

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

Evanilson de Lima Siqueira¹ 

Arielle Elias Arantes² 

Destaques:

- As rotas 041, 712 e 703 tiveram altos valores de demanda, emissão de CO₂ e tempo de viagem.
- Há dois agrupamentos de alta e baixa prioridade para eletrificação, nas regiões noroeste e sudeste.
- Ao substituir os ônibus a diesel por elétricos deve-se adquirir mais 55 ônibus para atender a demanda.
- As rotas 041 e 076 tem entre 0 e 23% dos ônibus com necessidade de recarga durante o dia.

Resumo: 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. 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 de novembro de 2018, os quais foram processados no software QGIS. 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 (dos Bairros) e Nível de Renda da População. Atribuiu-se pesos aos subcritérios utilizando o método MACBETH, sendo que estes foram utilizados no algoritmo TOPSIS para a hierarquização das rotas. Com a eletrificação da frota de ônibus das 10 rotas prioritárias, estima-se uma redução na emissão de CO₂ de 13%.

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

¹ Engenheiro civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC) e auxiliar de engenharia na TPF Engenharia. Atua no planejamento e desenvolvimento de projetos de infraestrutura viária e apoia na realização de estudos e na elaboração e emissão de relatórios. E-mail: evanilsondelimasiqueira@gmail.com.

² Doutora em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás. Atualmente é professora do Centro de Tecnologia na Universidade Federal do Ceará (UFC) e realiza pesquisas usando dados GNSS, SIG e análise multicritério, e o uso de imagens orbitais para aplicações nas áreas de análise de qualidade da água e da infraestrutura de transporte. E-mail: aearantes@det.ufc.br.

PRIORITIZATION OF BUS ROUTES FOR ELECTRIFICATION IN THE CITY OF FORTALEZA BASED ON MULTI-CRITERIA AND GIS ANALYSIS

Abstract: Public transportation electromobility generates low or no emission of polluting gases; however, the limited autonomy of batteries, long charging time and high acquisition cost hinder the adoption of this technology. Given this scenario, this study seeks to prioritize bus routes in the city of Fortaleza, Brazil, for electrification, considering demand/supply, environmental and social criteria, by integrating multicriteria and GIS analysis. GTFS data from November 2018 were collected and processed using QGIS software. A total of 10 sub-criteria were considered: Route Demand, Line/Route Length, Operating Fleet, Travel Time, Number of Daily Trips, Terminal Area, Distance from Terminal to Power Substation, CO₂ Emission, Total Population (on Neighborhoods) and Population Income Level. The weights assigned to the sub-criteria by the MACBETH method were used in the TOPSIS algorithm for route hierarchization. Electrification of the 10 priority routes could reduce CO₂ emissions by 13%.

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

PRIORIZACIÓN DE RUTAS DE AUTOBUSES PARA ELECTRICIDAD EN EL MUNICIPIO DE FORTALEZA CON BASE EN UN ANÁLISIS MULTICRITERIO Y DE SIG

Resumen: La electromovilidad del transporte público tiene como ventaja una baja o nula emisión de gases contaminantes, sin embargo, la limitada autonomía de las baterías, su largo tiempo de carga y el alto costo de adquisición de este componente dificultan la adopción de esta tecnología. En ese sentido, esta propuesta busca priorizar las rutas de autobuses en la ciudad de Fortaleza (Ceará, Brasil) para la electrificación, considerando los criterios relacionados con la demanda/oferta, aspectos ambientales y sociales, mediante la integración de análisis multicriterio y de SIG. En este estudio se utilizaron datos GTFS de noviembre de 2018, los cuales fueron procesados en el software QGIS. Se consideraron 10 subcriterios: Demanda de Ruta, Longitud de Línea/Ruta, Flota Operativa, Tiempo de Viaje, Número de Viajes Diarios, Área de la Terminal, Distancia de la Terminal a la Subestación Eléctrica, Emisión de CO₂, Población Total (de Barrios) y Nivel de Ingreso de la Población. Se asignaron pesos a los subcriterios mediante el método MACBETH, y estos se utilizaron en el algoritmo TOPSIS para jerarquizar las rutas. Con la electrificación de la flota de autobuses en las 10 rutas prioritarias, se estima una reducción del 13% de las emisiones de CO₂.

Palabras clave: Electromovilidad; MACBETH; TOPSIS; Demanda diaria; SIG.

INTRODUÇÃO

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). Enquanto veículos individuais respondem por cerca de 35% das viagens motorizadas e quase 60% das emissões de CO₂ nos centros urbanos brasileiros, os ônibus a combustão, utilizados no transporte público coletivo no Brasil, respondem por cerca de 25% do total de emissões de dióxido de carbono (CARVALHO, 2011).

Mesmo que os ônibus apresentem menor emissão comparativamente aos veículos individuais, o diesel, combustível fóssil derivado do petróleo, utilizado pelas frotas de ônibus, continua a ser um problema de poluição atmosférica nas zonas urbanas. 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, mostrando neste estudo que houve um aumento de 3 a 4% e 6% nas taxas de mortalidade diária por doenças cardiovasculares e respiratórias, respectivamente, associados ao aumento de material particulado e dióxido de enxofre na atmosfera.

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2019), 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. Neste sentido, 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.

Além da redução da poluição atmosférica e a melhoria da saúde da população, vale ressaltar que os ônibus elétricos são em torno de três vezes mais eficientes do que os veículos com motor de combustão interna, enquanto os motores a combustão têm aproveitamento de apenas 30% da energia, nos 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 elétricos que utilizam bateria. Considerando o valor do diesel de R\$ 3,26/L, tendo por referência o valor da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2020), o custo operacional do ônibus elétrico é 49% menor do que o do ônibus a diesel.

A adoção da tecnologia de ônibus elétricos no setor de transporte público possui alguns desafios como: a autonomia limitada das baterias e o longo tempo de carregamento, a insuficiência e problemas no fornecimento de energia da rede elétrica urbana e o alto custo de aquisição de um ônibus elétrico, o qual é 33% mais caro do que o ônibus a diesel (SLOWIK *et al.*, 2018). Mesmo com alto custo de aquisição, considerando que os ônibus nas metrópoles brasileiras rodam em média 300 quilômetros por dia, um ônibus com bateria de 350 kWh e carregador lento na garagem é mais barato do que um ônibus a diesel a partir de 80 mil quilômetros rodados (LIMA *et al.*, 2019).

Além disso, a falta de infraestrutura de recarga, e os custos de instalação de uma infraestrutura de recarga pode tornar o sistema de ônibus elétrico inviável economicamente. A *California Air Resources Board* (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. Este estudo também estimou os custos de equipamentos e instalação de um sistema de carregamento rota de 500 kW em atendimento a 6 ônibus em R\$ 3.168.000.

O alto investimento inicial, de mais de R\$ 300 milhões, dificulta a implantação desta iniciativa por parte das empresas terceirizadas do setor de transporte público, as quais para algumas cidades brasileiras, prestam serviço para a prefeitura por meio de licitações (WRI, 2019). A ausência de planos de implementação ou políticas para incentivar a eletromobilidade, como planos estratégicos ou apoio financeiro, é um obstáculo para o lançamento e implantação de projetos de eletromobilidade por parte do setor privado (WRI, 2019). Para que seja viável, a longo prazo, a substituição da frota a diesel por elétricos é necessário

um extenso apoio institucional, visto o elevado custo dos ônibus elétricos e das infraestruturas de recarga.

Para 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. Assim, os tomadores de decisão precisam determinar quais rotas de ônibus precisam ser eletrificadas primeiro, considerando como critério fundamental a demanda das rotas, os impactos sociais e ambientais. A fim de auxiliar na transição da frota de ônibus a diesel por uma frota de ônibus elétrico, 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.

MATERIAIS E MÉTODOS

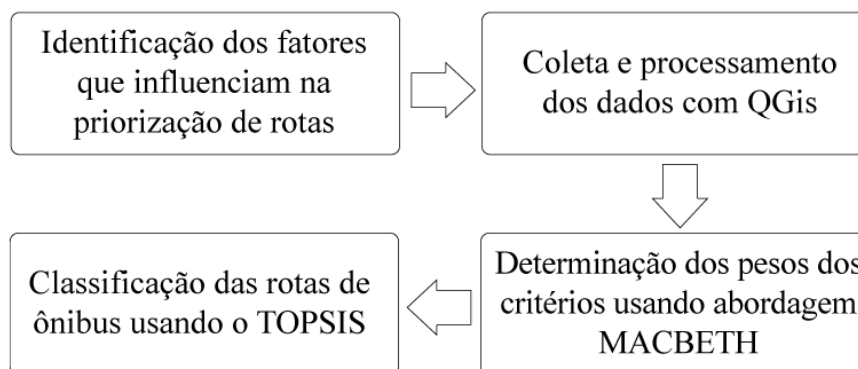
Para priorizar as rotas de ônibus para eletrificação, assumiu-se que os veículos adotados serão elétricos à bateria, com estratégia de recarga mista, e que as estações de carregamento serão implantadas em terminais e nas garagens de ônibus, pois será considerado que o veículo inicia sua viagem partindo do ponto de origem totalmente carregado.

Os critérios adotados para a priorização das rotas baseiam-se nos trabalhos de Erbas *et al.* (2018) e Emami *et al.* (2022), sendo estes adaptados para o município de Fortaleza, considerando os dados obtidos da ETUFOR (Empresa de Transporte Urbano para Fortaleza) para Novembro de 2018. Infelizmente não foi possível obter da ETUFOR dados de bilhetagem para o ano de 2022, assim, o único dado de bilhetagem disponível para a realização desta pesquisa foi o do mês Novembro de 2018. As principais etapas para a priorização das rotas do transporte coletivo incluíram:

- a) Identificação dos fatores ou critérios que devem ser considerados ao priorizar determinada rota;
- b) A coleta, organização e processamento dos dados em um ambiente de SIG, com o uso do software QGIS v3.18;

- c) A determinação dos pesos de cada critério utilizando a abordagem do MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) e a classificação das rotas utilizando o algoritmo TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) (Figura 1).

Figura 1 - Etapas para a priorização das rotas de ônibus a diesel para eletrificação



Fonte: Os autores (2022).

A identificação dos critérios que são relevantes para a priorização das rotas teve por referência a literatura e dados espaciais disponíveis para o município de Fortaleza. Foram coletados dados espaciais de cada critério e realizado o processamento destes em planilhas e no software QGIS. A relevância de cada critério foi avaliada por meio da abordagem MACBETH, determinando assim os pesos de cada critério. Por meio dos pesos e do algoritmo TOPSIS foi realizado a classificação das rotas.

Definição dos critérios

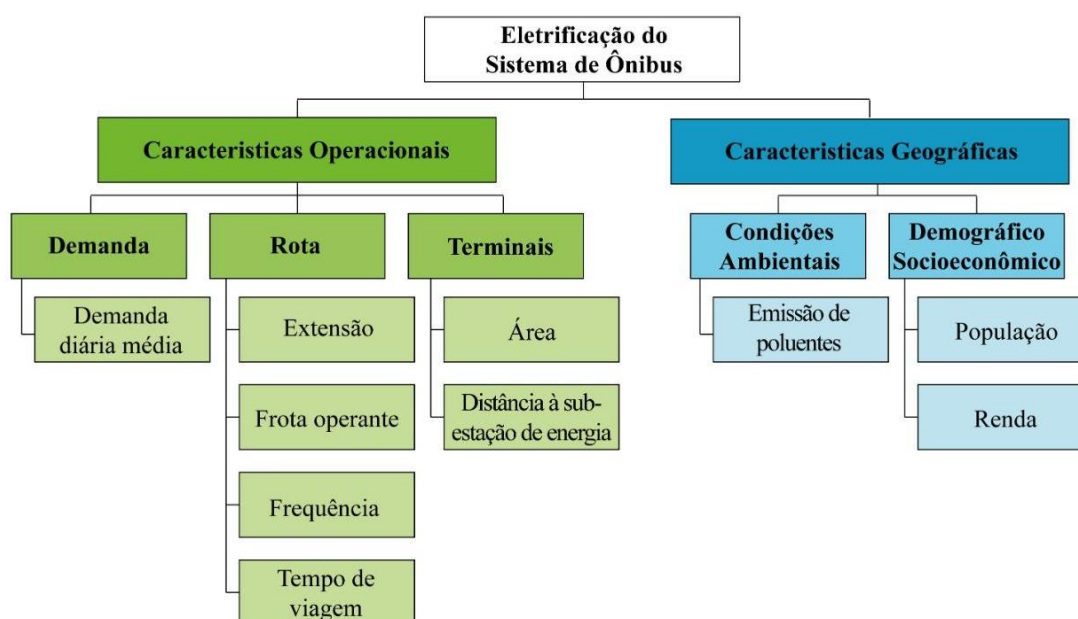
Foram levantados alguns dos principais critérios que afetam a eletrificação do sistema de ônibus, tendo por base os trabalhos de Erbas *et al.* (2018) e Emami *et al.* (2022). Os fatores foram divididos em duas categorias:

- a) As características operacionais, refletindo as condições das rotas e dos terminais, como a demanda diária média, a extensão da rota (ida e volta), a frota de ônibus operante por rota, o número de viagens (Frequência de ida e volta), o tempo total de viagem (ida e volta), a área dos terminais e a distância dos terminais as subestações de energia;

- b) As características geográficas, refletindo os impactos ambientais e socioeconômicos das rotas de ônibus, como a emissão de poluentes (CO₂), a população por bairro e a renda per capita por bairro (Figura 2).

De acordo com a hierarquia proposta, esses dois grupos são compostos por cinco critérios e dez subcritérios.

Figura 2 - Critérios selecionados para a priorização das rotas para eletrificação do sistema de ônibus do município de Fortaleza - CE



Fonte: Os autores (2022).

A Figura 2 representa os critérios e subcritérios considerados neste estudo, sendo contemplados critérios relacionados a demanda e os aspectos socioambientais. Diferentemente de Emami *et al.* (2022) não foram considerados os subcritérios qualidade do ar, características dos terminais, uso da terra e preço da terra, impacto na rede de energia e potencial para implantação de energia solar. A razão para isso é que não há dados espaciais para o município de Fortaleza dos subcritérios de qualidade do ar, das características dos terminais, do impacto dos ônibus elétricos na rede de energia elétrica e do potencial solar para implantação de painéis solares. Já para os dados de uso da terra e preço, as informações estão representadas pela unidade de bairros, sendo que a classificação do uso da terra e o preço estão bastante desatualizadas e generalizadas. Neste estudo também não foi considerado o relevo, visto que

menos de 10% do município tem declividade superior a 8%, segundo os dados de radar do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). A falta de dados espaciais de grande escala dificulta a contemplação de todos os subcritérios que possam influenciar na priorização das rotas de ônibus.

Características Operacionais

A demanda diária corresponde ao número de passageiros que utilizam determinada rota ao longo do dia. Este critério é relevante, pois determina a demanda de uso do transporte público. Para determinar a demanda foi considerado apenas o volume de passageiros que passam pela catraca do ônibus, desconsiderando a demanda de passageiros que embarcaram nos terminais.

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, s.d.) e como a maior rota possui 66,358 km, a autonomia da bateria não seria um problema. 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.

A frota operante, que é o número de ônibus alocados para uma determinada rota, indica o valor do investimento financeiro inicial, no que se refere a aquisição dos ônibus. A frota tem relação direta com a extensão da rota e com a frequência de serviço, visto que rotas extensas e com alto número de viagens requerem uma maior quantidade de ônibus. Assim, quanto maior a Frota, maior a necessidade de veículos para atendê-la, refletindo a importância desta

rota no contexto urbano. Portanto, rotas com maior frota apresentam maior prioridade de eletrificação.

A frequência de serviço refere-se ao 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. Assim como a frequência, o tempo de viagem está associado à demanda, sendo este o tempo necessário para um veículo completar uma viagem de ida e volta. Rotas com maior tempo de viagem acabam por emitir mais poluentes, e, portanto, devem ser priorizadas para a eletrificação. As viagens em um veículo elétrico são mais silenciosas e confortáveis aos passageiros do que o ônibus a diesel e, portanto, rotas mais demoradas são prioritárias para eletrificação, a fim de garantir um maior conforto aos usuários do transporte coletivo.

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, como determinado pela área dos terminais. Além disso, a distância dos terminais às subestações de energia é altamente importante, visto que quanto mais próxima à 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 a eletrificação.

Características Geográficas

O principal motivo para a eletrificação do sistema de ônibus é a redução de emissões de poluentes. Este critério leva em consideração a quantidade total de CO₂ emitida por determinada rota em um dia da semana. O número de viagens e a extensão da rota foram utilizadas para estimar a emissão total de CO₂ de cada rota. Visando minimizar as emissões, a prioridade da eletrificação deve ser dada às rotas que produzem mais poluentes.

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. De preferência, as rotas devem cobrir áreas com população de baixa renda, visto serem estas que mais utilizam o transporte público.

Processamento dos subcritérios no QGIS

As características, fonte dos dados e unidade de cada subcritério operacional e geográfico estão detalhados no Quadro 1. Os dados referentes aos critérios das rotas, como a extensão da rota, frota de ônibus, tempo e número de viagens foram obtidas do Geral de Feed de Trânsito (GTFS) para o mês de novembro de 2018, sendo que estes dados são organizados pela Divisão de Tecnologia da Informação - ETUFOR/DITIC para o município de Fortaleza. É importante destacar que o GTFS considera o tempo e o número de viagens programado e não os valores “reais” medidos ao longo das viagens. No caso dos dados de bilhetagem, também disponibilizados pela ETUFOR para o mês de novembro de 2018, estes são medidas reais da passagem dos usuários pela catraca do ônibus. Já os dados de população e renda foram baixados no site Fortaleza em Mapas, 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.

Quadro 1 - Informações sobre cada subcritério, como fonte e unidade.

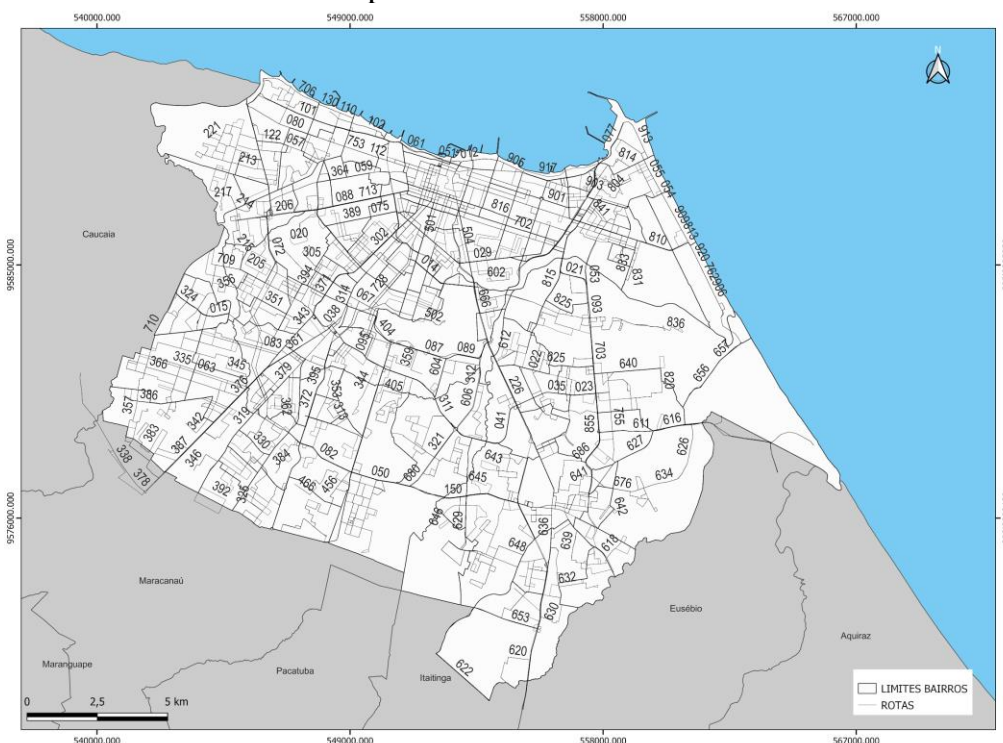
Crítérios	Unidade	Fonte
Demanda Diária	Passageiros por dia	Bilhetagem ETUFOR, 2018
Extensão da Linha	Km	GTFS (2018)
Frota operante	Número de ônibus	GTFS (2018)
Tempo de Viagem	Horas	GTFS (2018)
Frequência de Serviço	Nº de Viagens diária	GTFS (2018)
Área dos Terminais	m ²	ETUFOR (2018) e Google Earth
Distância do Terminal até a Subestação	Km	ETUFOR (2018) e CPE

Emissão de CO ₂	KgCO ₂ /Km	GTFS e Carvalho (2011)
População Total	Nº pessoas	SEFIN/PMF (2015)
Renda	Reais por bairro	SDE/IBGE (2010)

Fonte: Os autores (2022).

A partir dos dados GTFS e de bilhetagem foram geradas as 304 rotas para todo o município de Fortaleza. A Figura 3 mostra a localização das rotas no município de Fortaleza com os seus respectivos nomes. Percebe-se que há uma alta sobreposição das rotas de ônibus na Avenida Beira Mar (próxima à costa), onde encontra-se as praias de Fortaleza.

Figura 3 - Localização das 304 rotas de ônibus do transporte coletivo no município de Fortaleza



Fonte: Os autores (2022).

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, sendo posteriormente utilizado o software QGIS para determinar a frequência e o tempo de viagem e a extensão da rota.

Para a área dos terminais foi feita a delimitação de cada terminal no Google Earth, e posteriormente a área de cada polígono foi calculada no software QGIS v3.18. Já a distância do terminal à subestação de energia foi determinada como sendo a menor distância em linha reta, ou distância euclidiana, tendo como origem os terminais e os destinos as subestações.

Com relação aos dados de população e renda, 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 a emissão de poluentes 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 (Nº Viagens) e a extensão da rota (km) de cada ônibus, foi estimado a quantidade de CO₂ produzido por cada rota (Equação 1).

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

Determinação dos Pesos no MACBETH

O nível de atratividade de cada subcritério foi avaliado utilizando o método de análise multicritério MACBETH, sendo este um método de tomada de decisão (MDCA) desenvolvido na década de 1990 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, 2013). Os julgamentos são feitos entre pares, onde um indivíduo ou um grupo determina o nível de atratividade de uma opção em relação à outra.

Para determinar o nível de atratividade, foi aplicado um questionário de forma eletrônica 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 subcritério. O formulário foi distribuído por whatsapp, email e instagram para os usuários do transporte público, professores e alunos da Universidade

Federal do Ceará (UFC), motoristas e cobradores e os profissionais da ETUFOR. Não foi possível determinar a taxa de respostas, visto que este foi amplamente divulgado nas redes sociais sem que fosse registrado o número de visualizações. A aplicação do questionário online dificultou acessar os usuários do transporte coletivo fora dos contatos próximos dos autores. No entanto, devido ao prazo para finalização do trabalho, ficou inviável a aplicação de questionários de forma presencial, a fim de contemplar um grupo mais diversificado de atores.

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 subcritérios foi usada a média ponderada do inverso da categoria (Equação 2), onde x_i é o número de respostas na categoria i , com $i = 1,2,3,\dots,10$.

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

Para a atratividade, a avaliação foi feita por meio de comparações paritárias usando a escala semântica do método (Tabela 1), a fim de determinar o grau de atratividade de cada critério segundo os atores. O objetivo do método é transformar escalas ordinais em escalas cardinais a partir de juízos absolutos sobre essas diferenças de atratividade entre alternativas qualitativas. A partir do julgamento determina-se a escala quantitativa e os pesos de cada subcritério.

Tabela 1 - Escala de Julgamentos MACBETH

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

Fonte: Os autores (2022).

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. Esta matriz foi gerada no software M_MACBETH, o qual analisa automaticamente a consistência das escolhas feitas e, quando é encontrada uma inconsistência, o software oferece algumas sugestões para eliminar essa inconsistência (COSTA *et al.*, 2011). A escala numérica resultante é totalmente consistente com o julgamento de todos os tomadores de decisão, sendo então gerados pesos para os subcritérios.

Priorização das Rotas com o TOPSIS

Desenvolvido em 1981, por Hwang e Yoon, o TOPSIS 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 (HWANG e YOON, 1981):

- 1) Construção da Matriz de decisão/avaliação $(x_{ij})_{m \times n}$, Composta por m alternativas e n critérios. Nesta etapa foram consideradas as 304 rotas de ônibus do município de Fortaleza e 10 subcritérios.

- 2) Construção da Matriz normalizada $R = (r_{ij})_{m \times n}$, Equação 3, e ponderada $T = (t_{ij})_{m \times n}$, Equação 4. Os valores de cada subcritério foram normalizados, a fim de compatibilizar as escalas de variação. A normalização seguiu 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.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}} \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n. \quad (3)$$

$$t_{ij} = r_{ij}w_j \quad (4)$$

- 3) Definição da solução ideal A^+ e ideal negativa A^- , Equações 5 e 6, respectivamente. Neste caso, apenas a distância do terminal à subestação e o subcritério de renda são os negativos, ou seja, quanto menor o valor, melhor, sendo os demais subcritérios positivos.

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

$$A^- = \{t_1^-, t_2^-, t_3^-, \dots, t_n^-, \} \quad (6)$$

- 4) Distância euclidiana entre as alternativas e a solução ideal, dm (distância a A^+), (Equação 7), e dp (distância a A^-)(Equação 8). Posteriormente foram determinadas as distâncias de cada alternativa (rota de ônibus) para as soluções ideais positivas (dm) e negativas (dp). O valor de similaridade foi determinado a partir dessas distâncias (dm e dp) (Equação 9).

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

$$dp = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_j^+)^2} \quad (8)$$

5) Cálculo da medida de similaridade S, Equação 9;

$$S = \frac{dp}{(dm+dp)}, \quad 0 < S < 1 \quad (9)$$

6) Finalmente ordenou-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.

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. Posteriormente aplicou-se o índice de Moran para avaliar se existe algum agrupamento das rotas prioritárias no município de Fortaleza.

O índice de Moran 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 é a determinação de uma matriz de proximidade espacial, onde cada elemento da matriz recebe um peso de 0 a 1 de acordo com os vizinhos com os quais compartilha uma fronteira¹ (DRUCK *et al.*, 2004). O critério de vizinhança "rainha" e quatro vizinhos foi utilizado para calcular a matriz de proximidade espacial. O critério Rainha considera como vizinhas as unidades que possuem fronteiras comuns, em que a unidade vizinha é definida da forma com peso de 1, enquanto o elemento que não possui relação de vizinhança é definido com peso de 0. Com base nos valores da matriz de proximidade, o Índice de Moran é calculado considerando o número de rotas, o valor de similaridade de cada rota, a média dos valores de similaridade

de uma determinada região, sendo atribuído um peso, conforme os valores da matriz de proximidade espacial.

Viabilidade 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 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, s.d.). 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 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 pelo 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 pelo ônibus, sendo este valor multiplicado pela extensão da rota (ida e volta). Com isso, determinou-se a frota necessária para atender o número total de viagens diárias de cada rota. Analisou-se então dois cenários, um considerando a frota de ônibus atual e outro com a expansão da frota de ônibus.

Considerando a frota de ônibus atual, percebeu-se que para algumas rotas, a distância total percorrida em todas as viagens excedeu a autonomia da bateria, ou seja, para cumprir com o número de viagens da rota 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 ônibus de uma vez, assim, foi proposto um sistema de otimização da recarga. 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 foi avaliado 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.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Questionário e MACBETH

Ao total foram obtidas 68 respostas do questionário, sendo que 48,5% das respostas foram de alunos da graduação. Das 68 respostas, 18 ou 26,5% não são usuários do transporte público e outros 11 ou 16,1% não são professores ou alunos de graduação ou pós-graduação. Apenas 1,5% das respostas foram de motoristas ou cobrados de ônibus. É importante ressaltar que a predominância de respostas por parte dos alunos resultou em uma ampla variabilidade no julgamento dos critérios, resultado da falta de expertise destes. Infelizmente, mesmo distribuído o formulário eletrônico entre os profissionais da área de transportes, recebemos poucas respostas dos mesmos, sendo que estes são os principais atores que influenciam na tomada de decisão na priorização das rotas.

Destas respostas, é interessante notar que os primeiros critérios receberam mais votos na categoria 1 (mais relevante) do que na categoria 10 (menos relevante), já para os últimos subcritérios o comportamento foi oposto, isto é, estes receberam mais votos na categoria menos relevante do que na categoria mais relevante (Tabela 2). 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. Na Tabela 2 é perceptível a pouca

variação nas respostas entre os subcritérios, o que indica uma alta divergência no que cada ator considera mais ou menos relevante. Para minimizar este problema, o ideal seria obter um número maior de respostas e aplicar o questionário com outros atores.

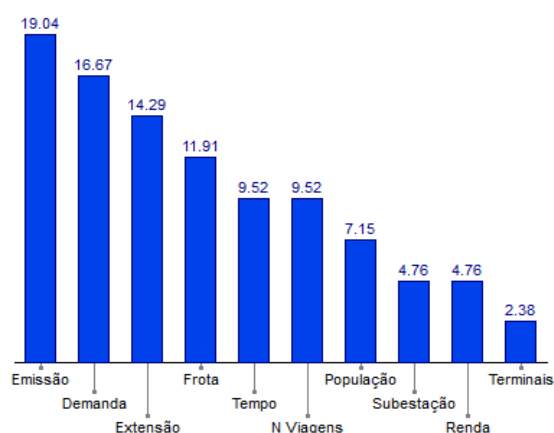
Tabela 2 - Resultados do Questionário relativos a Categorização dos Critérios

	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º
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
Número de Viagens	3	9	9	9	2	11	9	6	7	3
Distância Terminal a Subestação	4	7	9	7	9	4	8	10	3	7
Extensão da Linha/rota	2	7	7	9	8	9	8	8	6	4
Nível de Renda	8	6	6	4	6	8	8	3	6	13
População	1	6	7	5	7	5	7	10	9	11
Área dos Terminais	4	2	2	7	6	6	6	12	12	11

Fonte: Os autores (2022).

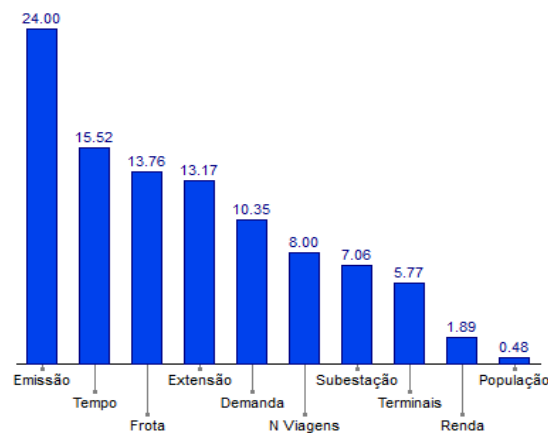
Após a categorização dos subcritérios, utilizou-se o MACBETH para analisar a consistência das respostas e qualificar o nível de comparação, ou atratividade, entre dois critérios, tendo por referência a Tabela 1. As Figuras 4 e 5 mostram os resultados obtidos no *software* em que é possível verificar que o fator Emissão de CO2 é o subcritério que mais influência na priorização das rotas de ônibus para eletrificação em ambos os casos (média e moda).

Figura 4 - Peso (%) - Média



Fonte: Os autores (2022).

Figura 5 - Peso (%) - Moda



Fonte: Os autores (2022).

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 subcritério de população, seguido da demanda da rota e do tempo de viagem, com diferenças superiores a 6 pontos percentuais. A extensão da rota foi o subcritério que menos apresentou diferença entre os pesos da média e moda, com uma diferença de 1,12 pontos. 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.

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. As Tabelas 3 e 4 indicam as 10 principais rotas com seus respectivos valores de similaridade, segundo a média e a moda das respostas do formulário. Pode-se observar 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 14657 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 11589 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 emitir 7,1 ton CO₂/dia.

Tabela 3 - Classificação TOPSIS Média

Classificação	ID da Rota	Nome da Rota	Similaridade
1 ^o	041	Parangaba/Oliveira Paiva/Papicu	0,8335
2 ^o	712	Cj Palmeiras/Papicu	0,8145
3 ^o	703	Paupina/Pici	0,7591
4 ^o	076	Cj Ceará/Aldeota	0,7199
5 ^o	051	Grande Circular I	0,7197
6 ^o	045	Cj Ceará/Papicu/Montese	0,7114
7 ^o	042	Antônio Bezerra/Francisco Sá/Papicu	0,6912
8 ^o	074	Antônio Bezerra/Unifor	0,6612
9 ^o	855	Bezerra de Menezes/Washington Soares	0,6359
10 ^o	754	Granja Lisboa/Goiabeiras	0,6338

Fonte: Os autores (2022).

Tabela 4 - Classificação TOPSIS Moda

Classificação	ID da Rota	Nome da Rota	Similaridade
1 ^o	041	Parangaba/Oliveira Paiva/Papicu	0,8456
2 ^o	712	Cj Palmeiras/Papicu	0,8295
3 ^o	703	Paupina/Pici	0,7616
4 ^o	051	Grande Circular I	0,7268
5 ^o	076	Cj Ceará/Aldeota	0,6929
6 ^o	045	Cj Ceará/Papicu/Montese	0,6876
7 ^o	042	Antônio Bezerra/Francisco Sá/Papicu	0,6540
8 ^o	754	Granja Lisboa/Goiabeiras	0,6479
9 ^o	073	Siqueira/Praia de Iracema	0,6461
10 ^o	074	Antônio Bezerra/Unifor	0,6212

Fonte: Os autores (2022).

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 2,38% e 5,77% na média e moda, respectivamente.

A redução de emissão de CO₂ das 10 rotas prioritárias pelo cenário da média e moda é de 62,8 ton CO₂/dia e de 63,4 ton CO₂/dia, respectivamente. Isso

equivale a uma redução de 13% na emissão de CO₂ do transporte público com a eletrificação de 3% das rotas (10 de 304) em operação em 2018. As rotas prioritárias contribuem para reforçar o peso dos critérios ambientais e operacionais.

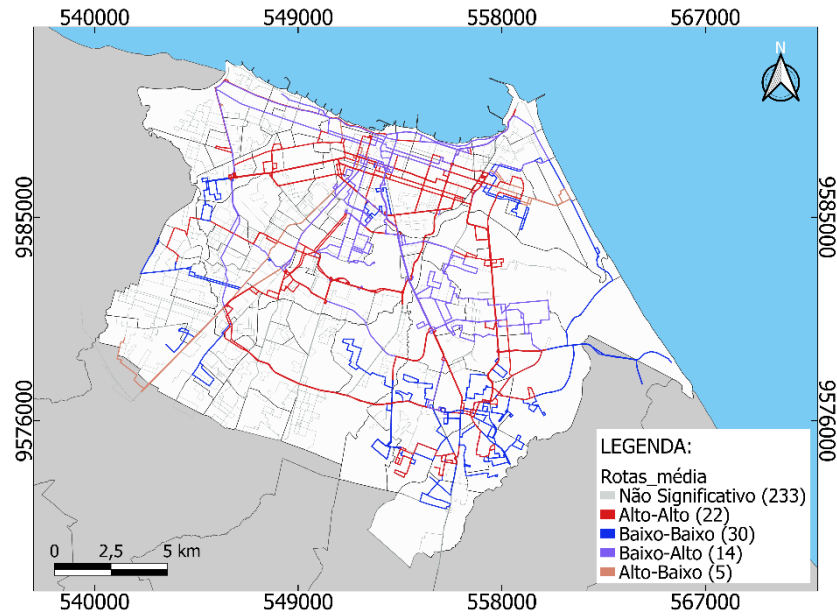
Pode-se notar também que, em geral, o julgamento da média ou moda não altera muito a classificação das rotas. Resultados usando dois cenários diferentes mostram que a estrutura proposta pode ser interpretada como um modelo robusto, de modo que pequenas mudanças nos pesos considerados não têm muito impacto na classificação da rota.

Índice de Moran

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 (Figura 6). Independente de adotar a média ou moda das respostas, o resultado dos valores de similaridade da análise de autocorrelação espacial foi praticamente idêntica para as duas análises (Figura 6 e Figura 8). No caso da moda, o percentual de rotas com correlações significativas positivas (alto-alto) e negativas (baixo-baixo) foram de 7% e 7%, respectivamente (Figuras 8 e 9). O percentual de rotas com agrupamento baixo-baixo foi menor para a moda (7%) do que para a média (10%).

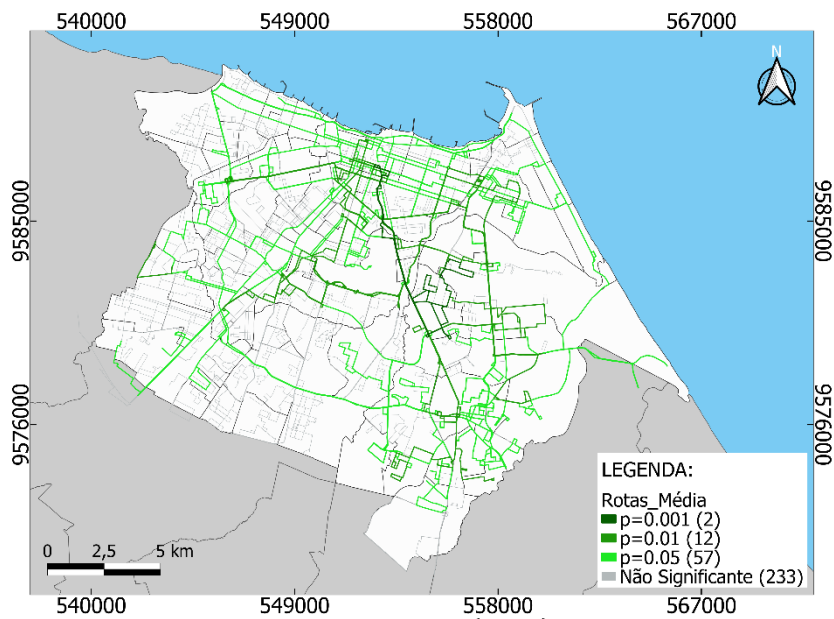
De qualquer forma, os padrões espaciais dos agrupamentos das Figuras 6 e 8 são semelhantes, ou seja, predominam-se rotas de alta priorização na região central e noroeste do município de Fortaleza, e rotas de baixa prioridade na região sudeste. Como o peso do subcritério renda foi o segundo menor em ambas as análises (média e moda), e a região sudeste apresenta uma população de menor renda, 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 o oposto do analisado neste trabalho.

Figura 6 - Correlações Espaciais dos Valores de Similaridade (Média)



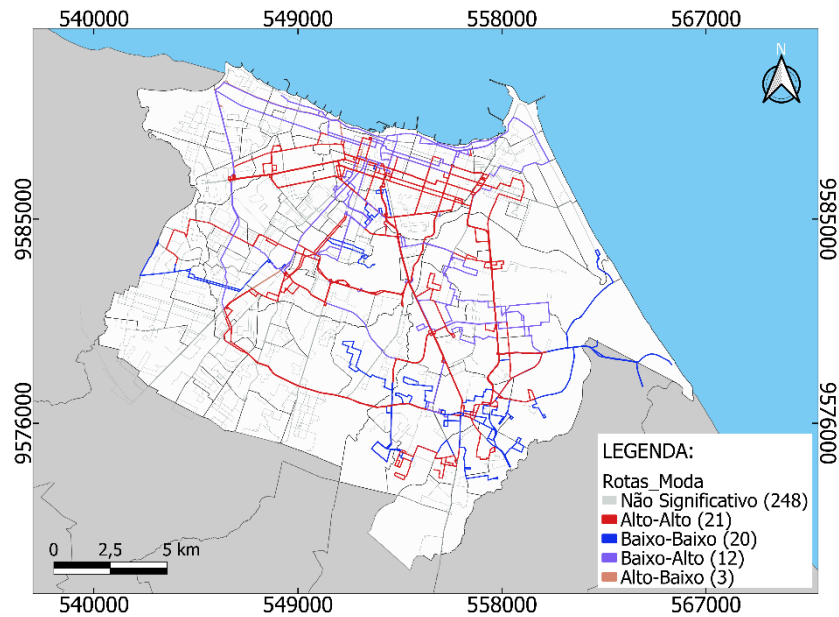
Fonte: Os autores (2022).

Figura 7 - Significância Estatística ($p < 0,05$)



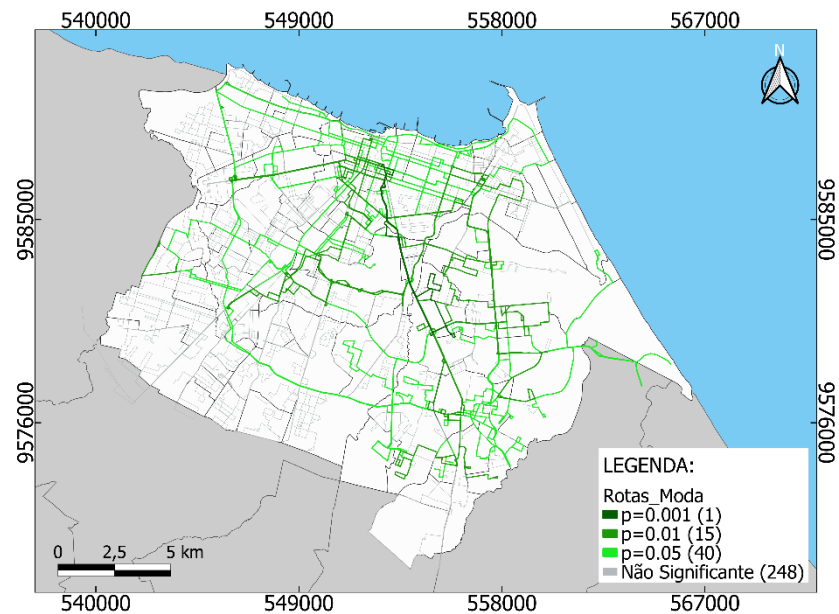
Fonte: Os autores (2022).

Figura 8 - Correlações Espaciais dos Valores de Similaridade (Moda)



Fonte: Os autores (2022).

Figura 9 - Significância Estatística ($p < 0,05$).



Fonte: Os autores (2022).

Considerando os valores de similaridade derivados da média das respostas do questionário, apenas 7% e 10% de todas as rotas apresentaram autocorrelação espacial positiva e negativa com significância estatística (Figuras 6 e 7), sendo este resultado corroborado pelo valor de correlação do Índice de Moran de 0,25 para a média e 0,22 para a moda. 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 6). 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.

Viabilidade das Rotas prioritárias para eletrificação

A Tabela 5 mostra o número de viagens realizadas pelos ônibus e quantas viagens poderiam ser realizadas com o ônibus elétrico (autonomia de viagens). 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. 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 5 - Classificação TOPSIS Moda

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: Os autores (2022).

Apenas a rota 076 consegue atender o itinerário diário completo sem a necessidade de recargas ao longo do dia, sendo uma das rotas com menor extensão entre as rotas prioritárias (Tabela 5). A rota 051 - Grande Circular I possui a maior extensão, 61,872 km, por isso possui uma autonomia baixa, além de ter a menor frota operante, sendo necessário cada ônibus realizar mais viagens ao longo do dia. A rota menos viável para ser eletrificada em termos econômicos é a 712, sendo esta a segunda com maior prioridade para eletrificação, segundo os critérios relacionados à demanda. Isto porque para atender às viagens

realizadas na rota 712 com a frota a diesel, seria necessário dobrar a frota de ônibus desta rota, ou seja, haveria um aumento de R\$ 83 milhões de reais no investimento inicial.

Para tornar viável a substituição dos ônibus, foi proposto um sistema de otimização de recarga, onde apenas parte da frota seria recarregada durante o dia (Tabela 6). Para a rota 712 todos os ônibus seriam carregados duas vezes, 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.

A rota 703 terá metade da frota com necessidade de recargas, realizando 6 viagens, enquanto a outra metade que não vai ser recarregada vai realizar apenas 3 viagens (Tabela 6). As rotas 712 e 051 são as mais críticas por terem 100% e 93,75%, da frota com necessidade de carregamento ao longo do dia, respectivamente. 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. Das cinco rotas prioritárias, as rotas 041 e 076 são as ideais para eletrificação, visto que estas atendem aos critérios de demanda e apenas 0 e 23% dos ônibus precisam de duas cargas diárias, o que aumenta os ônibus em circulação. Assim, para tornar viável a substituição dos ônibus à diesel por elétricos, é necessário uma estratégia de recarga mista, carregamentos noturnos na garagem por *plug-in* e carregamentos auxiliares diurnos nos terminais.

Tabela 6 - 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: Os autores (2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fim de auxiliar na transição da frota de ônibus a diesel por um frota de ônibus elétrico, buscou-se neste trabalho 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. A partir de um questionário aplicado considerando os vários atores que utilizam o transporte público, percebeu-se que o critério ambiental e os critérios operacionais foram considerados de maior relevância comparativamente aos critérios sociais. Com base nos pesos dos critérios, ordenou-se as rotas em ordem de maior ou menor importância utilizando o algoritmo TOPSIS. As três rotas com maior prioridade foram a 041, 712 e 703, sendo que estas apresentam maiores valores de demanda diária média, emissão de CO₂ e tempo de viagem. Com a eletrificação da frota de ônibus das 10 rotas prioritárias, estima-se uma redução na emissão de CO₂ de 13% (63 ton CO₂/dia).

Ao realizar a análise de autocorrelação espacial dos valores de similaridade das rotas, sendo que estes valores indicam a prioridade para eletrificação, verificou-se que dois agrupamentos significativos para eletrificação, um com alta prioridade na região noroeste e outro de baixa prioridade na região sudeste do município de Fortaleza. As rotas que apresentam agrupamentos significativos correspondem a cerca de 7% de todas as rotas analisadas, ou seja, a maioria das rotas não apresentou valores de similaridade semelhantes com os seus vizinhos. Isso é corroborado pelo baixo valor do índice de Moran, de 0,22.

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. Considerando o custo de cada ônibus elétrico do modelo BYD 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), considerando o preço de um ônibus a diesel de R\$ 200 mil reais. Esta mudança equivale a um aumento no investimento inicial de R\$ 317 milhões.

Para tornar viável a substituição dos ônibus, foi proposto um sistema de otimização de recarga, onde apenas parte da frota seria recarregada durante o

dia. As rotas 712 e 051 são as mais críticas por terem 100% e 93,75%, da frota com necessidade de carregamento ao longo do dia, respectivamente. Seria inviável a eletrificação destas rotas com este sistema, visto que parte do dia haveria um número reduzido de ônibus em circulação, devido ao alto tempo de recarga, isso acarretaria em superlotação e alto tempo de espera por parte dos passageiros. Das cinco rotas prioritárias, as rotas 041 e 076 são as ideais para eletrificação, visto que estas atendem aos critérios de demanda e apenas 0 e 23% dos ônibus precisam de duas cargas diárias, o que aumenta os ônibus em circulação.

Ao escolher critérios relacionados à demanda, as rotas prioritárias acabaram sendo as mais extensas e com maior frequência e tempo de viagem. Em termos técnicos e econômicos a eletrificação de rotas extensas e com alto número de viagens diárias não é o ideal, visto que estas apresentam percursos totais superiores a autonomia da bateria. Com isso, é necessário carregar a bateria durante o dia, e como o tempo de recarga é superior a 2 horas, isso indicaria que parte da frota de ônibus da rota não estaria em operação durante várias horas do dia, levando a problemas de superlotação e alto tempo de espera por parte dos passageiros. Neste sentido, para tornar viável na prática a substituição da frota de ônibus a diesel por elétrico é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias, que sejam de baixo custo, a fim de garantir baterias com maior autonomia e menor tempo de recarga.

REFERÊNCIAS

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP): Levantamento de Preços e de Margens de Comercialização de Combustíveis. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/2WCHoeY> .Acesso em: mai. 2022.

BYD. Chassis de ônibus: BYD D9A 20.410 - Padron piso alto. Campinas – SP. 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. 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.** 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: 21 mai. 2022.

COSTA, C. A. B.; CORTE, J. M.; VASNICK, J. C. Macbeth (measuring attractiveness by a categorical based evaluation technique. **Wiley encyclopedia of operations research and management science**, Fev. 2011. <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0970>

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Análise Espacial de Dados Geográficos.** Brasília: EMBRAPA, 2004.

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**, v. 2676, n. 8, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1177/03611981221082565>

ERBAS, M.; KABAK, M.; ÖZCEYLAN, E.; ÇETINKAYA, C. Optimal Siting of Electric Vehicle Charging Station: A GIS-Based Fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis. **Energy**, v. 163, n. 15, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.140>

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: 20 nov. 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.

LIMA, G. C. L. S.; SILVA, G. L. R.; ALBUQUERQUE, G. S. Mobilidade elétrica: o ônibus elétrico aplicado ao transporte público no Brasil. **Revista dos Transportes Públicos**, 2019.

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, 2019. Disponível em: <https://seeg-br.s3.amazonaws.com/2019-v7.0/documentos-analiticos/SEEG-Relatorio-Analitico-2019.pdf>. Acesso em: 17 set. 2022.

SLOWIK, P.; ARAUJO, C.; DALLMANN, T.; FAÇANHA, C. **Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas**

Urbanas. Brasília: MDIC, 2018. *E-Book*. Disponível em: <https://theicct.org/publication/avaliacao-internacional-de-politicas-publicas-para-eletromobilidade-em-frotas-urbanas/> . Acesso em: 23 set. 2022.

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

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.

Recebido em 24 de novembro de 2022
Aceito em 14 de fevereiro de 2023