renda de até 6 (seis) salários-mínimos.

O Capítulo VI - Do Uso e da Ocupação Diferenciados - trata das situações peculiares, que demandam normas e padrões de parcelamento, uso e ocupação do solo específicos, tais como Projetos Especiais, Condomínios, Hotéis-Residência, Conjunto Habitacional de Interesse Social e Áreas para Reassentamento Popular.

O Capítulo VII - Das Restrições Aeroportuárias - trata das limitações estabelecidas pelas normas específicas do Ministério da Defesa e da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), conforme a Lei nº 7.565/1986 (Código Brasileiro de Aeronáutica - CBA), que interferem diretamente nas disposições desta Lei, no que concerne ao uso e à ocupação do solo nas Zonas de Proteção de Aeródromo.

O Capítulo VIII - Da Mudança de Uso - possibilita a mudança de uso nas edificações em situação regular, desde que a implantação da atividade seja adequada ao zoneamento e à via, podendo esta ocorrer entre diferentes grupos ou subgrupos, e entre diferentes classes, no mesmo subgrupo. Nos casos de mudança de uso, admitem-se reformas, de acordo com o estabelecido na Legislação de Obras e Posturas, mantendo-se as características relativas a recuos e taxas de ocupação, desde que observados o índice de aproveitamento, a Fração do Lote e a altura máxima na Zona em que a atividade estiver inserida, somente para as atividades já licenciadas na data de publicação deste Projeto de Lei, ou quando o uso originário tenha se dado pelo lapso temporal mínimo de 2 (dois) anos.

O Capítulo II - Do Sistema Viário e do Estacionamento, do Título V, por sua vez, aborda sobre os espaços destinados a estacionamento de veículos, que estão classificados como privativos (quando se destinarem a um só usuário, família, estabelecimento ou condomínio, constituindo dependência para uso exclusivo da edificação) e coletivos (quando se destinarem à exploração comercial). Outrossim, as normas inseridas neste Capítulo tornam obrigatória a reserva de espaços destinados a estacionamento de veículos vinculados às atividades das edificações e o número de vagas calculado de acordo com o tipo de ocupação do imóvel, tudo em conformidade com o disposto em Anexos integrantes deste Projeto de Lei.

Quanto aos prédios destinados a Estacionamento Coletivo, estes terão incentivos construtivos em reconhecimento da situação de circulação na cidade e como forma de minimizar o conflito entre veículos motorizados particulares e a utilização de espaços públicos.