



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

EVANILSON DE LIMA SIQUEIRA

**PRIORIZAÇÃO DE ROTAS DE ÔNIBUS PARA ELETRIFICAÇÃO NO MUNICÍPIO
DE FORTALEZA BASEADO EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO E SIG**

FORTALEZA
2022

EVANILSON DE LIMA SIQUEIRA

PRIORIZAÇÃO DE ROTAS DE ÔNIBUS PARA ELETRIFICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE
FORTALEZA BASEADO EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO E SIG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Arielle Elias Arantes

FORTALEZA

2022

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)

- S629p Siqueira, Evanilson de Lima.
Priorização de rotas de ônibus para eletrificação no município de Fortaleza baseado em análise multicritério e SIG / Evanilson de Lima Siqueira. – 2022.
96 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.
Orientação: Profa. Dra. Arielle Elias Arantes.
1. Eletromobilidade. 2. MACBETH. 3. TOPSIS. 4. Demanda diária. 5. SIG. I. Título.
CDD 620
-

EVANILSON DE LIMA SIQUEIRA

PRIORIZAÇÃO DE ROTAS DE ÔNIBUS PARA ELETRIFICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE
FORTALEZA BASEADO EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO E SIG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 08/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Arielle Elias Arantes (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Mário Ângelo Nunes de Azevedo Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Evaldo e Silvia.

A minha vó, Maria Paulina.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pelo ânimo, pelo conhecimento, pela saúde, pela perseverança e por ter me permitido chegar até aqui. “Ebenézer! Até aqui nos ajudou o Senhor!”.

Aos meus pais, Evaldo Carlos Siqueira e Silvia de Lima Siqueira, pela minha educação e caráter e por todo esforço e sacrifícios que permitiram minha formação.

A minha avó, Maria Paulina, pelas orações e palavras acolhedoras.

A Profa. Dra. Arielle Elias Arantes, pela excelente orientação, pelo conhecimento, pela paciência e conselhos e principalmente por confiar no meu potencial.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata e Prof. Dr. Mário Ângelo Nunes de Azevedo Filho pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos entrevistados, pelo tempo concedido no preenchimento do formulário.

Aos professores, profissionais e colegas de graduação pelo aprendizado e por tornarem minha jornada mais leve.

As minhas amigas, Camily e Sabrina, que estiveram comigo do início ao fim da graduação, deixando-o mais agradável e descontraído.

Ao meu amigo Igor por ter me acolhido, por ter me ajudado em diversos momentos de desalento e por ter me ajudado na formatação deste trabalho.

Ao meu parceiro e amigo, Dhonatas Damasceno, por ter me acompanhado nos últimos anos da minha graduação, pelas palavras de fortalecimento e ânimo e por fim, pela contribuição neste trabalho com a edição de imagens.

“No mundo, todas as coisas se parecem, mas as coisas mais próximas são mais parecidas que aquelas mais distantes” (TOBLER, 1970, p. 236).

“everything is related to everything else, but near things are more related than distant things.” (TOBLER, 1970, p. 236).

RESUMO

A poluição do ar por transporte motorizado baseado na queima de etanol, gasolina e diesel tem implicações para a saúde humana, como agravamento dos sintomas de asma e problemas pulmonares. A eletromobilidade do transporte coletivo público tem a vantagem de ter baixa ou nenhuma emissão de gases poluentes, por outro lado, a autonomia limitada das baterias, o longo tempo de carregamento e o alto custo de aquisição dificulta a adoção desta tecnologia por parte das empresas de ônibus. Neste sentido, busca-se nesta proposta realizar a priorização das rotas de ônibus do município de Fortaleza-CE para eletrificação, considerando critérios relacionados à demanda/oferta, ambientais e sociais, por meio da integração da análise multicritério e do SIG. Neste estudo, foram utilizados os dados GTFS e de bilhetagem de novembro de 2018, os quais foram processados no software QGIS. Com base na literatura e nos dados disponíveis foram considerados 10 subcritérios: Demanda da rota, Extensão da linha/rota, Frota Operante, Tempo de Viagem, Número de Viagens Diárias, Área dos Terminais, Distância do Terminal até a Subestação de Energia, Emissão de CO₂, População Total e Nível de Renda da População. Aplicou-se um questionário com os diferentes atores do sistema de transporte público, e com base na média e moda das respostas determinou-se os pesos dos subcritérios utilizando o método MACBETH. Os pesos foram utilizados no algoritmo TOPSIS para determinar os valores de similaridade e realizar a hierarquização das rotas. Posteriormente aplicou-se o Índice de Moran para a identificação de possíveis agrupamentos significativos e realizou-se uma análise da viabilidade técnica da eletrificação das 5 rotas prioritárias. As três rotas com maior prioridade foram: 1) Rota 041- Parangaba/Oliveira Paiva/Papicu, 2) 712 - Conj. Palmeiras/Papicu e 3) 703- Paupina/Pici, as quais apresentaram maior demanda diária média, emissão de CO₂ e frota de ônibus. A substituição dos ônibus a diesel por elétricos nas 10 rotas prioritárias possibilitará reduzir a emissão de CO₂ em aproximadamente 63 ton. CO₂/dia, o que equivale a uma redução de 13%. Considerando a viabilidade da eletrificação das 5 rotas prioritárias, as rotas 712 e 051 são as mais críticas por terem 100% e 93,75% da frota com necessidade de recarga durante o dia. Para atender ao número de viagens diárias realizadas nestas rotas seria necessário aumentar a frota de ônibus atual, visto que a adoção de um sistema de rotação não é viável operacionalmente quando mais de 50% da frota precisa de recarregar a bateria durante o dia.

Palavras-chave: Eletromobilidade; MACBETH; TOPSIS; Demanda diária, SIG.

ABSTRACT

Air pollution from motorized transport based on the burning of ethanol, gasoline and diesel has implications for human health, such as worsening asthma symptoms and lung problems. The electromobility of public transport has the advantage of having low or no emission of polluting gases, on the other hand, the limited autonomy of the batteries, the long charging time and the high acquisition costs make it difficult for companies to adopt this technology. In this sense, this proposal seeks to prioritize bus routes in the city of Fortaleza-CE for electrification, considering demand/supply, environmental and social criteria, through the integration of multicriteria analysis and GIS. In this study, GTFS and ticketing data from November 2018 were used, which were processed in the QGIS software. Based on the literature and available data, 10 sub-criteria were considered: Route demand, Line/route extension, Operating fleet, Travel time, Number of daily trips, Terminal area, Distance from the Terminal to the Power substation, Emission of CO₂, Total Population and Population Income Level. A questionnaire was applied to the different actors in the public transport system, and based on the average and mode of the responses, the weights of the subcriteria were determined using the MACBETH method. The weights were used in the TOPSIS algorithm to determine similarity values and rank the routes. Subsequently, the Moran Index was applied to identify possible significant clusters and an analysis of the technical feasibility of electrification of the 5 priority routes was carried out. The three routes with the highest priority were: 1) Route 041- Parangaba/Oliveira Paiva/Papicu, 2) 712 - Conj. Palmeiras/Papicu and 3) 703- Paupina/Pici, which had higher average daily demand, CO₂ emissions and bus fleet. The replacement of diesel buses with electric ones on the 10 priority routes could reduce CO₂ emissions by approximately 63 tons. CO₂/day, which is equivalent to a 13% reduction. Considering the feasibility of electrifying the 5 priority routes, routes 712 and 051 are the most critical, as they have 100% and 93.75% of the fleet in need of recharging during the day. To meet the number of daily trips made on these routes, it would be necessary to increase the current bus fleet, since the adoption of a rotation system is not operationally viable when more than 50% of the fleet needs to recharge its battery during the day.

Keywords: Electromobility; MACBETH; TOPSIS; Daily demand; GIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trólebus alimentado por cabos aéreos suspensos	28
Figura 2 – Ônibus sendo carregado por pantógrafo	31
Figura 3 – Matriz de proximidade Normalizada	36
Figura 4 – Diagrama de Espalhamento de Moran	37
Figura 5 – Fases do processo MACBETH de apoio multicritério à decisão.....	39
Figura 6 – Etapas para a priorização das rotas de ônibus a diesel para eletrificação.	41
Figura 7 – Critérios selecionados para a priorização das rotas para eletrificação.....	42
Figura 8 – Localização das 304 rotas de ônibus.....	46
Figura 9 – Matriz de Julgamentos no MACBETH.....	48
Figura 10 – Mapa das Rotas Prioritárias - Média.....	55
Figura 11 – Mapa das Rotas Prioritárias - Moda.....	56
Figura 12 – Mapa de Agrupamento - Média	58
Figura 13 – Mapa de Agrupamento - Moda	59
Figura 14 – Renda Média por Bairro.....	60
Figura 15 – Mapa de Significância - Média	61
Figura 16 – Mapa de Significância - Moda	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perfil dos agentes que participaram da pesquisa.	51
Gráfico 2 – Nível de Relevância dos Critérios.	52
Gráfico 3 – Peso (%) - Média.	53
Gráfico 4 – Peso (%) - Moda.	53
Gráfico 5 – Índice de Moran - Média.	62
Gráfico 6 – Índice de Moran - Moda.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais Poluentes Veiculares.....	22
Tabela 2 – Estimativa Operacional Simplificada	23
Tabela 3 – Resumo Comparativo - Ônibus elétrico.	26
Tabela 4 – Quadro Resumo dos Sistemas de Recarga	32
Tabela 5 – Comparação entre os artigos.....	34
Tabela 7 – Informações sobre cada critério.....	45
Tabela 8 – Resultados do Questionário relativos à Categorização dos Critérios	52
Tabela 9 – Comparação entre os pesos dos Critérios	54
Tabela 10 – Classificação TOPSIS - Média	55
Tabela 11 – Classificação TOPSIS - Moda	56
Tabela 12 – Autonomia de viagens por ônibus para as rotas prioritárias.....	63
Tabela 13 – Sistema de Otimização de Recarga dos Ônibus Prioritários	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AMC	Análise Multicritério
AMD	Apoio Multicritério à Decisão
BHTrans	Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte
BNEF	<i>Bloomberg New Energy Finance</i>
CPE	Consultoria e Projetos Elétrico
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPE	Empresa De Pesquisa Energética
ETUFOR	Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GTFS	<i>General Transit Feed Specification</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel On Climate Change</i>
KML	<i>Keyhole Markup Language</i>
LISA	<i>Local Indicators of Spatial Analysis</i>
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>
MCDA	<i>Multi-criteria decision analysis</i>
MP	Material Particulado
PMF	Prefeitura Municipal de Fortaleza
PNMU	Política Nacional de Mobilidade Urbana
PVF's	Pontos de Vista Fundamentais
SDE	Secretaria Municipal do Desenvolvimento Econômico
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SEFIN	Secretaria Municipal das Finanças de Fortaleza
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPTans	São Paulo Transporte S/A

TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
UITP	<i>Union Internationale des Transports Publics</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
WRI	<i>World Resources Institute</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

R\$	Reais
%	Porcentagem
Σ	Somatório
$\sqrt{\quad}$	Radiciação (raiz quadrada)
<	Menor que
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _x	Óxidos de Carbono
h	Horas
Hab.	Habitantes
Kg	Quilograma
Km	Quilômetro
kW	Quilowatt
m ²	Metro Quadrado
NO	Monóxido de Nitrogênio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
SO _x	Óxidos de Enxofre
Ton.	Tonelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Problemática da Pesquisa	18
1.2	Justificativa	18
1.3	Objetivos	19
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	19
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	19
1.4	Organização do Trabalho	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	Benefícios da Eletromobilidade	21
2.1.1	<i>Benefícios à Saúde</i>	21
2.1.2	<i>Benefícios ao Meio Ambiente</i>	22
2.1.3	<i>Benefícios Econômicos</i>	22
2.2	Desafios e Oportunidades da Eletromobilidade	24
2.3	Caracterização da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus	26
2.3.1	<i>Ônibus Elétricos</i>	26
2.3.1.1	<i>Trólebus</i>	27
2.3.1.2	<i>Híbridos</i>	28
2.3.1.3	<i>Elétricos a Bateria</i>	29
2.3.2	<i>Baterias</i>	30
2.3.3	<i>Estações de Carregamento</i>	30
2.4	Estado da Arte	33
2.5	SIG e Análise Espacial	34
2.5.1	<i>Índice de Moran</i>	35
2.6	Análise Multicritério e Tomada de Decisão	37
2.6.1	<i>MACBETH</i>	38
2.7	TOPSIS	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	Definição dos critérios	42
3.1.1	<i>Características Operacionais</i>	43
3.1.2	<i>Características Geográficas</i>	44
3.2	Compilação de dados e processamento no QGIS	44
3.3	Modelo de Hierarquia - MACBETH	47

3.4	Classificação das Rotas com o TOPSIS	48
3.5	Análise de Autocorrelação Espacial.....	49
3.6	Viabilidade Operacional das Rotas prioritárias para eletrificação	49
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	51
4.1	Resultados do Questionário e MACBETH.....	51
4.2	Priorização das Rotas de Ônibus (TOPSIS).....	54
4.3	Índice de Moran	57
4.4	Viabilidade Operacional	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
	REFERÊNCIAS.....	67
	APÊNDICE A - FORMULÁRIO	73
	APÊNDICE B - CLASSIFICAÇÃO DAS ROTAS NO TOPSIS	83
	APÊNDICE C - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ROTAS.....	89
	APÊNDICE D - MAPA DAS ROTAS PRIORITÁRIAS - MÉDIA.....	90
	APÊNDICE E - MAPA DAS ROTAS PRIORITÁRIAS - MODA	91
	APÊNDICE F - MAPA DE AGRUPAMENTO - MÉDIA.....	92
	APÊNDICE G - MAPA DE AGRUPAMENTO - MODA	93
	APÊNDICE H - MAPA DE SIGNIFICÂNCIA -MÉDIA	94
	APÊNDICE I - MAPA DE SIGNIFICÂNCIA -MODA.....	95
	APÊNDICE J - RENDA MÉDIA POR BAIRRO.....	96
	APÊNDICE K - POPULAÇÃO POR BAIRRO	97

1 INTRODUÇÃO

A poluição do ar é um dos temas de discussão na atualidade e há um foco mundial em como minimizá-la, afinal é uma das causas do aquecimento global e dos problemas de saúde humana. Sabe-se que o desenvolvimento acelerado de novas áreas de atividades urbana e industrial no mundo tem aumentado a quantidade de gases poluentes lançados na atmosfera, devido ao aumento do número de veículos automotores, queimadas, industrialização, etc. A Resolução Conama 491, de 19 de novembro de 2018, define poluentes atmosféricos como:

“[...] qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade.” (BRASIL, 2018, p. 155)

O transporte motorizado à combustão tem sido responsável por grande parte das emissões de poluentes dos grandes centros urbanos. Segundo a *International Energy Agency* - (IEA, 2019), o setor de transportes corresponde a 24% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) no mundo, um dos principais gases causadores do efeito estufa. Já no Brasil, o setor de energia, sendo os transportes a principal fonte desta categoria, é o terceiro maior responsável por essas emissões, contribuindo com 21% das emissões em 2018, ficando atrás apenas dos setores de mudança do uso da terra e de agricultura, de acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2019).

A poluição veicular contribui para o aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o CO₂, ocasionando um impacto direto nas mudanças climáticas por meio do aquecimento global, além de provocar degradação da paisagem urbana por meio da fuligem expelida dos escapamentos, formação de névoas densa, efeito *smog*, chuvas ácidas por causa da emissão de óxidos de enxofre (SO_x), etc. Além do impacto ambiental, a poluição veicular afeta a saúde pública e a qualidade de vida das pessoas, pois o material particulado emitido pode penetrar no sistema de defesa do organismo, atingir os alvéolos e causar irritação, asma, bronquite e câncer de pulmão.

Uma alternativa mais ecológica aos carros particulares é o transporte público. O transporte pessoal, por exemplo, responde por cerca de 35% das viagens motorizadas e quase 60% das emissões de CO₂ nos centros urbanos brasileiros, enquanto o transporte público

coletivo responde por cerca de 25% do total de emissões de dióxido de carbono (CARVALHO, 2011).

No entanto, o diesel, combustível fóssil derivado do petróleo, utilizado pelas frotas continua a ser um problema de poluição atmosférica nas zonas urbanas. Com isso em mente, há a necessidade de implantar tecnologias limpas e desenvolver políticas que visem a redução das emissões de poluentes do transporte público. Uma forma de reduzir essas emissões é substituir as frotas de ônibus a diesel por ônibus elétricos, o que continua sendo um desafio em termos de investimento inicial e outros fatores associados à tecnologia de ônibus elétricos.

1.1 Problemática da Pesquisa

A adoção da tecnologia de ônibus elétricos no setor de transporte público possui alguns delimitadores, tais como a autonomia limitada das baterias, o longo tempo de carregamento e alto custo de aquisição destes veículos, além disso a falta de infraestrutura de recarga, o que pode tornar o sistema de *e-bus* inviável economicamente. Outro problema para implantação dos ônibus elétricos é a questão do fornecimento de energia, pois a demanda pode ocasionar impactos negativos na rede elétrica urbana.

Portanto, a fim de tornar o processo de eletrificação da frota de ônibus viável tecnicamente e economicamente, é necessário que isso ocorra de forma incremental, isto é, em cada etapa/estágio, os tomadores de decisão precisam determinar quais rotas de ônibus serão eletrificadas a cada passo. Para isso, há a necessidade de adoção de escolhas de critérios robustos e de hierarquização das alternativas, priorizando as rotas que atendem a um maior número de pessoas.

1.2 Justificativa

A priorização das rotas ajuda na tomada de decisão dos gestores no processo de eletrificação das rotas, tornando o processo mais viável economicamente, além disso, a substituição dos ônibus a diesel por elétricos favorece uma mobilidade urbana mais sustentável, em consonância com os preceitos da Política Nacional de Mobilidade Urbana – PNMU (BRASIL, 2012) e, como consequência, possibilita reduzir as emissões de GEE e poluentes locais e globais, melhorando a qualidade de vida da população.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia de análise multicritério e SIG para a priorização de rotas de ônibus elétricos no município de Fortaleza.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, podem ser destacados:

- 1) Avaliar a importância relativa de critérios relacionados a demanda/oferta, questões ambientais e sociais, a partir de vários atores como os motoristas e passageiros, utilizando o método de análise multicritério MACBETH.
- 2) Ordenar as rotas em ordem de maior ou menor importância utilizando o TOPSIS.
- 3) Realizar uma análise de autocorrelação espacial indicando os locais com maior ou menor prioridade para a substituição da frota de ônibus por ônibus elétrico.
- 4) Verificar a viabilidade operacional das rotas priorizadas, no que diz respeito à frequência de recargas diárias.

1.4 Organização do Trabalho

Os capítulos remanescentes da monografia são descritos a seguir:

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, trazendo o estado da arte em relação a eletromobilidade, seus benefícios e dificuldades, e é feita uma breve explanação das ferramentas utilizadas para atingir os objetivos propostos, tais como SIG e análise multicritério.

Depois, no capítulo 3 é exposta a estratégia metodológica aplicada, definições dos critérios de priorização de rotas e um modelo de hierarquia com base em análise multicritério.

Já no capítulo 4 é apresentado os resultados obtidos, fazendo uma análise e discussão das rotas prioritárias e da viabilidade operacional das mesmas.

E por fim, no capítulo 5 é abordada as considerações finais, apresentando os objetivos alcançados, comentários e recomendações para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

No mundo, os transportes respondem por 23% do total de emissões de CO₂ relacionados com energia (IPCC, 2014). Já no Brasil, dados de 2016 revelam que a subcategoria de transporte é a mais representativa do setor de energias e responde por 50% das emissões de CO₂ (46,0% das emissões totais de CO₂ no país são provenientes da queima de combustíveis ou emissões fugitivas), de acordo com dados da quarta Comunicação Nacional do Brasil à *United Nations Framework Convention on Climate Change* - UNFCCC do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (BRASIL, 2021). Por isso, a necessidade de falarmos de transporte coletivo e sustentável, a fim de minimizar os impactos da queima de combustível fóssil, já que possui uma emissão por passageiro bem menor do que automóveis.

O sistema de transporte público urbano se torna ineficiente principalmente por conta da distribuição desigual do espaço público e do uso intenso de transporte individual motorizado, fruto da desigualdade socioespacial em nosso país (BRASIL, 2022). Nesse sentido, há a necessidade de investimento em modos de transporte e em desenvolvimento urbano mais sustentável, tanto para atender à demanda crescente e melhorar as condições de mobilidade e acessibilidade, quanto para reduzir as desigualdades sociais e melhorar as condições ambientais. Pensando nisso, a PNMU – Lei nº 12.587/2012 prioriza e define o transporte coletivo sobre o transporte individual motorizado, tornando-o mais eficiente e atrativo à população por meio da integração entre os diferentes modos de transporte e da melhoria da acessibilidade e mobilidade das pessoas e cargas (BRASIL, 2012).

Os objetivos da PNMU são promover o acesso aos serviços básicos, melhorar as condições urbanas relacionadas ao transporte, promover o desenvolvimento sustentável e consolidar a governança democrática para a melhoria contínua do transporte urbano. A PNMU exige que os municípios com mais de 20.000 habitantes formulem e proponham planos de transporte urbano, que visam planejar o desenvolvimento da cidade de forma ordenada. Assim a lei visa promover o desenvolvimento sustentável, mitigando os custos ambientais e socioeconômicos do transporte de pessoas e mercadorias nas cidades.

Para isso, é fundamental que esse sistema seja propulsionado por fontes de energia de baixa ou nenhuma emissão de poluentes, como combustíveis vegetais, tais como etanol, biogás e biodiesel, ou fontes alternativas, como hidrogênio, energia eólica e energia elétrica. A implantação de tecnologias limpas em frotas de transporte coletivo, tais como trólebus, ônibus à bateria, à energia solar ou híbridos, e políticas de comprometimento de redução de emissões de poluentes já vem sendo adotado em cidades de todo o mundo, visando a melhoria da

qualidade do ar e da qualidade de vida da população. A exemplo, diversas cidades na Europa possuem meta para redução de emissão até o ano de 2050.

No que concerne ao transporte público no mundo, existem cerca de meio milhão de ônibus elétricos em circulação e a China vem liderando este espaço com a maior frota e destaque para Shenzhen, a primeira cidade do mundo com a frota 100% composta por ônibus elétricos (*The City Fix*, 2018). Em seguida vem a cidade de Santiago, no Chile, com a maior frota de ônibus urbanos elétricos fora da China, (WRI BRASIL, 2019), atualmente com uma frota de quase 800 veículos em operação (e-BUS RADAR, 2022). Já no Brasil, a cidade de São Paulo é destaque por possuir a maior frota e assumir um compromisso público de renovar sua frota de ônibus com tecnologias de baixa emissão de acordo com a lei N° 16.802/2018 publicada no Diário Oficial Cidade de São Paulo (SÃO PAULO, 2018).

2.1 Benefícios da Eletromobilidade

Os ônibus elétricos têm sido uma das alternativas para melhorar a qualidade do ar e a qualidade de vida da população nos grandes centros urbanos. Além disso, a eletromobilidade qualifica e integra o sistema de transporte coletivo e público, proporcionando a oportunidade de repensar a mobilidade na cidade (BRASIL, 2022). Com isto em mente, as próximas subseções irão tratar dos benefícios da eletromobilidade nas áreas da saúde, do meio ambiente e na economia.

2.1.1 Benefícios à Saúde

A poluição do ar por transporte motorizado baseado na queima de etanol, gasolina e diesel tem implicações para a saúde humana, como agravamento dos sintomas de asma e problemas pulmonares, e constitui um importante problema de saúde pública. Toledo (2011) realizou uma revisão de literatura sobre poluição veicular e a saúde da população de São Paulo e encontrou associação entre as concentrações de poluentes atmosféricos e o impacto na saúde da população da cidade, como exemplo o aumento da taxa de mortalidade diária por doenças cardiovasculares em 3 a 4% e respiratórias em 6% associados ao aumento de material particulado e dióxido de enxofre na atmosfera.

A *Union Internationale des Transports Publics* (UITP, 2019) afirma que a substituição de ônibus a combustão por elétricos pode melhorar consideravelmente a qualidade do ar e a saúde pública, com a diminuição de hospitalizações, de mortes, custos financeiros e

bem-estar. Além disso, os ônibus elétricos são mais confortáveis, por serem bem mais silenciosos que veículos a combustão interna.

2.1.2 *Benefícios ao Meio Ambiente*

O transporte motorizado a combustíveis fósseis emite diversos poluentes locais com efeitos nocivos ao meio ambiente, como é o caso das chuvas ácidas e do aquecimento global (CETESB, 2019). A Tabela 1 apresenta alguns destes poluentes e alguns de seus impactos.

Tabela 1 – Principais Poluentes Veiculares.

Poluente	Impactos
Óxidos de Carbono (COx)	Monóxido de carbono (CO), gás inodoro, incolor e tóxico, formado no processo de queima de combustíveis, sendo os veículos automotores sua principal fonte de emissão; Dióxido de carbono (CO ₂), sendo prejudicial em grandes concentrações ao meio ambiente devido a sua propriedade de gás estufa;
Óxidos de Nitrogênio (NOx)	Dióxido de nitrogênio que é um gás poluente com ação altamente oxidante sendo formado a partir da oxidação do monóxido de nitrogênio (NO), este sendo formado a partir da queima de matéria orgânica, causador da formação do <i>smog</i> fotoquímico e da chuva ácida;
Material Particulado (MP)	Partículas em suspensão na atmosfera, podendo ser partículas sólidas (como fuligem e poeira) ou líquidas, chamadas de aerossóis. Gera sujeira e degradação de imóveis próximos aos corredores de transporte.

Fonte: Adaptado Companhia Ambiental de São Paulo - CETESB (2019).

A eletromobilidade do transporte coletivo público tem a vantagem de ter baixa ou nenhuma emissão de gases poluentes, cooperando com o esforço global de combate às mudanças climáticas e melhorando a qualidade do ar.

No que concerne à sustentabilidade e à segurança energética comparados a veículos a combustão, os veículos elétricos também são mais vantajosos por não dependerem da produção e distribuição do petróleo e sua variação de preço, além disso, outro benefício para eletromobilidade é que no Brasil, a matriz energética é praticamente renovável, sendo um ponto bastante positivo para o meio ambiente (EPE, 2018).

2.1.3 *Benefícios Econômicos*

Além da redução da poluição atmosférica e a melhoria da saúde da população, vale ressaltar que os ônibus elétricos são em torno de 3 vezes mais eficientes do que veículos com

motor de combustão interna, enquanto os motores a combustão têm aproveitamento de apenas 30% da energia, os elétricos o rendimento supera os 95% (IEA, 2020).

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE - realizou uma avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil com o objetivo de analisar a viabilidade econômica da substituição de ônibus urbanos movidos a diesel por modelos equivalentes elétricos, que utilizam bateria (EPE, 2020). Para tal, foram considerados 3 cenários diferentes, a saber, “inércia”, “fossilizado” e “ambiental”. Para uma estimativa operacional simplificada, este trabalho irá considerar apenas o cenário de inércia, onde a demanda de petróleo continua em elevação e as tecnologias alternativas como ônibus híbridos e elétricos não possuem incentivos governamentais.

O preço do diesel adotado nesta estimativa da EPE no cenário de inércia foi de acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2020), ao longo de 2019 e o preço da energia elétrica adotado foi uma estimativa da tarifa praticada pela distribuidora Eletropaulo, aferida por meio de exercício de tarifas do mercado de energia A4 a partir de dados de ANEEL (2019). O rendimento do ônibus a diesel considerado foi conforme estudo realizado pela Secretaria de Transportes da cidade de Belo Horizonte e do ônibus elétrico foi conforme testes realizados na cidade de São Paulo (SPTrans, 2018). Na Tabela 2 segue os valores adotados de preço e rendimento para ônibus a diesel e elétrico e o custo operacional simplificado calculado. O custo operacional do ônibus elétrico é 49% menor do que o do ônibus a diesel.

Tabela 2 – Estimativa Operacional Simplificada

	Diesel	Elétrico
Preço do combustível / energia	R\$ 3,26/L (ANP, 2020)	R\$ 0,54/kWh (ANEEL, 2019)
Rendimento/Consumo	1,93 km/L (BHTrans, 2019)	0,65 km/kWh (SPTrans, 2018)
Custo Operacional	R\$ 1,69/Km	R\$ 0,83/Km

Fonte: Autor (Adaptado EPE, 2020).

Outro benefício da adoção de ônibus elétricos é o grande potencial de qualificar o transporte coletivo, melhorando sua imagem, principalmente, por exigir um grande investimento em infraestrutura, tais como pontos de ônibus, terminais e estações de carregamento, tornando tais infraestruturas mais acessíveis, seguras e integradas à paisagem urbana.

Estes resultados na melhoria da qualidade do ar e de vida da população são visíveis quando há uma rede eficiente, acessível e de qualidade (BRASIL, 2022), pois traz equidade no acesso dos cidadãos ao transporte público coletivo, no uso do espaço público de circulação e principalmente na redução das desigualdades e promoção da inclusão social (PNMU).

2.2 Desafios e Oportunidades da Eletromobilidade

Assim como toda inovação, há desafios a serem superados, na adoção da eletromobilidade nas cidades brasileiras não seria diferente. Há três principais elementos que dificultam a implementação da eletromobilidade: os próprios veículos e baterias; as agências e operadoras deste sistema; e principalmente, a infraestrutura de carregamento. E em cada um destes três elementos, encontramos três principais eixos a serem enfrentados a saber: desafios tecnológicos, financeiros e institucionais (WRI, 2019).

No que concerne aos desafios tecnológicos, pode-se citar a falta de conhecimento e as limitações técnicas dos ônibus elétricos e da infraestrutura de recarga como as principais barreiras técnicas (WRI, 2019). Além da falta de dados específicos sobre a viabilidade das operações de frota, as cidades carecem das informações necessárias para tomar decisões seguras e conhecimento geral sobre as barreiras e facilitadores da implementação da frota. Dados estes como análise inicial de custo benefício tanto dos veículos como da infraestrutura, estratégias e técnicas de implementação da frota, características operacionais dos veículos elétricos disponíveis no mercado, e planejamento de implementação e manutenção das infraestruturas de carregamento.

As limitações técnicas são encontradas nos três elementos, tais como os entraves relacionados aos veículos, como vida útil e desempenho da bateria limitados, agências e operadores sem o conhecimento necessário para adotar novos modelos operacionais considerando as limitações do sistema, e a ausência de infraestrutura de recarga, como a localização e capacidade das estações e dos pontos de recarga. A instabilidade da rede elétrica e o mercado de ônibus elétricos bastante restrito também são consideradas barreiras tecnológicas para a implementação da eletromobilidade nas cidades brasileiras (BRASIL, 2022).

Os principais desafios financeiros são a dificuldade das agências em mudar as práticas de aquisição de veículos e a falta de financiamento a longo prazo (WRI, 2019). Normalmente, as instituições utilizam modelos que incentivam compras de baixo custo e baixo risco, enquanto a eletrificação do transporte coletivo exige um alto investimento inicial, pois,

além dos próprios veículos, exige uma infraestrutura necessária, principalmente da implantação e capacidade das estações de carregamento. No que se refere ao custo de aquisição de um ônibus elétrico este é 33% mais caro do que um ônibus a diesel (SLOWIK *et al.*, 2018). Os custos de instalação de uma infraestrutura de recarga podem tornar o sistema de ônibus elétrico inviável economicamente. A CARB (2017) estimou os custos de equipamento e instalação de um carregador de garagem de 50 kW em R\$ 264.000 por ônibus, desconsiderando nesta análise o custo de aquisição de terrenos e os potenciais custos de atualização na infraestrutura de distribuição da rede elétrica.

O financiamento também é um obstáculo para implementação em larga escala, e as instituições financeiras muitas vezes relutam em fazer esses investimentos devido aos riscos e incertezas do setor de ônibus elétricos. No entanto, vale ressaltar, que nos últimos anos, o preço dos veículos vem se tornando mais atrativos devido à queda no custo das baterias, que compõem grande parte do valor total dos ônibus (BRASIL, 2022).

Além dos desafios técnicos e financeiros para implementação da eletromobilidade, há desafios institucionais, como falta de liderança e política pública pragmática e falta de autoridade institucional (WRI, 2019). Em muitas cidades, não há planos de implementação ou políticas para incentivar a eletromobilidade, como planos estratégicos ou apoio financeiro, e quando os incentivos estão disponíveis, eles são limitados. Além da falta de interesse dos próprios gestores envolvidos e do fraco apoio político. Em muitos casos, a falta de capacidade institucional tem sido um obstáculo para o lançamento e implantação de projetos de eletromobilidade, pois é necessário apoio jurídico, técnico e político para executar uma iniciativa de grande escala como esta. Além disso, há falta de acesso do governo às terras e propriedades para instalação das infraestruturas de rede que os ônibus elétricos necessitam.

Contudo, com novos desafios, também vem novas oportunidades e possibilidades. A eletromobilidade pode trazer como legado para as cidades brasileiras o desenvolvimento de novos estudos e pesquisas em prol de melhorias no transporte coletivo por ônibus, como coleta de dados para planejamento ao longo prazo (BRASIL, 2022). Também possibilitará a formulação de novos modelos de negócio, com a estruturação de contratos que avaliem o custo total de propriedade e que agreguem companhias de energia para a divisão de riscos. Além disso, com a incorporação de novas tecnologias e atualizações pode aumentar a competitividade, reduzir os custos e oferecer serviços de qualidade. Os incentivos de determinação de indicadores de qualidade e metas ambientais nos contratos podem favorecer a eletromobilidade (BRASIL, 2022). A eletromobilidade pode aquecer a economia, por geração de empregos, por desencadear a implantação de fábricas para fornecimento de insumos e

qualificação de mão-de-obra para manutenção e operação do novo sistema de transporte. E, por fim, o desenvolvimento de políticas de incentivos fiscais à eletromobilidade interligadas com outros setores além dos transportes, como indústria, energia, saúde e meio ambiente, tanto para produção ou importação dos componentes dos ônibus elétricos, como para tornar os padrões de qualidade do ar mais rígidos (BRASIL, 2022).

2.3 Caracterização da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus

Esta seção tem o objetivo de apresentar as principais características das tecnologias que envolvem a eletromobilidade, a saber: ônibus elétricos, baterias e infraestrutura de recarga.

2.3.1 Ônibus Elétricos

Os principais tipos de ônibus de tração elétrica são os trólebus, os híbridos e os elétricos a bateria. As próximas subseções irão apresentar melhor cada um dos tipos, bem como suas vantagens e desvantagens. Contudo, na Tabela 3 é apresentado um resumo comparativo entre os principais tipos de ônibus elétricos.

Tabela 3 – Resumo Comparativo - Ônibus elétrico.

	Trólebus	Híbridos	Elétricos a Bateria
Veículo	Custo Médio	Custo Médio	Custo Elevado
Infraestrutura	Custo Elevado	Custo Baixo	Custo Médio
Manutenção	Custo Médio	Custo Elevado	Custo Baixo
Flexibilidade Operacional	Baixo	Elevado	Elevado
Autonomia	-	20 a 50 km	150 a 250 km
Tempo de Recarga	-	-	3 - 8 horas

Fonte: Adaptado BRASIL, 2022.

Este trabalho adota os elétricos a bateria como o modelo padrão para priorização das rotas, transição para sistemas de transporte coletivo com emissão zero, pois se destacam por demonstrar todos os benefícios da eletromobilidade. Embora o custo de aquisição seja maior comparado aos outros dois, os elétricos a bateria possuem maior flexibilidade operacional e menores custos com manutenção e infraestrutura (Tabela 3).

2.3.1.1 Trólebus

Os trólebus são considerados os primeiros ônibus totalmente elétricos com surgimento na Europa na segunda metade do século XIX. No Brasil, foi introduzido por volta do ano 1949, em São Paulo (DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2019). Os trólebus são a maior frota de ônibus elétricos no país, com uma frota de 302 veículos no total, representando 86% da frota de ônibus elétrico no país, sendo operado principalmente no estado de São Paulo, com uma frota de 201 veículos (e-BUS RADAR, 2022). O valor de compra de um trólebus tipo Padron é estimado em R\$ 972.151,00, quase o dobro de um ônibus a diesel Padron na mesma configuração (SILVA¹, 2022).

Este sistema funciona a tração elétrica, alimentado por cabos aéreos suspensos ao longo da via, conectados por meio de duas hastes, Figura 1. Por ser limitado à infraestrutura de cabos elétricos, estes veículos são empregados para itinerários bem definidos, o que pode ser considerado uma desvantagem deste sistema, a baixa flexibilidade operacional (Tabela 3). Porém os modelos mais recentes possuem baterias que permitem uma certa autonomia a estes veículos. Outros pontos negativos deste sistema são: alto custo de investimento e de manutenção da infraestrutura, além da poluição visual causada pelos cabos aéreos. Estima-se que o custo de infraestrutura, considerando rede aérea e subestações seja de R\$ 58 milhões e o custo mensal de manutenção seja de R\$ 2 milhões na região metropolitana de São Paulo (SILVA², 2022).

Figura 1 – Trólebus alimentado por cabos aéreos suspensos



Fonte: Diário Do Transporte (2019)

Contudo, possuem boa aceleração e desaceleração, baixa emissão de ruídos, eliminação das emissões de poluentes de escapamento, número de peças reduzido (o que pode diminuir a frequência e os custos das manutenções veiculares) e um aumento da vida útil do veículo (BRASIL, 2022).

2.3.1.2 Híbridos

Os veículos híbridos, por sua vez, combinam elementos de motores a combustão interna com tração elétrica em um único veículo, sendo uma alternativa de baixa emissão de poluentes. Possuem melhor eficiência energética e emitem menos ruídos comparados a veículos convencionais (BRASIL, 2022). Além disso, uma grande vantagem deste sistema é a capacidade de se adaptar à infraestrutura já existente, sem a necessidade de cabos elétricos ou estações de recarga. Apresentam grande custo de aquisição, principalmente por serem mais complexos em decorrência da combinação de sistema de tração, necessitando de mais peças e maior necessidade de manutenção (BRASIL, 2022).

Os híbridos são veículos que permitem a utilização de forma mais eficiente de dois motores (VUCHIC, 2007), um a tração térmica e outro elétrico, um exemplo disso é em viagens com velocidade constante, quando há a necessidade de menos energia, o motor a combustão

interna carrega a bateria do veículo. A frenagem também pode fornecer cargas à bateria. Ora o veículo funciona a combustão, ora a tração elétrica. Os híbridos convencionais podem funcionar a série ou em paralelo, em uma combustão interna alimenta o gerador que por sua vez aciona o motor, em outro a combustão interna e o gerador elétrico trabalham juntos para movimentar os eixos do veículo.

Uma alternativa aos híbridos convencionais são os híbridos *plug-in* que combinam elementos de ônibus híbridos com veículos elétricos a bateria. Como o nome já sugere, esses veículos possuem baterias que podem ser carregadas por fontes externas, carregadores, por exemplo. Isso pode ser bastante vantajoso, por permitir a operação em modo totalmente elétrico com autonomia em torno de 20 a 50 quilômetros e em seguida continuam a utilização da combustão interna (TONG, 2015).

2.3.1.3 Elétricos a Bateria

Há também os veículos elétricos a bateria, sendo que, no Brasil, os primeiros operaram no Rio de Janeiro em 1917, vindos dos Estados Unidos e eram normalmente veículos de pequeno porte (DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2017). O elétrico puro, como também é chamado, extrai energia da bateria e converte em força motriz por um motor elétrico (MAHMOUD *et al.*, 2016). A energia armazenada nas baterias é proveniente de uma fonte externa (carregador) e toda vez que essa energia acaba, estes ônibus precisam ser reabastecidos. A frenagem regenerativa, assim como nos modelos híbridos, fornece também energia à bateria (BRASIL, 2022).

Comparando aos modelos de combustão interna convencionais, os elétricos a bateria possuem menos peças e componentes, pois requerem apenas uma bateria, um motor elétrico e conversores de potência (BRASIL, 2022). Também são mais eficientes que veículos a diesel, emitem menos poluentes e ruídos, consomem menos energia e precisam menos de manutenção. Em contrapartida, possuem maior custo de aquisição, quase R\$ 2 milhões (BRITTO, 2022) e autonomia limitada às condições de bateria, exemplo é o modelo Higer Azure A12 BR com autonomia de 270 km e tempo máximo de recarga de 4 horas (CURITIBA, 2022).

2.3.2 Baterias

Nos veículos elétricos, a principal função das baterias, além de armazenar energia, é alimentar o sistema de tração, sendo o único componente do veículo a fazer isto. A diferença de polaridade, ânodo e cátodo, nos terminais da bateria, gera uma tensão terminal (*Volts*) e o seu produto com a corrente elétrica (*Amperes*) gera a energia (*Watts-hora*) (BRASIL, 2022).

As baterias comumente podem ser de íons de lítio, de níquel-metal hidreto ou de chumbo ácido na indústria de veículos elétricos (GARCHE *et al.*, 2015), mas a maior representatividade é para as baterias de íons de lítio, por possuírem alta densidade de energia e voltagem, baixa taxa de autodescarga, longa vida útil e alta capacidade de carga e descarga (BLOOMBERG NEF, 2018).

É importante sempre observar dois aspectos das baterias, os custos e a vida útil (BRASIL, 2022). As baterias de íons de lítio possuem um alto custo de fabricação que reflete diretamente no preço final dos veículos, porém este custo de fabricação vem reduzindo, em torno de 79% desde 2010, e espera-se que isso se mantenha pelos próximos anos (BNEF, 2018) e reflita diretamente no preço dos *e-Bus*. A vida útil das baterias é medida em ciclos que dependem das reações químicas internas e podem ser impactadas negativamente por mau uso, como em casos de serem submetidas a altas temperaturas. Geralmente as baterias, para uso em veículos elétricos, costumam apresentar vida útil de oito a quinze anos (IEA, 2020).

Uma problemática importante é o destino dessas baterias quando a capacidade de armazenamento atinge patamares inferiores a 80% do valor inicial. No Brasil, a regulamentações de disposição e reciclagem para baterias não cobre as baterias feitas de íons de lítio (BRASIL, 2022). Porém é importante ter níveis elevados de reciclagem. Outra alternativa é o reaproveitamento dessas baterias, segunda vida, para deslocamento de pico de energia elétrica e para armazenamento de energia (BRASIL, 2022).

2.3.3 Estações de Carregamento

A infraestrutura necessária para adoção da tecnologia da eletromobilidade vem sendo o principal desafio enfrentado não só em nosso país, mas em todo mundo, sendo esta de suma importância, pois as estações de carregamento são necessárias para transmitir eletricidade da rede elétrica para o sistema de armazenamento do veículo. O sistema de carregamento pode ser por meio de carga condutiva ou indutiva, em um, o carregamento é por meio de conexão

física entre a rede elétrica e o veículo, já no outro, não é necessário de uma conexão direta e o carregamento ocorre por meio de um campo magnético (BRASIL, 2022).

As estações de recarga condutiva possuem potência de até 450 kW (RANDHAHN *et al.*, 2020) e o carregamento pode ser em *plug-in* ou pantógrafo, sendo o carregamento por *plug-in*, o mais usual e mais viável economicamente (BRASIL, 2022), porém possui tempo de recarga longo, em geral, de 3 a 6 horas, podendo chegar até a 8 horas para atingir a carga completa (RANDHAHN *et al.*, 2020), diminuindo o tempo de operação e manutenção. Comumente os veículos são carregados à noite ou de madrugada, no sistema *plug-in*, quando a energia é mais barata. Neste sistema de recarga, para os veículos que possuem maior autonomia durante o dia, as baterias costumam ser maiores e pesadas para garantir a autonomia durante o dia, sendo um ponto negativo, por proporcionarem menos espaço para passageiros e consumir mais energia por quilômetro rodado (BRASIL, 2022).

Já a recarga por pantógrafos, Figura 2, vem se tornando popular nos EUA e na Europa, e a vantagem é possuir um carregamento bem mais rápido, em torno de 4 a 6 minutos nos pontos de parada (DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2015), apenas para ampliar a autonomia e permitir ao veículo chegar até o próximo pantógrafo. Basicamente, esta tecnologia consiste no veículo parar sob ou próximo a um ponto de carregamento, que se conecta à parte superior ou à lateral do veículo, fornecendo assim, energia.

Figura 2 – Ônibus sendo carregado por pantógrafo



Fonte: Diário do Transporte, 2015

O carregamento por pantógrafos, permite menores baterias, mais espaços para passageiros e por consequência menores custo de aquisição dos ônibus, já que as baterias compõem grande parte do valor total dos ônibus. Entretanto, por possuírem baterias menores,

possuem também menos autonomia, o suficiente para chegar ao próximo ponto de parada, sendo assim, é necessário recargas durante toda a operação ao longo do dia.

O carregamento indutivo fornece uma potência entre 50 kW a 200 kW, geralmente obtidos a partir de pontos de carregamento localizados no solo (BELEN, 2018). A recarga indutiva mais comum é a recarga sem fio, onde a energia é transmitida por indução de uma bobina enterrada no solo a uma bobina de captação acoplada no veículo (BRASIL, 2022). A vantagem é que o veículo não precisa de contato direto com a rede elétrica, como na recarga condutiva, sendo que são carregados com mais frequência e a infraestrutura causa menos impacto visual. Como desvantagem, esta tecnologia é a mais cara de ser implantada, além de dificuldades em manutenções ou em substituições (VEEDER, 2019). Este sistema já é comumente usado em veículos sobre trilhos.

Em resumo, a tecnologia por *plug-in* possui a vantagem de ser mais viável economicamente, por apresentar menores custos de infraestrutura e manutenção, além de apresentar maior autonomia, porém o custo do conjunto de bateria acaba sendo elevado. Em contrapartida, a tecnologia de carregamento por pantógrafos e sem fio apresentam menor custos com o conjunto da bateria, porém altos custos com infraestrutura e menor autonomia dos veículos. Na Tabela 4 é feito o resumo comparativo entre os sistemas de recarga.

Tabela 4 – Quadro Resumo dos Sistemas de Recarga

Sistemas de Recarga	Recarga Condutiva		Recarga Indutiva
	<i>Plug-in</i>	Pantógrafos	Sem Fio
Infraestrutura e Manutenção	Custo Baixo	Custo Médio	Custo Elevado
Bateria	Custo Elevado	Custo Baixo	Custo Baixo
Autonomia	Alta	Baixa	Baixa

Fonte: Adaptado Brasil, 2022.

As estratégias de recarga utilizadas normalmente podem ser dos seguintes tipos: recarga na garagem, recarga de oportunidade e recarga mista (BRASIL, 2022). As recargas na garagem comumente são noturnas por *plug-in* e é recomendado que as garagens sejam próximas do itinerário de operação para redução da quilometragem morta, percurso percorrido para sair e chegar à garagem.

Na recarga de oportunidade, os veículos são carregados ao longo do percurso, podendo ser em terminais ou em pontos de ônibus. Esta estratégia consiste em carregamentos

curtos, apenas para dar autonomia para o veículo chegar ao próximo ponto de carregamento, sendo utilizados os pantógrafos nestes casos.

A estratégia de carregamento depende de cada projeto e muitas das vezes para ser viável economicamente e tecnicamente, é necessário a combinação de ambas estratégias de carregamento, na garagem e de oportunidade. Tendo em vista isto, surge a estratégia mista, com carregamentos noturnos na garagem por *plug-in* e carregamentos auxiliares diurnos por pantógrafos.

2.4 Estado da Arte

Como o sistema de ônibus elétrico possui limitações quanto a autonomia da bateria e ao tempo de recarga, isso levou a novas pesquisas para identificar locais ideais para a construção de estações de carregamento. Uslu e Kaya (2021) propuseram um modelo matemático misto inteiro-linear para decisões relativas à localização e a capacidade das estações de carregamento de ônibus elétricos e aplicaram seu modelo para um estudo de caso para redes de ônibus intermunicipais na Turquia, usando dados reais das empresas de ônibus. O objetivo deste estudo foi reduzir os custos gerais de investimento e os tempos de espera nas estações de carregamento, usando a teoria das filas para desenvolver o modelo.

Wang *et al.* (2017) também propuseram um modelo linear inteiro misto para determinar o local de carregamento e a capacidade de estações de carregamento de ônibus elétricos em redes de transporte público. O modelo é demonstrado usando uma rede de trânsito do mundo real baseada em Davis, Califórnia e, diferentemente de Uslu e Kaya (2021), eles focaram na programação ótima de recarga dos ônibus elétricos para determinar o tempo de carregamento de cada ônibus nas estações de carregamento.

Há também estudos que usam uma abordagem de análise de decisão multicritério (MCDA) para encontrar as melhores localizações das estações de carregamento. Esses estudos podem avaliar os locais de carregamento a partir de uma perspectiva de sustentabilidade usando diferentes critérios qualitativos e quantitativos. Erbas *et al.* (2018) aplicaram um método MCDA baseado em SIG para determinar a localização das estações de carregamento em Ancara (capital da Turquia). Para tanto, utilizaram-se do processo de hierarquia analítica difusa (AHP), com 15 critérios de diferentes perspectivas, e a técnica de preferência de ordem por similaridade com a solução ideal (TOPSIS). Diferentemente deste trabalho, Erbas *et al.* (2018) buscaram utilizar análises multicritérios, e o método AHP, para a determinação da localização das estações de carregamento, ao invés de explorar a priorização das rotas.

Emami *et al.* (2020) também usaram uma abordagem MCDA com 14 critérios baseada em SIG, mas em Twin Cities, Minnesota, EUA, para determinar as linhas de ônibus mais adequadas para a conversão do sistema a diesel existente em um sistema de ônibus elétrico. Eles também consideraram a possibilidade de a infraestrutura de carregamento ser nos terminais de ônibus, semelhante a este trabalho. Assim como Erbas *et al.* (2018), Emami *et al.* (2020) utilizaram AHP e TOPSIS para determinarem os pesos dos critérios e a classificação das rotas, respectivamente. Eles apresentam as 10 principais rotas de ônibus em diferentes cenários. Na Tabela 5 é feita uma comparação entre os artigos da literatura com o estudo proposto neste trabalho.

Tabela 5 – Comparação entre os artigos

Referências	Detalhe do Estudo	Solução Metodológica	Tipo de Aplicação
Uslu e Kaya (2021)	Localização e capacidade das estações de carregamento de ônibus elétricos a fim de reduzir os custos gerais de investimento e os tempos de espera nas estações de carregamento.	Modelo misto inteiro-linear Teoria das filas	Estudo de caso para ônibus intermunicipais na Turquia
Wang <i>et al.</i> (2017)	Localização e capacidade de estações de carregamento com programação ótima de recarga dos ônibus.	Modelo linear inteiro misto	Estudo de caso em Davis, Califórnia
Erbas <i>et al.</i> (2018)	Avaliação dos locais das estações de carregamento em termos de critérios ambientais/geográficos, econômicos e de urbanidade associados com um total de 15 subcritérios.	SIG AHP TOPSIS	Estudo de caso em Ancara (capital da Turquia)
Emami <i>et al.</i> (2020)	Priorização de rotas de ônibus considerando características das rotas e dos terminais associados com um total de 14 subcritérios.	SIG AHP TOPSIS	Estudo de caso em Twin Cities, Minnesota, EUA
Estudo Proposto	Priorização de rotas de ônibus considerando aspectos ambientais/geográficos e operacionais associados com um total de 10 subcritérios.	SIG MACBETH TOPSIS	Estudo de caso em Fortaleza, Ceará, Brasil

Fonte: Autor

2.5 SIG e Análise Espacial

Informações geográficas, como onde na superfície da Terra algo está ou o que está em um local, sempre fizeram parte dos problemas cotidianos da civilização. Com o advento da tecnologia e a invenção de computadores, a forma de gerenciar processos e obter dados mais rapidamente mudou. Com isso surge o SIG ou do inglês *GIS (Geographic Information System)*,

que lida com dados gráficos e não gráficos (alfanuméricos) com ênfase em análises espaciais e modelagens de superfícies.

O SIG pode ser tanto uma aplicação real, com metodologia e recursos humanos, com equipamentos, dados e *softwares*, como pode ser um programa de computador vendido ou fornecido de outra forma pelo desenvolvedor do programa. Aqui pode-se citar o programa usado neste trabalho, o QGis, *software* de sistema de informações geográficas gratuito, de código aberto e multiplataforma que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados.

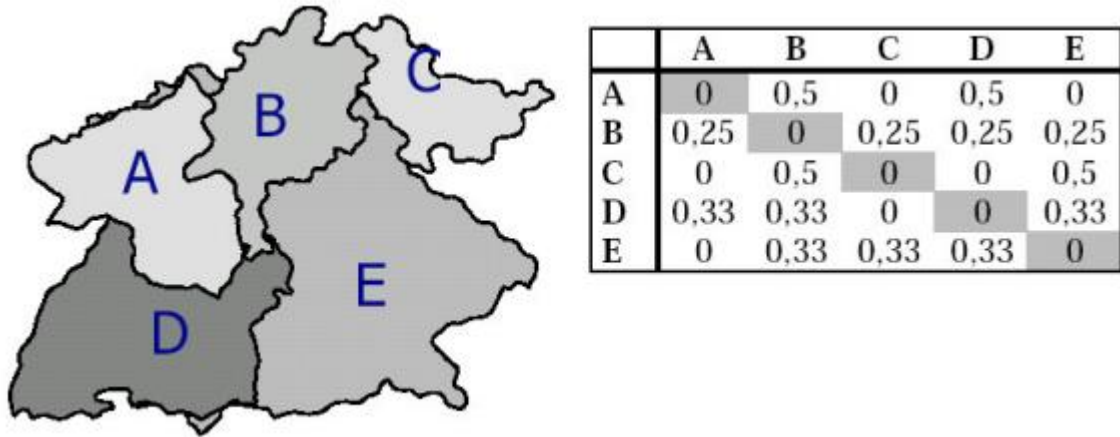
Segundo Aronoff (1989), o SIG pode ser definido como um conjunto de procedimentos, sejam manuais ou computacionais, para armazenar e manipular dados georreferenciados. Burrough (1986) definiu o termo SIG como um poderoso conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real. Cowen (1988) afirmou ainda que é um sistema de apoio à decisão que integra dados de referência espacial em um ambiente de respostas a problemas. Davis Junior (2000) define o termo SIG como uma característica de um sistema de informação que possibilita o acesso à georreferenciamento, associação ou não com bancos de dados.

O SIG permite entender a distribuição espacial de dados de fenômenos que ocorrem no espaço a partir de bancos de dados geograficamente baseados, mas além dessa percepção visual da distribuição espacial do problema, é útil traduzir os padrões existentes com considerações objetivas e mensuráveis através da análise espacial de dados geográficos (DRUCK *et al.*, 2004). A análise espacial concentra-se na medição de propriedades e relações, levando em conta a localização espacial dos fenômenos. A dependência espacial pode ser medida de diferentes formas, a próxima subseção irá falar melhor de uma das estatísticas mais difundidas para isso, o índice de Moran.

2.5.1 Índice de Moran

As medidas de autocorrelação espacial procuram lidar simultaneamente com similaridades na localização dos objetos espaciais e de seus atributos, podendo ter uma autocorrelação positiva, negativa ou uma ausência de autocorrelação (DRUCK *et al.*, 2004). Porém para definição dessas medidas de dependência espacial, é necessário a definição da vizinhança W adotada, na Figura 3 é ilustrado um exemplo de matriz de proximidade ou vizinhança espacial já normalizada, onde cada elemento w_{ij} da matriz representa uma medida de proximidade entre as áreas A, B, C, D e E.

Figura 3 – Matriz de proximidade Normalizada



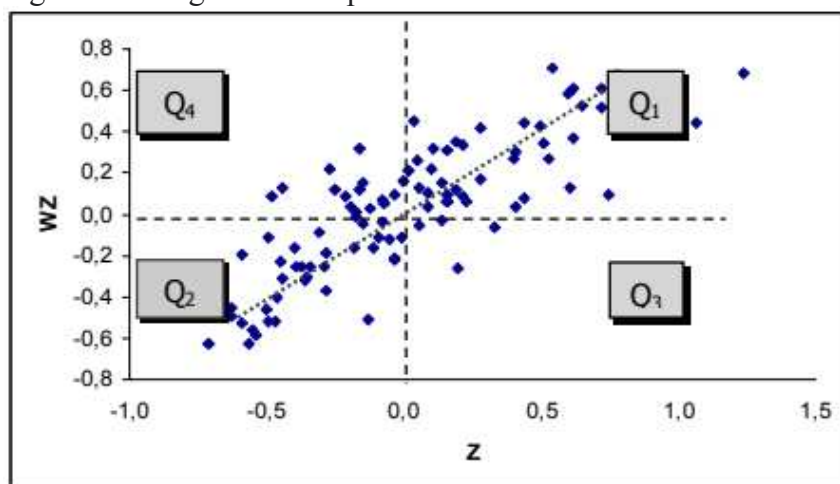
Fonte: DRUCK *et al*, 2004.

O índice de Moran mede a autocorrelação espacial a partir do produto dos desvios em relação à média. Na Equação (1) é apresentado o Índice Global de Moran, considerando apenas os vizinhos de primeira ordem, onde n é a quantidade de feições, z_i é o valor do atributo e \bar{z} o valor médio e w_{ij} os valores da matriz de proximidade.

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (1)$$

A dependência espacial pode ser melhor visualizada no diagrama de espalhamento de Moran, permitindo analisar o comportamento da variabilidade espacial. Na Figura 4 é mostrado um exemplo desse diagrama, onde os quadrantes Q1 e Q2 indicam correlação espacial positiva, onde os vizinhos apresentam valores semelhantes, já os quadrantes Q3 e Q4 indicam associação espacial negativa, onde os vizinhos não apresentam valores semelhantes. O índice de Moran pode ser refletido pela inclinação da reta ou coeficiente angular da regressão linear do diagrama.

Figura 4 – Diagrama de Espalhamento de Moran



Fonte: DRUCK *et al* (2004)

Muitas vezes é necessário examinar com mais detalhes os padrões espaciais quando há grandes áreas e o índice global não represente bem a associação espacial para todos os conjuntos de dados, para isso é necessário a aplicação dos indicadores locais, onde são associados às diferentes localizações de uma variável distribuída espacialmente, sendo assim, possível a identificação de agrupamentos (DRUCK *et al.*, 2004).

2.6 Análise Multicritério e Tomada de Decisão

No dia a dia das pessoas, muitas vezes é preciso tomar decisões sempre que há mais de uma alternativa ou opção, seja ela rotineira, como escolher o que fazer para sair, ou decisões mais difíceis de tomar, como em qual escola seu filho será matriculado. Em todos casos, sempre que possível, o decisor quer escolher a melhor alternativa, porém isto nem sempre é tão simples.

Um dos aspectos da tomada de decisão é a subjetividade, para um mesmo problema, cada decisor provavelmente optaria por alternativas distintas, pois cada um terá suas próprias preferências. A análise multicritério (AMC) surge a partir desta necessidade de analisar critérios pessoais de preferência (JUNIOR, 2006).

Miranda (2010) define AMC como um método, ou conjunto de métodos, que permite fazer uma escolha entre alternativas levando em conta vários critérios. Para Lopes (2015), a AMC permite uma análise simultânea de vários aspectos que influenciam diretamente no resultado final, conflitantes ou não.

A próxima subseção irá discutir um pouco do método de AMC utilizado neste trabalho, o MACBETH.

2.6.1 MACBETH

O MACBETH “*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*” é um método de tomada de decisão desenvolvido na década de 90 por Carlos A. Bana e Costa e J. C. Vansnick (SCHMIDT, 1995). O método se difere de outros MDCA por basear na diferença de atratividade para ponderar os critérios e avaliar as opções em julgamentos qualitativos (BANA e COSTA *et al.*, 2013). O objetivo do método é transformar escalas ordinais em escalas cardinais a partir de juízos absolutos sobre essas diferenças de atratividade entre alternativas, na Tabela 6 é apresentada esta escala.

Tabela 6 – Escala MACBETH

Escala Semântica	
0	Nula
1	Muito Fraca
2	Fraca
3	Moderada
4	Forte
5	Muito Forte
6	Extrema

Fonte: Adaptado BANA e COSTA *et al* (2013)

Há duas fases importantes neste método, a estruturação e a avaliação, em resumo, na estruturação são definidas os critérios ou pontos de vista fundamentais (PVF's) e na avaliação atribuída pontuação para atratividade de cada opção e ponderação para os PVF's. Na Figura 5 é apresentada as fases do método para o apoio à decisão segundo Bana e Costa (2013).

Figura 5 – Fases do processo MACBETH de apoio multicritério à decisão.



Fonte: Bana e Costa *et al* (2013).

2.7 TOPSIS

Desenvolvido em 1981, por Ching-Lai Hwang e Yoon (HWANG E YOON, 1981), o TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) é uma técnica ou algoritmo de Apoio Multicritério à Decisão (AMD) com o intuito de ordenar as alternativas baseado na similaridade das mesmas com a solução ideal, isto é, a alternativa escolhida possui a menor distância euclidiana da solução ideal positiva e deve ter a maior distância da solução ideal negativa.

O TOPSIS avalia a matriz de decisão com todas alternativas viáveis associadas a critérios ou atributos. O algoritmo prevê 6 etapas a saber (HWANG e YOON, 1981):

- 1) Construção da Matriz de decisão/avaliação $(x_{ij})_{m \times n}$, composta por m alternativas e n critérios;
- 2) Construção da Matriz normalizada $R = (r_{ij})_{m \times n}$, Equação (2), e ponderada $T = (t_{ij})_{m \times n}$, Equação (3);

Onde a normalização segue o método da raiz da soma dos quadrados e a ponderação de acordo com o peso w_j atribuído para cada critério no método MACBETH.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n. \quad (2)$$

$$t_{ij} = r_{ij}w_j \quad (3)$$

- 3) Definição da solução ideal A^+ e ideal negativa A^- , Equações (4) e (5), respectivamente;

$$A^+ = \{t_1^+, t_2^+, t_3^+, \dots, t_n^+, \} \quad (4)$$

$$A^- = \{t_1^-, t_2^-, t_3^-, \dots, t_n^-, \} \quad (5)$$

- 4) Distância euclidiana entre as alternativas e a solução ideal, dm (distância a A^+), Equação (6), e dp (distância a A^-), Equação (7);

$$dm = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_j^+)^2} \quad (6)$$

$$dp = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_j^-)^2} \quad (7)$$

- 5) Cálculo da medida de similaridade S , Equação (8);

$$S = \frac{dp}{(dm+dp)}, \quad 0 < S < 1 \quad (8)$$

- 6) Ordenação das alternativas.

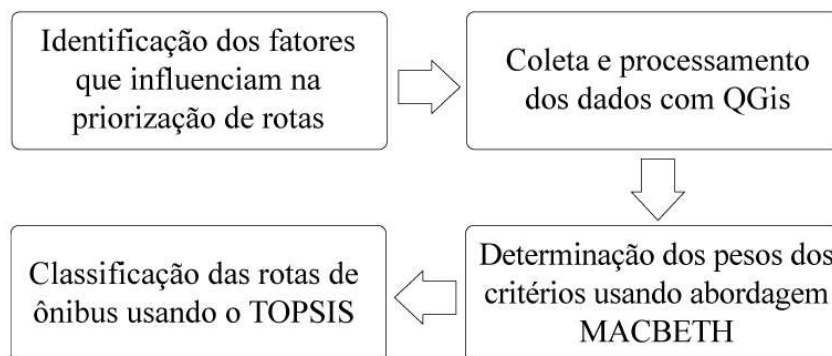
Ordena-se as alternativas de forma decrescente a partir dos valores de similaridade S , sendo os mais próximos de 1, os preferíveis, e os mais próximos a 0, os mais distantes da alternativa ideal.

3 METODOLOGIA

Para priorizar as rotas de ônibus para eletrificação é necessário definir melhor o problema e criar premissas simplificadoras. Este trabalho aborda um caso para eletrificação de um número limitado de linhas de ônibus na rede urbana do município de Fortaleza, escolha que depende diretamente da infraestrutura de carregamento ao longo das linhas de ônibus e do tipo de veículo empregado. Esta é a fase da **contextualização** de acordo com Bana e Costa *et al.* (2013). Por este motivo, para simplificar essa interdependência, este trabalho assume que os veículos adotados serão elétricos à bateria, com estratégia de recarga mista, e que as estações de carregamento serão implantadas em terminais e nas garagens de ônibus, pois será considerado que o veículo inicia sua viagem partindo do ponto de origem totalmente carregado.

Neste estudo, para a fase de **estruturação** (BANA e COSTA *et al.*, 2013), foi levado em consideração os atributos de avaliação (critérios ou PVF's) adotados na literatura (ERBAS *et al.*, 2018 e ERMAMI *et al.*, 2020) com adaptações para o estudo de caso em Fortaleza, com dados *General Transit Feed Specification* (GTFS) obtidos da Etufor (2018). Estes dados foram processados no *software* QGIS e serão melhor explicados na subseção 3.2. Compilação de dados e processamento no QGIS. Para a fase de desenvolvimento do modelo multicritério de **avaliação** (BANA e COSTA *et al.*, 2013), foi aplicado um questionário com os atores do sistema para atribuição de pontuação para atratividade de cada opção e ponderação para os critérios (PVF's). E por último foram classificadas as rotas, de acordo com a similaridade, na fase de **recomendação** (BANA e COSTA *et al.*, 2013), usando o TOPSIS. Na Figura 6 é apresentado o fluxograma para escolha de rotas adequadas para eletrificação.

Figura 6 – Etapas para a priorização das rotas de ônibus a diesel para eletrificação.



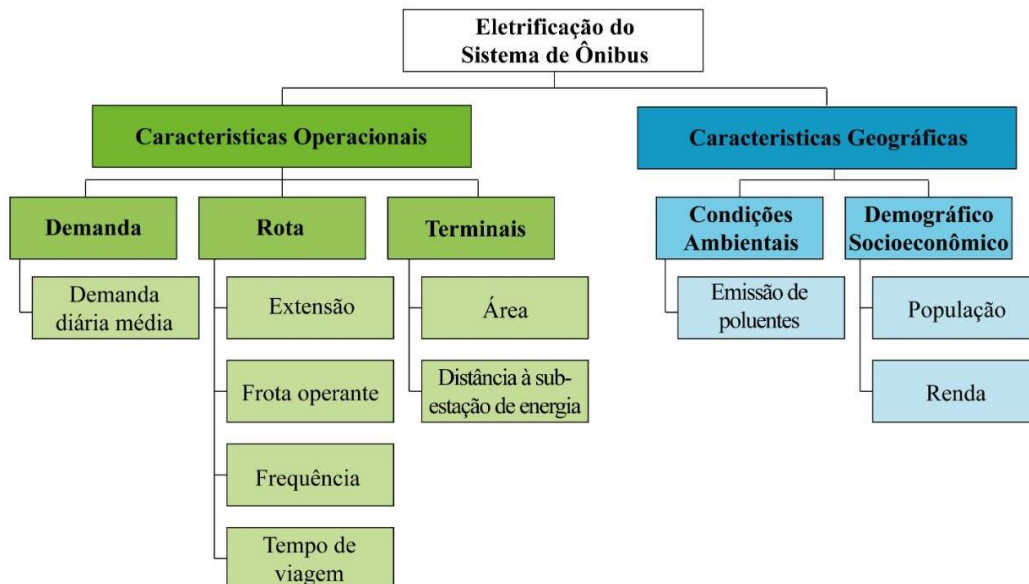
Fonte: Autor

3.1 Definição dos critérios

Nesta subseção, será apresentada uma breve introdução à estruturação e definição dos critérios, isto é, análise dos atributos de avaliação. Foram levantados alguns dos principais critérios que afetam a eletrificação do sistema de ônibus, de acordo com a literatura. Erbas *et al.* (2018) levaram em consideração aspectos ambientais/geográficos, econômicos e de urbanidade para seleção à localização das estações de carregamento. Já Ermami (2020), considerou as características das rotas e dos terminais para priorização de rotas para eletrificação.

Neste trabalho, os fatores foram divididos em duas categorias, sendo o primeiro, as características operacionais, refletindo as condições das rotas e dos terminais, já o segundo leva em consideração as características geográficas, refletindo os impactos ambientais e socioeconômicos das rotas de ônibus. Na Figura 7 é apresentado um modelo hierárquico criado pelo próprio autor para a seleção de rotas adequadas para transição para um sistema de ônibus elétrico.

Figura 7 – Critérios selecionados para a priorização das rotas para eletrificação.



Fonte: Autor

De acordo com a hierarquia proposta, esses dois grupos são compostos por cinco critérios e dez subcritérios para selecionar a rota de ônibus mais adequada. As próximas subseções descrevem e definem os critérios.

3.1.1 Características Operacionais

Demanda Diária Média: Número de passageiros que utilizam determinada rota ao longo do dia. Este critério é relevante, pois determina o nível de adeptos ao transporte público. Portanto, para oferecer a mais passageiros a oportunidade de usar o novo sistema de transporte, as rotas com maior demanda possuem maior prioridade de serem eletrificadas. Este trabalho levou em consideração apenas dados de bilhetagem para determinação da demanda diária média, ou seja, foi considerado apenas o volume de passageiros que passam pela catraca do coletivo, desconsiderando a demanda que embarca nos terminais.

Extensão das Rotas: Do ponto de vista econômico, rotas mais extensas requerem veículos elétricos com maior autonomia da bateria (distância total percorrida com uma recarga), impossibilitando que um ônibus elétrico com menor autonomia possa percorrer toda a rota antes de precisar realizar uma nova recarga. Normalmente o tempo de recarga dos ônibus elétricos a bateria é superior a 2 horas, inviabilizando a realização de muitas recargas ao longo do dia. Com base nisso, realizamos uma análise para verificar quais rotas poderiam exceder a autonomia da bateria, tendo como base o uso de 80% da bateria de um ônibus elétrico do modelo Byd, ou seja, considerando uma autonomia de 200 km (BYD, 2022) e como a maior rota possui 66,358 km, a autonomia da bateria não seria um problema para uma viagem completa de ida e volta. Considerou-se neste trabalho que rotas mais extensas e com maior número de viagens percorrem uma região maior do município, e com isso emitem maior quantidade de poluentes atmosféricos, assim, estas apresentam maior prioridade para eletrificação.

Frota Operante: Número de ônibus alocados para uma determinada rota. Quanto maior a demanda, maior a necessidade de veículos para atender uma linha, refletindo a importância desta rota no contexto urbano.

Frequência de Serviço: Número de viagens diárias atendidas por uma rota e pode ser conhecido como outro fator importante, por melhor atender à população. Portanto, escolher rotas de alta frequência pode trazer maior benefício e mais eficiência ao sistema de transporte público.

Tempo de viagem: Tempo necessário para um veículo completar uma viagem de ida e volta, isto é, realizar uma viagem completa e voltar ao ponto de origem, neste caso, o terminal rodoviário. Do mesmo modo, que a extensão das rotas, do ponto de vista econômico, as rotas com maior tempo de viagem exigem mais das baterias, porém este trabalho prioriza rotas mais demoradas, visto que estas acabam por emitir mais poluentes, e, portanto, devem ser priorizadas para a eletrificação. Além disso, considerando os aspectos de conforto aos usuários

do transporte coletivo, as viagens em um veículo elétrico são mais silenciosas e confortáveis aos passageiros do que as viagens em um ônibus a diesel.

Área dos terminais: Considerando que as estações de carregamento serão implantadas nos terminais rodoviários, e com o objetivo de minimizar custos, é preferível priorizar rotas que tenham como itinerário terminais de grande porte, pois haverá maior capacidade de carregamento.

Distância dos terminais às subestações de energia: Quanto mais próxima a estação de carregamento estiver da subestação de energia menor será o custo de construção e menor será a perda de energia para o fornecimento de eletricidade. Assim, as rotas conectadas aos terminais que possuem menor distância à subestação de energia são opções mais adequadas para escolher para a eletrificação tendo em vista o aspecto econômico.

3.1.2 Características Geográficas

Emissão de CO₂: O principal motivo para a eletrificação do sistema de ônibus é a redução das emissões de poluentes. Este critério, por motivos de simplificação, leva em consideração apenas a quantidade total de CO₂ produzido por linhas de ônibus em um dia da semana. Portanto, para reduzir as emissões em uma área urbana, a prioridade da eletrificação deve ser dada às rotas que produzem mais poluentes.

População: Para tornar o sistema mais viável, é preferível que as linhas de ônibus elétricos cubram áreas mais densamente povoadas, pois irá atender mais pessoas e potencialmente aumentar o número de usuários do transporte público, possibilitando maior eficiência energética e melhor custo-benefício.

Renda Média: Um dos princípios da PNMU é a equidade no acesso dos cidadãos ao transporte público coletivo com o objetivo de reduzir as desigualdades e promover a inclusão social. Portanto, rotas que cobrem uma maior população de baixa renda terão uma prioridade mais alta para seleção.

3.2 Compilação de dados e processamento no QGIS

Para efeito de simplificação, os subcritérios serão chamados apenas de critérios, desta seção em diante. Em seguida foram calculados os valores de cada critério utilizando o *software* QGIS. Na Tabela 7 é resumida a fonte e as ferramentas de análise de cada critério.

Tabela 7 – Informações sobre cada critério

Crítérios	Unidade	Fonte	Tipo de Análise
Demanda Diária	Passageiros por dia	Dados de Bilhetagem (ETUFOR, 2018)	Contagem
Extensão da Linha	Km	GTFS (ETUFOR, 2018)	Comprimento
Frota Operante	Nº da Frota	GTFS (ETUFOR, 2018)	<i>Group Stats</i>
Tempo de Viagem	Hora	GTFS (ETUFOR, 2018)	<i>Group Stats</i>
Frequência de Serviço	Nº de Viagens Diárias	GTFS (ETUFOR, 2018)	<i>Group Stats</i>
Área dos Terminais	m ²	<i>Google Earth</i>	Área
Distância do Terminal até a Subestação	Km	KML (CPE, s.d.) e <i>Google Earth</i>	Distância Euclidiana
Emissão de CO2	KgCO2/Km	CARVALHO (2011)	Estimativa
População Total	Hab.	SEFIN/PMF (2015)	Média Ponderada
Nível de Renda	R\$	SDE/IBGE (2010)	Média Ponderada

Fonte: Autor

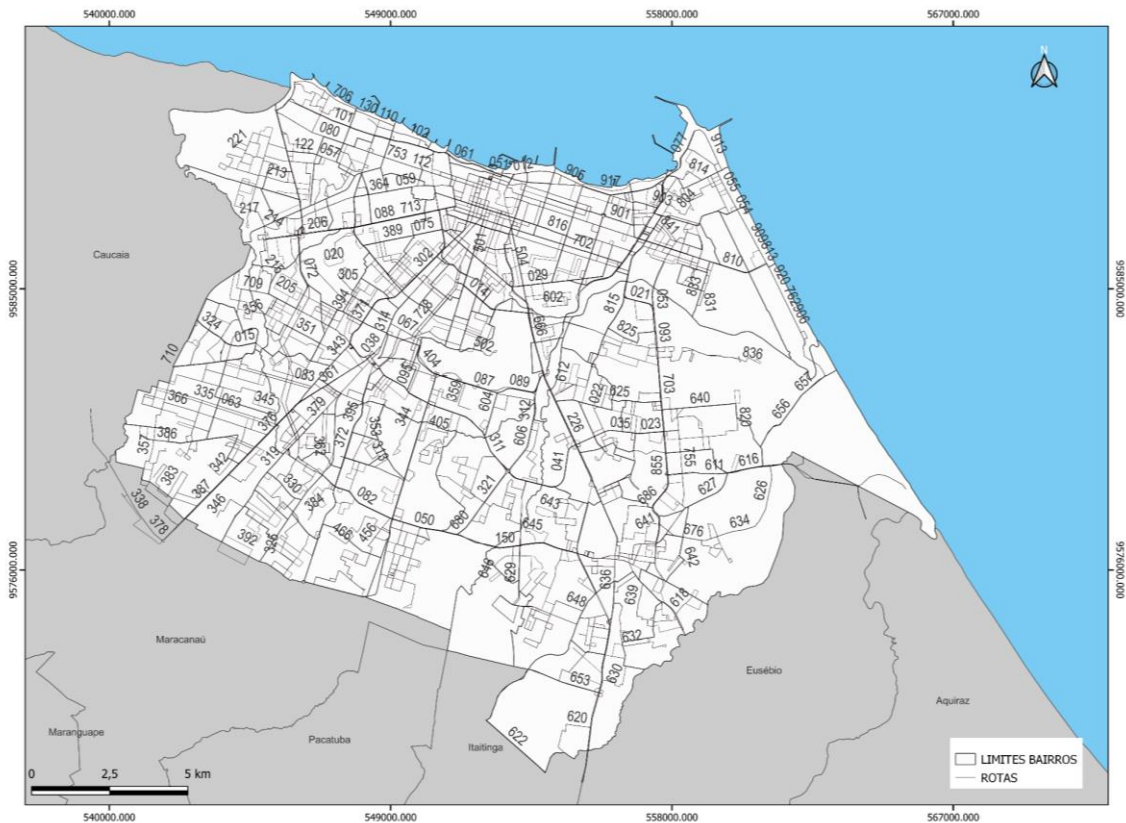
Os dados de bilhetagem e GTFS são ambos da Etufor (2018) ao longo do mês de novembro de 2018. Os dados socioeconômicos de população e renda foram baixados no site Fortaleza em Mapas (<https://mapas.fortaleza.ce.gov.br/#/>), serviço da Prefeitura Municipal de Fortaleza que disponibiliza para o cidadão mapas com informações geográficas produzidas pelos órgãos do município de Fortaleza e secretarias regionais. Todos os dados GTFS e de bilhetagem são arquivos de texto, sendo que apenas o arquivo *shape.txt* do GTFS tem as coordenadas das paradas de ônibus de todas as linhas. Utilizando este arquivo com as coordenadas das paradas de ônibus foi possível a criação dos traçados das rotas utilizando uma ferramenta de criação de vetor do QGIS chamada ‘pontos para linha’ e com a calculadora de campo foi possível determinar os comprimentos das rotas. A partir deste arquivo, foram obtidas 304 rotas para todo o município de Fortaleza. Na Figura 8 é mostrado o percurso das rotas no município de Fortaleza com os seus respectivos identificadores (ID). Percebe-se que há uma alta sobreposição das rotas de ônibus próximas à Avenida Beira Mar (próxima à costa), onde encontra-se as praias de Fortaleza.

As informações do GTFS contidas nos arquivos de textos dos critérios Tempo de Viagem, Frequência de Viagem, Frota de Ônibus e Bilhetagem foram unidas ao arquivo vetorial

das rotas por meio do nome da rota. Foi utilizado um *plugin* no QGIS, o *Group Stats*, para facilitar cálculo estatístico para grupos de feições em uma camada vetorial. Esta ferramenta foi utilizada, por exemplo, para calcular o valor total da ida e da volta de cada rota no que se refere à frequência de viagem, para somar os tempos entre paradas e determinar o tempo de viagem total da linha.

As áreas dos terminais foram delimitadas no *Google Earth* usando a ferramenta de criação de polígonos e exportados como *shapefile*. Já a distância do terminal à subestação foi determinada como sendo a menor distância em linha reta, ou distância euclidiana, usado uma ferramenta de análise vetorial do QGIS chamada ‘Distância ao ponto central mais próximo (ponto)’ entre os terminais e as subestações.

Figura 8 – Percurso das 304 rotas de ônibus.



Fonte: Autor

Com relação aos dados de população e renda (APÊNDICES J e K), como estes estavam representados por bairros, foi necessário fazer a média ponderada dos valores para cada rota, considerando o comprimento e o trajeto que as linhas realizam dentro de cada bairro. Para isto foi utilizada a ferramenta de interseção do QGIS entre as rotas de ônibus e os bairros.

Para a emissão de CO₂ assumiu-se que a emissão por quilômetro de todos os tipos de ônibus a diesel existentes é igual a 1,28 KgCO₂/Km (CARVALHO, 2011), e realizando uma estimativa com o número total de viagens (N^o Viagens) e a extensão da rota (km) de cada ônibus, foi estimado a quantidade de poluentes produzidos por cada trajeto, Equação (9).

$$1,28 * N^{\circ} \text{ de Viagens} * \text{Extensão da Rota} \quad (9)$$

Após a realização da análise no QGis, as informações de cada critério foram normalizadas de 0 a 1, visto que as unidades e os valores máximos e mínimos variaram muito para cada critério. Na segunda etapa descrita na Seção 2.7 TOPSIS explica como foi realizado a normalização dos valores (Equação 2).

3.3 Modelo de Hierarquia - MACBETH

Esta seção aborda o desenvolvimento para hierarquização, pontuação para atratividade de cada opção e ponderação dos critérios de acordo com a metodologia MACBETH.

Após escolha e processamento dos dados, foi utilizada a análise multicritério do MACBETH para determinação dos pesos de cada critério. Para determinar os pesos dos critérios, foi aplicado um questionário por meio do *google forms* (APÊNDICE A), durante o mês de maio de 2022, com os principais atores do sistema de ônibus, usuários do transporte público e profissionais da área, para saber a percepção dos mesmos em relação ao grau de importância ou relevância de cada critério. O formulário tinha dois objetivos, identificar o nível de relevância dos critérios e a atratividade entre um critério e outro. Para isto, os critérios foram categorizados de 1 a 10, com 1 sendo o mais relevante e 10 menos relevante. Para identificar o nível de relevância dos critérios foi usada a média ponderada do inverso da categoria (Equação 10), onde x_i é o número de respostas na categoria i , com $i = 1, 2, 3, \dots, 10$.

$$m_{ponderada} = (x_1 \frac{1}{1} + x_2 \frac{1}{2} + x_3 \frac{1}{3} + \dots + x_i \frac{1}{i}) / \sum_1^{10} \frac{1}{i} \quad (10)$$

Para a atratividade, a avaliação foi feita por meio de comparações paritárias usando a escala semântica do método, a fim de determinar o grau de atratividade de cada critério segundo os atores. Na Tabela 6 da seção 2.6.1 MACBETH é exemplificada a escala utilizada, onde 0 representa os itens possuem relevância equivalente e 6 os itens que são extremamente mais relevantes que o outro. Com base, nas comparações feitas no formulário foram criadas

duas matrizes de julgamentos, uma levando em consideração a média aritmética de todas as respostas, e outra, o valor mais frequente, moda. É importante destacar que a média ponderada foi utilizada para categorização dos critérios e para a geração da matriz de julgamento foi usada a média aritmética e a moda.

Estas duas matrizes foram rodadas no *software* M_MACBETH, na Figura 9 é mostrado um exemplo da matriz de julgamento com 5 critérios sendo executada no *software*. Quando os julgamentos são inseridos no *software*, ele verifica automaticamente a consistência e dá algumas soluções para resolver as inconsistências. A escala numérica resultante, ou os pesos de cada critério, é totalmente consistente com o julgamento de todos os tomadores de decisão.

Figura 9 – Matriz de Julgamentos no MACBETH.

	[N1]	[N2]	[N3]	[N4]	[N5]	[tudo inf.]
[N1]	nula	mt. fraca	moderada	mt. forte	extrema	positiva
[N2]		nula	fraca	forte	mt. forte	positiva
[N3]			nula	fraca	moderada	positiva
[N4]				nula	mt. fraca	positiva
[N5]					nula	positiva
[tudo inf.]						nula

Julgamentos consistentes

Fonte: Autor

Os pesos de cada critério, P , em ambos cenários, média aritmética e moda, foram comparados através da variação percentual e pontos percentuais entre os valores dos pesos de acordo com as equações 11 e 12. A ideia desta análise foi verificar quais critérios apresentaram pesos mais distintos, conforme a adoção da média ou moda das respostas do questionário.

$$\text{Variação Percentual} = \frac{P_{maior} - P_{menor}}{P_{menor}} \times 100 \quad (11)$$

$$\text{Ponto Percentual} = P_{maior} - P_{menor} \quad (12)$$

3.4 Classificação das Rotas com o TOPSIS

Com o auxílio do *software* Excel, as alternativas foram classificadas de acordo com sua semelhança com a solução ideal (TOPSIS). O procedimento seguiu o algoritmo descrito por Hwang e Yoon (1981), ver Equações (2) a (8). Por meio do processamento de dados em QGIS, uma matriz de decisão foi construída e normalizada utilizando 304 rotas (alternativas) e

10 critérios. A matriz de decisão foi ponderada de acordo com os pesos gerados pelo MACBETH.

Foram definidas soluções ideais positivas e negativas de acordo com os critérios máximo ou mínimo. Neste caso, apenas a distância do terminal à subestação e o critério de renda foram os critérios mínimos, ou seja, quanto menor o valor, melhor, e os demais foram critérios máximos. Finalmente, foram determinadas as distâncias de cada alternativa (rotas de ônibus) para as soluções ideias positivas (dm) e negativas (dp). O valor de similaridade foi determinado a partir dessas distâncias (dm e dp). As rotas foram classificadas em ordem decrescente de similaridade, de 1 a 0.

3.5 Análise de Autocorrelação Espacial

Os valores de similaridade das rotas foram incorporados à tabela de atributos das rotas de ônibus para gerar um mapa mostrando a variação espacial das rotas com maior ou menor prioridade. Para avaliar se existe uma autocorrelação espacial entre as rotas prioritárias, adotou-se o Índice de Moran. Este índice mostra o quanto o valor de similaridade de uma determinada rota está relacionado aos valores de seus vizinhos de primeira ordem. Como a análise foi feita considerando os vizinhos locais, optou-se por utilizar o Índice de Moran local, que faz parte dos índices LISA (*Local Indicators of Spatial Analysis*).

Como a autocorrelação espacial está relacionada a uma determinada vizinhança, o primeiro passo para calcular esse índice foi gerar uma matriz de proximidade espacial no *software* GeoDa, cujo critério de vizinhança foram quatro vizinhos na configuração da "rainha". Com base nos valores da matriz de proximidade, o Índice de Moran foi calculado considerando os valores de similaridade de cada rota e, a média dos valores de similaridade dos vizinhos, sendo atribuído um peso, conforme os valores da matriz de proximidade espacial (Equação 01).

3.6 Viabilidade Operacional das Rotas prioritárias para eletrificação

Para avaliar a viabilidade da substituição dos ônibus a diesel por elétricos para as 5 rotas prioritárias em ambos os cenários (moda e média), este trabalho considerou o modelo de ônibus elétrico BYD D9A 20.410 - Padron piso alto, com preço médio de R\$ 2 milhões de reais, chassi tubular para carrocerias de até 13 metros, 100% elétrico, com baixo custo de manutenção e até 250 km de autonomia, com bateria com capacidade de 324 kWh e carregamento de 2 a 5 horas (BYD, 2022). A autonomia do ônibus elétrico é a distância total que este consegue

percorrer com apenas uma recarga, sendo que este deve usar apenas 80% da carga da bateria, a fim de não a danificar, assim a autonomia real do modelo BYD D9A é de 200 km.

Primeiramente, analisou-se o número de recargas que cada ônibus precisaria fazer considerando o número de viagens realizadas por cada ônibus em cada rota diariamente e a autonomia da bateria. Para cada rota, dividiu-se o número de viagens total pela frota de ônibus, determinando assim o número de viagens feitas por cada ônibus. Com isso, determinou-se a frota necessária para atender o número total de viagens diárias de cada rota. Percebeu-se que para algumas rotas que a distância total percorrida em todas as viagens excedeu a autonomia da bateria, ou seja, seria necessário realizar uma nova recarga durante o dia. Como o tempo de recarga excede a 2 horas, seria inviável a recarga de toda a frota de uma vez, assim, foi proposto um sistema de otimização da recarga, onde otimiza a quantidade de viagens que um ônibus realiza ao longo do dia considerando a autonomia de viagens e minimiza a quantidade de ônibus que precisam ser recarregados. Neste sistema, parte da frota de cada rota será recarregada duas vezes durante o dia, uma na garagem e outra em determinado terminal, e a outra metade da frota só será recarregada uma vez na garagem.

É importante ressaltar que não foram avaliados os aspectos logísticos desta proposta, em termos da programação dos horários de recarga, os locais nos terminais para a implementação das estações de carregamento e o número de carregadores em cada estação de carregamento. Também não foi avaliado os horários de ociosidade dos ônibus, a fim de determinar se estes poderão ficar estacionados mais de 2 horas recarregando durante o dia. Se todos os ônibus estiverem em operação durante o dia todo ou se o tempo de ociosidade for inferior a 2 horas, seria necessário aumentar a frota de ônibus para atender ao número de viagens diária de determinada rota.

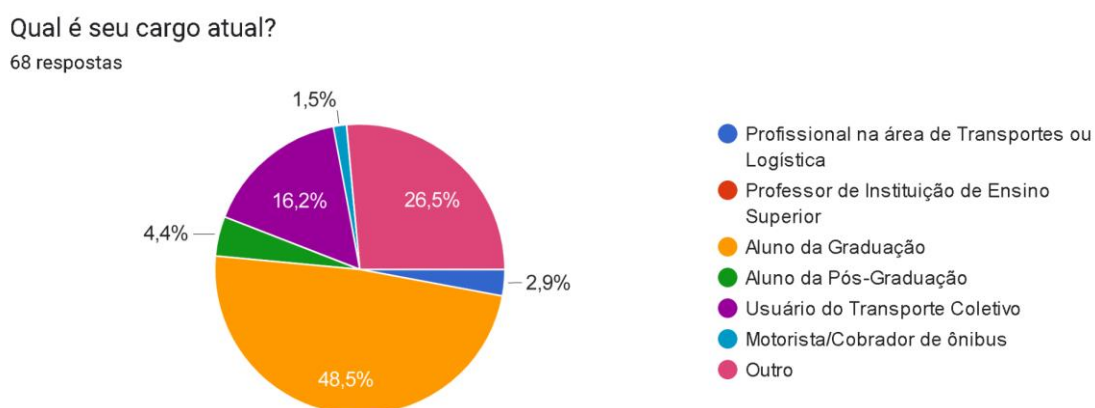
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste Capítulo é apresentado o julgamento dos agentes e atores juntamente com a análise MACBETH e TOPSIS para escolher as rotas de ônibus mais adequadas para eletrificação na cidade de Fortaleza, Ceará. Todos os mapas presentes nesta seção podem ser encontrados nos Apêndices.

4.1 Resultados do Questionário e MACBETH

O formulário contou com a colaboração de profissionais da área de transportes, alunos de graduação e pós-graduação e usuários do transporte coletivo, o Gráfico 1 mostra o percentual de cada grupo que respondeu ao formulário, ao total foram 68 respostas. Há um destaque para alunos da graduação, 48,5%, e não se pode descartar a hipótese que dentro do grupo dos alunos, há também usuários do transporte coletivo. Dentro dos 26,5% que responderam “outro” como cargo atual, se destacam prestadores de serviços terciários, tais como atendente, tosador, manicure, barbeiro, recepcionista, etc.

Gráfico 1 – Perfil dos agentes que participaram da pesquisa.

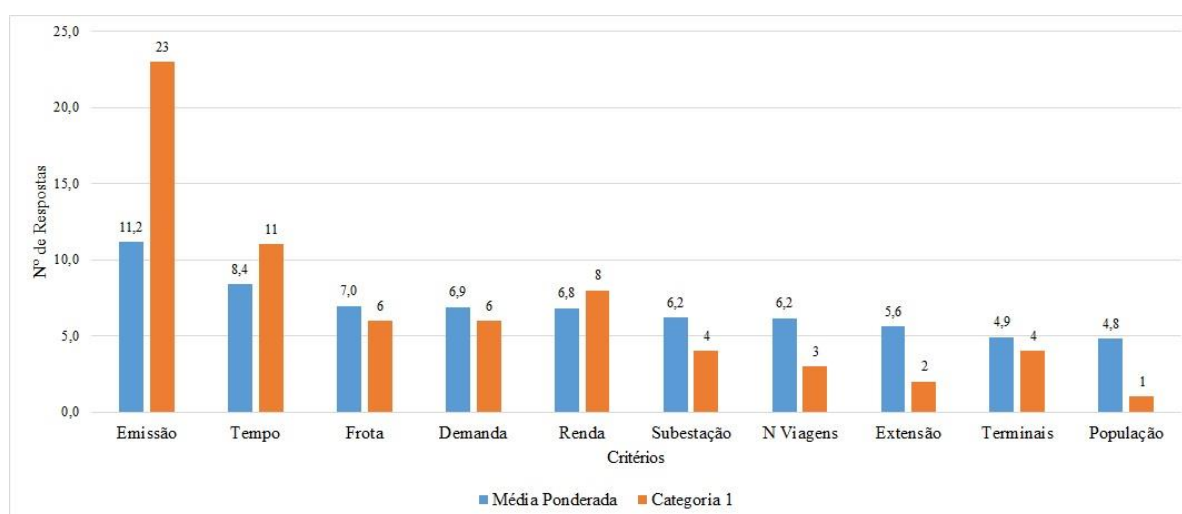


Fonte: Autor

Os 10 subcritérios da Figura 7 foram contemplados. No Gráfico 2 é mostrada a relevância dos critérios, sendo a média ponderada das respostas de todas as categorias (Equação 10), o gráfico também apresenta o número de respostas na categoria mais relevante para cada critério. O gráfico já apresenta os critérios em ordem decrescente de prioridade, da esquerda

para direita. Observa-se pouca variação nas respostas entre os critérios, sendo a emissão de CO2 o único mais expressivo. Isto indica uma alta divergência no que cada ator considera mais ou menos relevante. Para minimizar este problema, o ideal seria obter um maior número de respostas e aplicar o questionário com outros atores, como os motoristas e outros que trabalham na ETUFOR. A Tabela 8 mostra detalhadamente os valores absolutos obtidos dos critérios em cada categoria do formulário.

Gráfico 2 – Nível de Relevância dos Critérios.



Fonte: Autor

Tabela 8 – Resultados do Questionário relativos à Categorização dos Critérios

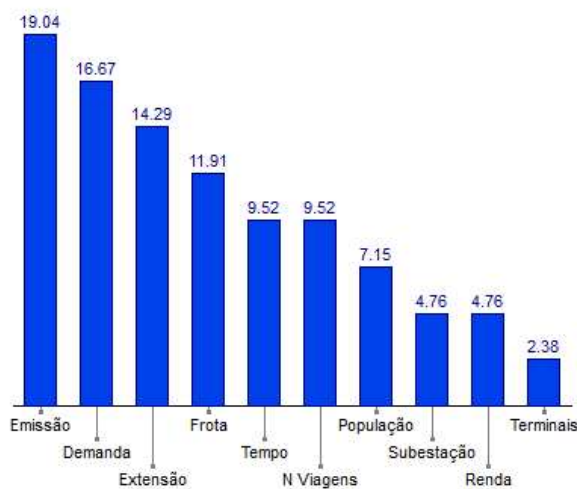
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Emissão de CO2	23	6	5	6	4	2	3	2	9	8
Tempo de Viagem	11	9	6	6	10	7	7	5	4	3
Frota Operante	6	8	10	7	6	9	4	8	8	2
Demanda da rota	6	8	7	8	10	7	8	4	4	6
Nível de Renda	8	6	6	4	6	8	8	3	6	13
Dist. Terminal a Subestação	4	7	9	7	9	4	8	10	3	7
Número de Viagem	3	9	9	9	2	11	9	6	7	3
Extensão da rota	2	7	7	9	8	9	8	8	6	4
Área dos Terminais	4	2	2	7	6	6	6	12	12	11
População	1	6	7	5	7	5	7	10	9	11

Fonte: Autor

É interessante notar que os primeiros critérios, os mais relevantes, receberam mais votos na categoria 1 do que na categoria 10, já os últimos, isso é o oposto, receberam mais votos na categoria menos relevante do que na categoria mais relevante (Tabela 8). Observa-se também que a Emissão de CO₂ foi o critério que foi considerado como o mais relevante na priorização de rotas, com 33,8% das respostas. Seguido deste critério temos o tempo de viagem, a frota de ônibus e a demanda da rota, com 16 e 8% das respostas, respectivamente. Para a categoria menos relevante (Categoria 10), o número de respostas foi maior para os critérios do Nível de Renda, População e Área dos Terminais. Pode-se concluir a partir dos resultados do questionário que o critério ambiental e os critérios operacionais foram considerados de maior relevância comparativamente aos critérios sociais.

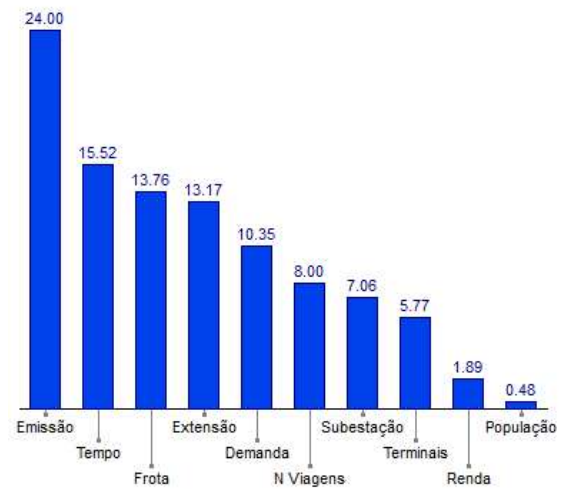
Após a identificação da relevância dos critérios do ponto de vista dos agentes, utilizou-se o MACBETH para analisar a consistência das respostas e qualificar o nível de comparação, ou atratividade, entre dois critérios em extremo, muito forte, forte, moderado, fraco, muito fraco ou nulo, de acordo com a Tabela 6. Além disso, o MACBETH foi utilizado para definir o peso entre cada critério, considerando tanto a média como a moda das respostas do formulário. Os Gráficos 03 e 04 mostram os resultados obtidos no *software* em que é possível verificar que o fator Emissão de CO₂ é o critério que mais influência na priorização das rotas de ônibus para eletrificação em ambos os casos (média e moda) segundo os resultados do questionário e na Tabela 9 é apresentada esta variação percentual e diferença de pontos percentuais entre os pesos em ambos cenários.

Gráfico 3 – Peso (%) - Média.



Fonte: Autor

Gráfico 4 – Peso (%) - Moda.



Fonte: Autor

Tabela 9 – Comparação entre os pesos dos Critérios

Critérios	Pesos (%) - Média	Pesos (%) - Moda	Variação Percentual	Ponto Percentual
Emissão de CO2	19,04	24,00	26,05%	4,96
Demanda da rota	16,67	10,35	61,06%	6,32
Extensão da Rota	14,29	13,17	8,50%	1,12
Frota Operante	11,91	13,76	15,53%	1,85
Número de Viagens	9,52	8,00	19,00%	1,52
Tempo de Viagem	9,52	15,52	63,03%	6,00
População Total	7,15	0,48	1389,58%	6,67
Dist. do Terminal a Subestação	4,76	7,06	48,32%	2,30
Nível de Renda	4,76	1,89	151,85%	2,87
Área dos Terminais	2,38	5,77	142,44%	3,39

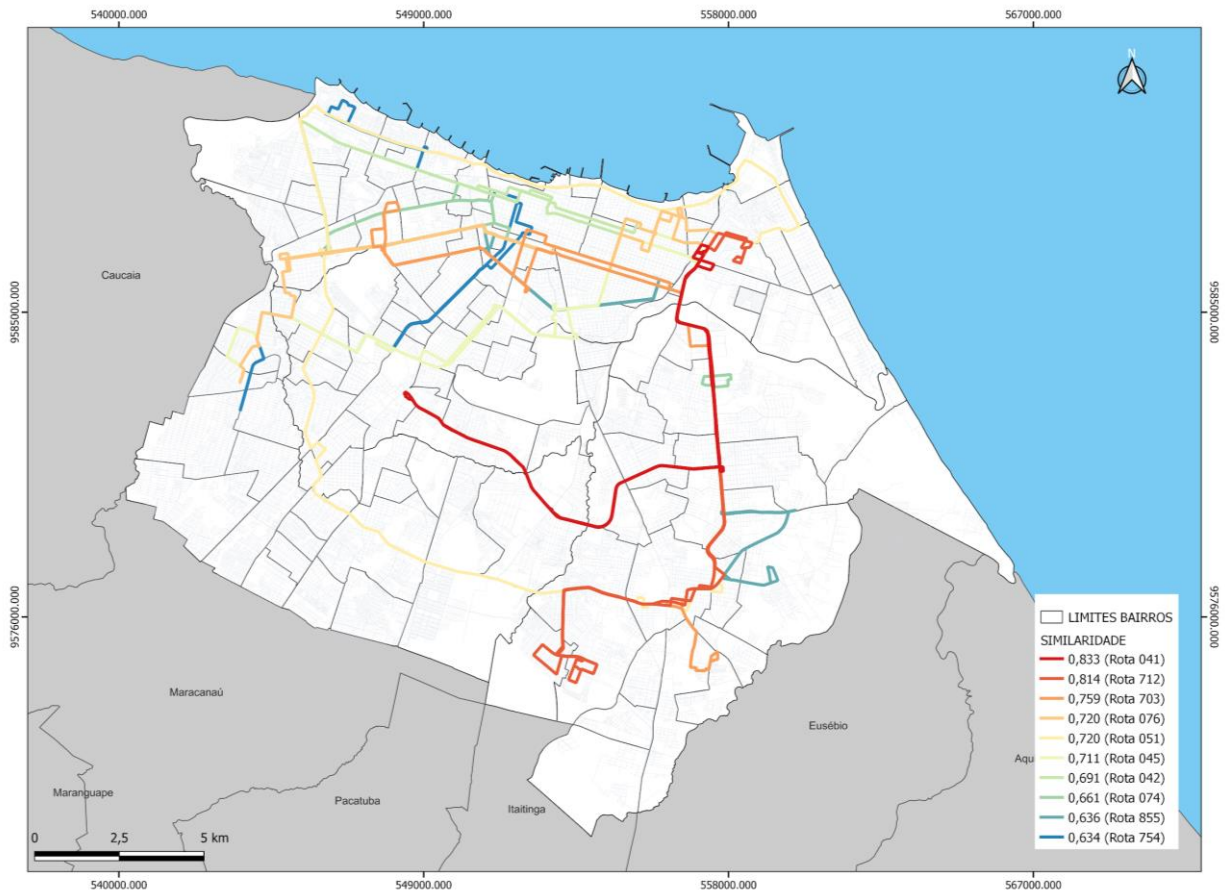
Fonte: Autor

Ao fazer uma comparação entre as diferenças dos pesos em ambos os cenários, média e moda, é possível notar que a maior diferença ocorreu no critério de população, seguido da demanda da rota e do tempo de viagem, com diferenças superiores a 6 pontos percentuais, (Tabela 9) e do nível de renda e área dos terminais, com variações percentuais acima de 100%. A extensão da rota foi o critério que menos apresentou diferença entre pontos e variação percentual, 1,12 e 8,50%, respectivamente. Considerando os pesos obtidos a partir das respostas mais frequentes, a diferença nos pesos entre cada subcritério foi maior do que ao adotar como referência os pesos baseados na média das respostas.

4.2 Priorização das Rotas de Ônibus (TOPSIS)

Com base nos pesos obtidos pelo método MACBETH e o método do TOPSIS, as rotas foram classificadas em diferentes níveis de prioridade. Nas Tabelas 10 e 11 são indicadas as 10 principais rotas de julgamentos com seus respectivos valores de similaridade, tanto pela média como pela moda das respostas do formulário. Já nas Figuras 10 e 11 são apresentados os mapas com a localização dessas rotas prioritárias e seus respectivos valores de similaridade.

Figura 10 – Mapa das Rotas Prioritárias - Média



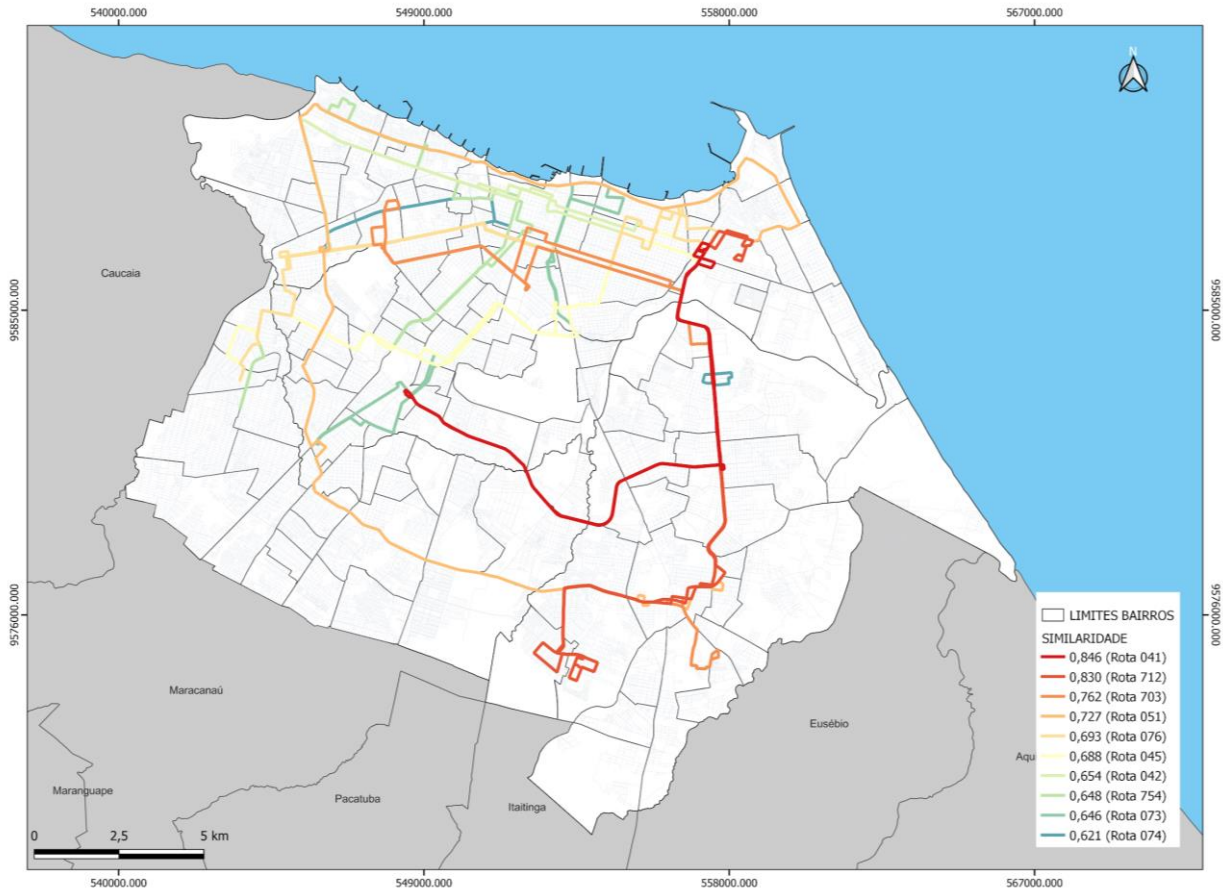
Fonte: Autor

Tabela 10 – Classificação TOPSIS - Média

Classificação	ID da Rota	Nome da Rota	Similaridade
1º	041	Parangaba/Oliveira Paiva/Papicu	0,833
2º	712	Cj Palmeiras/Papicu	0,814
3º	703	Paupina/Pici	0,759
4º	076	Cj Ceará/Aldeota	0,720
5º	051	Grande Circular I	0,720
6º	045	Cj Ceará/Papicu/Montese	0,711
7º	042	Antônio Bezerra/Francisco Sá/Papicu	0,691
8º	074	Antônio Bezerra/Unifor	0,661
9º	855	Bezerra de Menezes/Washington Soares	0,636
10º	754	Granja Lisboa/Goiabeiras	0,634

Fonte: Autor

Figura 11 – Mapa das Rotas Prioritárias - Moda



Fonte: Autor

Tabela 11 – Classificação TOPSIS - Moda

Classificação	ID da Rota	Nome da Rota	Similaridade
1º	041	Parangaba/Oliveira Paiva/Papicu	0,846
2º	712	Cj Palmeiras/Papicu	0,830
3º	703	Paupina/Pici	0,762
4º	051	Grande Circular I	0,727
5º	076	Cj Ceará/Aldeota	0,693
6º	045	Cj Ceará/Papicu/Montese	0,688
7º	042	Antônio Bezerra/Francisco Sá/Papicu	0,654
8º	754	Granja Lisboa/Goiabeiras	0,648
9º	073	Siqueira/Praia de Iracema	0,646
10º	074	Antônio Bezerra/Unifor	0,621

Fonte: Autor

Pode-se observar em ambas Tabelas que das rotas finais recomendadas, as 3 primeiras rotas, 041, 712 e 703 se destacaram por apresentarem valores de similaridade superiores a 0,75, o que significa que estas 3 rotas mais se aproximam do que seria a solução ideal positiva. A rota 041 - Parangaba/Oliveira Paiva/Papicu apresenta a maior demanda diária média, com 14.657 passageiros por dia, e a maior frota operante, com 30 veículos em operação diariamente, além de emitir 7,6 ton. CO₂/dia. Já a 712 - Conj. Palmeiras/Papicu apresenta a

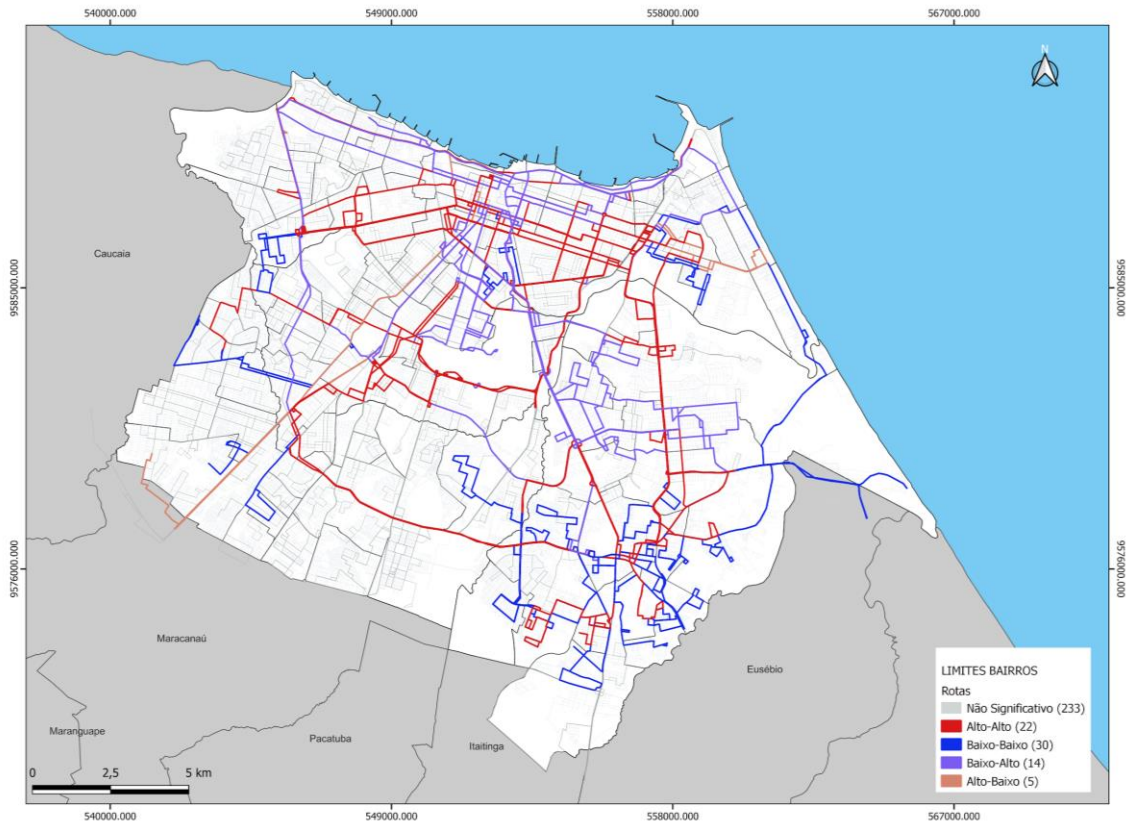
maior emissão de CO₂ dentre todas as rotas, com 8,5 ton. CO₂/dia, além de atender uma demanda de 11.589 passageiros diariamente. E por fim, a rota 703 - Paupina/Pici possui o segundo maior tempo de viagem, com 183 min, devido a ser uma das rotas mais extensas, com 56,3 Km, além disso emite 7,1 ton. CO₂/dia. A redução de emissão de CO₂ das 10 rotas prioritárias pelo cenário da média é de 62,8 ton. CO₂/dia e de 63,4 ton. CO₂/dia, no cenário da moda, em ambos os casos, há uma redução de 13% na emissão de dióxido de carbono diariamente com adoção da tecnologia de ônibus elétricos no setor de transporte público. As rotas prioritárias contribuem para reforçar o peso dos critérios ambientais e operacionais.

Vale destacar que dentre as rotas prioritárias, as rotas 703 - Paupina/Pici, 712 - Conj. Palmeiras/Papicu e 754 - Granja Lisboa/Goiabeiras não fazem integração com nenhum terminal rodoviário, isso se deve à pouca influência do critério área dos terminais em ambos os cenários, com pesos de 2,38% na média ou 5,77% na moda. Pode-se notar também que, em geral, o julgamento da média ou moda não altera muito a classificação das rotas. Resultados usando dois cenários diferentes mostram que a estrutura proposta pode ser interpretada como um modelo robusto, de modo que as mudanças nos pesos considerados não têm muito impacto na classificação da rota. No APÊNDICE B é possível consultar a classificação e os valores de similaridade das 304 rotas em ambos os cenários.

4.3 Índice de Moran

Nas Figuras 12 e 13 são apresentados os mapas de agrupamentos de ambos cenários, as rotas em vermelho (alto-alto) e azul (baixo-baixo) implicam que os valores de similaridade destas rotas têm valores semelhantes aos de seus vizinhos, indicando um aglomerado espacial com rotas de alta ou baixa prioridade para eletrificação. Já as classificações alto-baixo e baixo-alto indicam que os vizinhos não apresentam valores semelhantes de similaridade. E por fim, as rotas em cinza não apresentaram dependência espacial significativa, sendo 76,64% das rotas no cenário da média e 81,58% no cenário da moda, isto é, o cenário da moda apresentou dependência espacial menos significativa que a média.

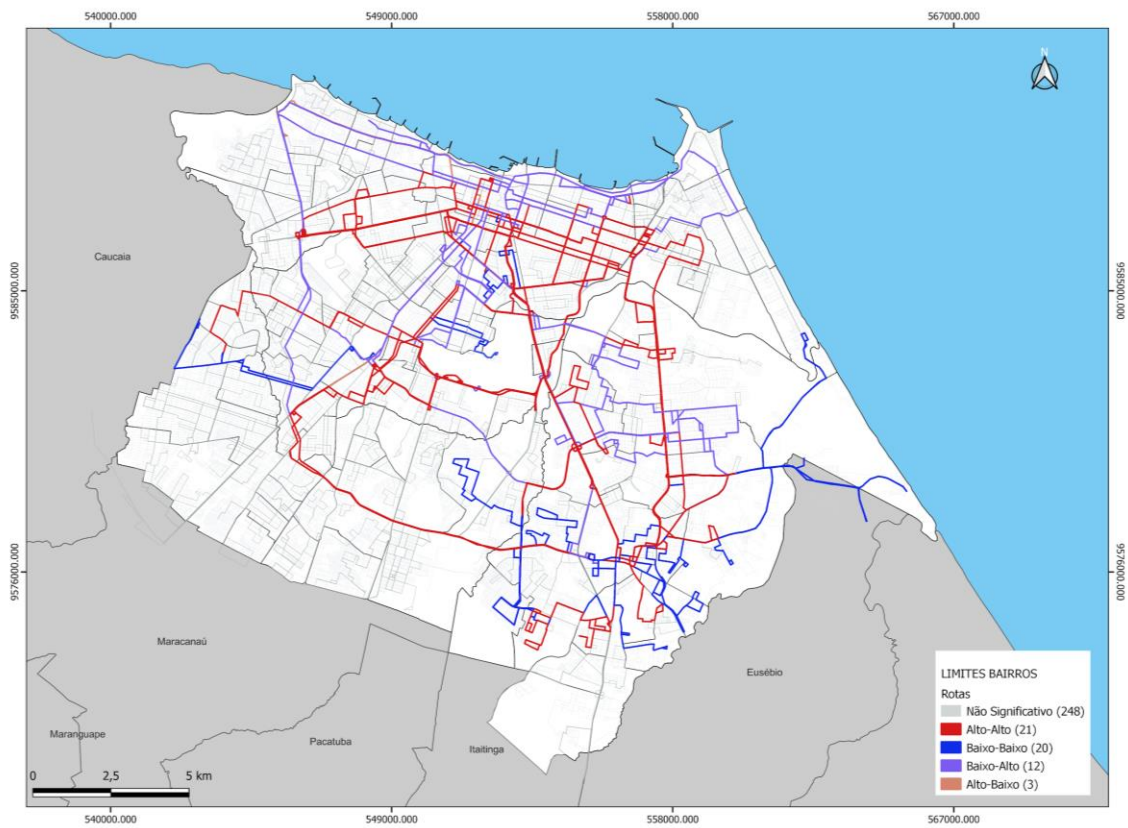
Figura 12 – Mapa de Agrupamento - Média



Fonte: Autor

Considerando os valores de similaridade derivados da média das respostas do questionário, apenas 7,24% e 9,87% de todas as rotas apresentaram autocorrelação espacial positiva e negativa com significância estatística, sendo este resultado corroborado pelo valor de correlação do Índice de Moran de 0,253 (Gráfico 5). Ou seja, de uma forma geral a maioria das rotas não apresenta agrupamentos significativos, com exceção de duas regiões do município, uma na região noroeste com alta prioridade para eletrificação e outra na região sudeste com baixa prioridade para eletrificação (Figura 12). É importante destacar que os bairros de alta prioridade apresentam uma maior quantidade de comércios, enquanto os bairros de baixa prioridade são predominantemente residenciais e com população de baixa renda (Figura 14).

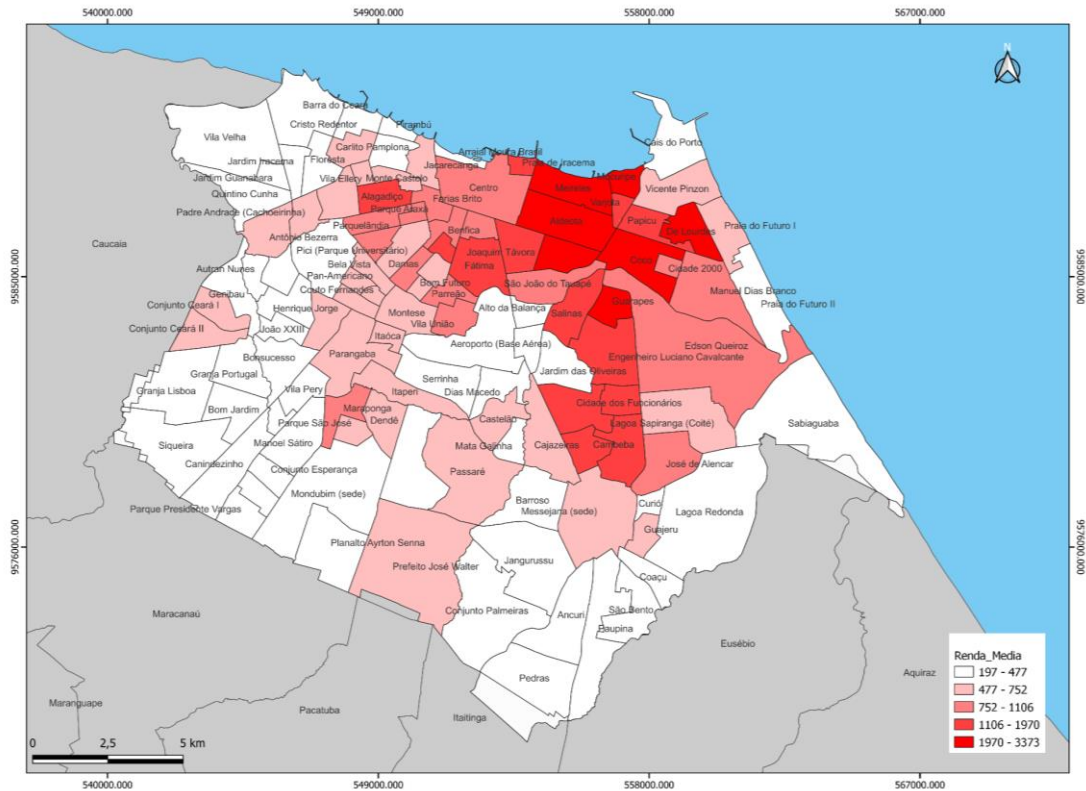
Figura 13 – Mapa de Agrupamento - Moda



Fonte: Autor

Independente de adotar a média ou moda das respostas, o resultado dos valores de similaridade da análise de autocorrelação espacial foi praticamente idêntico para as duas análises (Figuras 12 e 13). No caso da moda, o percentual de rotas com correlações significativas positivas (alto-alto) e negativas (baixo-baixo) foram de 6,91% e 6,58%, respectivamente (Figura 13). De qualquer forma, os padrões espaciais dos agrupamentos das Figuras 12 e 13 são semelhantes, ou seja, predominam-se rotas de alta priorização na região central e noroeste do município de Fortaleza, e rotas de baixa prioridade na região sudeste. Como o peso do subcritério renda foi o segundo menor em ambas as análises (média e moda), e a região sudeste apresenta uma população de menor renda (Figura 14), as rotas de ônibus que passam nestes bairros foram classificadas como de baixa prioridade para eletrificação. Se os pesos fossem alterados, dando prioridade aos critérios sociais ao invés dos operacionais, os resultados da priorização das rotas seriam diferentes.

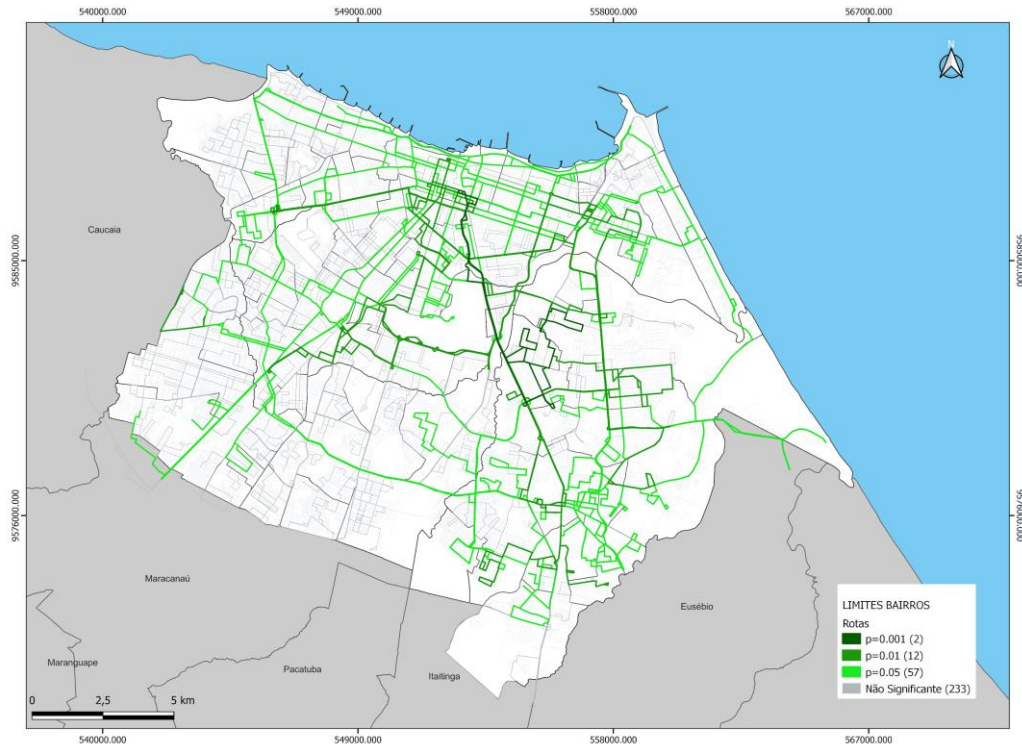
Figura 14 – Renda Média por Bairro



Fonte: Autor, adaptado IBGE 2010.

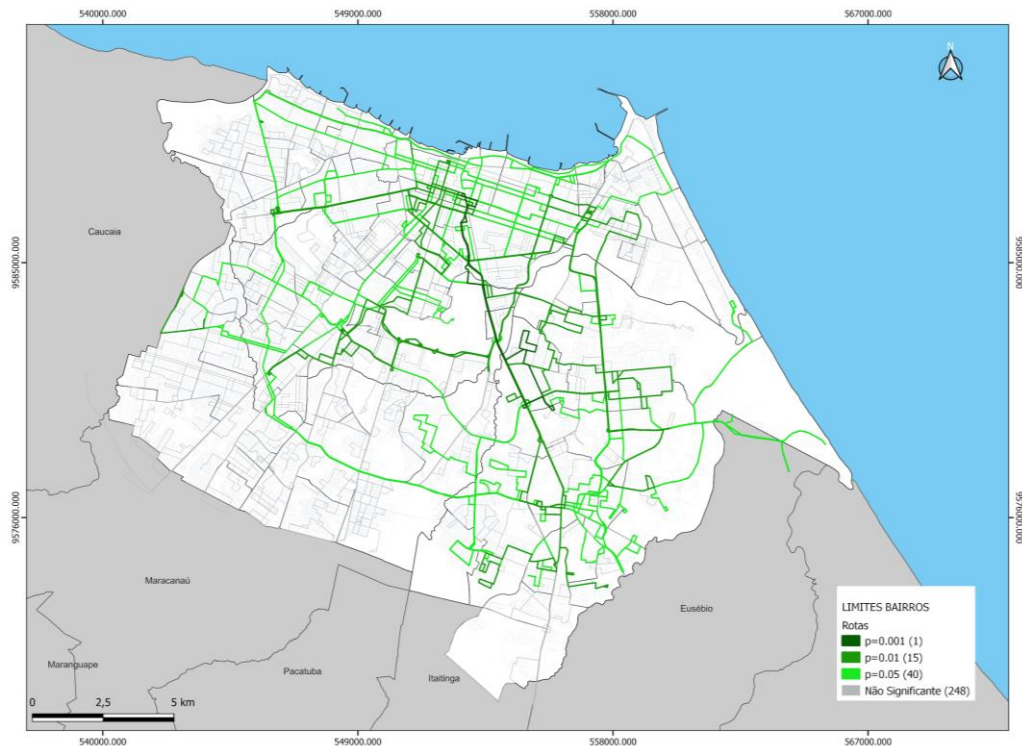
As Figuras 15 e 16 mostram a significância estatística ($p < 0,05$) para os agrupamentos das Figuras 12 e 13, cenários da média e moda, respectivamente. E os Gráficos 05 e 06 apresentam os gráficos de dispersão ou diagrama de espalhamento de Moran, para ambos cenários, sendo o índice de Moran de 0,253 e 0,222, para média e moda, respectivamente. Ambos valores de Moran indicam uma baixa dependência espacial, sendo a moda menor do que a média.

Figura 15 – Mapa de Significância - Média



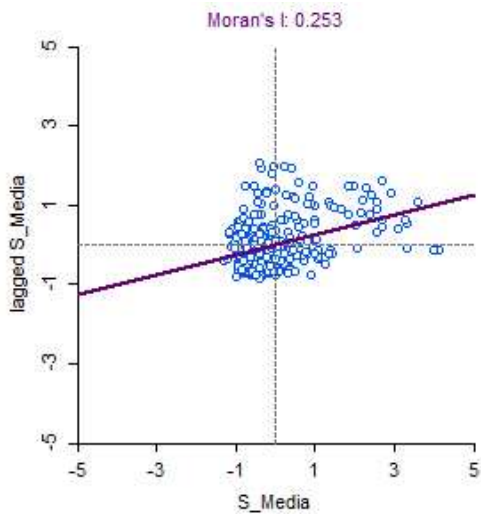
Fonte: Autor

Figura 16 – Mapa de Significância - Moda



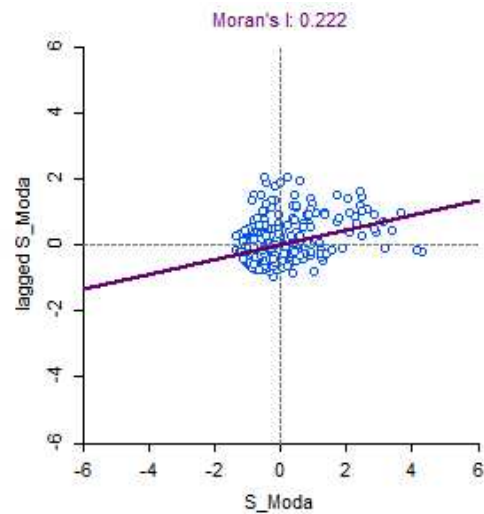
Fonte: Autor

Gráfico 5 – Índice de Moran - Média



Fonte: Autor

Gráfico 6 – Índice de Moran - Moda



Fonte: Autor

4.4 Viabilidade Operacional

A viabilidade operacional foi feita apenas para as 5 rotas prioritárias, uma vez que atende os ambos cenários, média e moda. A Tabela 12 apresenta algumas das principais características operacionais das 5 rotas prioritárias de ambos cenários, tais como extensão, número de viagens e a frota operante em cada linha. O número de viagens por ônibus é uma estimativa média considerando o número de viagens e a frota disponível. Já a autonomia de viagens é quantas viagens um ônibus de uma determinada rota consegue realizar sem a necessidade de uma nova recarga. Além disso, a Tabela 12 mostra a frota necessária para atender o itinerário sem a necessidade de recargas, de acordo com as limitações de autonomia da bateria. Caso os ônibus a diesel fossem substituídos por ônibus elétricos, seria necessário adquirir mais 55 ônibus elétricos para atender ao número de viagens programadas para cada rota, sem necessidade de carregamento ao longo do dia. Considerando o custo de cada ônibus em R\$ 2 milhões, o custo total para atender a demanda com ônibus elétrico seria de R\$ 340 milhões (frota das 5 rotas em 170 ônibus) versus R\$ 23 milhões com os ônibus a diesel (frota das 5 rotas em 115 ônibus), o que equivale a um aumento no investimento inicial de R\$ 317 milhões.

Tabela 12 – Autonomia de viagens por ônibus para as rotas prioritárias.

ID da Rota	Extensão (Km)	Nº Viagens	Frota	Nº viagens por ônibus	Autonomia de Viagens	Frota Necessária
041	41,072	145	30	5	4	37
712	50,311	132	22	6	3	44
703	56,314	99	22	5	3	33
076	44,902	100	25	4	4	25
051	61,872	91	16	6	3	31

Fonte: Autor

Observa-se que apenas a rota 076 consegue atender o itinerário diário completo sem a necessidade de recargas ao longo do dia, por ser uma das rotas com menor extensão entre as rotas prioritárias (Tabela 12). A rota 041, mesmo sendo a linha com menor extensão dentre as rotas prioritárias, não consegue ter autonomia de atender todas as 145 viagens diárias, uma vez que necessita de 5 viagens em média por ônibus e possui autonomia de apenas 4 viagens (Tabela 12), sendo assim, é necessário que uma parte da frota seja carregada ao longo do dia. A rota 051 - Grande Circular I possui a maior extensão, 61,872 km (Tabela 12), por isso possui uma autonomia baixa de viagens, além de ter a menor frota operante, sendo necessário cada ônibus realizar mais viagens ao longo do dia.

Pensando nas rotas que precisam de recarga ao longo do dia, a Tabela 13 apresenta um sistema proposto de otimização de recarga para as 5 rotas prioritárias. O sistema considera que o ônibus carregado uma vez realiza o dobro de viagens a fim de aproveitar melhor a carga da bateria, no caso, dois ciclos da bateria, por exemplo, a rota 703 tem uma autonomia de 3 viagens e cada ônibus da linha precisa realizar em média 5 viagens diárias (Tabela 12), o sistema proposto de recarga ótimo, considera que o ônibus carregado irá realizar 6 viagens, isto é, o dobro da autonomia, enquanto os ônibus que não vão ser carregados realizam apenas à quantidade máxima de viagens de uma bateria, no caso, 3 viagens, em média, a rota continua com 5 viagens por ônibus. Além disso, a Tabela 13 mostra o número de viagens totais que podem ser atendidas em caso de aumento de demanda com o sistema de recargas ótimo.

Tabela 13 – Sistema de Otimização de Recarga dos Ônibus Prioritários

ID da Rota	Ônibus que vão ser recarregados	Ônibus que não vão ser recarregados	Nº Viagens da Rota	Nº de Viagens que podem ser atendidas
041	7	23	145	148
712	22	0	132	132
703	11	11	99	99
076	0	25	100	100
051	15	1	91	93

Fonte: Autor

A rota 041 com o sistema de recarga consegue ter o mínimo de ônibus com a necessidade de carregamento no terminal, 23,33% da frota, otimizando tempo e operação, e caso houvesse aumento na demanda seria possível expandir a operação para até 148 viagens. Como esperado, a rota 076 é a única que não necessita de recargas ao longo do dia, diferentemente da 712, que terá a necessidade de recarregar toda sua frota, uma à noite na garagem e outra durante o dia. Isso seria complicado na prática, visto que o tempo de recarga é superior a 2 horas, ou seja, haveria um número reduzido de ônibus em circulação durante todo o dia, o que poderia levar a superlotação e a um maior tempo de espera para os passageiros. As rotas 712 e 051 são as mais críticas por terem 100% e 93,75%, respectivamente, da frota com necessidade de carregamento ao longo do dia. Isto acaba exigindo uma frota maior devido à menor autonomia, uma vez que o sistema rotativo não é viável operacionalmente devido ao tempo de recarga, sendo a principal limitação da adoção da tecnologia de ônibus elétricos no sistema de transporte coletivo público.

A solução será ônibus com maior autonomia, o que exigirá investimentos em tecnologia e pesquisa para minimizar o tempo de carregamento da bateria e otimizar as distâncias percorridas. Inicialmente, ônibus híbridos movidos a combustíveis vegetais como etanol, biogás e biodiesel ou recargas mistas com pantógrafos ao longo do dia seriam outras alternativas viáveis, porém este último sua segurança é questionável devido aos custos de investimento muito elevados para serem implantados em pontos de ônibus. Vale ressaltar também que este trabalho dá maior peso aos aspectos ambientais e de demanda do que aos aspectos econômicos e técnicos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve como objetivo entender a priorização das rotas para tornar o processo de transição da frota de ônibus a diesel por ônibus elétrico mais viável técnica economicamente, possibilitando a redução das emissões de gases do efeito estufa e poluentes locais e globais, melhorando a qualidade de vida da população, considerando critérios relacionados à demanda/oferta, ambientais e sociais, por meio da integração da análise multicritério e do SIG, com o apoio do TOPSIS para classificação das rotas.

Para se atingir uma compreensão da priorização das rotas de ônibus no município de Fortaleza para eletrificação, foram definidos quatro objetivos específicos. O primeiro avaliou a importância relativa de critérios relacionados à demanda/oferta, questões ambientais e sociais, a partir de vários atores, utilizando o método de análise multicritério MACBETH. Verificou-se que o critério ambiental e os critérios operacionais foram considerados de maior relevância comparativamente aos critérios sociais. Em segundo, ordenou-se as rotas em ordem de maior ou menor importância utilizando o TOPSIS. A análise permitiu concluir que há uma redução significativa de poluentes diariamente com adoção da tecnologia de ônibus elétricos no setor de transporte público e que as rotas prioritárias contribuem para reforçar o peso dos critérios ambientais e operacionais. Depois, na análise de autocorrelação espacial verificou-se que há duas regiões do município, uma na região noroeste com alta prioridade para eletrificação e outra na região sudeste com baixa prioridade para eletrificação e que no geral a maioria das rotas não apresentaram agrupamentos significativos. E por fim, na viabilização das rotas prioritárias, verificou-se que é necessária uma estratégia de recarga mista, com carregamentos noturnos na garagem por *plug-in* e carregamentos auxiliares diurnos nos terminais para a maioria das rotas prioritárias. Devido ao alto tempo de recarga da bateria, a manutenção da frota de ônibus atual não é o suficiente para atender ao número de viagens diárias das rotas 712 e 051, as quais tem 100% e 93,75% da frota com necessidade de carregamento ao longo do dia, o que é inviável operacionalmente.

Com isso, a hipótese do trabalho de que é viável a adoção da tecnologia de ônibus elétricos no setor de transporte público para redução de emissão de gases do efeito estufa se confirmou, porque há uma redução de mais de 60 ton. CO₂/dia, redução de aproximadamente de 13%, considerando apenas as 10 primeiras rotas prioritárias. E isso só foi possível com a adoção de escolhas de critérios robustos e de hierarquização das alternativas a fim de priorizar rotas para eletrificação com objetivos ambientais, sociais, técnicos e econômicos.

Os instrumentos de coleta dos dados permitiram avaliar e entender a percepção dos agentes e usuários em relação a adoção da tecnologia de ônibus elétricos no setor de transporte público a fim de hierarquizar, ponderar a atratividade de cada opção e os critérios de acordo com a metodologia MACBETH, sendo de suma importância para contribuição das etapas seguintes.

A falta de dados, como qualidade do ar e demanda de passageiros de ônibus dentro dos terminais, limita a escolha e definição de critérios, além da dificuldade de obter dados operacionais mais atualizados sobre as rotas. Outra limitação deste trabalho é a baixa participação de especialistas no questionário, como alunos de pós-graduação e professores do ensino superior na área de transportes.

Em pesquisas futuras, pode-se utilizar outra metodologia de análise multicritério, como o AHP, para priorização das rotas e outros critérios ambientais e sociais, como a poluição do ar e sonora ao redor de escolas e hospitais, uma vez que os ônibus elétricos são mais silenciosos. Outra sugestão é utilizar dados atualizados de população e renda, pois o IBGE está realizando um novo censo demográfico em 2022, além do uso de dados da demanda e frota mais atualizados. Outra proposta é medir as emissões veiculares de dióxido de carbono e outros poluentes do efeito estufa, em vez de estimá-las a partir de emissões constantes, visto que há uma variação nas emissões conforme a velocidade de tráfego.

Em termos de outros estudos seria interessante avaliar a viabilidade econômica das rotas prioritárias, considerando o custo de aquisição dos ônibus elétricos, da implantação da infraestrutura de recarga e o seu impacto na rede elétrica. Também seria de grande importância a realização de estudos para determinar a localização de estações de carregamento, considerando recargas fora das garagens e terminais.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Postos Tarifários**. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/2ZeF3oW>>. Acesso em: mai. de 2022.
- ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Preços. Levantamento de Preços e de Margens de Comercialização de Combustíveis**. 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/2WCH0eY>>. Acesso em: mai. de 2022.
- ARONOFF, S. **Geographic Information Systems: A Management Perspective**. 1989. WDL pub., Ottawa.
- BANA E COSTA, CA, VANSNICK, JC. **Um referencial teórico para medir a atratividade por meio de uma técnica de avaliação baseada em categorias (MACBETH)**. 1997. In: Clímaco, J. (eds) *Análise Multicritério*. Springer, Berlim, Heidelberg. Disponível em <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60667-0_3>
- BANA E COSTA, CA; ANGULO-MEZA, L; OLIVEIRA, M. **O Método Macbeth E Aplicação No Brasil**. 2013. Carlos A. Bana e Costa1 Lídia Angulo-Meza2 Mônica D. Oliveira3 ENGEVISTA - UFF - BRASIL. ENGEVISTA. 15. 10.22409/engevista. v15i1.484.
- BELEN, M. M. DE. **Electrification of public transport: methodologies and tools to assess its feasibility around the world and transferability across Europe**. Master's Degree in Transport Systems Engineering (Faculty of Civil and Industrial Engineering), Sapienza Università di Roma, 2018. Disponível em: <https://web.uniroma1.it/cdaingtrasporti/sites/default/files/Thesis_DeBelen_MTRR_18gen18.pdf>. Acesso em: out. 2022.
- BHTrans. **Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte (BHTrans)**. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3jqbCKw>>. Acesso em: mai. de 2022.
- BNEF. BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. **Electric buses in cities – driving towards cleaner air and lower CO2**. [s. l.], 2018. Disponível em: <<https://www.c40.org/research>>. Acesso em: out. 2022.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama 491/2018, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar**. 2018. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 21 nov. 2018. Seção 1, p. 155-156. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>>. Acesso em: 21 mai. 2022.
- BRASIL. **Lei Nº 12.587, de 3 De janeiro De 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana**. 2012. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112587.htm>. Acesso em: out. 2022.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima / Secretaria de Pesquisa e Formação Científica**. -- Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Guia De Eletromobilidade: Orientações para estruturação de projetos no transporte coletivo por ônibus.** Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022.

BRITTO, M. **Vendidos por quase R\$ 2 milhões, ônibus elétricos buscam formas de amenizar custo para abrir caminho no Brasil.** Um Só Planeta, 2022. Disponível em <<https://umsoplaneta.globo.com/energia/noticia/2022/02/14/vendidos-por-quase-r-2-milhoes-onibus-eletricos-buscam-formas-de-amenizar-custo-para-abrir-caminho-no-brasil.ghtml>> Acesso em: out. de 2022.

BURROUGH, P.A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment.** Oxford University Press, Oxford, 1986.

BYD. **Chassis de ônibus: BYD D9A 20.410 - Padron piso alto.** Campinas – SP: Byd Brasil, s.d. Disponível em: <<https://www.byd.com.br/chassi-byd-d9a-20-410/>>. Acesso em: 18 nov. 2022.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD (CARB). **Public workshop of the proposed Innovative Clean Transit Regulation.** Disponível em: <<https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/180613Workshop%20Notice.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

CARVALHO, C. H. R. de. **Emissões Relativas De Poluentes Do Transporte Urbano.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2011. Disponível em <<http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/5574>> Acesso em: out. 2022.

CETESB. Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2018.** CETESB, 2019. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2019/07/Relat%C3%B3rio-de-Qualidade-do-Ar-2018.pdf>>. Acesso em: mai. 2022.

COWEN, D.J. **GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences.** *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* v. 54, p. 1551-1554, 1988.

CPE. **Consultoria E Projetos Elétricos.** Disponível em <<https://www.google.com/url?q=https://www.cpe-ce.com.br/pdf/subestac%25C3%25B5es-estado-do-ceara.kml&sa=D&source=docs&ust=1669467916552782&usg=AOvVaw1BafaTz-D-T5WyV3Ulu3Wl>> Acesso em: abr. de 2022.

CURITIBA. Prefeitura Municipal De Curitiba. **Cinco linhas de ônibus testam veículo elétrico da Higer nesta semana.** 2022. Disponível em <<https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/cinco-linhas-de-onibus-testam-veiculo-eletrico-da-higer-nesta-semana/>>. Acesso em: out de 2022.

DAVIS JUNIOR, C. A. **Múltiplas Representações em Sistemas de Informações Geográficos.** Belo Horizonte: UFMG, 2000. Tese de Doutorado – Programa de Pós Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2000. Disponível em: <<https://www.dcc.ufmg.br/pós/cursos/defesas/460D.PDF>>. Acesso em: set. de 2022.

DIÁRIO DO TRANSPORTE. **Luxemburgo apresenta sistema de recarga rápida para bateria de ônibus elétricos.** Out. 2015. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2015/10/26/luxemburgo-apresenta-sistema-de-recarga-rapida-para-bateria-de-onibus-eletricos/>>. Acesso em: out. 2022.

DIÁRIO DO TRANSPORTE. **Trólebus 70 anos: um meio de transporte que é viável para os dias de hoje e para o futuro.** Abr. 2019. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2019/04/21/trolebus-70-anos-um-meio-de-transporte-que-e-viavel-para-os-diasde-hoje-e-para-o-futuro>>. Acesso em: out 2022.

DIÁRIO DO TRANSPORTE. **O primeiro ônibus elétrico no Brasil.** Jul. 2017. Disponível em:<<https://diariodotransporte.com.br/2017/07/16/historia-o-primeiro-onibus-eletrico-nobrasil>>. Acesso em: out 2022.

DRUCK, S.; Carvalho, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V. M. (eds). **Análise Espacial de Dados Geográficos.** Brasília, EMBRAPA, 2004 (ISBN: 85-7383-260-6).

EBUS RADAR. Brasil. Disponível em: <<https://www.ebusradar.org>>. Acesso em: mai. 2022.

EMAMI, B. D.; SONG, Y.; KHANI, A. **Prioritizing Bus Routes for Electrification: A GIS-based Multi-Criteria Analysis Considering Operational, Environmental and Social Benefits and Costs.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020.

EPE. Empresa De Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2018: ano base 2017.** Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: out. 2022.

EPE. Empresa De Pesquisa Energética. **Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil.** 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Nova-versao-da-Ferramenta-para-Avaliacao-de-Viabilidade-de-Onibus-Eletrico.aspx>>. Acesso em: mai. 2022.

ERBAS, M.; KABAK, M.; ÖZCEYLAN, E.; ÇETINKAYA, C. **Optimal Siting of Electric Vehicle Charging Stations: A GIS-Based Fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis.** Energy (2018), doi: 10.1016/j.energy.2018.08.140

ETUFOR. **Empresa De Transporte Urbano De Fortaleza.** Disponível em <<https://etuforweb.fortaleza.ce.gov.br/>>. Acesso em: abr. 2022.

FORTALEZA EM MAPAS. **Prefeitura Municipal De Fortaleza.** Disponível em <<https://mapas.fortaleza.ce.gov.br/#/>>. Acesso em: abr. 2022.

GARCHE, J.; MOSELEY, P. T.; KARDEN, E. **Lead-acid batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles.** In: SCROSATI, B.; GARCHE, J.; TILLMETZ, W. (Ed.) Advances in battery technologies for electric vehicles. Woodhead Publishing, Elsevier, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423775000054>>. Acesso em: out. 2022.

HWANG, C.L.; YOON, K. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications**. Springer-Verlag, New York, 1981. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>> Acesso em: mai. 2022.

IEA. **CO2 Emissions from Fuel Combustion 2019**. IEA, Paris, 2019. Disponível em <<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-2019>> Acesso em: mai. 2022.

IEA. **Global EV Outlook 2020 – Entering the decade of electric drive?** IEA, 2020. Disponível em <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>>. Acesso em: out. 2022.

IPCC. Intergovernmental Panel On Climate Change. **Mitigation of Climate Change**. Climate Change 2014. Disponível em <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf>. Acesso em abril de 2022.

JUNIOR, L. F. N. **Tomada De Decisão Com Múltiplos Critérios: Pesquisa-Ação sobre o Método AHP em Pequenas Empresas**. Dissertação (Mestrado) Universidade de Taubaté, 2006. Disponível em: <http://ppga.com.br/mestrado/2006/nunesjr-luis_fernando.pdf>. Acesso em: set. 2022.

LOPES, E. E. **Determinação de diretrizes de traçado geométrico de obras lineares utilizando análise multicritério**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/135515>>. Acesso em: set. 2022.

MAHMOUD, M.; GARNETT, R.; FERGUSON M.; KANAROGLOU, P. **Electric buses: a review of alternative powertrains**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 62, p. 673-684, September 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116301290>>. Acesso em: out. 2022.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. 2.ed. In: . [S.l.]: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. p. 425.

RANDHAHN, A.; KNOTE, T. **Deployment of Charging Infrastructure for Battery Electric Buses**. In: MULLER, B.; MEYER, G. Towards User-Centric Transport in Europe 2. Berlin: Springer Nature, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-38028-1_12>. Acesso em: out 2022.

SÃO PAULO. **Lei Nº 16.802, De 17 De Janeiro De 2018**. Dispõe sobre o uso de fontes motrizes de energia menos poluentes e menos geradoras de gases do efeito estufa na frota de transporte coletivo urbano do Município de São Paulo; Diário Oficial Cidade de São Paulo. Câmara Municipal de São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://documentacao.camara.sp.gov.br/iah/fulltext/leis/L16802.pdf>> Acesso em: out. 2022.

SCHMIDT, A. M. A. **Processo De Apoio A Tomada De Decisão Abordagens: Ahp E Macbeth**. Orientador: Prof. Leonardo Ensslin, Phd. 1997. 155p. Dissertação (Mestrado) –

Curso De Pós-Graduação Em Engenharia De Produção, Departamento De Engenharia De Produção E Sistemas, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

SEEG. Sistema De Estimativas De Emissões E Remoções De Gases De Efeito Estufa. **Análise das emissões brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para as metas do Brasil**. SEEG, 2019. Disponível em: <<https://seeg-br.s3.amazonaws.com/2019-v7.0/documentos-analiticos/SEEG-Relatorio-Analitico-2019.pdf>>. Acesso em: set. 2022.

SILVA, Thiago¹. **Um diagnóstico atual do sistema trólebus paulistano**. PLAMURB, 2022. Disponível em: <<https://plamurbblog.wordpress.com/2022/04/07/um-diagnostico-atual-do-sistema-trolebus-paulistano/>>. Acesso em: out. de 2022.

SILVA, Thiago². **Um diagnóstico atual do sistema trólebus gerenciado pela EMTU**. PLAMURB, 2022. Disponível em: <<https://plamurbblog.wordpress.com/2022/05/06/um-diagnostico-atual-do-sistema-trolebus-gerenciado-pela-emptu/>> Acesso em: out. de 2022.

SLOWIK, P.; ARAUJO, C.; DALLMANN, T.; FAÇANHA, C. **Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas**. Brasília: MDIC, 2018. Disponível em: <<https://theicct.org/publication/avaliacao-internacional-de-politicas-publicas-para-eletromobilidade-em-frotas-urbanas/>>. Acesso em: 23 set. 2022.

SPTTrans. **Relatório da Administração 2018**. SPTTrans, 2018. <<https://bit.ly/2CQueTd>>. Acesso em: mai. de 2022.

THE CITY FIX. **How did Shenzhen build the world's largest electric bus fleet?** Abr. 2018. Disponível em: <<https://thecityfix.com/blog/shenzhen-build-worlds-largest-electric-bus-fleet-lu-lu-lulu-xue-weimin-zhou>>. Acesso em: mai. 2022.

TOBLER W. **A computer movie simulating urban growth in the Detroit region**. Economic Geography, 46(Supplement): 234–240, 1970.

TOLEDO, G. I. F. M. de; NARDOCCI, A. C. **Poluição veicular e saúde da população: uma revisão sobre o município de São Paulo (SP), Brasil**. Revista Brasileira de Epidemiologia [online]. 2011, v. 14, n. 3, pp. 445-454. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/S1415-790X2011000300009>>. Acesso em: out. de 2022.

TONG, F.; JARAMILLO, P.; AZEVEDO, I. M. L. **Comparison of life cycle greenhouse gases from natural gas pathways for light-duty vehicles**. Energy & Fuels 2015, v. 29, n. 9, p. 6008-6018. Aug. 2015. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.5b01063>>. Acesso em: out 2022.

UITP. Union Internationale Des Transports Publics. **The impact of electric buses on urban life**. Policy brief, jun. 2019. Disponível em: <<https://www.uitp.org/impact-electric-buses-urban-life>>. Acesso em: mai. 2022.

USLU, T.; KAYA, O. **Location and capacity decisions for electric bus charging stations considering waiting times**. 2021. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 90. 102645. 10.1016/j.trd.2020.102645.

VEEDER, C. **Transforming transit, realizing opportunity: how battery-electric buses can benefit the environment, the economy, and public transit.** Jobs to Move America, EUA, 2019. Disponível em: <<https://jobstomoveamerica.org/resource/transforming-transitrealizing-opportunity>>. Acesso em: out 2022.

VUCHIC, V. R. **Urban transit: systems and technology.** New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

WANG, Y.; HUANG, Y.; XU, J.; BARCLAY, N. **Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis.** 2017. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 100. 115-132. 10.1016/j.tre.2017.01.001.

WRI. World Resources Institute. **Barriers to adopting electric buses.** Ross Center for Sustainable Cities program. Washington, D. C., 2019. Disponível em: <<https://www.wri.org/publication/barriers-adopting-electric-buses>>. Acesso em: out 2022.

WRI BRASIL. World Resources Institute Brasil. **Como Santiago se tornou líder global em ônibus elétricos.** Jan. 2019. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/01/como-santiago-se-tornou-lider-global-em-onibus-eletricos>>. Acesso em: 21 mai. 2022.

APÊNDICE A – FORMULÁRIO

PRIORIZAÇÃO DE ROTAS DE ÔNIBUS PARA ELETRIFICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE FORTALEZA

Este questionário foi feito com o objetivo de realizar uma análise multicritério dos fatores que influenciam na priorização de rotas de ônibus para eletrificação (Substituição de ônibus convencionais para ônibus elétricos) no município de Fortaleza. Com base no método MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique), a avaliação é feita por meio de comparações paritárias. Com isso, peço um pouco de paciência e atenção ao responder as perguntas. Qualquer dúvida ou sugestão, basta enviar um email para: aearantes@det.ufc.br e/ou evanilsondelimasiqueira@gmail.com.

Agradeço pela valiosa avaliação! Sua opinião é bastante importante para o desenvolvimento desta pesquisa.

*Obrigatório

1. Por favor, informe seu nome completo *

2. Onde trabalha/estuda? *

3. Qual é seu cargo atual? *

Marcar apenas uma oval.

- Profissional na área de Transportes ou Logística
- Professor de Instituição de Ensino Superior
- Aluno da Graduação
- Aluno da Pós-Graduação
- Usuário do Transporte Coletivo
- Motorista/Cobrador de ônibus
- Outro

4. Se a resposta da pergunta anterior foi "outro", por favor especifique

5. Quais Critérios são mais importantes para a priorização de rotas de ônibus para eletrificação no município de Fortaleza? Classifique * os itens abaixo em ordem de importância (Sendo 1º- o mais importante - e 10º - o menos importante), Lembrando que a resposta assinalada não pode ser a mesma para diferentes itens.

Marcar apenas uma oval por linha.

	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º
Demanda da rota	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Extensão da Linha/rota	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Frota Operante (Quantidade de ônibus na Linha)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tempo de Viagem	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Número de Viagens Diárias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Área dos Terminais	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Distância do Terminal até a Subestação de Energia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Emissão de Poluentes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
População Total (dos Bairros)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nível de Renda da População	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

6. Na sua opinião, existem outros itens que influenciam na priorização de rotas? Se sim, quais seriam?

15. (Questão 09/09) - Quanto a 'População Total (dos Bairros)' por onde a rota passa é mais ou menos relevante que o item abaixo? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	-6 - Extremamente menos relevante	-5	-4	-3	-2	-1	0 - Os itens possuem relevância equivalente	1	2	3	4	5	6 - Extremamente mais relevante
Nível de Renda da População	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

OBRIGADO POR CHEGAR ATÉ AQUI!!!

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

APÊNDICE B - CLASSIFICAÇÃO DAS ROTAS NO TOPSIS

Tabela – Classificação das Rotas no TOPSIS (Continua)

ID Rota	Nome da Rota	Classificação (Média)	Classificação (Moda)	Similaridade (Média)	Similaridade (Moda)
4	Messejana/Papicu/Cambeba/TJ	133	155	0,228642	0,215651
11	Circular I	70	79	0,313546	0,305028
12	Circular II	80	82	0,303165	0,294973
13	Aguanambi I	230	208	0,166063	0,180961
14	Aguanambi II	245	219	0,157442	0,173461
15	Cj Ceará/Antônio Bezerra I	74	63	0,308106	0,326414
16	Cuca Barra/Papicu	162	187	0,205206	0,191793
19	Messejana/Papicu/Manibura	95	105	0,267597	0,263668
20	Campus do Pici	231	188	0,165821	0,191576
21	Luciano Cavalcante/Papicu	131	134	0,231575	0,235048
22	Jardim das Oliveiras/Centro	164	186	0,20481	0,193115
23	Corujão/Edson Queiróz/Papicu	282	287	0,133961	0,127103
25	Opaia/Lagoa	260	253	0,146435	0,148292
26	Antônio Bezerra/Messejana	24	24	0,514531	0,497652
27	Siqueira/Papicu/Aeroporto	17	11	0,578873	0,60025
28	Antônio Bezerra/Papicu	29	36	0,450064	0,4089
29	Parangaba/Náutico	39	48	0,398201	0,371498
30	Siqueira/Papicu/13 de Maio	13	12	0,613896	0,598795
31	Av. Borges de Melo I	40	44	0,395546	0,381555
32	Av. Borges de Melo II	32	34	0,436216	0,428431
33	Corujão/Circular I	302	303	0,093619	0,077107
34	Corujão/Av. Paranjana I	154	193	0,209854	0,188848
35	Corujão/Av. Paranjana II	160	196	0,207855	0,187453
37	Corujão/Cj Ceará/Aldeota	140	184	0,217785	0,194798
38	Parangaba/Papicu	18	20	0,565601	0,543333
39	Corujão/Av. Bezerra de Menezes	298	295	0,111608	0,112943
40	Parangaba/Lagoa	158	92	0,208255	0,279857
41	Parangaba/Oliveira Paiva/Papicu	1	1	0,833489	0,845599
42	Antônio Bezerra/Francisco Sá/Papicu	7	7	0,691203	0,654075
43	Cj Ceará/Lagoa/Fernandes Távora	72	61	0,309505	0,327689
44	Parangaba/Papicu/Montese	16	16	0,586849	0,579016
45	Cj Ceará/Papicu/Montese	6	6	0,711422	0,687648
46	Corujão/Cj Ceará	182	234	0,193971	0,167032
47	Corujão/José Bastos/Centro	285	293	0,129808	0,113832
48	Corujão/Parangaba/Papicu	251	272	0,153682	0,139374
50	Siqueira/Papicu/Washington Soares	14	13	0,611258	0,597921
51	Grande Circular I	5	4	0,719718	0,726884
53	Messejana/Papicu/Washington Soares	34	33	0,41734	0,428882
54	Corujão/Praia do Futuro/Caça e Pesca	186	223	0,19233	0,17209
55	Corujão/Grande Circular I	90	115	0,276999	0,252263
56	Corujão/Grande Circular II	108	136	0,256933	0,234147
57	Corujão/Jardim Iracema	265	279	0,143956	0,132567
58	Corujão/Jardim Guanabara/N Assunção II	284	296	0,131555	0,109749
59	Corujão/Av. Sargento Hermínio	297	294	0,113734	0,113068
60	Parquelândia/Parangaba	63	72	0,327685	0,315344
61	Linha Central/Via Centro Fashion	292	270	0,125582	0,141332
62	Corujão/Cj Esperança	272	290	0,140086	0,118367
63	Corujão/Bom Jardim	213	257	0,178992	0,146071
64	Corujão/Aeroporto/Centro/Rodoviária	252	283	0,153377	0,131794
65	Corujão/Barroso/Jardim Viôleta	246	274	0,157124	0,138925
66	Parangaba/Papicu/Aeroporto	22	21	0,534774	0,535482
67	Lagoa/Albert Sabin	280	276	0,135851	0,137998
68	Messejana/Papicu/Cambeba/LJ	180	189	0,195638	0,19156

Tabela – Classificação das Rotas no TOPSIS (Continuação)

ID Rota	Nome da Rota	Classificação (Média)	Classificação (Moda)	Similaridade (Média)	Similaridade (Moda)
69	Lagoa/Papicu/Via Expressa	86	83	0,290565	0,294055
70	Cuca Barra/Parangaba	36	43	0,407884	0,38244
71	Antônio Bezerra/Mucuripe	73	76	0,309385	0,309083
72	Antônio Bezerra/Parangaba	104	93	0,259288	0,279378
73	Siqueira/Praia de Iracema	12	9	0,61704	0,646111
74	Antônio Bezerra/Unifor	8	10	0,661244	0,621278
75	Campus do Pici/Unifor	11	17	0,631287	0,574178
76	Cj Ceará/Aldeota	4	5	0,719941	0,69294
77	Parangaba/Mucuripe	20	22	0,546159	0,518189
78	Siqueira/Mucuripe/ED	214	243	0,177772	0,158474
79	Antônio Bezerra/Náutico	67	68	0,323153	0,32231
80	Francisco Sá/Parangaba	41	46	0,39537	0,380382
81	Cj Ceará/Antônio Bezerra II	189	167	0,189963	0,202331
82	Antônio Bezerra/Messejana/Perimetral	33	30	0,432269	0,438371
83	Cj Ceará/Lagoa/Augusto dos Anjos	176	160	0,196759	0,208671
84	Siqueira/Messejana/Perimetral	79	67	0,303482	0,32246
85	Lagoa/Aldeota	78	77	0,304668	0,308934
86	Bezerra de Menezes/Santos Dumont	28	31	0,450944	0,430897
87	Expresso/Siqueira/Papicu	68	59	0,317648	0,336503
88	Antônio Bezerra/Albert Sabin	85	90	0,290917	0,282333
89	Expresso/Parangaba/Papicu	148	151	0,212833	0,218848
90	Corujão/Montese	299	299	0,111182	0,097402
91	Expresso/Antônio Bezerra/Parangaba	263	248	0,143996	0,153902
92	Antônio Bezerra/Papicu/Praia de Iracema	23	25	0,515796	0,492828
93	Expresso/Messejana/Papicu	232	229	0,165806	0,169741
94	Expresso/Parangaba/Aldeota	215	228	0,17501	0,16991
95	Corujão/José Walter	146	204	0,214506	0,18262
96	Expresso/Cj Ceará/Papicu	105	121	0,258872	0,246368
97	Antônio Bezerra/Siqueira	129	108	0,233195	0,259235
98	Expresso/Antônio Bezerra/Papicu	83	75	0,296613	0,31011
99	Siqueira/Mucuripe/Barão de Studart	21	19	0,540683	0,548838
101	Beira Rio	64	78	0,326723	0,307973
102	Vila Santo Antônio/Nossa Senhora Graças	171	178	0,198794	0,196845
106	Floresta/Centro	205	210	0,182695	0,179668
110	Vila do Mar/Centro	163	198	0,205168	0,185758
111	Jardim Iracema	114	132	0,248944	0,236788
112	Álvaro Weyne/Centro	170	200	0,199301	0,184014
114	Cj Nova Assunção/Francisco Sá	50	49	0,372521	0,36911
115	Jardim Guanabara/Centro	76	88	0,306836	0,283088
120	Vila do Mar/Náutico/Antônio Bezerra I	98	109	0,266482	0,258486
122	Antônio Bezerra/Álvaro Weyne	142	131	0,217672	0,236967
129	Parangaba/Náutico II	137	147	0,224844	0,22501
130	Vila do Mar/Náutico/Antônio Bezerra II/SFS	239	252	0,163198	0,148553
140	Vila do Mar/Centro II/ES	296	304	0,117697	0,074795
145	Cj. Ceará/Papicu/Montese/II	47	38	0,374216	0,391255
150	Siqueira/Papicu/W. Soares	42	41	0,391764	0,38531
200	Antônio Bezerra/Centro/BRT	62	52	0,332668	0,358002
205	Dom Lustosa	273	244	0,13974	0,156861
206	Padre Andrade/Antônio Bezerra	241	211	0,160032	0,179119
210	Quintino Cunha/Antônio Bezerra	109	87	0,256811	0,284619
213	Jardim Guanabara/Cj Nova Assunção II	121	112	0,243565	0,254991
214	Estação/Pio Saraiva I	190	162	0,189651	0,208448
215	Autran Nunes	219	173	0,171317	0,198845
216	Antônio Bezerra	238	176	0,163311	0,197661

Tabela – Classificação das Rotas no TOPSIS (Continuação)

ID Rota	Nome da Rota	Classificação (Média)	Classificação (Moda)	Similaridade (Média)	Similaridade (Moda)
217	Estação/Pio Saraiva II	289	284	0,126258	0,130481
220	Av. Sargento Hermínio	89	89	0,286194	0,282932
221	Vila Velha/Riomar Kennedy	253	255	0,152667	0,147055
222	Antônio Bezerra/Papicu/Antônio Sales	26	29	0,467392	0,440066
225	João Arruda	165	124	0,203949	0,245658
226	Expresso/Antônio Bezerra/Messejana	84	86	0,29198	0,285225
244	Antônio Bezerra/Parangaba/Montese	128	135	0,23542	0,234924
286	Expresso/Antônio Bezerra/Santos Dumont	115	118	0,24766	0,250784
302	Rodolfo Teófilo/José Bastos	283	285	0,131642	0,128672
303	Igreja São Raimundo	256	240	0,151289	0,16233
304	Bela Vista/Lagoa	266	262	0,143495	0,145156
305	Bela Vista/Humberto Monte	226	221	0,167621	0,173177
308	Demócrito Rocha	225	224	0,167681	0,171709
310	Campus Universitários/Pan Americano	221	217	0,170381	0,175403
311	Castelão/Parangaba	119	127	0,244136	0,240435
312	Dias Macedo/Parangaba	191	205	0,189105	0,182499
313	Parangaba/Alto da Paz	211	206	0,179772	0,182287
314	Henrique Jorge	175	168	0,197307	0,202215
315	Messejana/Parangaba	57	51	0,342137	0,363024
316	Genibaú/Centro	138	146	0,218104	0,225548
317	Cidade Nova/Parangaba	69	70	0,316507	0,318656
318	Av. Lineu Machado/SP1	279	280	0,136991	0,132548
319	Parque São José/Osório de Paiva/Parangaba	178	161	0,195824	0,208664
320	João XXIII/Centro	202	203	0,185	0,182637
321	Jardim União/Parangaba	122	138	0,242	0,23237
322	Granja Portugal/Lagoa	199	201	0,185645	0,183524
323	João XXIII/Lagoa	168	120	0,202756	0,246712
324	Cj Ceará/1ª Etapa	300	298	0,103827	0,102217
325	Aracapé/Siqueira	195	220	0,186751	0,173332
327	Cj Ceará/4ª Etapa	157	140	0,208817	0,231304
329	Parque Santa Rosa/Siqueira	174	148	0,197953	0,222988
330	Cj Esperança/Siqueira	235	207	0,16432	0,182154
331	Cj Esperança/Centro	94	110	0,269461	0,25844
332	Siqueira/Lagoa	177	145	0,196052	0,226184
333	Bom Jardim/Centro	87	96	0,289105	0,273883
334	Monte Rey/Siqueira	287	286	0,128554	0,127942
335	Bom Jardim I	100	97	0,26105	0,271
336	Parque Santa Cecília I	144	137	0,217355	0,23351
337	Jardim Jatobá/Siqueira I	136	149	0,226127	0,222199
338	Canindezinho	120	113	0,243828	0,253873
339	Cj Veneza Tropical/Mirasol I	267	278	0,142455	0,133245
340	Cj Itaperi	188	171	0,19058	0,200982
341	Cj Ceará/Centro/3ª Etapa	44	42	0,388463	0,384686
342	Parque São Vicente	192	174	0,18854	0,19864
343	Cj Ceará/Centro/2ª Etapa	43	40	0,390982	0,38717
344	Vila Betânia/Parangaba	275	251	0,139023	0,149344
345	Cj Ceará/Siqueira	77	62	0,306431	0,327377
346	Jardim Fluminense	139	142	0,217943	0,228678
347	José Walter/Parangaba/Av. L	116	130	0,247236	0,237265
348	Av. Lineu Machado/SP2	293	291	0,124048	0,116164
349	Cj Veneza Tropical/Mirasol II	259	275	0,146496	0,138658
350	Av. José Bastos/Lagoa	150	144	0,211545	0,226517
351	Jóquei/Bonsucesso	203	172	0,183562	0,200123
353	Parangaba/Parque Veras	247	230	0,157086	0,169011

Tabela – Classificação das Rotas no TOPSIS (Continuação)

ID Rota	Nome da Rota	Classificação (Média)	Classificação (Moda)	Similaridade (Média)	Similaridade (Moda)
356	Genibaú/Lagoa	200	164	0,18563	0,205049
357	Cj Ceará/Granja Lisboa	193	214	0,187453	0,176681
359	Santa Tereza	233	231	0,165622	0,168772
360	Siqueira/João Pessoa	46	37	0,381411	0,397211
361	Siqueira/Osório de Paiva/Parangaba	209	152	0,180961	0,218439
362	Siqueira/Vila Manoel Sátiro/Parangaba	106	95	0,258419	0,276253
363	Vila Manoel Sátiro/Centro	206	222	0,182277	0,172884
364	Lagoa/Riomar Kennedy/José Jataí	218	227	0,172142	0,1703
365	Bela Vista/Viriato Ribeiro	220	215	0,170777	0,176221
366	Bom Jardim II	134	129	0,227697	0,238252
367	Cj Ceará/Bom Jardim/SP1	257	292	0,148046	0,115461
368	Cj Ceará/Bom Jardim/SP2	278	297	0,137143	0,10269
369	Parque Presidente Vargas	125	122	0,23747	0,245754
371	Parangaba/José Bastos	149	154	0,212086	0,217639
372	Aracapé/Parangaba I	92	103	0,275993	0,264697
374	Aracapé/Centro	145	182	0,216815	0,195685
376	Parque Santa Cecília II	147	139	0,213991	0,232212
377	José Walter/Parangaba/Av. J	107	123	0,257263	0,245742
378	Urucutuba/Siqueira	228	260	0,16737	0,145476
379	Cj Esperança/Parangaba	71	57	0,310083	0,338424
382	Parque Jerusalém	240	233	0,162028	0,168262
383	Parque São João/Siqueira	197	225	0,185936	0,171454
384	Parque Santana	222	247	0,169246	0,153956
386	Planalto Granja Lisboa	187	181	0,191674	0,195804
387	Jardim Jatobá/Centro	82	85	0,300429	0,286878
388	Cj Tatumundé	271	271	0,141671	0,140177
389	Jovita Feitosa/Shopping Benfica	123	116	0,241113	0,251542
390	Parangaba/João Pessoa	102	98	0,260169	0,26951
391	Passaré/Parangaba	141	150	0,217767	0,220548
392	Nova Esperança/Siqueira	262	268	0,144421	0,141979
393	Miguel Arraes/Siqueira	234	235	0,164971	0,16626
394	Parque Universitários/Lagoa	288	288	0,127579	0,125215
395	Sítio Córrego/Parangaba	250	256	0,15471	0,146226
397	Jardim Jatobá/Siqueira II	166	177	0,203947	0,197589
399	Cidade Jardim I/Parangaba	167	179	0,203924	0,196708
401	Montese/Parangaba	110	102	0,255385	0,265071
404	Aeroporto/Benfica/Rodoviária	208	209	0,181187	0,180443
405	Parque Dois Irmãos/Expedicionários	52	53	0,35799	0,357887
406	Planalto Ayrton Senna/Expedicionários	27	27	0,461314	0,449373
407	José Walter/Expedicionários	54	60	0,351933	0,336424
411	Montese/Lagoa	156	163	0,208939	0,208326
421	Montese/Lagoa/Parangaba/ED	301	302	0,096549	0,085894
456	Planalto Ayrton Senna/Parangaba	35	32	0,411236	0,429851
466	Arvoredo/Parangaba	101	100	0,260687	0,266259
501	Bairro de Fátima	274	239	0,139306	0,162762
502	Vila União	111	117	0,254506	0,251185
503	Av. Treze de Maio/Rodoviária I	281	266	0,135236	0,143781
504	Av. Treze de Maio/Rodoviária II	294	273	0,123587	0,13906
600	Messejana/Frei Cirilo/Expresso	65	65	0,325219	0,325306
601	Aerolândia	124	111	0,23971	0,257172
602	Parque Pio XII/Ana Gonçalves	201	192	0,185083	0,189346
603	Jardim União/Centro	53	56	0,356145	0,351912
604	Dias Macedo/Centro	181	185	0,194853	0,194145
605	José Walter/Br 116/Av. I	58	64	0,338663	0,325813
606	José Walter/Br 116/Av. N	59	66	0,338661	0,324159
610	Cidade Func/Cj Alvorada	118	128	0,244158	0,238918

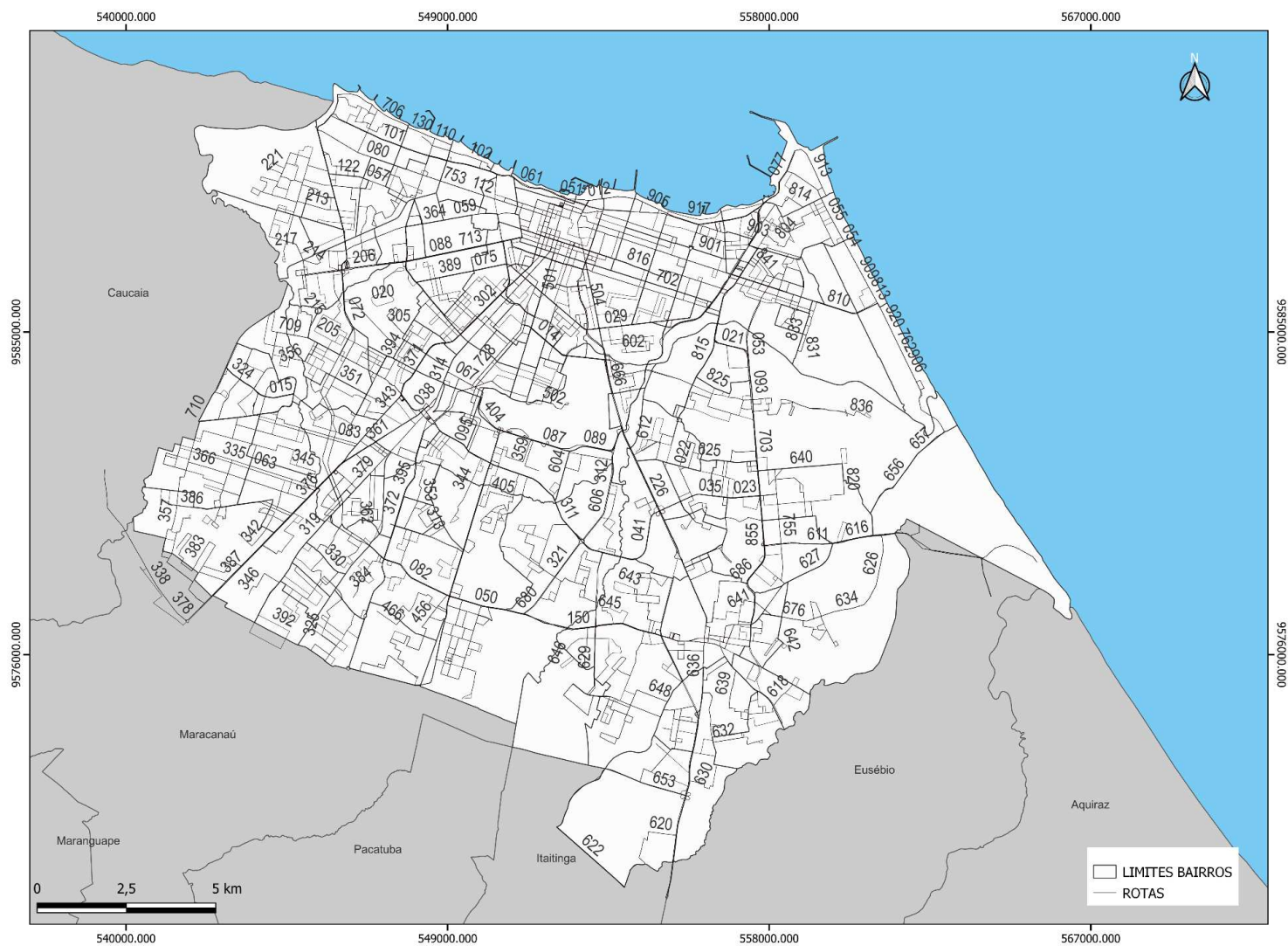
Tabela – Classificação das Rotas no TOPSIS (Continuação)

ID Rota	Nome da Rota	Classificação (Média)	Classificação (Moda)	Similaridade (Média)	Similaridade (Moda)
611	Cidade Func/Cofeco/Lago Jacarey	135	153	0,226913	0,218157
612	Cj Tancredo Neves/Novo Lagamar	113	107	0,251708	0,260619
613	Barroso/Jardim Viôleta	81	80	0,302187	0,30169
615	Corujão/Paupina/Lagoa Redonda	269	277	0,142097	0,133265
616	Lagoa Redonda I	196	190	0,186359	0,191116
617	Lagoa Redonda/Abreulândia/Direita	210	226	0,180234	0,17131
618	Parque Santa Rosa/Messejana	185	166	0,192606	0,204237
619	Paupina	291	281	0,126008	0,132203
620	Corujão/Pedras	249	265	0,15537	0,143834
621	Pedras I	127	126	0,23588	0,240958
622	Pedras II	155	157	0,209517	0,213477
625	Parque Manibura/Borges de Melo	151	170	0,211477	0,201101
626	Lagoa Redonda II	169	165	0,199612	0,204766
627	Lagoa Redonda/Papicu	91	99	0,276274	0,266812
628	Sítio São João/Parque Santa Maria	194	183	0,186827	0,194802
629	Cj Palmeiras/Perimetral	126	119	0,236518	0,246756
630	Itamaraty/Elizabeth II	223	212	0,168347	0,178117
631	Carlos Albuquerque	212	180	0,179604	0,196162
632	Alto Alegre/Messejana	161	156	0,205558	0,215443
634	Lagoa Redonda/Abreulândia/Esquerda	237	249	0,163382	0,152949
635	Cj Tamandaré	224	232	0,167942	0,168264
636	Cj Palmeiras/Parque Santa Maria	143	143	0,217497	0,228419
637	Cj Maria Tomásia/Santa Filomena	236	236	0,163614	0,165812
639	Planalto Coaçu/Messejana	270	250	0,141842	0,149917
640	Cj Alvorada/Messejana	172	169	0,198353	0,20126
641	Guajerú I	242	238	0,158273	0,163038
642	Guajerú II	217	213	0,172924	0,177677
643	Barroso Circular	258	246	0,146808	0,155358
644	Lagoa Redonda/Abreulândia/Litorânea	244	261	0,157511	0,145179
645	Cj João Paulo II	276	264	0,13854	0,144377
646	Cj São Cristóvão	216	216	0,174247	0,175687
648	Cidade Nobre/Messejana	261	269	0,145887	0,141625
653	Santa Fé	243	241	0,157887	0,16138
655	Passaré/Messejana	153	159	0,210494	0,212355
656	Messejana/Sabiaguaba/Direita	227	245	0,167496	0,155788
657	Messejana/Sabiaguaba/Esquerda	183	202	0,193425	0,182709
660	Cj Palmeiras/Centro	15	15	0,594779	0,588238
663	Gereberaba/Messejana	248	259	0,15549	0,145622
665	Corujão/Messejana/Centro	254	263	0,15259	0,14473
666	Jardim Castelão	88	84	0,287558	0,288378
670	Sítio São João/Centro	60	73	0,338205	0,314915
676	Cj Curió	207	199	0,181517	0,185135
680	José Walter/Papicu/Cidade Jardim	38	45	0,398919	0,381192
686	Cj São Bernardo	277	258	0,137365	0,145725
690	Parque Santa Maria/Messejana	286	282	0,129365	0,132065
696	Curió/Messejana	229	218	0,166916	0,174848
701	Parque Americano	268	254	0,142114	0,148079
702	Av. Antônio Sales/Dionísio Torres	264	242	0,143981	0,159422
703	Paupina/Pici	3	3	0,759117	0,761678
706	Barra do Ceará/Antônio Bezerra	132	141	0,23134	0,231209
709	Cj Ceará/Centro	31	26	0,445303	0,469513
710	Cj Ceará/Bonsucesso/Centro	55	50	0,351319	0,363693
711	Barra do Ceará/Cais do Porto	48	47	0,373694	0,374058
712	Cj Palmeiras/Papicu	2	2	0,814484	0,829534
713	Santos Dumont/Perimetral	25	23	0,490076	0,49934
725	Parque Santa Maria/Liceu	45	39	0,385542	0,387531

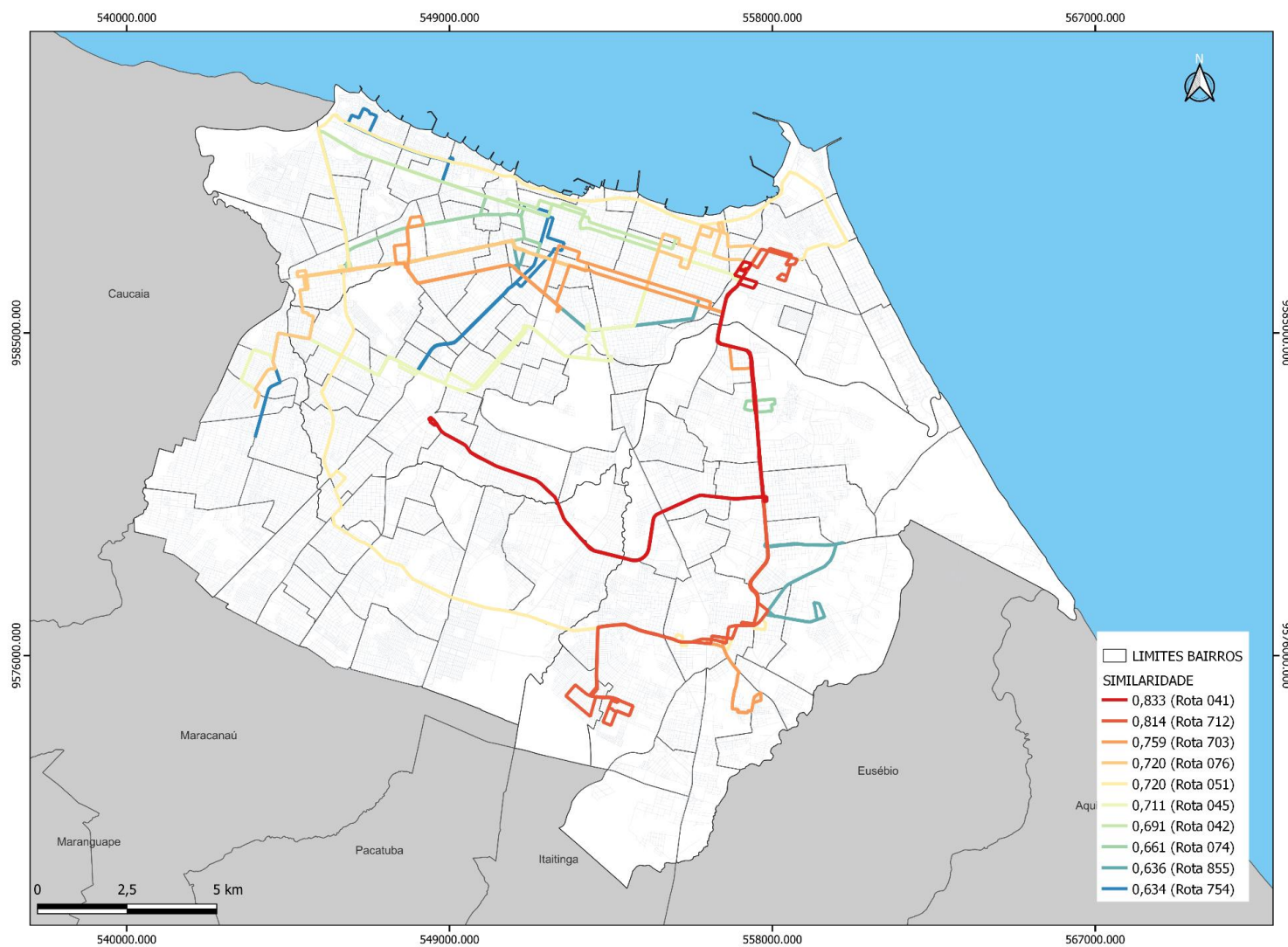
Tabela – Classificação das Rotas no TOPSIS (Conclusão)

ID Rota	Nome da Rota	Classificação (Média)	Classificação (Moda)	Similaridade (Média)	Similaridade (Moda)
728	José Walter/Centro	37	35	0,399327	0,422104
753	Cidade 2000/Sargento Hermínio	56	58	0,343793	0,336796
754	Granja Lisboa/Goiabeiras	10	8	0,633875	0,647958
755	Cj Alvorada/North Shopping	30	28	0,446756	0,442714
757	Vila Velha/Centro	19	18	0,560864	0,571023
762	Caça e Pesca/Centro/IE	159	175	0,207973	0,19779
767	Vila Velha/North Shopping/Riomar Kennedy	290	289	0,126019	0,121769
804	Aldeota	97	91	0,267063	0,282285
806	Edson Queiróz/Papicu	96	94	0,267567	0,277775
810	Papicu/Praia do Futuro	93	81	0,273501	0,295559
813	Papicu/Praia do Futuro II/ED	303	300	0,088906	0,096197
814	Papicu/Castelo Encantado	255	237	0,15225	0,164032
815	Messejana/Papicu/Cj Tancredo Neves	49	54	0,373675	0,35602
816	Edson Queiróz/Centro	61	74	0,336726	0,3122
820	Papicu/Cj Alvorada	75	71	0,307504	0,317733
825	Cidade Func/Papicu/Jardim das Oliveiras	198	194	0,185762	0,187608
831	Papicu/Hospital Geral/Cidade 2000/ED	304	301	0,075676	0,088139
832	Papicu/Cidade 2000	130	104	0,232765	0,264679
833	Cidade 2000/Centro	99	125	0,265708	0,243911
836	Cj Dona Yolanda Queiroz	295	267	0,118638	0,142708
841	HGF/Papicu/Riomar	152	106	0,21089	0,261481
855	Bezerra de Menezes/Washington Soares	9	14	0,635968	0,590736
901	Dom Luíz	117	114	0,246183	0,253189
903	Varjota	204	191	0,183056	0,191088
905	Meireles/Centro	103	133	0,260002	0,235468
906	Caça e Pesca/Serviluz/Centro	51	55	0,362787	0,354044
907	Castelo Encantado/Centro	173	197	0,198158	0,187078
909	Praia do Futuro/Caça Pesca/Beira Mar	66	69	0,324045	0,319163
913	Papicu/Serviluz/Varjota	184	158	0,193258	0,213013
917	Aeroporto/Beira Mar	179	195	0,195658	0,187519
920	Papicu/Caça e Pesca	112	101	0,253594	0,265646

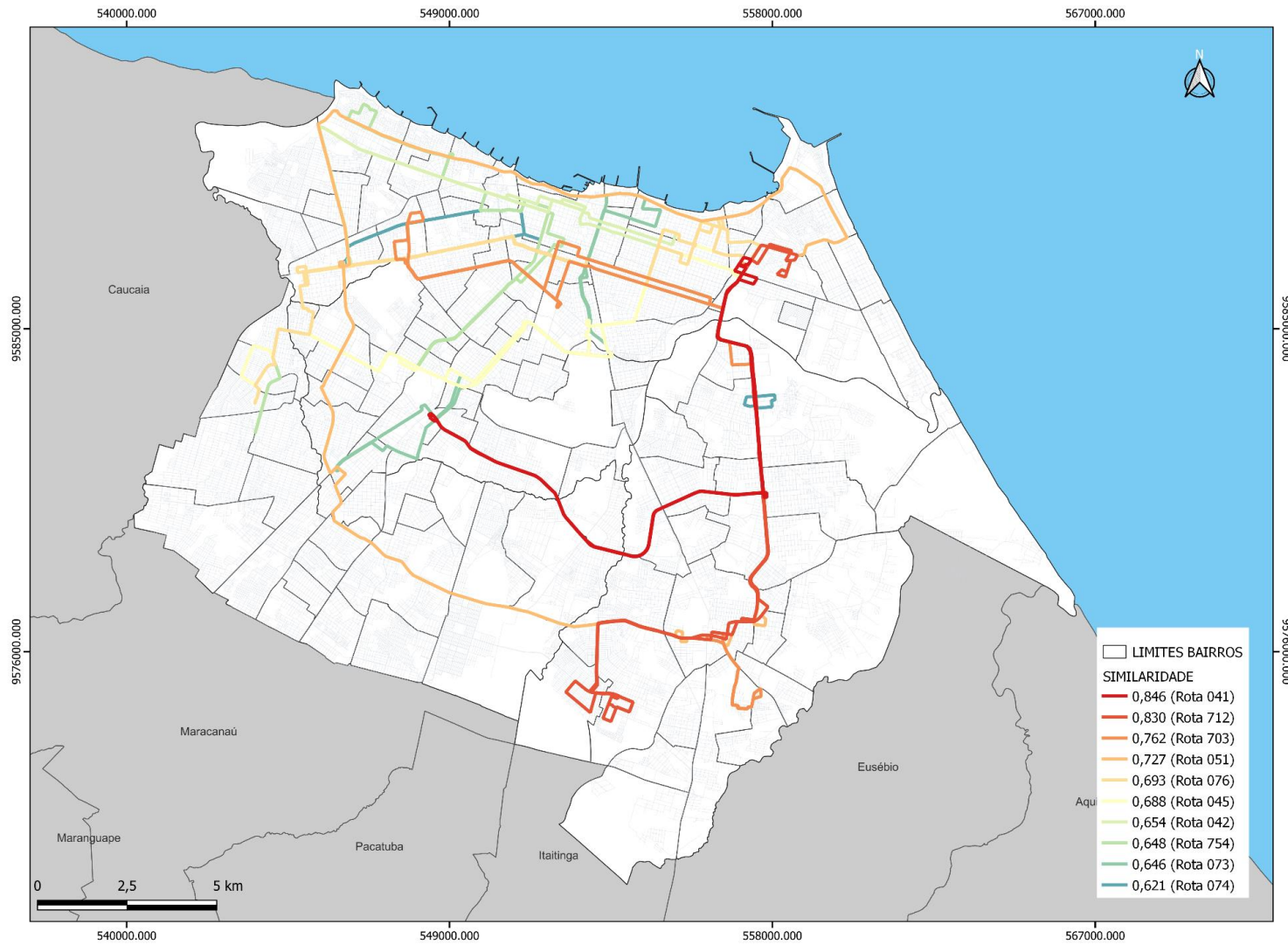
APÊNDICE C - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ROTAS



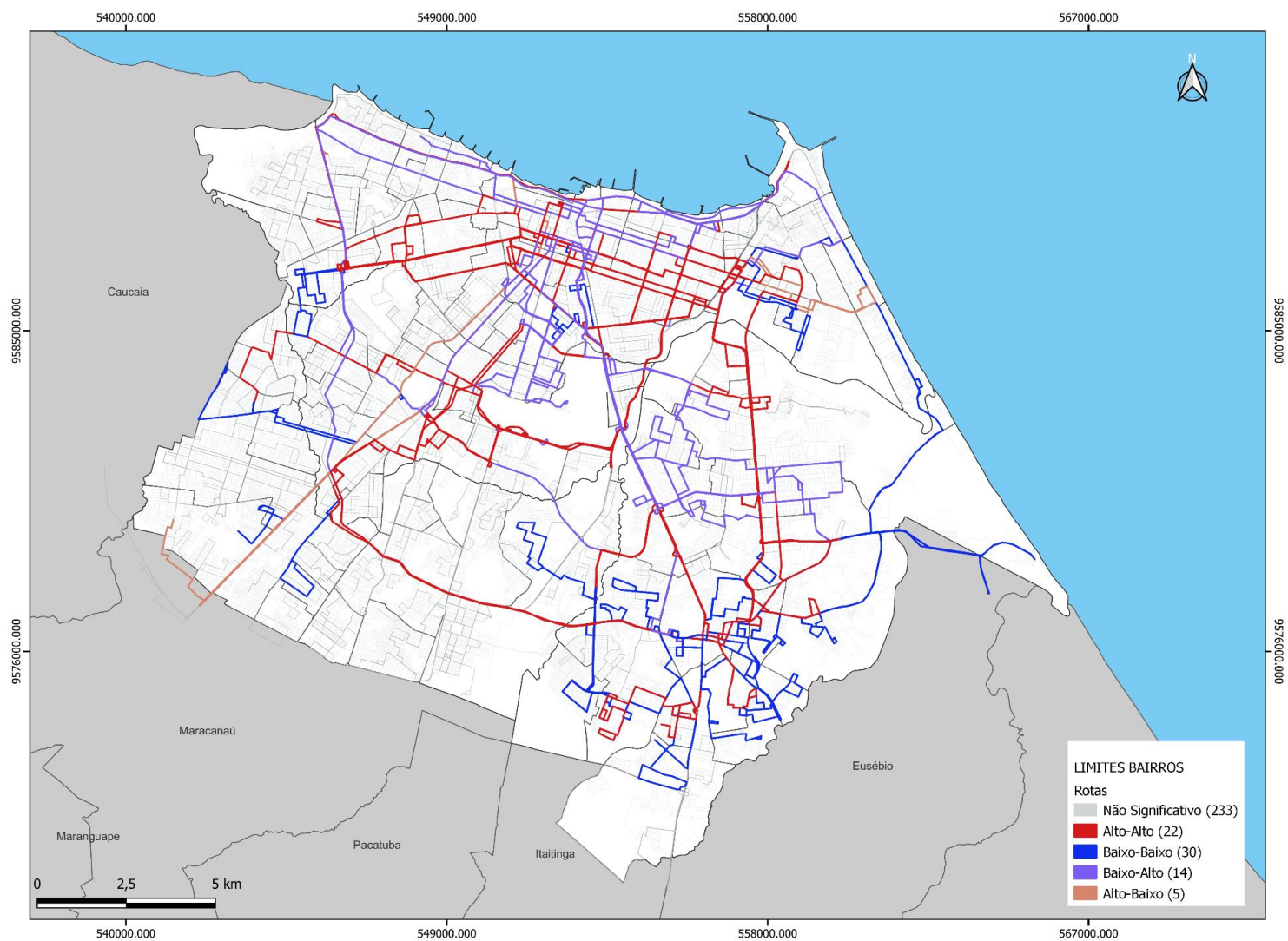
APÊNDICE D - MAPA DAS ROTAS PRIORITÁRIAS - MÉDIA



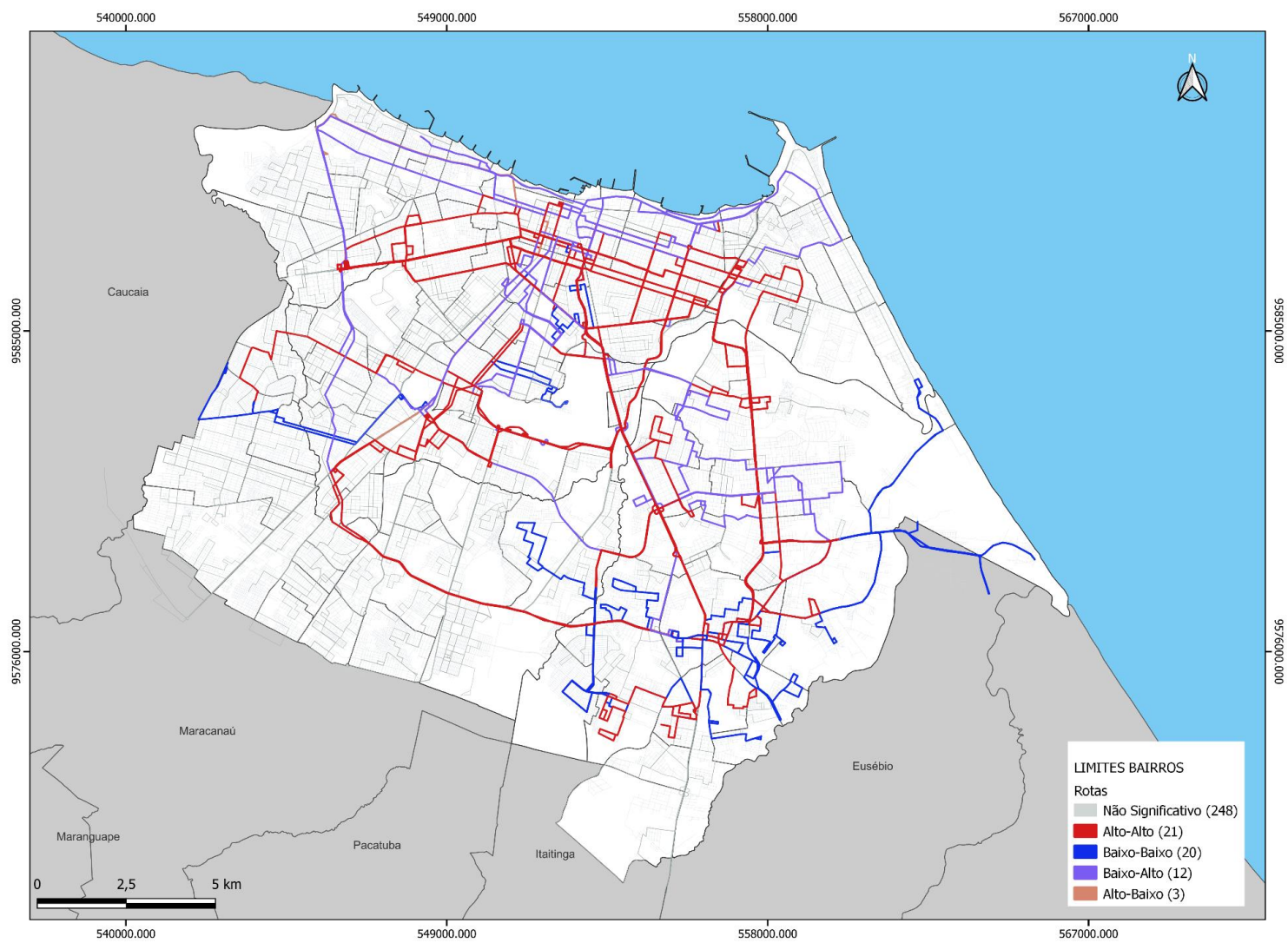
APÊNDICE E - MAPA DAS ROTAS PRIORITÁRIAS - MODA



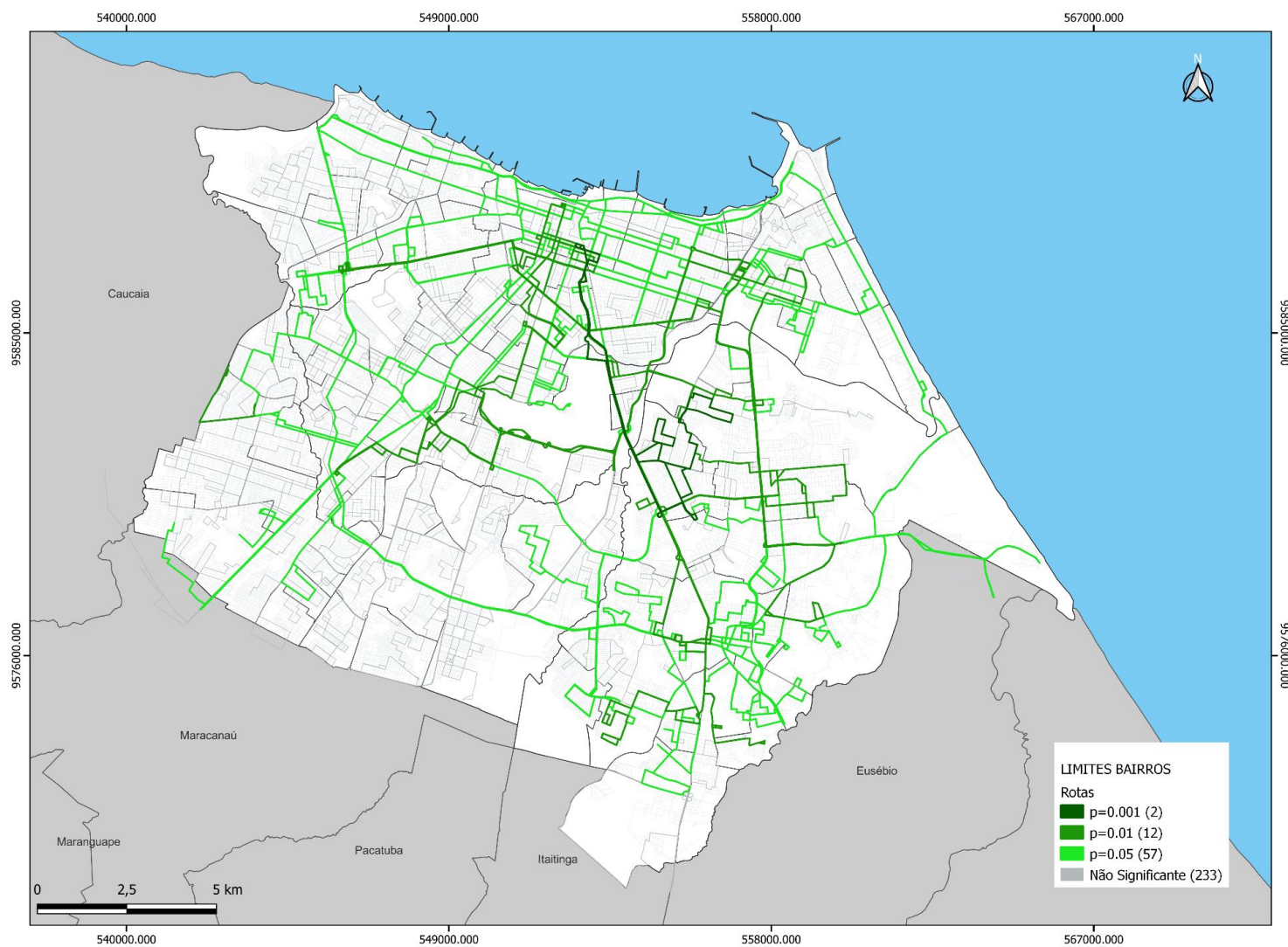
APÊNDICE F - MAPA DE AGRUPAMENTO - MÉDIA



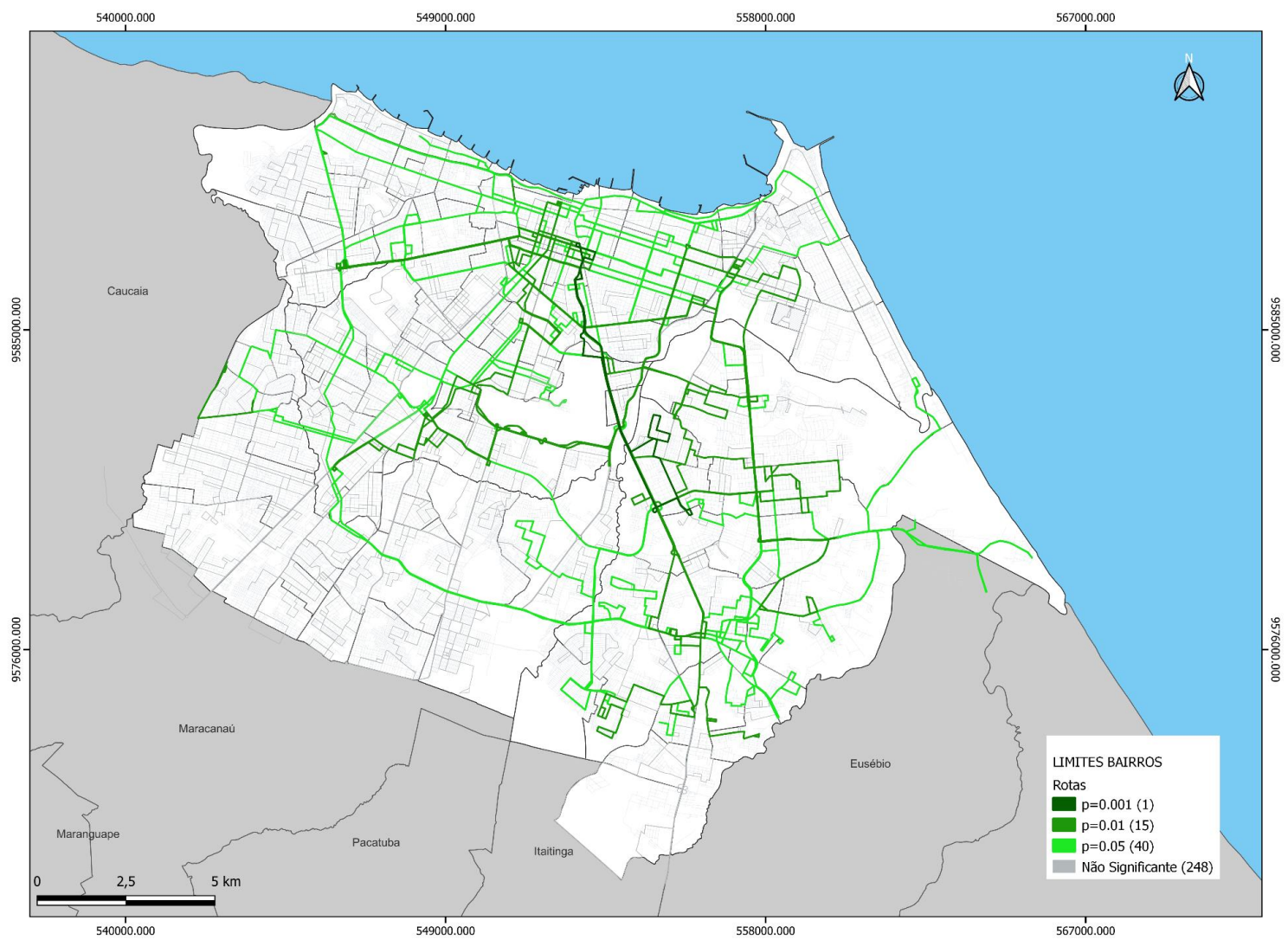
APÊNDICE G - MAPA DE AGRUPAMENTO - MODA



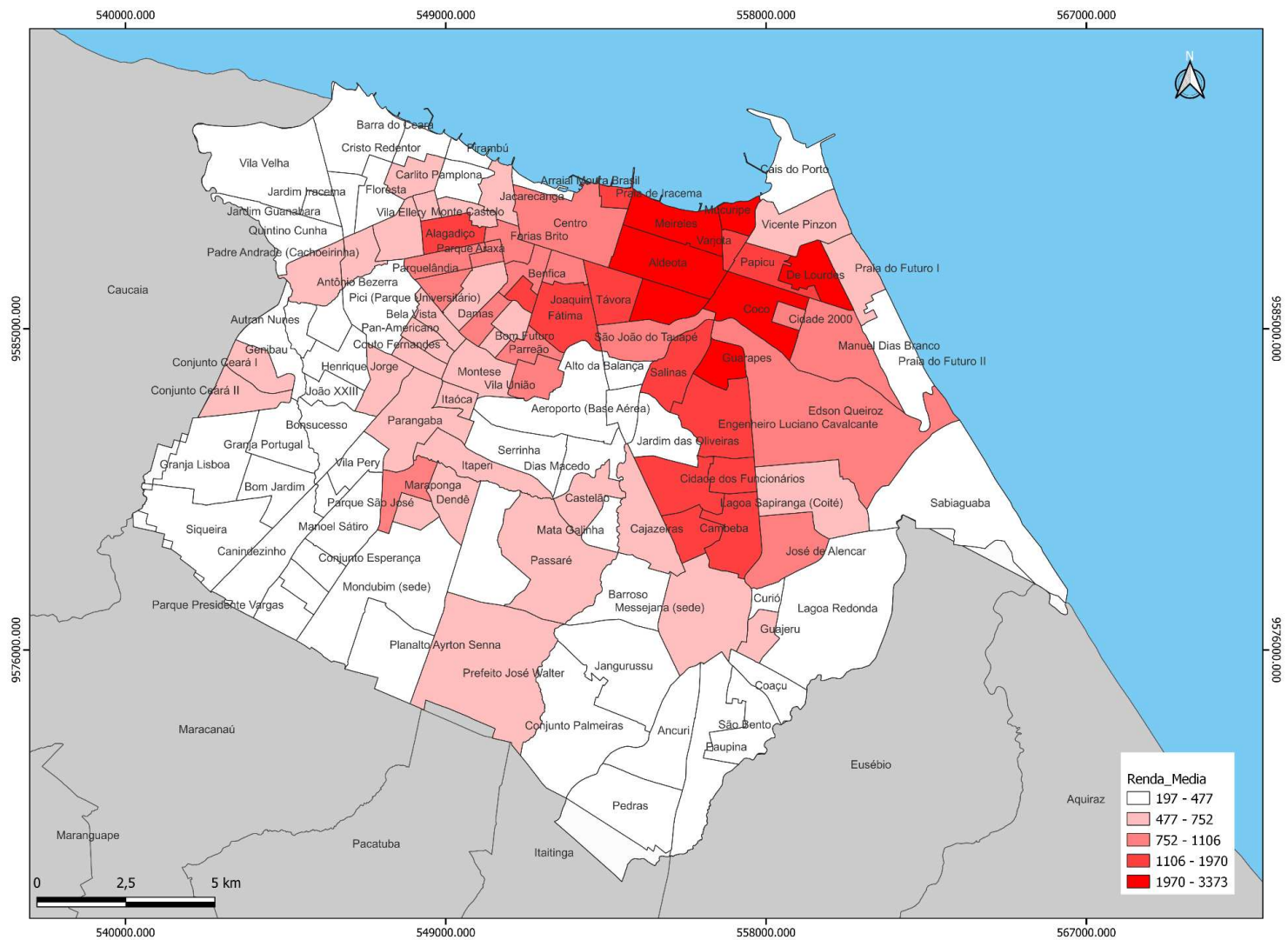
APÊNDICE H - MAPA DE SIGNIFICÂNCIA -MÉDIA



APÊNDICE I - MAPA DE SIGNIFICÂNCIA -MODA



APÊNDICE J - RENDA MÉDIA POR BAIRRO



APÊNDICE K - POPULAÇÃO POR BAIRRO

