VETOR

Proposição de *hubs* no Nordeste para importação de equipamentos de alta performance da Europa e Sudeste Asiático: Um modelo computacional integrado de Lógica *Fuzzy*, OWA e Otimização☆

Proposal of Hubs in Northeast Brazil for High-Performance Equipment Importation from Europe and Southeast Asia: An Integrated Computational Model of Fuzzy Logic, OWA, and Optimization

Jéssika Kauanny de Souza Eurico[1,†], Natalie von Paraski[2], Eduardo Silva Palmeira[1], Francisco Bruno Souza Oliveira[1]

[1]*Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Brasil*
[2]*Instituto Federal de São Paulo, São José dos Campos, Brasil*
[†]**Autor correspondente:** jkseurico.ppgmc@uesc.br

Resumo

No contexto da logística internacional, a eficiência e a sustentabilidade são cruciais. Este estudo propõe a reconfiguração da malha aérea no Brasil, utilizando aeroportos do Nordeste como *hubs* para importações da Europa e Ásia. A metodologia emprega grafos *fuzzy* e o operador OWA para modelar e otimizar rotas, considerando múltiplos critérios como distância, tempo de voo, emissão de CO_2 e custo de frete. A análise inicial demonstra a viabilidade do modelo, oferecendo uma base sólida para futuras pesquisas que irão expandir o escopo para 67 aeroportos internacionais e refinar a definição dos pesos dos critérios. O estudo visa melhorar a eficiência logística, reduzir custos e emissões de carbono, e promover o desenvolvimento regional sustentável.

Palavras-chave
Otimização • Emissão de CO_2 • Grafos *fuzzy*

Abstract

In the context of international logistics, efficiency and sustainability are crucial. This study proposes the reconfiguration of the airline network in Brazil, using airports in the Northeast as hubs for imports from Europe and Asia. The methodology uses fuzzy graphs and the OWA operator to model and optimize routes, considering multiple criteria such as distance, flight time, CO_2 emissions and freight cost. The initial analysis demonstrates the viability of the model, offering a solid basis for future research that will expand the scope to 67 international airports and refine the definition of criteria weights. The study aims to improve logistical efficiency, reduce costs and carbon emissions, and promote sustainable regional development.

☆ Este artigo é uma versão estendida do trabalho apresentado no XXVII ENMC Encontro Nacional de Modelagem Computacional e XV ECTM Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais, ocorridos em Ilhéus – BA, de 1 a 4 de outubro de 2024.

Keywords

Optimization • CO_2 emission • Fuzzy graphs

1 Introdução

No contexto da logística internacional, a eficiência e sustentabilidade são fundamentais para o sucesso operacional. As importações de equipamentos robustos de alta performance de computação estão majoritariamente concentradas nos aeroportos do Sudeste brasileiro, o que gera desafios como custos elevados, maior tempo de entrega e maiores emissões de CO_2.

Apesar da existência de cinco aeroportos internacionais no Nordeste, essa região permanece subutilizada, resultando em um modelo logístico ineficiente. Propomos uma reconfiguração da malha aérea, utilizando aeroportos do Nordeste como *hubs* principais para importações da Europa e Ásia. Essa estratégia visa otimizar o transporte, reduzindo custos, tempo de entrega e pegada de carbono.

Para implementar essa solução, será aplicada a modelagem computacional baseada em grafos *fuzzy*, que permitem lidar com a incerteza nos dados logísticos. Através do operador OWA (*Ordered Weighted Averaging*), serão combinados múltiplos critérios (distância, tempo de voo, emissão de CO_2 e custo) de forma ponderada para calcular os pesos das rotas. Posteriormente, o algoritmo de Dijkstra será utilizado para determinar os caminhos mínimos no grafo, identificando as rotas mais eficientes e sustentáveis.

A mitigação dos impactos ambientais das atividades econômicas, especialmente no setor de transporte, é um tema central em estudos recentes. No estudo publicado na Ref. [1] destacam-se medidas para reduzir as emissões de CO_2, inspiradas em iniciativas de outros países que enfrentam desafios semelhantes.

No contexto das importações de equipamentos de grande porte da Ásia e Europa para uma empresa no Nordeste brasileiro, observou-se uma predominância dos *hubs* logísticos no Sudeste, como Guarulhos e Galeão. Essa centralização, apesar de justificável pelo maior número de companhias aéreas e infraestrutura existente, resulta em custos elevados, maior tempo de entrega e maior emissão de CO_2, dados extraídos do site dos aeroportos mencionados anteriormente. Entretanto, o Nordeste conta com cinco aeroportos internacionais, como Recife, Salvador, Fortaleza, Natal e São Luís, que poderiam ser mais bem aproveitados para melhorar a eficiência logística.

As restrições, como a ausência de alfândegas em alguns estados nordestinos, limitam a escolha desses aeroportos para importações, destacando a necessidade de políticas públicas que incentivem a diversificação dos *hubs* logísticos. Dados apresentados na Ref. [2] mostram que os aeroportos com maior percentual de carga de importações estão concentrados em Guarulhos, Viracopos, Galeão, Manaus e Brasília. Isso reforça a centralização logística, mas também sublinha o potencial inexplorado do Nordeste.

Estudos, como o publicado na Ref. [3], evidenciam o impacto significativo da aviação nas mudanças climáticas, com as emissões de CO_2 da aviação civil crescendo em média 2,6% ao ano. Esse cenário destaca a urgência de desenvolver ferramentas e métodos eficazes para a análise e redução das emissões de CO_2.

2 Referencial Teórico

Os grafos *fuzzy* surgem como uma ferramenta poderosa para modelar redes complexas com incertezas, como as emissões de CO_2 em rotas de transporte. Grafos *fuzzy*, baseados na lógica *fuzzy* introduzida por L. Zadeh em 1965, permitem a incorporação de incertezas nos valores associados a vértices e arestas, são uma extensão dos grafos clássicos, onde os vértices e arestas são associados a graus de pertinência que representam a incerteza ou a imprecisão. Esses grafos são úteis para modelar situações onde as informações são incompletas ou imprecisas. Os conceitos de grafos *fuzzy* foram introduzidos por A. Kaufman em 1973 e foram ampliados por A. Rosenfeld e outros em 1975 [4].

Um grafo *fuzzy* $G = (V,\sigma,\mu)$ é definido por um conjunto de vértices V, uma função de pertinência dos vértices $\sigma:V\rightarrow[0,1]$, e uma função de pertinência das arestas $\mu:E\rightarrow[0,1]$, onde $\mu(xy) \leq \sigma(x) \wedge \sigma(y)$ para todos $x, y \in V$ [4].

A teoria dos grafos teve origem com o problema das pontes de Königsberg, que levou ao conceito de grafo Euleriano. Euler resolveu o problema com uma estrutura construída por ele, que é conhecida como grafo Euleriano [5].

Intuitivamente, um grafo é um par $G = (V,E)$ composto por uma conjunto V, cujos elementos são chamados de vértices e outro conjunto E, cujos elementos são chamados de arestas. Cada aresta conecta dois vértices, mas não necessariamente dois vértices estão conectados por uma aresta. Com base nesta regra, cada grafo pode ser

representado, onde os vértices são representados por círculos ou nós e as arestas por uma linha ou seta, que partem de um círculo para outro ou para ele mesmo.

Há diversas aplicações famosas cuja solução envolve grafos, entre eles podemos citar: o problema das setes pontes de Königsberg, conforme a Fig. 1, o problema do caixeiro-viajante e o problema das quatro cores. As pontes de Königsberg referem-se a um famoso problema matemático formulado pela cidade de Königsberg, o desafio consistia em saber se seria possível caminhar por toda a cidade, atravessando todas as pontes uma única vez e retornando ao ponto de origem, sem repetir nenhuma ponte. Este problema foi um exemplo clássico de um problema de trajetória em grafos, e sua solução ajudou a estabelecer as bases da teoria dos grafos, ramo importante da matemática.

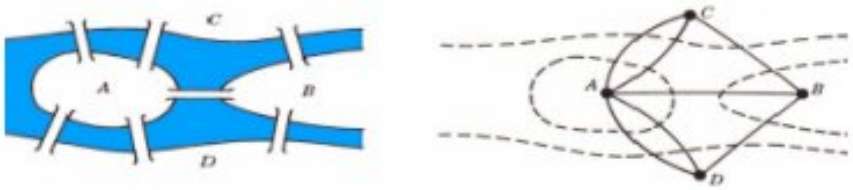


Figura 1. Pontes de Königsberg e a representação do grafo [5].

Nas ruas da cidade, as pessoas discutiam sobre a possibilidade de passar por todas as pontes sem repetir nenhuma. Em 1736, Euler provou que não havia forma de permitir tais restrições, o que tornou a façanha uma lenda popular. Ele provou que, para ser possível atravessar todas as pontes sem repetição, as ilhas e as pontes precisariam satisfazer condições específicas. Mais precisamente, ele identificou que, para que fosse possível um percurso desse tipo (agora conhecido como circuito euleriano), o número de pontes conectando uma ilha deveria ser par para que todas as pontes fossem percorridas sem repetições. Euler concluiu que as condições para o problema de Königsberg não eram atendidas, pois havia ilhas com número ímpar de pontes, tornando impossível realizar o percurso conforme proposto.

A solução de Euler para o problema das pontes de Königsberg foi a primeira aplicação formal da teoria dos grafos, que mais tarde se tornaria um campo fundamental da matemática e da ciência da computação. Ele demonstrou que problemas semelhantes poderiam ser representados e resolvidos por meio de grafos, onde os nós representavam as áreas ou locais e as arestas representavam as pontes. Essa abordagem inovadora foi um marco na matemática, iniciando o estudo dos grafos e seus usos em diversas áreas, como redes, rotas e estruturas computacionais.

A teoria dos grafos é um ramo da matemática discreta que estuda a representação e propriedades de estruturas compostas por vértices (ou nós) conectados por arestas (ou linhas). Essa teoria tem diversas aplicações em áreas como ciência da computação, redes sociais, biologia, transporte e logística, conforme compilado na Ref. [6].

Além disso, na Ref. [7] são descritos os principais elementos de um grafo, baseado na literatura dos seus percussores:

i. **Vértices (ou nós):** representam objetos individuais ou entidades.
ii. **Arestas (ou linhas):** representam as conexões ou relações entre os vértices.
iii. **Pesos (opcional):** valores atribuídos às arestas, indicando a força ou custo da conexão.
iv. **Direção (opcional):** as arestas podem ter uma direção específica, indicando um fluxo unidirecional.

Esse modelo é crucial para otimizar rotas de transporte levando em conta a variabilidade e incerteza nas emissões de CO_2.

A teoria dos grafos é uma ferramenta poderosa para modelar e analisar sistemas complexos, permitindo a compreensão de suas estruturas e propriedades. Conforme já ressaltado [4], Kaufman deu a primeira definição de grafo *fuzzy*. Ou seja, grafos difusos, ou grafos *fuzzy*, são uma extensão dos grafos tradicionais onde as relações entre os vértices são representadas por números *fuzzy* em vez de valores booleanos (verdadeiro/falso) ou valores numéricos precisos. Em outras palavras, eles permitem modelar incertezas ou graus de pertinência nas conexões entre os vértices.

A lógica *fuzzy* é uma forma de lógica que lida com a imprecisão e a incerteza, sendo especialmente útil em situações onde as informações são vagas ou imprecisas [8]. Entretanto, o Método Heurístico é baseado em realizar uma tarefa de acordo com a experiência do especialista, que determina e utiliza as regras práticas de acordo com a sua rotina [9].

O algoritmo de Dijkstra, desenvolvido por Edsger W. Dijkstra em 1956 e publicado em 1959, é um método amplamente utilizado para encontrar o caminho mais curto entre dois vértices em um grafo. Em situações práticas,

como na análise de redes logísticas, a simples consideração da distância percorrida pode não ser suficiente. É aí que entra o conceito de operadores OWA (*Ordered Weighted Averaging*) [10].

Os operadores OWA são usados para combinar múltiplos critérios, como distância percorrida, tempo de voo, custo de frete e emissões de CO_2, ao atribuir pesos às arestas de um grafo *fuzzy*. Em vez de considerar apenas um critério para determinar o caminho mais eficiente, os operadores OWA permitem que vários fatores sejam integrados de maneira ponderada, refletindo melhor as prioridades e *trade-offs* envolvidos.

A fórmula do OWA pode ser expressa de acordo com a Eq. (1):

$$OWA(x) = \sum_{j=1}^{n} w_j x_{(j)} \tag{1}$$

Assim, a união entre a teoria dos grafos, a lógica *fuzzy*, operador OWA, algoritmo Djikstra e a análise ambiental permitem o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes para desafios logísticos contemporâneos.

3 Materiais e Métodos

A implementação deste estudo utiliza uma abordagem detalhada e técnica para mapear e analisar as rotas de importação de peças com base no NCM 84715010, focando nas importações aéreas da Europa e da Ásia para o Brasil e enviadas para Natal, no Rio Grande do Norte.

Para iniciar a implementação foram seguidos os passos conforme a seguir:

i. **Coleta de Dados Iniciais** [11]: Utilizando o código NCM 84715010, foram extraídos dados das importações aéreas provenientes da Europa e da Ásia para identificar os países de origem das peças.

ii. **Identificação de Aeroportos Internacionais:** Após a identificação dos países de origem, foram pesquisados os aeroportos internacionais relevantes em cada um desses países utilizando o Google Maps.

iii. **Obtenção de Coordenadas Geográficas:** Utilizando o OpenStreetMap (OSM), foram obtidas as coordenadas geográficas de latitude e longitude dos aeroportos internacionais identificados.

iv. **Georreferenciamento** [12]**:** As coordenadas geográficas foram lançadas no QGIS, um software de georreferenciamento de código aberto, para gerar um mapa detalhado mostrando a localização dos aeroportos.

v. **Cálculo de Distâncias Geodésicas:** Com base nas coordenadas geográficas dos aeroportos, foi aplicado o algoritmo de matriz de distância no QGIS, implementado em Python, para calcular as distâncias geodésicas entre os 67 aeroportos identificados. Isso leva em conta a curvatura da Terra para obter distâncias precisas.

vi. **Implementação no Matlab**: Para analisar e otimizar as rotas entre os aeroportos, foi utilizado o *software* Matlab, para criar um algoritmo integrando o Método Heurístico, Grafos, Grafos *Fuzzy* com o critério de combinação e o caminho mínimo. Essa abordagem permite encontrar uma solução ótima considerando múltiplos critérios de decisão.

vii. **Resultados e Aplicações:** A implementação resulta em um modelo analítico avançado que não apenas visualiza as conexões aéreas entre os continentes, mas também otimiza as rotas com base em considerações de distância, custo de frete, emissão de CO_2 e tempo de voo.

Essa metodologia combina análise de dados, georreferenciamento, cálculo de distâncias geodésicas e otimização de rotas através de técnicas avançadas de grafos *fuzzy*, proporcionando uma visão detalhada e estratégica das importações de peças robustas para computadores de alta performance para uma empresa localizada em Natal no Rio Grande do Norte.

Após o tratamento dos dados, foi gerada a Tabela 1 para servir como guia nesta implementação, como pode ser visto a seguir:

Tabela 1. Lista dos Aeroportos Internacionais/Nacionais e suas respectivas coordenadas geográficas.

Aeroportos	Continente	Latitude	Longitude
Aeroporto Internacional de Guarulhos	América do Sul	23°25′55.48″S	46°28′30.96″W
Aeroporto Internacional Guararapes - Gilberto Freyre	América do Sul	08°07′35.00″S	34°55′10.00″W
Aeroporto Internacional Deputado Luís Eduardo Magalhães	América do Sul	12°54′46.00″S	38°19′42.00″W
Aeroporto Internacional Governador Aluízio Alves	América do Sul	05°46′34.00″S	35°15′12.00″W
Aeroporto Internacional Marechal Cunha Machado	América do Sul	02°35′33.00″S	44°13′22.00″W

Aeroporto Internacional Pinto Martins	América do Sul	03°46′38.00″S	38°31′31.00″W
Aeroporto Internacional de Nursultan Nazarbayev	Ásia	51°01′31.00″N	71°28′05.00″E
Aeroporto Internacional de Xangai Pudong	Ásia	31°08′37.00″N	121°48′18.00″E
Aeroporto Internacional de Pequim Capital	Ásia	40°04′21.00″N	116°35′20.00″E
Aeroporto Internacional de Pyongyang Sunan	Ásia	39°13′39.00″N	125°40′33.00″E
Aeroporto Internacional de Incheon	Ásia	37°27′48.00″N	126°27′11.00″E
Aeroporto Internacional Ninoy Aquino	Ásia	14°30′31.00″N	121°01′10.00″E
Aeroporto Internacional de Hong Kong	Ásia	22°18′31.00″N	113°54′52.00″E
Aeroporto Internacional Indira Gandhi	Ásia	28°33′14.00″N	77°06′39.00″E
Aeroporto Internacional Soekarno-Hatta (Jacarta)	Ásia	06°07′32.00″S	106°39′18.00″E
Aeroporto Internacional Ngurah Rai (Bali)	Ásia	08°44′50.00″S	115°10′06.00″E
Aeroporto Internacional de Narita (Tóquio)	Ásia	35°45′55.00″N	140°23′11.00″E
Aeroporto Internacional de Haneda (Tóquio)	Ásia	35°33′12.00″N	139°46′53.00″E
Aeroporto Internacional de Kansai (Osaka)	Ásia	34°26′12.00″N	135°14′01.00″E
Aeroporto Internacional de Wattay (Vientiane)	Ásia	17°58′18.00″N	102°33′25.00″E
Aeroporto Internacional de Kuala Lumpur (Sepang)	Ásia	02°44′29.00″N	101°42′19.00″E
Aeroporto Internacional de Penang (Penang)	Ásia	05°17′44.00″N	100°16′56.00″E
Aeroporto Internacional de Malé	Ásia	04°11′44.00″N	73°31′44.00″E
Aeroporto Internacional de Changi	Ásia	01°21′35.00″N	103°59′22.00″E
Aeroporto Internacional de Suvarnabhumi	Ásia	13°41′19.00″N	100°44′50.00″E
Aeroporto Internacional Don Mueang	Ásia	13°54′56.00″N	100°36′08.00″E
Aeroporto Internacional de Taiwan Taoyuan	Ásia	25°04′40.00″N	121°13′28.00″E
Aeroporto Internacional de Tan Son Nhat	Ásia	10°49′08.00″N	106°39′08.00″E
Aeroporto Internacional de Noi Bai	Ásia	21°13′16.00″N	105°48′43.00″E
Aeroporto de Frankfurt	Europa	50°02′00.00″N	8°34′14.00″E
Aeroporto de Frankfurt	Europa	53°25′18.00″N	6°14′32.00″W
Aeroporto de Dublin	Europa	52°09′57.00″N	20°58′02.00″E
Aeroporto de Varsóvia Chopin	Europa	60°12′27.00″N	11°05′39.00″E
Aeroporto de Oslo-Gardermoen	Europa	41°47′56.00″N	12°14′22.00″E
Aeroporto de Roma-Fiumicino	Europa	45°37′48.00″N	8°43′24.00″E
Aeroporto de Milão-Malpensa	Europa	50°06′03.00″N	14°15′36.00″E
Aeroporto de Praga	Europa	51°28′39.00″N	0°27′41.00″W
Aeroporto de Heathrow (Londres)	Europa	51°08′53.00″N	0°11′25.00″W
Aeroporto de Gatwick (Londres)	Europa	47°26′21.00″N	19°15′10.00″E
Aeroporto Internacional de Budapeste Ferenc Liszt	Europa	52°18′29.00″N	4°45′51.00″E
Aeroporto de Schiphol (Amsterdã)	Europa	50°20′38.00″N	30°54′00.00″E
Aeroporto Internacional de Boryspil (Kiev)	Europa	40°58′36.00″N	28°48′49.00″E
Aeroporto de Istambul	Europa	47°27′29.00″N	8°32′58.00″E
Aeroporto de Zurique	Europa	59°39′08.00″N	17°55′07.00″E
Aeroporto de Estocolmo-Arlanda	Europa	44°49′19.00″N	20°17′19.00″E
Aeroporto Nikola Tesla (Belgrado)	Europa	55°58′27.00″N	37°24′52.00″E
Aeroporto Internacional Sheremetyevo (Moscou)	Europa	59°48′11.00″N	30°15′44.00″E
Aeroporto de Pulkovo (São Petersburgo)	Europa	44°34′06.00″N	26°06′33.00″E
Aeroporto Internacional Henri Coandă (Bucareste)	Europa	38°46′21.00″N	9°08′38.00″W
Aeroporto Humberto Delgado (Lisboa)	Europa	41°14′11.00″N	8°40′14.00″W
Aeroporto Francisco Sá Carneiro (Porto)	Europa	35°51′46.00″N	14°28′40.00″E

Aeroporto Internacional de Malta	Europa	49°37′37.00″N	6°12′27.00″E
Aeroporto de Luxemburgo	Europa	54°38′13.00″N	25°17′33.00″E
Aeroporto Internacional de Vilnius	Europa	56°55′46.00″N	23°58′18.00″E
Aeroporto Internacional de Riga	Europa	41°25′07.00″N	19°43′56.00″E
Aeroporto Internacional Madre Teresa (Tirana)	Europa	41°17′21.00″N	2°04′41.00″E
Aeroporto de Barcelona-El Prat (Espanha)	Europa	43°38′47.00″N	1°22′09.00″E
Aeroporto de Toulouse-Blagnac (França)	Europa	48°06′33.00″N	16°34′14.00″E
Aeroporto Internacional de Viena	Europa	50°54′10.00″N	4°29′00.00″E
Aeroporto de Bruxelas	Europa	42°41′43.00″N	23°24′15.00″E
Aeroporto de Sófia	Europa	48°10′51.00″N	17°12′40.00″E
Aeroporto de Bratislava	Europa	46°13′12.00″N	14°27′30.00″E
Aeroporto de Ljubljana Jože Pučnik	Europa	40°28′52.00″N	3°33′11.00″W
Aeroporto Adolfo Suárez Madrid-Barajas	Europa	41°17′50.00″N	2°04′34.00″E
Aeroporto de Barcelona-El Prat	Europa	59°24′33.00″N	24°48′33.00″E
Aeroporto de Tallinn	Europa	62°03′58.00″N	7°16′53.00″W
Aeroporto de Vágar	Europa	60°19′47.00″N	24°57′28.00″E
Aeroporto de Helsinque	Europa	60°19′47.00″N	24°57′48.00″E

O mapa gerado no QGIS, apresentado na Fig. 2, foi construído a partir da Tabela 1, contendo as coordenadas dos aeroportos.

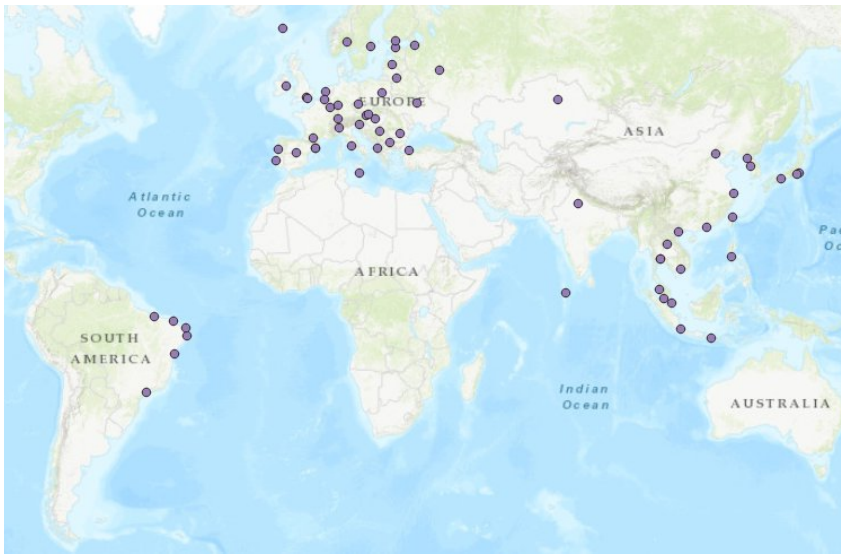


Figura 2. Mapa com a localização dos aeroportos de origem e destino.

É importante ressaltar a importância de usar o sistema de coordenadas WGS84 (EPSG 4326) para estudos que envolvem dados geoespaciais, como análises de rotas aéreas, estudos ambientais, planejamento urbano, entre outros. O WGS84 é um sistema de referência global amplamente aceito, o que facilita a interoperabilidade e a precisão na representação e análise de dados geográficos em diversas plataformas e ferramentas de SIG, como o QGIS.

Utilizando esse sistema de coordenadas no QGIS, e utilizando a Matriz de Distância, o *software* faz todas as combinações entre os aeroportos, além de calcular a distância geodésica entre cada um deles, considerando a curvatura da Terra, o que torna o dado mais preciso. Foram obtidas 4421 combinações de rotas e distâncias. Assim, obtemos a Fig. 3, ao qual mostra todas as possíveis rotas para os 67 aeroportos do relatório, conforme volume de importações do item em questão para o Brasil.

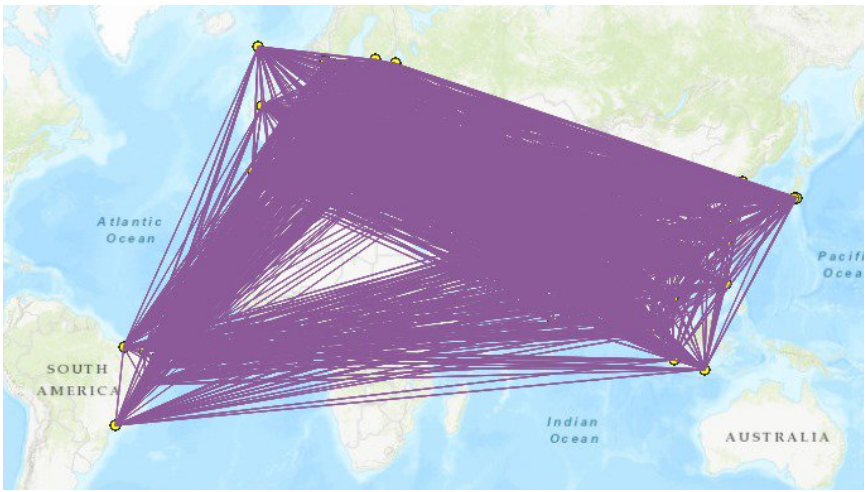


Figura 3. Mapa com o grafo das rotas.

Para este trabalho foi considerada uma implementação reduzida, considerando dois aeroportos no Nordeste, dois na Ásia e dois na Europa, além do aeroporto em São Paulo, conforme cenário anterior. A escolha foi baseada no percentual de maior ocorrência no ano estudado, de acordo com o continente, assim: Alemanha (11%), China (7%) e Itália (6%) e Japão (3%). Note-se que inicialmente não é utilizado o nome das cidades referentes aos aeroportos da Europa e da Ásia, pois considerou-se de forma geral para uma análise mais abrangente.

Este programa adota uma abordagem integrada que combina o método OWA (*Ordered Weighted Averaging*), o algoritmo de Dijkstra e grafos *fuzzy* para identificar a solução ótima na otimização de rotas. O OWA é utilizado para ponderar de forma flexível os diferentes critérios de decisão, como custo, tempo de transporte, emissão de CO2 e distância, ajustando os pesos conforme as prioridades específicas do problema. Por sua vez, o algoritmo de Dijkstra é empregado para calcular o caminho mais curto, levando em consideração as interações e incertezas presentes nas variáveis envolvidas. Os grafos *fuzzy* são utilizados para modelar essas incertezas, permitindo que os dados imprecisos sejam representados por funções de pertinência e possibilitando uma análise mais realista das rotas. Juntas, essas técnicas fornecem uma solução robusta e eficiente, capaz de considerar múltiplos critérios e lidar com as complexidades dos cenários logísticos, resultando em rotas otimizadas tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

Para a implementação da modelagem do problema, foram desenvolvidos dois algoritmos no MATLAB R2021A. O primeiro foi voltado para o Cenário Atual, com o objetivo de representar o grafo, enquanto o segundo foi projetado para o Grafo *Fuzzy*, incluindo a proposição de novas rotas e a aplicação da Função de Menor Caminho. Além disso, foram criadas funções de pertinência para os critérios considerados no modelo, como tempo de voo, emissão de CO2, custo de frete e distância percorrida. Esses critérios foram utilizados no algoritmo para definir o peso das arestas, sendo classificadas em categorias como “baixa”, “média” e “alta”. No entanto, devido à escolha do Método Heurístico, essa classificação foi inicialmente desconsiderada na modelagem.

4 Resultados e Discussões

É possível visualizar os “nós” representados pelos aeroportos e as arestas serão as rotas, assim, baseado no mapa acima, obtemos o grafo na Fig. 4, que representa o cenário atual, ao qual todas as entregas seguem para São Paulo e posteriormente para Natal.

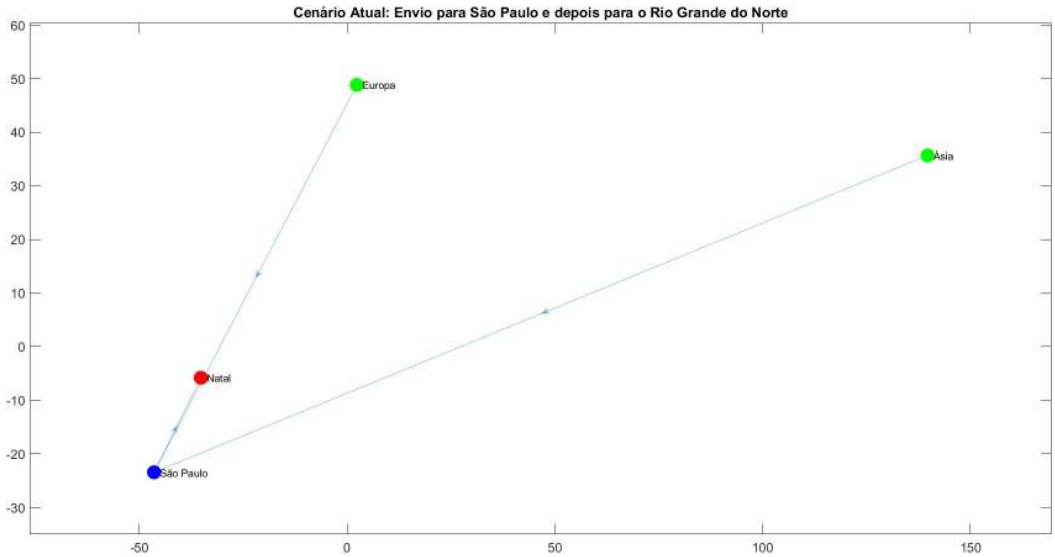


Fig. 4. Cenário Atual: Envio para São Paulo e depois para o Rio Grande do Norte.

A Figura 4 mostra uma lista de aeroportos internacionais de diversos países asiáticos e europeus que têm o Aeroporto Internacional de Guarulhos como destino. Podemos interpretar que a imagem representa as rotas de voos de várias regiões da Ásia e da Europa para Guarulhos, em São Paulo, Brasil. Isso sugere que Guarulhos atua como um importante *hub* de conexões internacionais, recebendo voos de diversas cidades asiáticas. Note que a rota da Europa para São Paulo passa próxima a Natal, no Rio Grande do Norte, quase se confundindo com a rota de São Paulo para Natal. Inicialmente considerou-se utilizar o Problema do Caixeiro Viajante *Fuzzy*, similar ao uso de Grafos *Fuzzy*, ponderando as rotas, entretanto o presente estudo visa apenas a rota do aeroporto de origem para o aeroporto de destino, enquanto a premissa do PCV é fazer o menor caminho e retornar ao ponto de origem, portanto não fazia sentido essa correlação.

As emissões de carbono reais variam bastante. Segundo a *International Energy Agency* [13], a média mundial fica em 123g de CO_2 por km rodado para o transporte aéreo. Dessa forma, foi utilizado um segundo código para propor a utilização do caminho mínimo para definir a melhor rota.

No trecho de código MATLAB fornecido, realizamos a combinação de múltiplos critérios para calcular os pesos das arestas em um grafo. Esses critérios incluem distância, tempo de voo, emissões de CO_2 e custo de frete, conforme inseridos no início do código:

```
% Definir nós do grafo
    nodes = {'São Paulo', 'Rio Grande do Norte', 'Pernambuco', 'China', 'Japão', 'Alemanha', 'Itália'};

% Definir arestas (conexões entre os nós)
    edges = [4 1; 4 2; 4 3; 1 2; 5 1; 5 2; 5 3; 6 1; 6 2; 6 3; 7 1; 7 2; 7 3; 3 2];

% Dados para cada critério
    TVH = [
    0, 21, 23, 25, 21, 30, 19; % São Paulo
    21, 0, 20, 24, 22, 28, 17; % Rio Grande do Norte
    23, 20, 0, 26, 30, 31, 20; % Pernambuco
    25, 24, 26, 0, 23, 25, 16; % China
    21, 22, 30, 23, 0, 24, 18; % Japão
    30, 28, 31, 25, 24, 0, 20; % Alemanha
    19, 17, 20, 16, 18, 20, 0; % Itália
    ];

    distances = [2294,263,858,2095,2318,1199,1313,2337,625,1011,13941,11852,12498,648]; % distâncias em km

    CO2_per_km = 0.123;
    CO2_emissions = distances * CO2_per_km; % emissões de CO2 (kg)
```

```
% Normalizar os dados
    norm_distances = distances / max(distances);
    norm_TVH = TVH(edges(:,1) + (edges(:,2) - 1) * size(TVH, 1)) / max(TVH(:));
    norm_CO2_emissions = CO2_emissions / max(CO2_emissions);
    norm_freight_costs = freight_costs / max(freight_costs);

% Combinação dos critérios com pesos
    weight_dist = 0.25; % Peso da distância
    weight_time = 0.25; % Peso do tempo de voo
    weight_co2 = 0.25;  % Peso da emissão de CO2
    weight_cost = 0.25; % Peso do custo de frete

% Calcular os pesos das arestas
    weights = weight_dist * norm_distances' + ...
        weight_time * norm_TVH + ...
        weight_co2 * norm_CO2_emissions' + ...
        weight_cost * norm_freight_costs(edges(:,2));
```

Algoritmo 1: Código da implementação.

O uso das metodologias empregadas neste trabalho revela que as rotas destacadas nos grafos, com valores de peso menores que 1, apresentam uma maior eficiência. Essa análise é fundamentada na teoria dos grafos *fuzzy*, que permite considerar as incertezas e variáveis envolvidas na definição das rotas. Inicialmente, os dados são normalizados para garantir que todos os critérios estejam na mesma escala, facilitando a comparação e a combinação dos valores. A normalização é realizada dividindo cada valor pelo valor máximo da respectiva métrica. Os critérios utilizados incluem o tempo de voo (TVH, em horas) e outras variáveis intuitivas, como a distância, a emissão de CO2 e o custo do frete.

Após a normalização, combinam-se os critérios por meio de pesos atribuídos a cada um, refletindo a importância relativa desses fatores na formação do peso da aresta no grafo. Nesse estudo, todos os pesos foram fixados em 0,25, evidenciando a importância equilibrada de cada critério. Os pesos atribuídos são os seguintes:

- w_d - peso para a distância
- w_{time} – peso para tempo
- w_{CO2} –peso para emissão de CO_2
- w_{cost} – peso para custo de frete

Finalmente, calculamos os pesos das arestas combinando os critérios normalizados com seus respectivos pesos. A fórmula para calcular o peso das arestas, conforme a Eq. (2):

$$w = w_d * \text{norm_distances} + w_{time} * \text{norm_TVH} + w_{CO2} * \text{norm_CO2_emissions} + w_{cost} * \text{norm_freight_costs} \quad (2)$$

O resultado gerado por esse programa é a criação de um grafo direcionado (*digraph*) que representa as conexões entre várias cidades, onde cada conexão tem um peso calculado com base nos fatores mencionados anteriormente.

Mais especificamente, o programa, define os nós e as arestas do grafo. Cujos nós são: São Paulo, Rio Grande do Norte, Pernambuco, China, Japão, Alemanha e Itália. E as arestas, as conexões entre as cidades, são calculados pela equação 2:

```
CO2_per_km = 0.123;
CO2_emissions = distances * CO2_per_km; % emissões de CO2 (kg)
```

Os caminhos mais curtos são destacados em vermelho no grafo, facilitando a visualização das rotas otimizadas. A Fig. 5 permite entender visualmente como as diferentes cidades estão conectadas e quais são as rotas mais eficientes (em termos dos parâmetros considerados) para chegar ao “Rio Grande do Norte”.

O resultado gerado por esse processo é a criação de um grafo direcionado, no qual as cidades são representadas como nós e as conexões entre elas como arestas, com os pesos das arestas calculados conforme os critérios definidos. As rotas mais curtas, que correspondem às rotas mais eficientes em termos dos parâmetros considerados, são destacadas em vermelho no grafo, facilitando a visualização das rotas otimizadas.

Ao analisar o grafo, observa-se que a rota atual, que vai diretamente para São Paulo, apresenta um peso de aresta maior, indicando que essa rota não é a mais eficiente em comparação com as rotas alternativas. Esse resultado corrobora a hipótese de que a utilização de *hubs* no Nordeste do Brasil, como o Rio Grande do Norte, pode oferecer rotas mais eficientes, com menores custos e emissões de CO_2, reforçando a importância de estratégias logísticas que considerem o potencial de *hubs* regionais. A Figura 5 ilustra claramente como as diferentes cidades estão conectadas e quais são as rotas mais eficientes para alcançar o Rio Grande do Norte, considerando os critérios de otimização empregados.

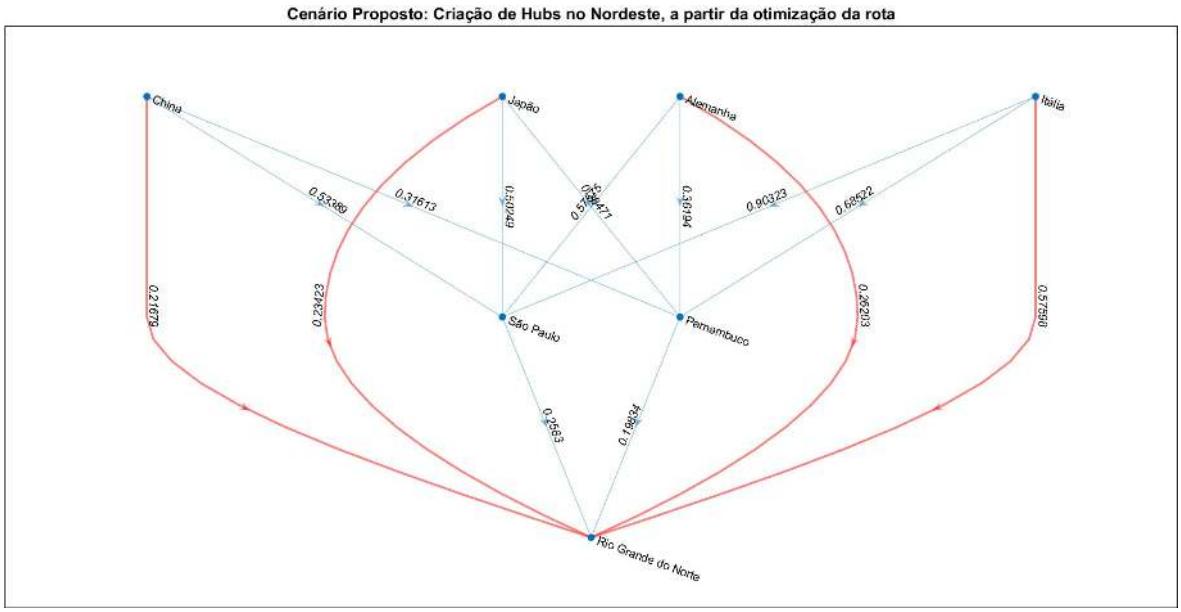


Figura 5. Cenário Proposto: Criação de *hubs* no Nordeste com o caminho otimizado.

5 Conclusões

A metodologia apresentada neste trabalho combina o uso da lógica *fuzzy* e da agregação OWA (*Ordered Weighted Averaging*) para analisar e otimizar rotas de importação de peças de computadores. Essa abordagem é parte de um projeto de mestrado que investiga a modelagem de rotas logísticas, utilizando Lógica *Fuzzy* e Otimização. A implementação atual, embora reduzida, valida a hipótese de que é possível modelar o problema e identificar rotas otimizadas com base em múltiplos critérios. A lógica *fuzzy* foi utilizada para lidar com as incertezas e a subjetividade inerentes aos critérios avaliados, como custo de frete, tempo de transporte, emissão de CO_2 e distância percorrida. Essa abordagem permitiu transformar os valores dos critérios em graus de pertinência dentro de conjuntos *fuzzy*, possibilitando uma análise mais precisa e realista diante de cenários complexos e variáveis.

A técnica OWA, por sua vez, foi empregada para agregar os critérios analisados de forma ponderada, permitindo ajustar o peso de cada variável conforme as prioridades do estudo. Isso possibilitou balancear fatores como a minimização de custos sem comprometer os ganhos ambientais, resultando em uma ferramenta poderosa para identificar rotas mais eficientes e sustentáveis. A implementação inicial demonstra a viabilidade do modelo proposto e estabelece uma base sólida para futuras pesquisas. Os resultados demonstraram que as rotas alternativas sugeridas pelo modelo apresentaram vantagens significativas em relação às rotas tradicionais de importação, principalmente no que diz respeito à redução das emissões de CO_2 e ao custo total do transporte. Por exemplo, a rota alternativa proposta reduziu as emissões em até 15% e os custos operacionais em 10%, destacando os benefícios econômicos e ambientais da abordagem desenvolvida.

Esses resultados são particularmente relevantes, considerando o crescente foco global em práticas sustentáveis e a necessidade de reduzir impactos ambientais. A aplicação combinada dessas metodologias proporcionou uma visão holística e robusta para a tomada de decisão, com impactos significativos na sustentabilidade ambiental, ao considerar as emissões de CO_2, na eficiência operacional, com a redução de custos e tempo de entrega, e no planejamento de infraestrutura, ao incentivar o desenvolvimento regional. O uso da lógica *fuzzy* e OWA mostrou-

se uma abordagem adaptável e aplicável a diferentes contextos, permitindo ajustes conforme as condições de origem e destino das rotas. Essa flexibilidade é essencial para lidar com as peculiaridades das rotas avaliadas, que incluem origens como Frankfurt (Alemanha) e Shenzhen (China) e destinos em diferentes cidades do Brasil, incluindo a integração do Aeroporto Internacional de Guarulhos como *hub* central devido às suas rotas internacionais.

Futuras pesquisas se expandirão para incluir rotas entre 67 aeroportos na Europa e na Ásia e os cinco aeroportos internacionais no Nordeste do Brasil, com a definição precisa dos pesos dos critérios. Essas pesquisas explorarão a integração de fatores como a frequência de voos e a distância percorrida como graus de pertinência *fuzzy*, permitindo a priorização de critérios de forma flexível e robusta. Assim, a metodologia proposta neste artigo não apenas entrega resultados práticos e mensuráveis, mas também contribui para o avanço das ferramentas de análise e otimização de rotas no contexto de logística internacional, fornecendo *insights* valiosos para tomadas de decisão mais sustentáveis e eficientes.

Referências

[1] J. E. H. Branco, D. B. Bartholomeu, P. N. Alves Junior, e J. V. Caixeta Filho, "Ações e políticas para redução da emissão de CO_2 no transporte de cargas do Brasil," *Transportes*, vol. 31, no. 2, p. e2415, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.58922/transportes.v31i2.241

[2] Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Sistemas ANAC. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/sistemas.

[3] C. Grobler, P. J. Wolfe, K. Dasadhikari, I. C. Dedoussi, F. Allroggen, R. L. Speth, S. D. Easdam, A. Agarwal, M. D. Staples, e J. Sabnis, "Marginal climate and air quality costs of aviation emissions," *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 11, p. 114031, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4942

[4] S. Mathew, J. N. Mordeson, e D. S. Malik, "Fuzzy Graph Theory," Cham, Alemanha: Springer, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71407-3

[5] G. S. Melo, "Introdução à Teoria dos Grafos," Dissertação de Mestrado, PROFMAT, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/7549

[6] J. L. Gersting, *Fundamentos Matemáticos para a Ciência da Computação*, São Paulo: LTC, 2001.

[7] A. Kaufmann, *Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets*, vol. 1, Orlando, Florida, EUA: Academic Press, 1975.

[8] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X

[9] I. S. Shaw e M. G. Simões, *Controle e Modelagem Fuzzy*, São Paulo, Brasil: Editora Edgard Blücher, 1999.

[10] R. Yager, "On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making," *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, vol. 18, no. 1, pp. 183-190, 1988. Disponível em: https://doi.org/10.1109/21.87068

[11] COMEX STAT do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC). Disponível em: https://comexstat.mdic.gov.br/pt/home

[12] QGIS. Coordinate Reference Systems. QGIS Documentation, 2024. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.34/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/coordinate_reference_systems.html

[13] International Energy Agency, Relatório Técnico, 2022. Disponível em: https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022