



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA

Fundação Instituída nos termos da Lei nº 5.152, de 21/10/1966 – São Luís - Maranhão

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – CCET

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE



Proposta de rede para postos de GNV no Maranhão através de otimização espacial

Luciana Pereira Barbosa

São Luís - MA, 06 de maio de 2024

Luciana Pereira Barbosa

Proposta de rede para postos de GNV no Maranhão através de otimização espacial

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnologias, da Universidade Federal do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Allan Kardec Duailibe Barros Filho

São Luís - MA, 06 de maio de 2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Barbosa, Luciana Pereira.

Proposta de rede para postos de GNV no Maranhão através de otimização espacial / Luciana Pereira Barbosa. - 2024. 62 f.

Orientador(a): Allan Kardec Duailibe Barros Filho.
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2024.

1. Gás Natural. 2. GNV (Gás Natural Veicular). 3. Infraestrutura. 4. Otimização Espacial. I. Barros Filho, Allan Kardec Duailibe. II. Título.

CCET- Centro de Ciências Exatas e Tecnologias
Universidade Federal do Maranhão

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica intitulada *Proposta de rede para postos de GNV no Maranhão através de otimização espacial* de autoria de Luciana Pereira Barbosa.

Prof. Dr. Allan Kardec Duailibe Barros Filho
Orientador
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Elétrica-UFMA

Prof. Dr. Wendell Ferreira De La Salles
Membro da banca
Departamento de Tecnologia Química- UFMA

Prof. Dr^a. Marta de Oliveira Barreiros
Membro da banca
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia (CCNT)-UFPA

Prof. Dr. Ewaldo Eder Carvalho Santana
Membro da banca
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Elétrica-UFMA

Agradecimentos

Toda a minha gratidão a Deus.

Expresso minha gratidão, também aos colegas, amigos e familiares que me apoiaram e encorajaram ao longo desta jornada acadêmica.

Agradeço ao meu orientador, professor Allan Kardec, pela sua orientação, e *insights* valiosos ao longo deste processo.

Meus agradecimentos também a Programa de Formação de Recursos Humanos PRH-54.1 da ANP e UFMA, principalmente ao professor Wendell e professora Lyzette, a orientação de ambos foi fundamental para o meu crescimento acadêmico.

- Quem está nas trincheiras ao teu lado? - E isso importa? - Mais do que a própria guerra”.
Ernest Hemingway

RESUMO

O gás natural possui uma aplicação em diversos setores. O Maranhão, atualmente é um dos poucos estados com produção ativa *onshore* e com 7,1% dos blocos exploratórios do país dentro de seus limites. O atual setor de gás natural no Brasil enfrenta escassez de infraestrutura, mas novas metodologias para o transporte, como os gasodutos virtuais é uma oportunidade promissora para a interiorização do Gás Natural (GN). Nesta perspectiva, estratégias de demanda de gás natural no Maranhão onde ainda não se tem malha de gasodutos são de extrema importância para fomentar a demanda, produção e desenvolvimento regional. Dentre os combustíveis fósseis o gás natural oferece benefícios ambientais e de saúde, se apresentando como uma alternativa promissora na substituição do diesel no setor de transporte. A criação de rotas para fornecimento de Gás Natural Veicular (GNV) ao longo das rodovias faz parte de uma abordagem recente, os chamados Corredores Azuis. O pressuposto da criação dessa infraestrutura no estado se apoia nos seguintes pontos para o Maranhão: existe produção de GN, o Porto do Itaqui como porta de entrada e saída de insumos, alta produção de grão, presença de grandes indústrias. Sendo assim, este energético como GNV empregado no setor de transporte no Maranhão pode estabelecer novos cenários para a matriz de transporte do estado, favorecendo uma mudança gradativa no setor e reduzindo a dependência externa de combustíveis. Favorecendo-se dos avanços da tecnologia, aplicando técnica de otimização espacial este estudo objetivou oferecer cenários de rede, através da alocação ótimas de pontos de postos de GNV no estado do Maranhão, oferecendo uma configuração de rede ininterrupta de GNV. A importância do uso de dados georreferenciados para pesquisa de alocação de recurso adquiridos nas bases de dados públicos, possibilitou a criação de base de dados para pesquisas futuras, oferecendo possíveis configurações de rede para corredores de GNV no Maranhão. Utilizando técnicas de otimização espacial, este estudo desenvolveu configurações de rede para distribuição de GNV no estado do Maranhão, com foco nos municípios mais desenvolvidos. Os resultados demonstram que a localização estratégica dos pontos otimizados para a instalação de postos de GNV desempenha um papel crucial na promoção de uma distribuição eficiente e abrangente do gás natural. Essas configurações de rede têm o potencial de atender às demandas de transporte, estimular o desenvolvimento regional e reduzir a dependência externa de combustíveis no estado. Além disso, o estudo ressalta a importância do uso de dados georreferenciados para pesquisa de alocação de recursos, destacando a viabilidade de sua aquisição em bases de dados públicos para a criação de bases de dados para pesquisas futuras. Esses resultados contribuem para informar políticas e estratégias de expansão da infraestrutura de GNV, beneficiando a economia, o meio ambiente e a sociedade do Maranhão.

Palavras-chave: Gás Natural, GNV (Gás Natural Veicular), Infraestrutura, Otimização Espacial.

ABSTRACT

Natural gas has applications in various sectors. Maranhão is currently one of the few states with active onshore production and 7.1% of the country's exploratory blocks within its boundaries. The current natural gas sector in Brazil faces infrastructure shortages, but new transportation methodologies, such as virtual pipelines, present a promising opportunity for the interiorization of Natural Gas (NG). In this perspective, natural gas demand strategies in Maranhão, where there is still no pipeline network, are extremely important to foster demand, production, and regional development. Among fossil fuels, natural gas offers environmental and health benefits, presenting itself as a promising alternative to diesel in the transportation sector. The creation of routes for supplying Compressed Natural Gas (CNG) along highways is part of a recent approach, known as Blue Corridors. The assumption behind the creation of this infrastructure in the state relies on the following points for Maranhão: there is NG production, the Port of Itaqui as an input and output gateway, high grain production, and the presence of large industries. Thus, this energy source, such as CNG used in the transportation sector in Maranhão, can establish new scenarios for the state's transportation matrix, favoring a gradual change in the sector and reducing external fuel dependency. Benefiting from technological advances, applying spatial optimization techniques, this study aimed to provide network scenarios through optimal allocation of CNG station points in the state of Maranhão, offering an uninterrupted CNG network configuration. The importance of using georeferenced data for resource allocation research acquired from public databases enabled the creation of databases for future research, offering possible network configurations for CNG corridors in Maranhão. Using spatial optimization techniques, this study developed network configurations for CNG distribution in the state of Maranhão, focusing on the most developed municipalities. The results demonstrate that the strategic location of optimized points for the installation of CNG stations plays a crucial role in promoting efficient and comprehensive natural gas distribution. These network configurations have the potential to meet transportation demands, stimulate regional development, and reduce external fuel dependency in the state. Additionally, the study emphasizes the importance of using georeferenced data for resource allocation research, highlighting the viability of its acquisition in public databases for the creation of databases for future research. These results contribute to informing policies and strategies for expanding CNG infrastructure, benefiting the economy, the environment, and society in Maranhão.

Keywords: Natural Gas, CNG (Compressed Natural Gas), Infrastructure, Spatial Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma metodológico.	15
Figura 2: Reservas provadas no Brasil.	17
Figura 3: Características da Infraestrutura de Gás natural no Maranhão.	18
Figura 4: Concessionárias estaduais de Gás Natural.	19
Figura 5: Gráfico de concentração de empresas credenciadas ao INMETRO para adaptação dos veículos a GNV.	22
Figura 6: Ilustração de caminhões movidos a GNV.	23
Figura 7: As sete pontes de Königsberg.	23
Figura 8: Exemplo de um grafo direcionado.	24
Figura 9: Características gerais de um SIG.	27
Figura 10: Interação de dados dentro de um SIG.	29
Figura 11: infraestrutura de GNV no Nordeste Brasileiro.	35
Figura 12: Postos mapeados.	37
Figura 13: Representação do cruzamento de dois pontos.	38
Figura 14: Os quatros melhores resultados para alocações ótimas dos postos aplicando AG.	40
Figura 15: Configurações dos corredores com base na malha rodoviária a partir dos pontos ótimos.	43
Figura 16: Média de Veículos nas BRs.	45
Figura 17: Contagem realizadas <i>in loco</i>	46
Figura 18: Metodologia de obtenção dos dados no QGIs.	48
Figura 19: Qualidade viária para a configuração 3.	51
Figura 20: Representação de possíveis demandas.	52
Figura 21: Configuração da inclusão do Maranhão no projeto de Corredores Azuis.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características de um SIG.....	28
Tabela 2: Parâmetros utilizados no GA.....	39
Tabela 3: Distancias (km) e custos para cada configuração.....	50

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	11
1.1.	Contextualização do problema	12
1.2.	Objetivos do trabalho	14
1.2.1.	Objetivo Geral	14
1.2.2.	Objetivos específicos.....	14
1.3.	Métodos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1.	O Gás Natural na Economia Brasileira: Dinâmica Global e Perspectivas Locais	16
2.2.	Papel do Gás Natural no Desenvolvimento Econômico e Energético do Maranhão	17
2.3.	Transporte de Gás natural e perspectiva de adoção do GNV no Maranhão	20
2.4.	Teoria dos Grafos e Algoritmos de Otimização para Roteamento.....	23
2.5.	Tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e modelagem de rede	26
2.6.	Benefícios ambientais do gás natural para GNV	30
3	CONSTRUÇÃO DO MODELO: MODELAGEM GEOESPACIAL DO MARANHÃO ...	33
3.1.	Infraestrutura de Gás Natural existente	33
3.2.	Corredor Azul no Maranhão	34
3.3.	Coleta e Análise de Dados Geoespaciais	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1.	Algoritmo genético e obtenção de pontos ótimos	37
4.2.	Modelagem da rede e execução do Algoritmo de Dijkstra	41
4.3.	Análise das distâncias e custos associados.....	49
5	CONCLUSÃO	54
5.1.	Trabalhos futuros.....	55
	REFERÊNCIAS	56

6. ANEXO I:60

7. ANEXO II: 61

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o mundo globalizado tem enfrentado uma pressão constante para reduzir as emissões de gases que contribuem para intensificar o efeito estufa. Considerando as projeções de aumento da demanda por energia e a necessidade de mudanças na matriz energética, existem várias questões não abordadas para alcançar uma matriz neutra em emissões, especialmente de carbono. Nessa perspectiva, o uso de tecnologias consolidadas e com baixa pegada de carbono é o meio mais viável para atingir esses objetivos.

Para este propósito, o gás natural (GN) oferece vantagens suficientes, uma vez que possui uma pegada de carbono menor que a de outros combustíveis fósseis. No Brasil, a infraestrutura de transporte de GN, representada pelos gasodutos, está predominantemente localizada nas regiões costeiras, o que limita o acesso a esse recurso nas regiões centrais do país [1]. Assim, estratégias de interiorização do gás se apresentam como um campo de pesquisa relevante, tanto na oferta quanto na demanda de GN.

A importância das estratégias logísticas decorre de serem o ponto focal de várias atividades econômicas dentro das redes de valor, como fornecimento, produção, armazenamento e transporte de mercadorias. Além disso, o fato de o país possuir reservas de gás natural comprovadas praticamente em todo o seu território indica que o aproveitamento desse gás pode contribuir ainda mais para a descarbonização da matriz energética, especialmente nos setores de transporte e industrial, fornecendo tempo hábil para a eletrificação de alguns setores e uma maior oferta de fontes renováveis de energia. Notavelmente, o estado do Maranhão detém uma parte significativa dessas reservas, sendo um dos poucos estados com produção terrestre e fazendo parte da nova fronteira exploratória de petróleo e gás, a Margem Equatorial.

Entretanto, como no estado do Maranhão não há nenhuma malha de gasoduto, exceto a do complexo do Parnaíba [2], existe uma urgência em encontrar soluções para o aumento da oferta e do consumo de GN no estado, considerando seu potencial produtor.

Recentemente, em 2022, foi elaborado um relatório que analisa os aspectos econômicos e ambientais da implantação de corredores de GNV, Gás Natural Veicular, no Nordeste brasileiro. Esta é uma ideia em ascensão e amplamente difundida nos últimos anos em vários países, que é a criação de rotas para abastecimento de veículos a gás natural (GNV), conhecidos como Corredores Azuis, ou "*Blue Corridors*", em inglês. No entanto, nos estados mencionados no relatório existem apenas 71 postos de GNV até o momento, com foco principalmente em automóveis leves [3],

sendo que nenhum destes está em território maranhense. Para essa infraestrutura existe necessidade de planejamento, oferta de gás natural e investimentos, tanto para a construção/adaptação de postos quanto para a adaptação/produção de veículos para GNV.

Na oportunidade, a Companhia de Gás Maranhense (GASMAR) apontou iniciativas para a distribuição de GNV nos próximos anos [4]. O gás que poderá ser fornecido pela ENEVA a partir de seu sistema de produção em Santo Antônio dos Lopes/MA. Este gás poderá ser transportado como Gás Natural Liquefeito (GNL) até a capital, São Luís, e distribuído para os postos como Gás Natural Comprimido (GNC) por gasodutos virtuais.

Um plano de rotas eficiente é de grande importância dentro do setor logístico, pois é através dele que estratégias são traçadas para reduzir custos e aumentar o nível de serviço. Portanto, o desempenho de um sistema de transporte é primordial nos resultados logísticos, assim como a localização dos terminais e a distribuição dos produtos [5]. Desta forma, o levantamento de dados para a estratégia de construção da rede de distribuição GNV é crucial para a implantação destes corredores, principalmente para veículos pesados que cortam o estado durante a maior parte do ano para descarga no Porto do Itaqui.

Logo, dado o crescimento e a importância do GN na matriz energética brasileira, juntamente às projeções de aumento na produção e demanda, esta dissertação apresenta uma proposta de rede para a implementação de corredores de GNV (Corredores Azuis) no estado do Maranhão apoiada na Teoria dos Grafos, algoritmo genético e modelagem em SIG (Sistemas de Informação Geográfico) usando dados georreferenciados. Outro pressuposto importante desta dissertação refere-se à priorização de soluções logísticas em um país carente de dados locais e capital de longo prazo, que deverá percorrer um longo caminho para recuperar a capacidade de investimento em infraestrutura de gasodutos.

1.1.Contextualização do problema

A utilização de recursos fósseis tem crescido constantemente, enquanto o gás natural emerge como um componente crucial na transição para uma matriz energética de baixo carbono [6][8][5]. Embora seja um combustível fóssil, o gás natural possui características que o tornam uma fonte de energia eficiente, relativamente limpa e econômica. Ele representa 24,2% [9] do consumo mundial de energia primária e desfruta de uma variedade de aplicações além da geração de energia, incluindo indústrias como papel/celulose, produção de fertilizantes, aço e transporte.

No contexto global, os estudos sobre descarbonização do setor de transporte têm recebido considerável atenção. No entanto, é crucial realizar análises locais para compreender as especificidades de cada região. No Brasil, onde o segmento de transporte responde por 37,7% do consumo nacional de energia, sendo que 41,9% desse consumo é suprido pelo diesel, com 25,5 % desse diesel sendo importado [7][3][10][3][1], é evidente a necessidade de buscar alternativas mais sustentáveis.

O potencial de crescimento na produção de gás natural no Brasil, especialmente devido às descobertas no Pré-Sal e na costa Norte/Nordeste, oferece uma oportunidade significativa para reduzir as emissões no setor de transporte. No entanto, estudos realizados no estado do Maranhão identificaram que os custos relacionados à infraestrutura de transporte e à falta de demanda são obstáculos para a expansão do consumo de gás natural [2].

Diante desse cenário, estratégias de interiorização do gás natural se tornam essenciais. Enquanto os gasodutos permanecem como a principal via de escoamento, modalidades alternativas como o transporte rodoviário e ferroviário, utilizando Gás Natural Liquefeito (GNL) ou Gás Natural Comprimido (GNC), estão sendo exploradas. No Maranhão, a distribuição de GNC/GNL a granel surge como uma opção promissora para expandir o acesso ao gás natural, especialmente devido a inexistência de infraestrutura de dutos.

O uso do GNV como combustível veicular apresenta benefícios significativos, não apenas em termos de eficiência e economia, mas também em relação à saúde, meio ambiente e segurança [6]. Considerando a extensa área territorial e a importância agrícola do Maranhão, juntamente à predominância de veículos pesados movidos a diesel, a transição para o GNV se mostra uma alternativa viável, ainda que de longo prazo.

Além disso, a criação de Corredores Azuis no estado pode contribuir para a descarbonização das frotas de veículos pesados, representando uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de carbono e outros poluentes nocivos ao meio ambiente e à saúde humana. Embora a implementação desses corredores ainda seja incipiente no Brasil, estudos estão sendo conduzidos, dada a perspectiva de crescimento na produção de gás natural e adoção do mesmo.

Desta forma propor uma metodologia para levantamento de dados para o avanço do gás natural para GNV pode ser uma ferramenta valiosa para identificar restrições, otimizar recursos e promover a uma reforma energética no setor de transporte. Sendo esta, a proposta deste estudo.

1.2. Objetivos do trabalho

1.2.1. Objetivo Geral

- Desenvolver uma proposta de rede para postos de GNV no Maranhão, utilizando otimização espacial para identificar locais estratégicos que otimizem a distribuição e o acesso ao gás natural veicular.

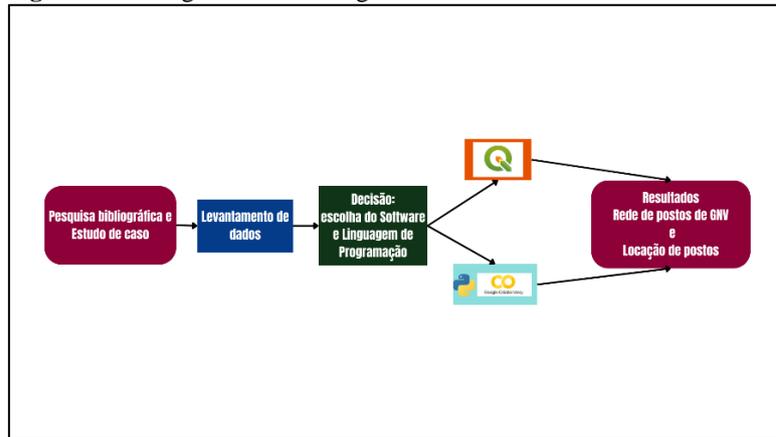
1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar áreas estratégicas no estado do Maranhão para a distribuição potencial de gás natural, considerando dados de contagem de veículos, densidade populacional, localização de postos de combustíveis e dados georreferenciados, a fim de maximizar a eficiência da distribuição.
- Propor um plano de rotas hipotéticas para a distribuição de gás natural nos postos de combustível do Maranhão, utilizando análises geoespaciais avançadas, visando otimizar a conectividade da rede e gerar banco de dados para minimizar os custos operacionais futuros.

1.3. Métodos

A metodologia adotada nesta pesquisa foi delineada com base em uma abordagem mista, que incluiu pesquisa bibliográfica e estudo de caso. A pesquisa bibliográfica foi realizada para fundamentação teórica e contextualização do problema, utilizando fontes relevantes da literatura acadêmica e relatórios técnicos sobre o tema. Em seguida, foi empregada uma abordagem de estudo de caso, com o Estado do Maranhão como objeto de análise devido à sua relevância para o estudo da interiorização do gás natural e da implementação de corredores de GNV. O fluxograma metodológico adotado pode ser visto na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma metodológico.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Os dados utilizados nesta pesquisa foram predominantemente de domínio público, obtidos a partir de fontes confiáveis como a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) [7], o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE) [11], a Conselho Nacional do Transporte (CNT) [12] e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) [13]. Esses dados foram coletados, organizados e analisados para fornecer uma base sólida para o desenvolvimento do modelo de estudo.

Para a construção do modelo de estudo, adotou-se uma abordagem baseada na Teoria dos Grafos, combinando o uso de algoritmos genéticos (AG) com ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). O algoritmo genético foi implementado em linguagem de programação *Python*, utilizando o ambiente do *Google Colaboratory*, enquanto o software livre QGIS (Quantum Geographical Information System) foi utilizado para a análise espacial e visualização dos resultados da rede [14].

Essa metodologia integrada permitiu a modelagem eficiente da distribuição de pontos de postos de GNV no estado do Maranhão, considerando fatores geoespaciais e requisitos logísticos. Além disso, facilitou a identificação de áreas estratégicas para a implementação de corredores de GNV, contribuindo para o desenvolvimento de políticas e estratégias de expansão da infraestrutura de GNV no estado.

Essa abordagem metodológica foi essencial para alcançar os objetivos propostos neste estudo e oferecer *insights* valiosos para o planejamento e implementação de corredores de GNV no Maranhão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O Gás Natural na Economia Brasileira: Dinâmica Global e Perspectivas Locais

O processo de globalização nos setores energéticos está cada vez mais integrado. Sua origem ocorre entre distintas regiões geográficas que possuem recursos energéticos e mercado consumidor. O consumo de gás natural (GN) é influenciado por diversos fatores externos, como as condições de desenvolvimento econômico local, políticas energéticas, condições climáticas e os preços do gás natural, o que resulta em uma forte incerteza [15][16].

Entre os combustíveis fósseis, o gás natural é o mais eficiente do ponto de vista energético quando comparado ao carvão mineral e derivados de petróleo [5][9]. Notavelmente, o consumo e a comercialização do gás natural tiveram um crescimento substancial nas últimas décadas. Este fenômeno decorreu da liberalização dos mercados de energia em várias regiões e do estabelecimento de padrões para redes de gás natural ao redor do mundo [10][16].

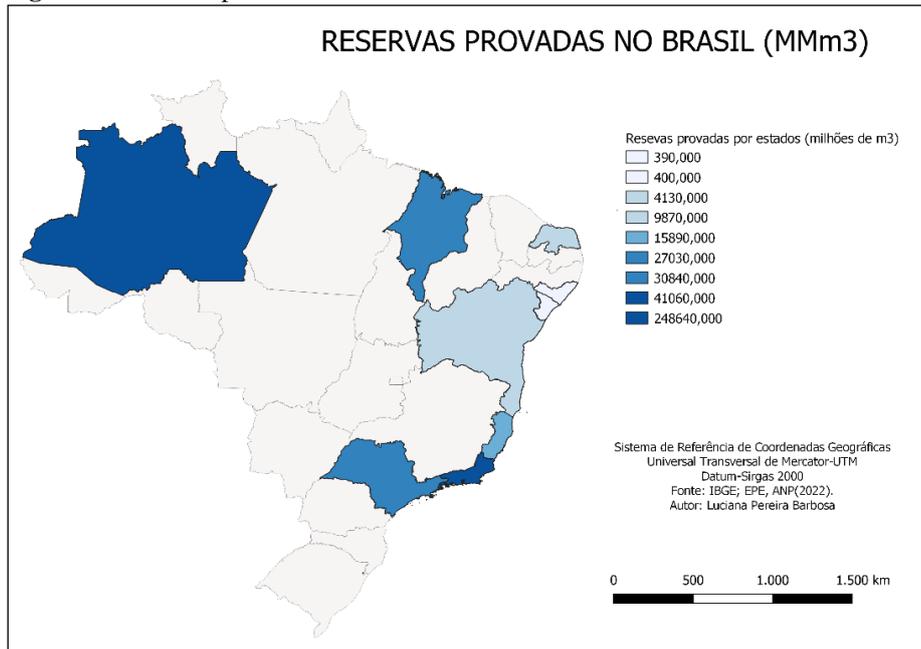
Segundo a Agência internacional de Energia [17] as reservas provadas de gás natural totalizam 198,8 trilhões de metros cúbicos, enquanto os recursos mundiais tecnicamente recuperáveis de gás natural somam 810 trilhões de metros cúbicos.

Especialmente em economias emergentes, como Venezuela, Bolívia, Trinidad & Tobago, Brasil, Argentina e Guiana, a expansão e exploração das vastas reservas de combustíveis fósseis desempenham um papel fundamental no impulsionamento do desenvolvimento e no estímulo ao crescimento econômico [16][17]. As perspectivas para a produção brasileira de gás natural são positivas, graças à exploração das áreas do Pré-sal e das bacias terrestres [10].

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis [7], o Brasil ocupou a 31ª colocação no ranking dos maiores detentores de reservas provadas e produtores de gás natural do mundo em 2019. Os principais usos incluem residencial, comercial, industrial, transporte e produção de energia elétrica.

Dessas reservas provadas, estima-se que cerca de 7,1%, Figura 2, estejam localizadas no Maranhão, conferindo ao estado a quarta posição no ranking dos detentores de reservas de gás no Brasil, e que se comprovada a comercialidade desse gás o mesmo poderá ser levado aos postos para distribuição como GNV.

Figura 2: Reservas provadas no Brasil.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

O Rio de Janeiro detém aproximadamente 65,7% das reservas de gás natural, seguido pelo Amazonas com 10,9% e São Paulo com 8,2%. A exploração desse recurso tem sido amplamente discutida, não apenas devido ao Pré-sal, mas principalmente em relação às expectativas associadas à Margem Equatorial [18].

O principal consumidor de gás natural no Brasil é o setor industrial, representado pelos segmentos da indústria química, cerâmica, ferro-gusa, aço, papel e celulose, enquanto no Maranhão é o setor de energia, com perspectivas de aumento do consumo. Observa-se que, de maneira geral, o gás natural apresenta usos tanto como matéria-prima quanto como insumo energético na indústria [10], tornando-se um recurso importante na reindustrialização do país.

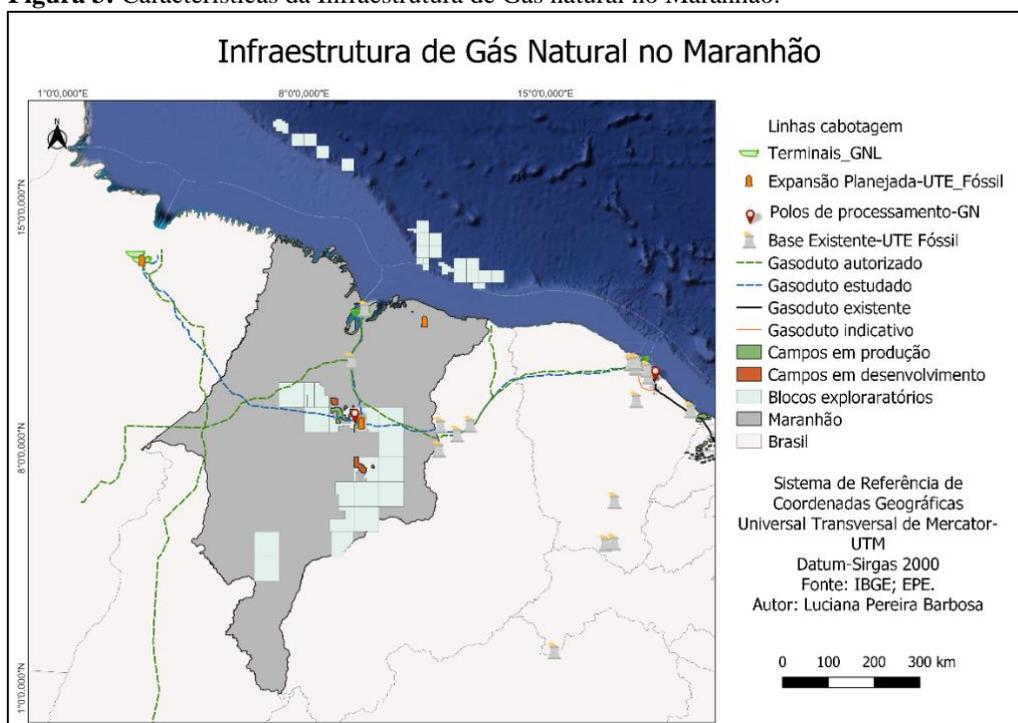
2.2. Papel do Gás Natural no Desenvolvimento Econômico e Energético do Maranhão

O gás natural é uma fonte energética versátil, capaz de substituir outras fontes de energia, como eletricidade, GLP, óleo diesel, carvão e coque [19]. No Maranhão, a exploração de gás natural concentra-se principalmente na Bacia do Parnaíba, localizada na região nordeste do estado e abrangendo também os estados do Piauí, Pará, Tocantins, Bahia e Ceará, com uma área total de 665.888 km² [20].

A exploração nessa região teve início nos anos 1950, adotando uma abordagem distinta da Bacia do Solimões. Apesar do encerramento da fase exploratória durante os anos 1980, as informações obtidas nesse período foram cruciais para uma nova diretriz exploratória alinhada ao quadro regulatório atual da indústria de petróleo e gás natural no país [16].

Ao todo, foram perfurados 227 poços exploratórios na Bacia do Parnaíba, fornecendo *insights* sobre a expansão desse fenômeno no estado do Maranhão [18][2]. O Estado se destaca como o único com reservas comprovadas e operações ativas na produção de gás natural *onshore*, sendo o segundo maior produtor do país [21]. Esta posição privilegiada pode ser confirmada na Figura 3.

Figura 3: Características da Infraestrutura de Gás natural no Maranhão.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

A intensificação da exploração do gás natural, aliada à diversificação em direção a outras regiões, traz consigo um novo conjunto de desafios e imperativos estratégicos relacionados à sua utilização. Os substanciais investimentos na exploração têm reconfigurado a realidade da produção no estado, ao mesmo tempo em que alteram a dinâmica das finanças públicas das localidades com poços em operação.

No início da fase de produção, o principal objetivo da ENEVA, detentora de 99,9% da produção de gás no Maranhão, era converter o recurso em lucro de forma imediata, considerando

as limitações na infraestrutura de transporte e os significativos investimentos já realizados em pesquisas e perfuração na Bacia do Parnaíba [2]. Nesse contexto, a empresa adotou um novo paradigma ao implementar um modelo integrado de produção de energia a partir do gás natural, o *reservoir-to-wire* [22].

A especialização nesse modelo de negócios emergiu como a estratégia-chave para aproveitar as reservas, dada a considerável distância dos campos de exploração em relação à infraestrutura nacional de gasodutos. Conseqüentemente, a solução foi harmonizar a competência em exploração de campos no continente com a extensa infraestrutura de transmissão elétrica, permitindo direcionar a produção. A produção de gás natural está totalmente voltada para suprir as necessidades do complexo termelétrico de Parnaíba, localizado em Santo Antônio dos Lopes/MA.

A infraestrutura de distribuição do gás natural provém de gasodutos que transferem o gás dos campos de produção até a Unidade de Tratamento de Gás da Parnaíba Energia S/A. Posteriormente, o gás é encaminhado ao Complexo Termelétrico, cuja operação é administrada pela própria ENEVA [21] [19]. No entanto, é esperado que o consumo de GN cresça em outros setores, principalmente na indústria e no transporte, devido a acordos feitos para a distribuição de GNV no Maranhão pela Companhia Maranhense de Gás-GASMAR.

Atualmente, existem 27 concessionárias no Brasil que detêm o poder de concessão para fornecimento de gás natural canalizado em seus respectivos estados, Figura 4. No Maranhão, essa concessão é de responsabilidade da GASMAR.

Figura 4: Concessionárias estaduais de Gás Natural.



Fonte: Abegás, 2023.

As empresas distribuidoras desempenham um papel essencial no final da cadeia, conhecida

como o segmento *downstream*. Sua principal função é impulsionar o crescimento do mercado e garantir uma ampla cobertura geográfica para chegar aos consumidores finais de forma econômica.

A inflexibilidade relacionada à alocação exclusiva do gás para a geração de energia limitou consideravelmente a operação da GASMAR ao longo da última década [2]. A rentabilidade da companhia está intrinsecamente vinculada à provisão de energia pela ENEVA ao Operador do Sistema Nacional (ONS). Mas novas medidas estão surgindo, recentemente, o governo do estado, através da mesma, trouxe a perspectiva de distribuição de GNV nos próximos anos.

A exploração na Bacia do Parnaíba possui uma capacidade de produção de 8,4 MMm³/dia, funcionando de acordo com a demanda energética. Números derivados da pesquisa de Silva (2023) [2] destacaram que existe uma projeção de demanda potencial de aproximadamente 2 MMm³/dia, abrangendo setores como indústrias extrativistas, processamento, substituição de óleo combustível e diesel em pequenas centrais geradoras de eletricidade, além do campo de transporte [2][21]. Essa visão proporciona oportunidades para variar a demanda e, por conseguinte, estabelecer um mercado para o gás natural no estado do Maranhão, conforme proposto pela GASMAR.

É de extrema importância que as regulamentações estaduais enfatizem não apenas os consumidores localizados em áreas litorâneas, mas também considerem as termelétricas e outras iniciativas em regiões centrais [23]. As novas rotas tecnológicas são o que vão impulsionar o mercado de gás no Maranhão, como a geração de uma demanda por GNV, por exemplo. Isto é o que pode sustentar a transição de um dos setores mais intensivos em poluentes para uma rota de baixo carbono.

2.3. Transporte de Gás natural e perspectiva de adoção do GNV no Maranhão

No Brasil, estão disponíveis os modais rodoviário, ferroviário e marítimo. A exploração da linha de cabotagem do país é um meio bastante consolidado, dada a infraestrutura portuária existente. O transporte ferroviário de gás natural também é uma alternativa à falta de acesso aos gasodutos, embora ainda pouco difundido global e localmente.

O sistema viário proporciona uma adaptabilidade essencial na rede de distribuição, influenciando diretamente a excelência e a abrangência dos serviços logísticos prestados. De acordo com Pfoer et al. (2018) [24], vários fatores influenciam os custos do transporte rodoviário

de cargas, incluindo quilometragem percorrida, tipo de tráfego, tipo de via, condições da rodovia, região, porte do veículo e desequilíbrio nos fluxos. O transporte rodoviário pode ser realizado por meio de GNL (Gás Natural Liquefeito) ou GNC (Gás Natural Comprimido), com o GNL sendo mais vantajoso devido à sua maior capacidade de transporte por volume, apesar do processo de liquefação ser mais dispendioso [25].

O transporte a granel de gás natural pode aumentar o consumo em áreas atendidas por concessionárias, especialmente em indústrias e no setor de transporte. Essa transição progressiva no panorama energético local pode substituir fontes de energia mais poluentes e dispendiosas, especialmente à medida que a demanda se solidifica.

É crucial considerar a disparidade na distribuição de recursos, bem como as complexidades políticas e econômicas que frequentemente dificultam essa mudança ambiciosa. O programa "Gás para Crescer" de 2016 enfrenta críticas substanciais devido à sua amplitude excessiva e à dificuldade em articular decisões que afetam os variados grupos de interesse na cadeia de valor do gás [24].

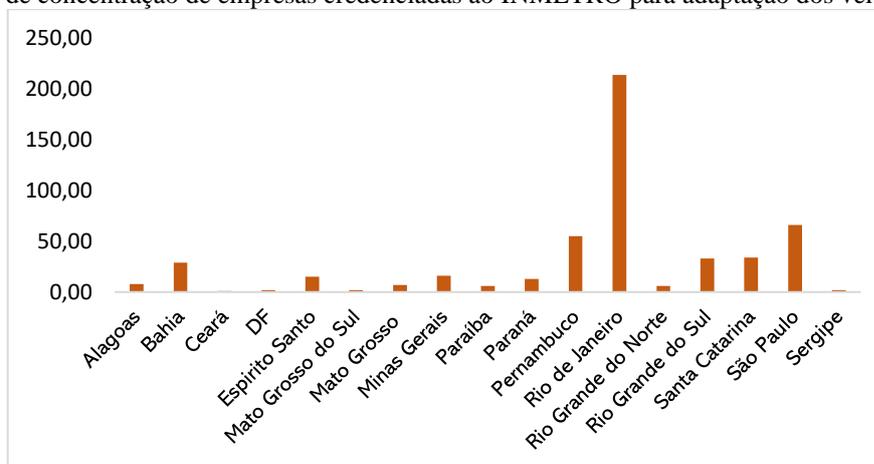
Iniciativas de transporte em pequenas escalas são essenciais para levar este combustível ao estado do Maranhão, visto que veículos movidos a Gás Natural Veicular (GNV) têm se tornado cada vez mais comuns. O interesse dos governos em combustíveis menos poluentes tem incentivado o crescimento do número de veículos a GNV, embora algumas condições básicas, como a disponibilidade de GN, um quadro regulatório claro e forte apoio governamental, sejam necessárias para promover essa adoção [26][27].

Recentemente, a GASMAR vem trabalhando na implantação do uso deste combustível [4]. A infraestrutura de GN ainda se apresenta limitada, mas a distribuição de GNV através de caminhões por meio de gasodutos virtuais oferece grandes vantagens. A adoção do GNV em veículos pesados no Maranhão pode gerar um consumo significativo, devido ao grande tráfego de ônibus e caminhões no estado, à expectativa de aumento de disponibilidade de gás natural e à presença de uma região portuária.

No entanto, a adaptação de veículos para GNV ainda enfrenta desafios, como os custos e a perda da garantia para veículos novos. Em 2018, os veículos a GNV representavam 3% da frota brasileira [28]. Sendo que, a adaptação desses veículos deve ser realizada em instituições credenciadas pelo INMETRO, conforme a Norma ISO 11439 e a Portaria nº 133. Até o momento desta pesquisa, não foi possível encontrar estabelecimentos de instalação de kits de GNV registrados no Maranhão. O Rio de Janeiro é o estado com a maior quantidade de instaladoras de

GNV (ver Figura 5), justificado pelo forte desenvolvimento do mercado de GN no estado.

Figura 5: Gráfico de concentração de empresas credenciadas ao INMETRO para adaptação dos veículos a GNV.



Fonte: INMETRO, 2023 [29].

No Rio de Janeiro, existe uma infraestrutura de conversão de veículos bem desenvolvida, garantindo comodidade, segurança e confiabilidade aos consumidores. Essas oficinas são certificadas pelo principal órgão de qualidade do Brasil [29]. Quanto aos tipos de cilindros, os instalados com mais frequência são os de 15 m³ de capacidade. Para veículos menores, há a alternativa de usar cilindros de 7,5 m³, enquanto para veículos maiores, existem opções de cilindros com capacidades de 17 m³ e 21 m³.

Ao longo do desenvolvimento da tecnologia de implantação do GNV, observou-se vários fracassos, como os casos do Canadá e da Nova Zelândia. Esses países inicialmente tiveram sucesso devido a fortes incentivos governamentais, porém, devido à falta de coordenação eficaz entre governo e indústria, os projetos perderam força, levando à perda de confiança do público na indústria de GNV [30]. Portanto, a sinergia entre o governo e a indústria é crucial para a implantação bem-sucedida do GNV no Maranhão.

Economicamente, o GNV é uma opção mais barata, representando em média 50% a 60% do preço do etanol e da gasolina por unidade energética, além de emitir menos gás carbônico (CO₂) do que a gasolina e o diesel. Substituir parte da demanda de diesel por gás natural pode trazer grandes benefícios ao Brasil, especialmente considerando que o diesel é a principal fonte utilizada para o transporte de cargas pesadas no país.

Um cilindro com capacidade para 15 m³ pode oferecer uma autonomia entre 180 e 200 km em tráfego urbano, conforme [8]. Segundo Consulgás (2022) [3], em rodovias, essa autonomia pode variar entre 275 e 300 km. Alguns arranjos de cilindros em veículos pesados podem ser

visualizados na Figura 6.

Figura 6: Ilustração de caminhões movidos a GNV.



Fonte: Google imagens, 2023.

2.4. Teoria dos Grafos e Algoritmos de Otimização para Roteamento

Os sistemas de distribuição e prestação de serviços têm sido frequentemente alvo de pesquisas científicas devido à sua significativa complexidade e papel essencial para o desenvolvimento em geral. Esse tipo de serviço exige planejamento e estratégias para maior eficiência na entrega de mercadorias ou alocação de serviços.

Nessa abordagem, a Teoria dos Grafos tem sido amplamente utilizada [31]. Ela foi desenvolvida no século XVIII pelo matemático Leonard Euler, que propôs o problema conhecido como "o problema das sete pontes de Königsberg", considerado o problema fundador da teoria [32][33]. Os moradores de Königsberg (atualmente Kaliningrado) questionavam-se sobre a possibilidade de atravessar as sete pontes do Rio Pregel sem repetir nenhuma delas e, ao mesmo tempo, retornar ao ponto de partida. A resolução desse problema não é possível, sua representação através de grafos é mostrada na Figura 7.

Figura 7: As sete pontes de Königsberg.



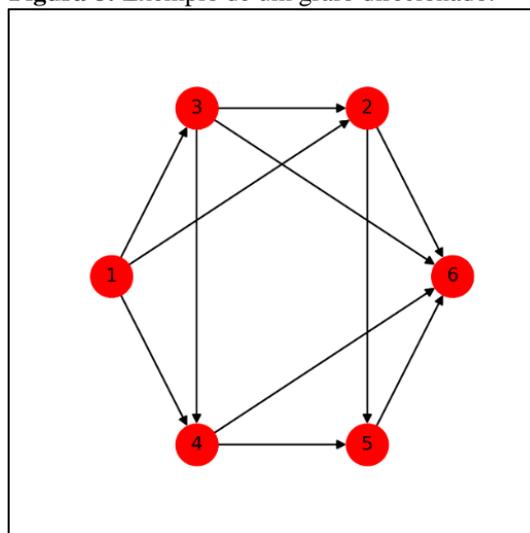
Fonte: Elaboração própria, 2023.

Com o avanço da tecnologia da informação, o emprego de algoritmos na resolução de questões associadas a grafos tem oferecido suporte em diversas circunstâncias que demandam implementação computacional, abordando desafios como a busca do caminho mais curto ou a minimização de custos. A exploração da Teoria dos Grafos oferece uma perspectiva para resolver uma gama de problemas práticos nos quais a matemática desempenha um papel crucial [31][33]. Esta abordagem justifica a investigação embasada em teorias e sua aplicação prática, através da interpretação dos resultados obtidos por meio de softwares analíticos.

Um grafo G é um conjunto ordenado $G = (V, A)$, onde V representa um conjunto não vazio de vértices/nós e A é um conjunto de pares ordenados que ligam os vértices, chamados de arcos ou arestas. Esses arcos representam as conexões entre os vértices e podem ter atribuído um peso específico caso o grafo seja ponderado [31]. Com base na situação e na aplicação, este pode assumir características diversas: direcionado ou não, com ou sem atribuição de peso, e estruturas cíclicas ou acíclicas. O peso de um arco representa o custo, tempo ou outras variáveis de decisão necessárias para ir de um nó a outro [34].

Um grafo orientado, também conhecido como dígrafo, é quando os vértices têm direção e apontam para outro vértice, tendo um sentido único. Na Figura 8, podemos visualizar a representação de um grafo direcionado composto de seis nós e onze arestas.

Figura 8: Exemplo de um grafo direcionado.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

A representação computacional de um grafo ocorre por meio de uma estrutura que

corresponde singularmente a um grafo específico, viabilizando seu armazenamento e manipulação em um computador. Contudo, representar o grafo por meio de diagramas de pontos não é prático para armazenamento ou manipulação quando se tem um grande número de nós [35]. Assim, os meios utilizados para a representação computacional de um grafo são estruturas como matriz de adjacências ou lista de adjacências.

A matriz de adjacência é uma representação tabular de um grafo, onde cada linha e coluna representam um nó (ou vértice) no grafo, podendo ser definida da seguinte forma [35]:

Definição: *Seja G um grafo com n vértices e m arestas. A matriz de adjacência, de ordem $n \times n$, denotada por $X = [x_{ij}]$ é definida como $x_{ij} = 1$ se existe uma aresta entre os vértices v_i e v_j ou $x_{ij} = 0$ caso contrário.*

A utilização da matriz de adjacência é especialmente útil em grafos densos, nos quais o número de arestas se aproxima do máximo possível [34][35]. Conforme destacado por Magzhan e Jani (2013) [36] e De Oliveira (s.d) [37], os modelos baseados em grafos têm uma ampla variedade de aplicações, abrangendo áreas clássicas como mapeamento, modelagem de estruturas hierárquicas e representação de interações em redes sociais, bem como setores industriais, onde são usados para representar rotas, fluxo de materiais e alocação de recursos.

Nesse contexto, diversos algoritmos foram desenvolvidos para problemas de roteirização, incluindo o Algoritmo do Caminho Mínimo, o algoritmo de Floyd, o algoritmo de Dijkstra, o Problema do Caixeiro Viajante e o Problema do Carteiro Chinês, entre outros [36][38]. No entanto, neste trabalho, daremos destaque à abordagem de Dijkstra. Desenvolvido pelo renomado cientista da computação Edsger Wybe Dijkstra em 1952, o algoritmo de Dijkstra tem como objetivo encontrar o caminho mais curto de um vértice inicial a todos os outros pontos do grafo [39][40]. Apesar de sua relativa simplicidade, este algoritmo tem demonstrado resultados altamente satisfatórios em uma variedade de contextos.

Em um grafo direcionado ponderado G com um conjunto de vértices V e conjunto de arestas E , e uma função de peso $w(u, v)$ que associa um peso não negativo a cada aresta de u para v , o algoritmo de Dijkstra encontra as distâncias mais curtas $d(v)$ de um vértice de origem s para todos os outros vértices em V [34][36]. Assim temos:

- 1- Para cada vértice v em V , defina $d(v)$ como infinito;
- 2- Assuma-se $d(s)$ como 0, pois a distância de s para s é igual a 0;
- 3- Em conjunto K , armazene todos os vértices em V ;
- 4- Enquanto K não estiver vazio, faça:

- 5- *Selecione u em K com menor distância $d(v)$;*
- 6- *Remova u de K ;*
- 7- *Para cada vértice v adjacente a u :*
Se $d(u) + w(u, v) < d(v)$, atualize $d(v)$ para $d(u) + w(u, v)$.

A função objetivo é minimizar a distância acumulada, e a atualização da distância mais curta para cada vértice é feita da seguinte forma:

$$d(v) = \min(d(v), d(u) + w(u, v))$$

Desta forma, quando todos os nós tiverem sido fechados a partir dos valores obtidos de seus predecessores, os valores obtidos serão as distâncias mínimas que partem do nó origem até os demais nós da rede gerando uma árvore de caminho mínimo.

2.5. Tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e modelagem de rede

Na análise de redes, existem inúmeros softwares disponíveis, especialmente para problemas logísticos e alocação de recursos [38]. No entanto, a obtenção de dados para esse tipo de análise pode ser uma limitação significativa em uma pesquisa.

Em um estudo conduzido por Baeza, Ihle e Ortiz (2017) [39], foi utilizado um Sistema de Informação Geográfica (SIG) em conjunto com a heurística de Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*) para a alocação de uma malha de minerodutos. Os resultados indicaram que essa abordagem pode contribuir para a redução de custos e aprimoramento na alocação de recursos para o empreendimento.

Em Dos Reis e Almeida (2018) [40] foi empregado o *PostGIS* em conjunto com o software R para caracterizar a malha urbana em Santarém/PA. Concluiu-se que a metodologia utilizada foi favorável para melhorar as vias e deslocamentos na região. Já na pesquisa conduzida por De Medeiros Pereira et al. (2018) [41], foi destacada a falta de planejamento para melhorias nas condições viárias, propondo-se a aplicação de inteligência geográfica em todas as rodovias pavimentadas em Minas Gerais.

Os avanços tecnológicos atuais têm impulsionado os setores da economia a grandes avanços de desenvolvimento, e o desenvolvimento de softwares para modelagem e simulação do

mundo real tornou-se uma ferramenta crucial para apoiar a tomada de decisões. Diante disso, este trabalho se beneficiou da vasta disponibilidade de dados geoespaciais, optando pelo uso de SIG na construção e desenvolvimento do modelo desta dissertação. O software escolhido foi o *Quantum Geographical Information System (QGIS)*.

O QGIS é um SIG gratuito e de código aberto que oferece amplas vantagens em análises geoespaciais, sensoriamento remoto, análises de rede e estatísticas. Além disso, esse software proporciona benefícios na aplicação de análises remotas, reduzindo os custos de uma análise presencial. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido amplamente integrados a modelos multicritérios, possibilitando a sinergia entre diferentes campos da ciência e criando uma abordagem prática para resolver problemas de planejamento e tomada de decisão espacial [42][43][44][45].

Vários pesquisadores têm utilizado SIG como sistema de suporte à decisão na avaliação de problemas relacionados à localização ótima de recursos [46][47]. Essa abordagem também pode ser aplicada em análises de rede, seja do sistema rodoviário, ferroviário, dutoviário, redes de abastecimento, entre outros.

Um SIG é composto pelos seguintes componentes apresentados na Figura 9 [47]:



Fonte: Elaboração própria, 2023.

De maneira ampla, as operações de processamento em um SIG atuam sobre dados em uma área de trabalho na memória principal. A conexão entre os dados geográficos e as funções de processamento do SIG é estabelecida por meio de mecanismos de seleção e consulta, os quais estabelecem restrições sobre o conjunto de dados.

Todo subsistema deve estar presente, entretanto, de acordo com os objetivos e as necessidades do operador, a implementação dos componentes pode ser feita de forma distinta [47][48]. Quanto à classificação, um SIG pode ser dado como na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Características de um SIG.

Grupo	Objetivo
SIG para Suporte a decisão	-Típicamente usados em problemas de planejamento e gestão; -Partilha muitas características dos Sistemas de Apoio à Decisão; -Requerem o desenvolvimento de ambientes especialmente adequados à resolução de problemas, em que a integração de muitos produtos informáticos e a criação de interfaces Homem-Máquina simples e potentes se colocam como questões centrais; -Destina-se a objetivos que não se encontram completamente definidos quando o sistema é criado.
SIG Operacionais	Resolução de problemas bem definidos que ocorrem com caráter repetitivo; Caracterizam-se por suportar diversos tipos de funcionalidades, particularmente, para organização e armazenamento de dados e para obtenção de dados pré-definidos; Solucionar problemas nas áreas de gestão e análise de redes de infraestruturas, de cadastro e registro de propriedades, etc.
SIG Operacionais com requisitos de tempo real	Distinguem-se pelas frequentes alterações de dados e por envolverem muitas variáveis com características temporais fundamentais; Destinam-se a resolver problemas de caráter global e de monitoração de redes; Utiliza modelos complexos e base de dados volumosos, com recurso a alta tecnologia.

Fonte: [48][49].

Em um SIG geralmente os objetos podem ser representados por três tipos de dados: pontos, linhas e polígonos [46].

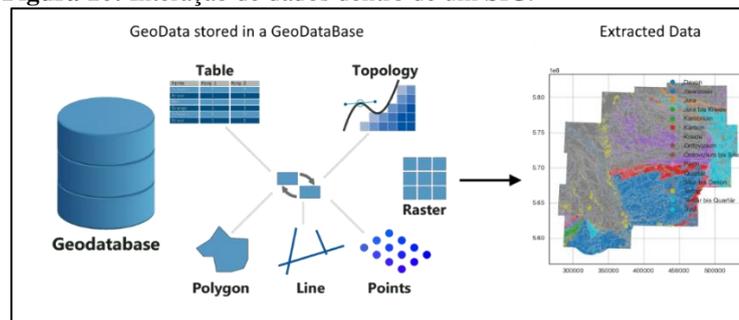
- Pontos: definem localizações discretas de elementos geográficos demasiadamente pequenos para serem descritos como linhas ou polígonos.
- Linhas: são entidades geométricas unidimensionais definidas por uma sequência de coordenadas geográficas conectadas.
- Polígonos: um polígono são figuras geométricas bidimensionais com uma série de vértices conectados por segmentos de linha, representando uma área fechada no espaço.

Cada um desses objetos possui coordenadas geográficas que são pares ordenados (x, y), e são armazenadas em *shapefiles* que consistem em arquivos *.shp (geometria), *.shx (índice) e

*.dbf (banco de dados relacional) [47][48]. Esses elementos interagem no contexto do mapa, formando as camadas de dados em mapas temáticos (*layers*), que representam a área geográfica de interesse. O mapa funciona como um modelo abstrato dos fenômenos espaciais, em que cada camada representa um tema específico, ou seja, dados geográficos compartilhando características comuns.

De forma sucinta, apresenta-se essa estruturação do banco de dados na Figura 10.

Figura 10: Interação de dados dentro de um SIG.



Fonte: [43].

Apesar da ampla adoção dessas tecnologias, é notável que sua aplicação mais substancial ocorre nos campos da saúde e transformações ambientais [49], mas nas últimas décadas a melhoria desses softwares tem proporcionado análise de dados mais robustas. A exemplo, Ayala Filho [50] e Moraes [51] apresenta em sua pesquisa algumas das funções essenciais de um SIG, como:

- Realizar operações genéricas de SIG;
- Manipulação matrizes;
- Análise de caminhos mínimos;
- Resolução de problemas de roteirização;
- Particionar, clusterizar e regionalizar;
- Localizar centros para alocação de recursos;
- Aplicar modelos de previsão de demanda;
- Permitir a visualização para dados e modelos de transporte;

Outras vantagens significativas incluem a ampla disponibilidade de dados georreferenciados nas bases de dados nacionais de acesso público, o que foi um dos pontos principais da escolha desses sistemas para o desenvolvimento deste trabalho devido à escassez de dados.

2.6. Benefícios ambientais do gás natural para GNV

Há uma variedade de fontes de energia que podem levar a caminhos energéticos mais sustentáveis. Entretanto, não se pode trilhar esse caminho reduzindo a oferta de energia, mas buscando estratégias de integração entre os setores, a fim de que elevem os benefícios dessa transição como um todo.

O crescimento econômico é o maior responsável pelas emissões de CO₂ e este fato só tende a crescer. A disponibilidade de energia é um dos pilares fundamentais do desenvolvimento das sociedades e esta energia tem sido fornecida em sua maior parte por combustíveis fósseis até o momento. Os hidrocarbonetos são responsáveis por grande parte da formação das economias sólidas que conhecemos hoje, e essa realidade irá perdurar por algumas décadas.

A necessidade de uma mudança nas matrizes energéticas em todo mundo ecoa na forma de impactos no clima global, aumento da temperatura, ondas de calor/frio, excessos/escassez de chuvas etc. Uma das primeiras transições, a do carvão para o petróleo, não conseguiu extinguir de vez o uso do carvão. E a transição do petróleo para as energias renováveis não irá extinguir o uso de hidrocarbonetos às velocidades esperadas. Desta forma, o que se espera é o estabelecimento de estratégias de baixo carbono.

O GN pode ser considerado como um “combustível ponte”, “combustível de transição” ou “um combustível potencial para a transição para uma economia de baixo carbono” [52][53], principalmente devido ao menor nível de emissões de gases de efeito estufa do que outros combustíveis fósseis [52] e por ser um recurso tecnologicamente maduro, não necessitando de grandes ajustes para aumentar sua produção.

Buscando alterar a estrutura de quase monopólio exercido pela Petrobrás, como produtora, compradora e gestora de gasodutos, em 2021 foi criada a nova Lei do Gás (Lei no 14.134/2021), alterando o marco regulatório-institucional do setor de gás natural e contribuindo para o aumento da concorrência e o acesso não discriminatório a infraestrutura [51]. Vale destacar que o gás natural é amplamente empregado em diversos setores e que, por tais questões, a aceitação deste energético não oferece resistência. Nas últimas três décadas, o consumo do gás natural cresceu de forma significativa, alcançando 24,2% da energia primária total e 21% das emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEEs), mas no Brasil o consumo de GN se manteve em torno de 12% da matriz energética [9].

A mudança exigida pelas políticas climáticas tem peso maior em cadeias mais intensivas em emissões de poluentes, como o setor de transporte. No Brasil, esse setor responde por cerca de 37,7% do consumo de energia, do qual 41,9% é suprido pelo diesel (Balanço Energético Nacional, 2022), sendo que 23% desse diesel é importado. Esse despertar teve início em 2019, o que levou o governo a intensificar a proposta do uso de gás natural em transporte de cargas e no transporte público [3].

Em 2021, as emissões provenientes do setor de transporte foram majoritariamente atribuídas ao transporte de cargas, respondendo por aproximadamente 57%, enquanto o transporte de passageiros representou uma parcela de 43%, conforme dados do Sistema de Estimativa de Emissão de Gases-SEEG (2022). Em geral, quase todos os veículos pesados são movidos a diesel e como têm crescido as melhorias na otimização da logística de frete rodoviário, a mudança de combustíveis à base de petróleo para uma alternativa mais limpa poderia reduzir as emissões operacionais e diminuir a dependência do petróleo importado [53].

De acordo com Graça [54], as emissões de CO₂ do GN em comparação a outros energéticos convencionais é cerca de 4 vezes menor. Em média, o uso de gás natural comprimido (GNC) produz menos gases de efeito estufa quando comparados com os veículos convencionais a gasolina e a diesel [54][52]. Comparado à gasolina, o GNV tem um potencial médio de redução de 68% de monóxido de carbono (CO), 35% de óxidos de nitrogênio (NO_x), 26% de dióxido de carbono (CO₂) e 10% de material particulado (PM) [52][55].

Nessa perspectiva, o GN para GNV é uma boa alternativa para reduzir as emissões tanto de gases de efeito estufa como de material particulado. Todavia, deve-se considerar algumas premissas para a implantação de GNV como combustível alternativo na transição da matriz de transporte no Maranhão. Como por exemplo:

- A disponibilidade de reservas de gás natural suficientes, necessárias para abastecer os veículos a gás natural.
- A existência ou compromisso com um sistema de distribuição de gás em escala que proporcione boas oportunidades para construção de postos de abastecimento de GNV nos locais de interesse.
- Disponibilidade de veículos candidatos à conversão para GNV em uma escala que resultará no estabelecimento de um mercado comercial viável.
- Desenvolvimento de um sistema de GNV que seja seguro e também financeiramente

viável sob um quadro regulatório claro.

Estes pontos são muito importantes de serem analisados antes de adotar o GNV como combustível alternativo para transporte. De forma a exemplificar, podemos citar o caso do Paquistão, que possui mais de 3,7 milhões de veículos a GNV, mas enfrenta problemas de escassez de gás, levando o governo a não favorecer a maior expansão do setor do GNV no país [56]. Nesse caso, o governo está lutando com a difícil tarefa de tentar reverter a estratégia e levar os veículos de volta à gasolina para desviar o gás natural para a indústria e usinas de energia [52].

No mercado brasileiro, a insuficiência no fornecimento de gás natural pode ser identificada como um dos principais fatores responsáveis pela taxa de crescimento lento da adoção do Gás Natural Veicular (GNV) [57]. Outro ponto que tem ganhado destaque no mundo é a percepção entre garantir o acesso ao gás natural para cozinhar em domicílios de baixa renda e abastecer veículos com gás natural.

O histórico do Brasil na adoção do GNV teve um crescimento significativo do mercado de 2000 a 2007, o que resultou na conversão de aproximadamente 1,5 milhão de veículos. Entretanto, após 2007 até 2015 houve uma conversão de apenas 286.000 veículos [28]. A escassez de gás para o setor do GNV reduziu posteriormente os investimentos na rede de distribuição de gás natural e postos de abastecimento de GNV. Além de alguma redução na diferença de preço entre o GNV e os combustíveis convencionais, a opção preferencial do governo brasileiro pelo uso do gás natural na geração de energia e nas indústrias foi o principal fator contribuinte.

No apoio à inserção do GN no setor de transporte, podemos destacar iniciativas como: o “Novo Mercado de Gás” que visa à criação de um mercado de gás natural aberto, dinâmico e competitivo, promovendo condições para redução do seu preço e, com isso, contribuir para o desenvolvimento econômico do País. O relatório do BNDES intitulado “Gás Para o Desenvolvimento”, onde além de outros assuntos ele aborda o uso de GN para veículos pesados. Tudo isso atrelado às exigências por melhorias ambientais e qualidade de vida relacionado à emissão de poluentes, o uso de combustíveis mais limpos é também uma forma promissora do uso do GN, levando, dentro dessa abordagem, ao conceito da criação dos Corredores Azuis.

A ideia dos Corredores Azuis foi lançada no ano 2000 pela Fundação não governamental Ecológica Vernadsky em Moscou, Rússia. As principais vantagens dessa estratégia seriam de cunho tanto econômicas, como ambientais. Segundo [58] o objetivo do projeto era o estabelecimento de “corredores de transporte para veículos de transporte de cargas pesadas que utilizam Gás Natural Comprimido (GNC) como combustível ao invés de diesel”. Uma iniciativa

para construção de “Corredores sustentáveis” do Ministério da Economia vem trabalhando com diversos players do setor de gás natural, biometano e montadoras de veículos, com o objetivo de organizar as pautas do setor.

Até o presente momento a introdução dos Corredores Azuis é algo recente no cenário brasileiro, mas já conquistou destaque na Europa, isso foi enfatizado por Mouette et al. [58] que destacaram a crescente utilização do potencial do gás natural e do biometano no setor de transportes. Hagos e Ahlgren [60] ressaltaram que Portugal tem se mostrado um exemplo, pois desde de 2016 o país conseguiu uma marca de mais de 23 milhões de veículos a gás natural (GNV), representando 1,32% da população total de veículos. Além de outros casos como na Ásia-Pacífico com 66%, na América Latina com 24%, na Europa com 8,6% e na África e na América do Norte com 1,4% [58][60].

Os países que já possuem infraestruturas de gás natural poderão fazer a transição para a tecnologia GNV de forma mais econômica e rápida. Todavia, para economias como o Brasil, os desafios serão maiores, visto que a infraestrutura de GN é regionalizada. O estado do Maranhão é um dos poucos estados que hoje, contam com uma produção de GN *onshore* [61] e com possibilidade de crescimento.

A distribuição de GN no Maranhão carece de estratégias e planejamento, visto que até o momento não há infraestrutura de gasodutos. Dessa forma, estudos e pesquisas para a construção de cenários para o avanço da demanda de GN, tanto para indústria como para GNV, são extremamente relevantes, se tornando uma ferramenta essencial para apoio a decisão.

3 CONSTRUÇÃO DO MODELO: MODELAGEM GEOESPACIAL DO MARANHÃO

3.1. Infraestrutura de Gás Natural existente

Um dos maiores desafios para o setor de gás natural no Brasil, sem dúvidas, diz respeito à logística de distribuição, o que pode, em alguns casos, elevar consideravelmente os custos do energético. Até o momento, um dos meios mais econômicos de distribuição conhecido atualmente é por meio de gasodutos, mas no Brasil os avanços na implantação dessa infraestrutura evoluem a passos largos. Mesmo que os estudos apresentados pelos Planos Indicativos de Gasodutos (PIG's)

sejam consideráveis avanços no desenvolvimento de infraestruturas em regiões centrais.

Hoje, as amplas discussões que colocam o gás natural como um novo impulso para a reindustrialização do Brasil não podem limitar-se somente à exploração das reservas no Pré-Sal. Sendo fundamental, também considerar os potenciais de exploração de outros campos, como os da Margem Equatorial, e buscar atender a demanda presente em outras regiões e os investimentos requeridos para interligá-las à rede nacional de transporte [23].

Desta forma, as perspectivas no contexto maranhense são promissoras, ainda que a princípio o uso do transporte rodoviário (gasodutos virtuais) seja a rota com maiores chances para a distribuição do gás produzido na Bacia do Parnaíba para suprir as novas demandas do estado, como é apresentado neste estudo.

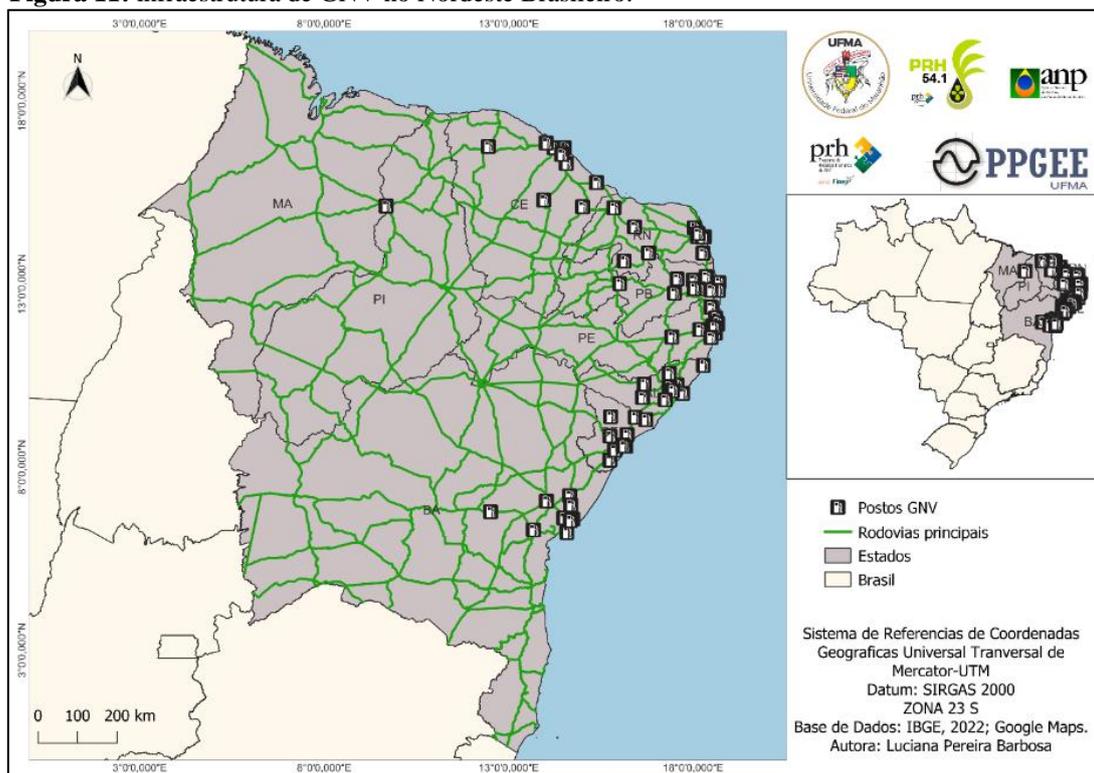
3.2. Corredor Azul no Maranhão

Os gasodutos virtuais para transporte de Gás Natural Liquefeito (GNL) ou Gás Natural Comprimido (GNC) já são uma realidade, entretanto estratégias de demanda são necessárias. A implementação de Corredores Azuis representa uma estratégia emergente para consolidar o Gás Natural (GN) como uma alternativa viável para o transporte de média e longa distância, onde, inicialmente o GN é introduzido como um combustível complementar, construindo uma estratégia evolutiva para se tornar uma substituição eficaz do diesel.

Em um relatório desenvolvido pela CONSULGÁS em 2022, considerando as projeções de aumento nas ofertas de Gás Natural e Biometano no Brasil, foi analisada a implantação destes Corredores Azuis dentro das principais rodovias que cortam os Estados do Nordeste. Isso mostra que, a difusão bem sucedida de GNV é uma tarefa difícil e complexa por diversas razões, mas como primeiro passo na identificação de soluções promissoras, é fundamental compreender as questões estruturais fundamentais para o desenvolvimento destes corredores [23][27].

Atualmente no Nordeste do país, existem 71 postos de GNV instalados nos Estados: Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Bahia, Sergipe e Alagoas. E como pode ser visto na Figura 11, ainda não se tem nenhum posto de GNV em território maranhense.

Figura 11: infraestrutura de GNV no Nordeste Brasileiro.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Os postos mostrados são para abastecimento de veículos leves, mas que podem passar por adaptações e atender outros veículos, como ônibus e caminhões. Em caso de implantação de novos postos os custos poderão ser maiores.

Para o estabelecimento de um posto de GNV, por exemplo, um dos principais pontos que devem ser analisados é se há uma rede de gasodutos que levem o gás até estes postos, caso contrário deve-se consultar a concessionária estadual (GASMAR) sobre a possibilidade de distribuição deste gás por gasodutos virtuais. Além disso, dentro da análise de adaptação dos postos ou a criação de novos, deve-se considerar o arranjo de capacidade de armazenamento, compressores e capacidade de abastecimento dos veículos e a demanda.

Na perspectiva dessa construção é possível considerar duas abordagens quando se fala em uma nova estação de abastecimento de gás natural [62]:

- Estação de Abastecimento de GNV (Gás Natural Comprimido): este tipo de infraestrutura pode ser alimentado a partir da rede de gás natural existente. Neste caso, seria necessário instalar um compressor com capacidade para atingir uma pressão final de 200 bar, e os dispensadores.

- Estação de Abastecimento de GNV/GNL (Gás Natural Comprimido/Liquefeito): este tipo de infraestrutura capaz de fornecer tanto gás natural liquefeito quanto comprimido, deve ser alimentado com gás natural liquefeito através de tanques de transporte. Para isso é necessário instalar um tanque estacionário de GNL para acumular e alimentar a instalação, uma bomba de transferência para converter o GNL em GNV, e os dispensadores.

A produção de gás natural no estado do Maranhão concentra-se exclusivamente na Bacia do Parnaíba, sendo que a distribuição para os postos no estado poderá ser realizada pela GASMAR. Diante desse desafio, no contexto da otimização de rotas e alocação de recursos, a utilização de técnicas para coleta de dados e caracterização da área de interesse a partir de fontes públicas pôde oferecer uma boa representação regional através de dados geoespaciais. A seguir, serão apresentados os métodos empregados no levantamento de dados para esta pesquisa para formulação da proposta de rede.

3.3. Coleta e Análise de Dados Geoespaciais

A importância crescente da tecnologia dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) está se estabelecendo como uma ferramenta indispensável para a visualização e análise regular de informações espaciais. Seu uso abrange diversas aplicações, como a criação de mapas de uso do solo (para planejamento urbano), análise e estruturação de sistemas de transporte (rotas de tráfego e respostas a emergências), análise geodemográfica (locais de serviços), mapeamento de redes de infraestrutura (gás, água, eletricidade) e diversas áreas de gestão de recursos naturais [63][64][65].

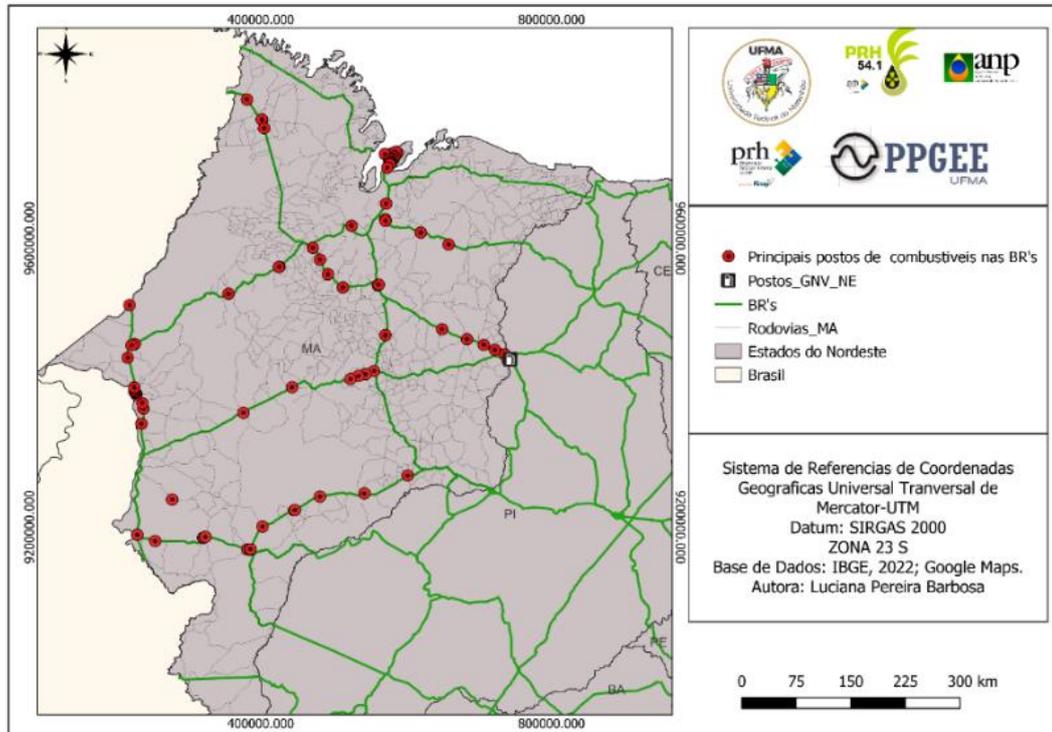
As revoluções em andamento na computação de alto desempenho e na análise de dados espaciais, combinadas com o contínuo refinamento dos procedimentos de solução de otimização, estão mudando fundamentalmente o cenário para a realização de otimização espacial no contexto de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

As rodovias presentes no estado, possuem um grande volume de postos combustíveis, sendo que aqueles dentro das BRs é inferido aqui, que estes são passíveis de adaptação para atender a futura demanda de GNV. Ou ainda, estes pontos estratégicos podem apresentar características que favoreçam a construção dos postos.

Neste trabalho, a construção do banco de dados para análise de rede teve início com o

mapeamento dos postos de combustível dentro dos limites do estado Figura 12.

Figura 12: Postos mapeados.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Com isso, usando as bases de dados geográficos existentes foi feita uma visualização espacial do Maranhão e inserindo os dados referentes às rodovias para melhor entendimento da infraestrutura rodoviária. A estrutura desses dados pode ser vista no Anexo I desta dissertação, contendo todos os pontos, nome do posto e as coordenadas, latitude e longitude referente aos pontos. Observa-se que os pontos analisados são distribuídos em todo o território maranhense.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Algoritmo genético e obtenção de pontos ótimos

Do ponto de vista da otimização, uma das principais vantagens das técnicas de computação evolutiva, como os Algoritmos Genéticos (AGs), é que estas não impõem muitos requisitos matemáticos sobre o problema a ser otimizado. Essas abordagens se baseiam no princípio darwiniano da seleção natural e reprodução genética [66], que funcionam através de um processo

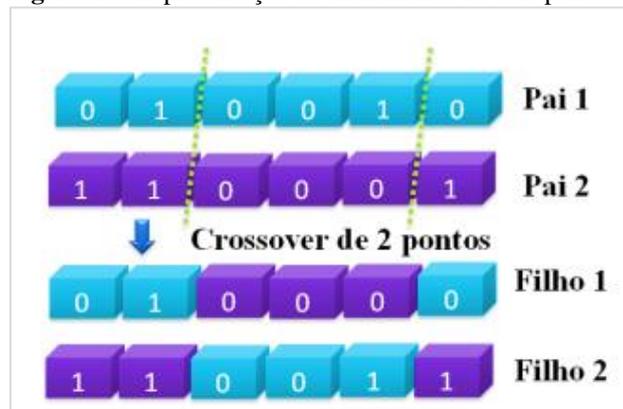
iterativo que simula a seleção natural, recombinação genética e mutação para encontrar soluções aproximadas para problemas complexos [67].

Em um AG, uma população de soluções candidatas é representada como "indivíduos" ou "cromossomos", onde cada indivíduo é avaliado de acordo com sua adequação ao problema (*fitness*). Os indivíduos mais aptos têm uma maior probabilidade de serem selecionados para a reprodução, produzindo descendentes que herdam características vantajosas dos pais. Ao longo das gerações, os AGs tendem a convergir para soluções melhores à medida que exploram o espaço de busca. Esses algoritmos são amplamente utilizados em problemas de otimização onde outras técnicas podem ser ineficazes devido à complexidade ou falta de informação sobre o problema.

Desta forma, dada a escassez de informação no problema em questão, foi aplicado um algoritmo genético para otimização espacial e, através desta, encontrar pontos ótimos ou quase ótimo para a alocação dos postos de GNV no território maranhense. Na otimização espacial, o objetivo é encontrar a configuração ideal de recursos ou atributos em um determinado espaço geográfico, levando em consideração diferentes critérios e restrições, como custo, distância, interações entre elementos, população, demanda, entre outros [68].

Existem três operadores genéticos o de seleção, cruzamento e mutação, mas aqui optou-se pelo de cruzamento. Esse operador combina informações genéticas de dois ou mais indivíduos para criar novos indivíduos. Nessa abordagem, existem diferentes métodos de *crossover*, como o cruzamento de um ponto, cruzamento de dois pontos, cruzamento uniforme, entre outros. O que está sendo empregado nessa abordagem é cruzamento de dois pontos, que pode ser representado como na Figura 13.

Figura 13: Representação do cruzamento de dois pontos.



Fonte: CAO, 2020[68].

Nesse sentido, seleciona dois indivíduos como “pais” e a partir deste se tem uma nova geração. O modelo de otimização dos pontos foi construído usando arquivos do tipo pontos e polígonos no formato .shp e linguagem de programação *python*, executado no *Google Colaboratory*. Os parâmetros do algoritmo estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros utilizados no GA.

Parâmetros	
População	90 postos
Função fitness	$aptidão(ponto) = \sum_{i=1}^n d(ponto, municipio)$
distancia	$distancia(P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$

Fonte: Elaboração própria, 2024.

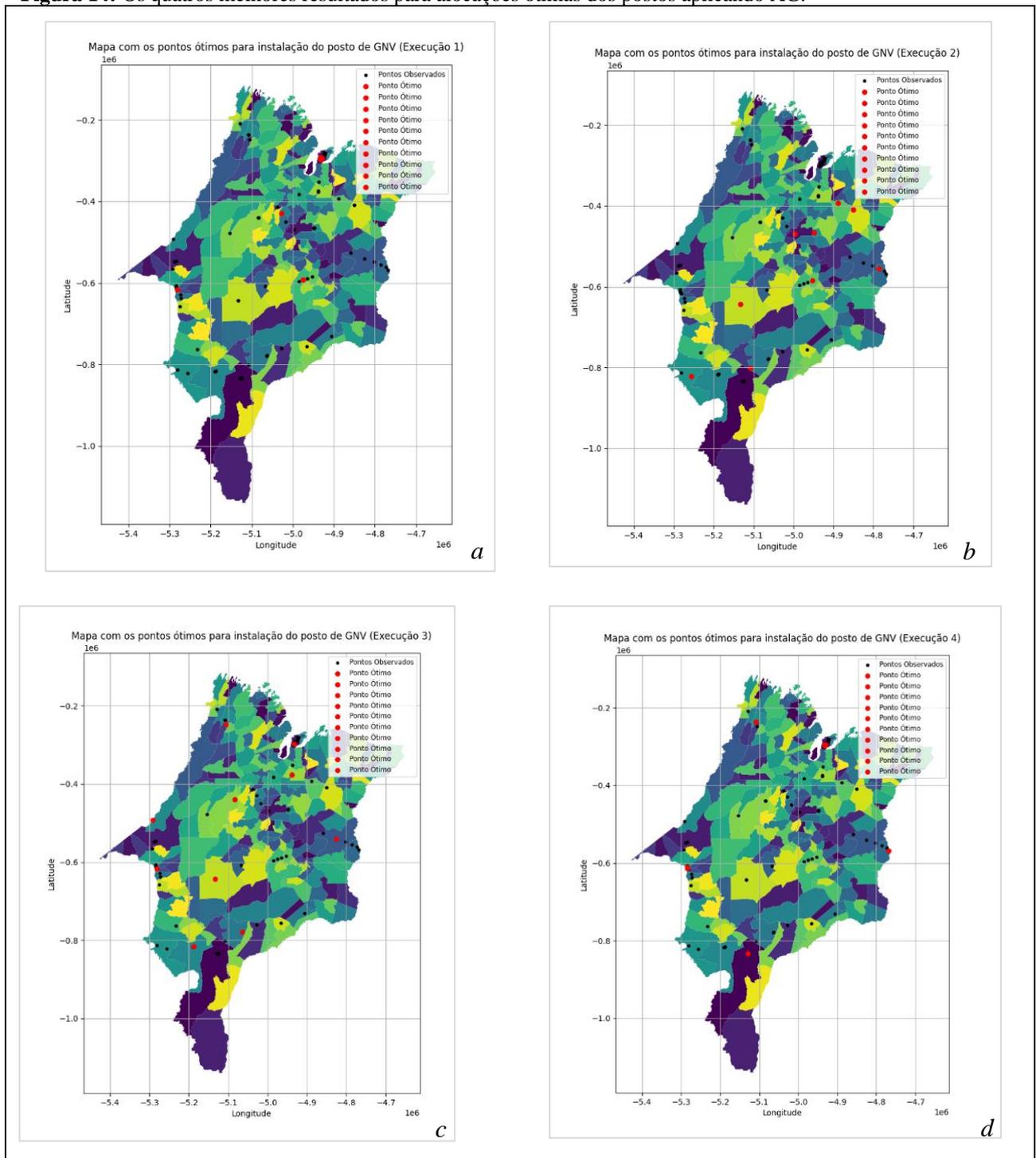
Onde: $aptidão(ponto)$ é a aptidão do ponto de localização do posto de GNV. n é o número de municípios na área de interesse e $d(ponto, municipio_i)$ é a distância entre o ponto de localização do posto de GNV e o centroide do município.

A função de aptidão calcula a soma das distâncias entre o ponto de localização do posto de GNV e os centroides de todos os municípios na área de interesse. Quanto menor essa soma, melhor é considerada a solução, indicando que os postos estão bem distribuídos e próximos aos centros populacionais mais desenvolvidos. Enquanto a função distância é responsável por calcular a distância euclidiana entre dois pontos no plano cartesiano. Logo, essa função é utilizada para calcular a distância entre o ponto de localização do posto de GNV e o centroide de cada município.

Os sistemas de referência de coordenadas geográficas são sistemas utilizados para descrever a posição de pontos ou lugares na superfície terrestre de forma precisa e padronizada. Estes fornecem um método de localização global que permite que qualquer lugar na Terra seja identificado de maneira única. Desta forma, dados de entrada referente aos pontos coletados são as latitudes e longitude dos pontos dos postos coletados, o Sistema de Referência de Coordenadas Geográfica utilizado foi o SIRGAS-2000, que é o Datum de referência utilizado no Brasil.

Dada a escassez de dados sobre o problema, as premissas adotadas foram encontrar os melhores pontos, dentre os postos mapeados, estabelecendo uma distância de 300 km e priorizando os municípios com uma população maior que 70 mil habitantes. Além disso, em uma abordagem tímida, foi determinado uma quantidade de 10/91 postos. Dentro do esquema de execução foi selecionada as 4 melhores configurações de 5, como mostrado na Figura 14.

Figura 14: Os quatro melhores resultados para alocações ótimas dos postos aplicando AG.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Conforme visto na figura o algoritmo apresentou configurações distintas a cada execução, mas resultou em configurações que permitisse uma rede de postos GNV distribuídos em todo o estado, apesar de que configurações como a apresentado na Figura 14 *a* ofereceu uma solução alocando quase todo os pontos na capital. Na Figura 14 *b*, os pontos poderiam fornecer GNV para

regiões de importante valor econômico dentro do estado do Maranhão, como Balsas, Carolina e Caxias, mas não houve proposta para Imperatriz, Açailândia, nem São Luís.

Na Figura 14 *c*, a distribuição foi mais abrangente, permitindo a alocação de postos nos principais centros produtivos do estado, se mostrando uma configuração interessante para uma rede de fornecimento ininterrupto de GNV. Na Figura 14 *d* a configuração pode limitar o acesso do GNV, dada a distância entre os pontos. No Anexo II deste documento constam as coordenadas referente aos pontos de resultado de cada execução.

4.2. Modelagem da rede e execução do Algoritmo de Dijkstra

Na modelagem da rede, foi abordado uma analogia da Teoria dos grafos construindo uma rede dentro do QGIS, onde os pontos coletados representam os vértices e as rodovias as arestas do grafo. As rodovias que cortam o estado possuem características distintas, sendo que, dependendo da qualidade, isso pode impactar diretamente nos custos associados a essas rotas e na alocação de recursos em determinadas regiões. Desta forma, os tipos são classificados como:

- Pavimentada: cobertas por asfalto;
- Revestimento natural: revestimento natural compactado;
- Revestimento primário solto: revestimento natural solto.

A distância em quilômetros se refere à medida linear entre dois pontos na rede. É uma medida direta da extensão física do caminho, geralmente calculada com base nas coordenadas geográficas dos pontos ou na geometria das linhas que compõem a rede. Essa medida não considera outros fatores, como tempo de viagem, dificuldade do terreno ou custos associados.

Em sistemas logístico, distâncias de um ponto a outro dentro de uma rede podem se apresentar como um dos fatores de maior impacto, mas, parâmetros como qualidade viária, curvas e declividade, também são variáveis importantes para análise dos custos e dos riscos da rede. E como no contexto maranhense a infraestrutura do modal rodoviário é carente, além de identificar os pontos ótimos para os postos, buscou-se também obter infraestrutura de rede entre eles usando a malha rodoviária. Apresentando uma configuração de postos de GNV no Maranhão.

No SIG as restrições são feitas por seleção, onde foi considerado todas as vias (pavimentada, com revestimento natural e revestimento natural solto), ambas as direções, uma velocidade média

de 60 km/h e zero tolerância para a topologia. A construção da função custo genérica poderá ser empregada após a obtenção dos dados, considerando a distância percorrida multiplicando pelo somatório dos demais custos, incluindo os da rede, como dado pela equação:

$$\sum_{i,j=1}^n d_{ij} * \sum_{i,j=1}^n c_{ij}$$

Onde,

d_{ij} é a distância entre o nó i e j ;

c_{ij} é o custo da rede, e é uma maneira de quantificar o esforço ou dificuldade de viajar de um ponto a outro, levando em conta fatores adicionais. Esses fatores podem incluir restrições de velocidade, tipos de terreno, condições da estrada, custos associados (por exemplo, pedágios), entre outros.

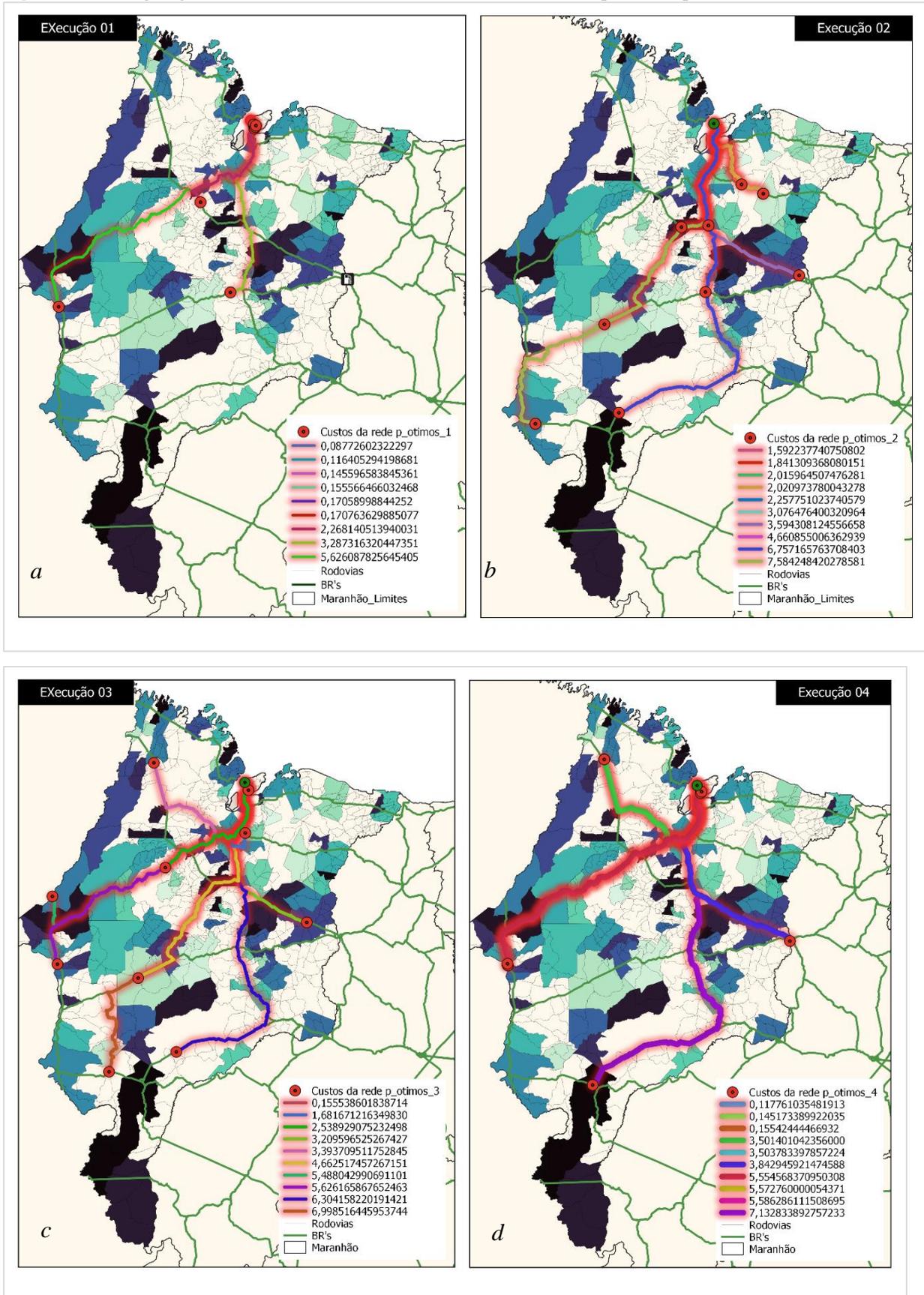
Na gestão do crescimento urbano e regional, a otimização espacial pode ser usada para identificar locais adequados para o desenvolvimento residencial, comercial e industrial, levando em consideração fatores como acessibilidade, serviços públicos e sustentabilidade ambiental [69][70]. Encontrar as localizações ótimas para essas infraestruturas, permite que os planejadores minimizem custos, maximizem a eficiência e atendam às necessidades da população.

As redes geradas para os postos nas simulações utilizando Algoritmo de Dijkstra consideram as linhas da base rodoviária como arestas do grafo e os conjuntos de pontos obtidos no algoritmo genético como nós. Esse algoritmo determina a rota mais curta partindo de um único ponto, abrangendo todos os outros nós, criando uma árvore de caminho mínimo com os custos e distâncias correspondentes.

A árvore de caminho mínimo é um conjunto de arestas que conectam todos os vértices do grafo de maneira a minimizar a soma dos custos associados. Essa estrutura forma uma árvore que se estende do nó de origem para todos os outros nós do grafo, garantindo que cada nó seja alcançado pelo caminho mais curto possível.

Essa árvore fornece informações valiosas sobre a conectividade do grafo e identifica a rota mais eficiente para alcançar qualquer nó a partir do nó de origem. Essa rota ótima é útil em várias aplicações, como planejamento de transporte, redes de comunicação, logística, distribuição de recursos e outras áreas. Os custos gerados para cada caminho é uma medida admissional que mostra a dificuldade de percorrer o caminho de acordo com as características das rodovias. resultados podem ser vistos na Figura 15.

Figura 15: Configurações dos corredores com base na malha rodoviária a partir dos pontos ótimos.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Na Figura 15 é possível observar para cada um dos conjuntos de pontos do algoritmo genético as redes de caminho mínimo alcançada, o algoritmo de Dijkstra prioriza a distâncias para escolha dos caminhos, o que levou a resultados de rede com trechos em diferentes classificações, pavimentada, revestimento natural/primário solto. Essa informação pode ser empregada como critério de decisão para estratégias logísticas, visto que a infraestrutura pode impactar nos custos e segurança no fornecimento dos produtos. Desta forma essas informações podem contribuir para a estratégia da adoção do GNV no Maranhão enquanto alternativa a escassez de malha de gasodutos.

Em geral, gasodutos são empreendimentos de alto custo e com grandes prazos de implantação, frequentemente sujeitos a atrasos devido às várias licenças e autorizações necessárias para sua construção e operação. Essas dificuldades de construção também valem para ferrovias e rodovias, porém essas podem ser facilitadas por serem infraestruturas com interesses mais abrangentes e consideradas mais essenciais.

Desta forma, o Brasil precisa aproveitar essa oportunidade única com as diversas perspectivas de crescimento na oferta de gás natural, seja GNL ou GNC, a fim de promover projetos que facilitem a expansão do acesso ao gás natural por todo o país, resultando na universalização dos serviços de distribuição de gás. Para tanto, é essencial realizar investimentos significativos em infraestrutura, instalações de processamento, redes de gasodutos para transporte e outras estruturas que permitam que o gás proveniente do esperado aumento na produção tanto *offshore* como *onshore*, seja disponibilizado a um número maior de consumidores em todo o território nacional, e não apenas nas áreas costeiras.

Na literatura analisada, foi observado que, quando se trata de custos para utilização de gás natural, estes se limitam principalmente aos financeiros como preço do combustível, custos de adaptação dos veículos, manutenção e certificação [58][70]. Mas quando se fala de estudos de distribuição, existe uma carência, principalmente quando se considera uma economia de dimensões continentais, como é o caso do Brasil.

Alguns estudos encontrados na literatura brasileira se concentram nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. A pesquisa de Galbieri et al. [71] apresentou o gás natural como uma nova estratégia de mitigação de emissões GEE. Em Machado et al. [70] foi trabalhada uma análise política e econômica do uso do gás natural. Pfoser et al. [24] em sua pesquisa avaliou a aceitação do GNL como combustível. Os resultados do modelo de equações estruturais sugeriram que a acessibilidade, atitude, usabilidade e utilidade influenciam diretamente a aceitação do GNL.

Mouette et *al.* [58] avaliou os custos e emissões de um Corredor Azul na realidade brasileira. Os resultados mostram que o GNL é uma escolha de combustível acessível quando comparado ao diesel [59].

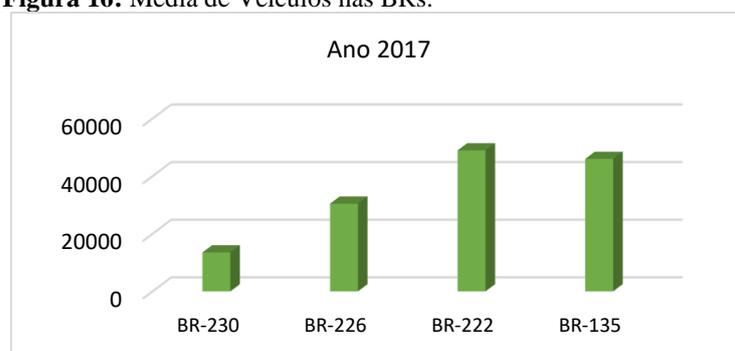
Diante disso a pesquisa no estado do Maranhão oferece *insights* para o horizonte de desenvolvimento tanto da infraestrutura de GNV como uma perspectiva no aumento da demanda de gás natural no estado.

O Maranhão é um estado com alto potencial de oferta de gás natural, mas o aumento da produção depende também da existência de demanda. Em termos industriais, empresas como Vale, Alumar e Suzano são potenciais consumidoras de GN no estado, para cumprir os compromissos internos de suas políticas ambientais. Entretanto, outros mercados devem ser explorados, como tem sido apresentado neste trabalho.

Em um estado de grandes extensões e com uma região portuária, ao longo do ano, o fluxo de veículos pesados é de números expressivos, sendo estas cargas vindas principalmente das regiões produtoras de grãos, como Imperatriz, Açailândia, Balsas, Tasso Fragoso e outras. Por estas razões, a maior parte destes veículos cortam praticamente todo o estado até chegar ao destino, seja ele o porto do Itaqui, ou para os demais estados. Sendo necessário uma pesquisa junto as empresas de transporte sobre a substituição de combustível destes veículos ou aquisição de caminhões a GNV.

Veículos pesados, podem ser contabilizados neste grupo aqueles de transporte de passageiros e de transporte de cargas, como os caminhões. Sendo que, a adoção do GNV para estes veículos no Maranhão é a estratégia mais adequada, dadas as características de desenvolvimento regional. Nos levantamentos disponíveis pela Conselho Nacional de Transporte-CNT [12], os fluxos de veículos nas BRs que cortam o estado são mostrados na Figura 16.

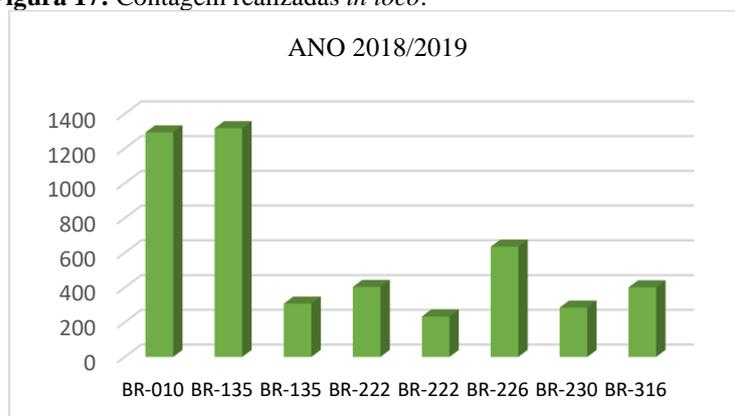
Figura 16: Média de Veículos nas BRs.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Este levantamento mostra dados referentes às classes: Veículos Leves, Motos, Ônibus, Caminhões Leves, Truck, Semirreboques, Semirreboques Especiais, Reboques. Conforme Figura 16 é possível inferir que na BR-222 e 135, apresentam fluxos maiores. Nos anos de 2018/2019, foi realizado uma contagem de caminhões e ônibus e foi observado os fluxos distribuídos conforme a Figura 17 [4], sendo que nas BR-135 e BR-222 essa contagem foi realizada em dois pontos. E conforme visto a contagem local, embora mais restrita, mostra que o fluxo na BR-135 reflete claramente os dados fornecidos pelo CNT.

Figura 17: Contagem realizadas *in loco*.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Como um problema prático e complexo, esses sistemas de alocação espacial de recursos são de natureza dinâmica, envolvendo diversos elementos interagindo entre si e influenciados por efeitos de natureza aleatória. Nesse sentido, diferentes arquiteturas podem ser contempladas e exploradas, mesmo com as restrições existentes. A identificação da infraestrutura existente de gás natural no Maranhão foi parte crucial para a compreensão do sistema de distribuição de gás, mostrando que a distribuição por outros modais, além dos gasodutos, pode oferecer um caminho mais rápido para aumentar o consumo de GN no estado como aqui apresentado.

De acordo com Akay et al. [73] e Moraes [51], a análise em rede emerge como uma ferramenta de grande potencial na solução de questões relacionadas ao transporte e ao planejamento de rotas. Sendo que a caracterização das geometrias verticais e horizontais podem, juntamente a outros fatores, oferecer uma classificação da infraestrutura analisada. Essa importância está ligada a fatores que afetam a eficiência e a segurança do transporte [74]. O desenvolvimento de um estudo de demanda para o GN no contexto estadual deve considerar todas as cadeias de desenvolvimento do estado nas quais o energético poderá ser usado, devendo ser aplicado novos estudos.

A demanda de combustíveis no estado poderá ser expressiva se considerarmos um avanço gradativo da frota que circula no estado na adoção do GNV. Dessa forma, as estratégias de distribuição dos postos de GNV para um atendimento amplo dos veículos pesados que circulam o estado podem considerar fatores como população, infraestrutura, presença de indústria etc. A população, devido a pressuposição de que estas são maiores em regiões com maior potencial de desenvolvimento, foi empregada no algoritmo genético como função de penalização, sendo que a escolha deveria ser para os pontos próximos dos municípios com população acima de 70 mil habitantes.

O algoritmo genético como ferramenta aplicado à otimização geoespacial ofereceu configurações para a possível alocação de postos Figura 15, sendo que se delimitou a escolha de 10 pontos ótimos dentro do espaço de busca e 150 gerações. O AG de cruzamento de dois pontos corte foi escolhido devido a limitação de dados existentes. Este algoritmo é rápido, simples e oferece resultado relativamente satisfatórios quando aplicados ao problema.

Dentro da abordagem do uso de algoritmo com auxílio de sistema SIG, [39] apresentou uma comparação entre o uso do algoritmo de Dijkstra e uma abordagem metaheurística do algoritmo genético Colônia de Formiga (*Ant Colony Optimization-ACO*), na pesquisa onde o objetivo era obter rotas para minerodutos que oferecessem o menor custo, os resultados mostram que o algoritmo de Dijkstra ofereceu caminhos mais ideais. Na pesquisa, a base de dados usada foi Modelo Digital de Elevação (MDE), na qual os autores avaliaram as componentes horizontais e verticais das rotas inferindo, que a geometria do terreno agrega um custo a rede.

Em Neto et al. [75] os autores usaram o algoritmo de Dijkstra para roteirização do transporte de resíduos urbanos no Software *TranCAD*, resultou em rotas de menores custos, mas os softwares apresentaram restrições para construção do modelo, dado o número de variáveis. Ayala Filho [50] pesquisou como o uso de plataformas livres de SIG podem ser ferramentas de baixo custo para apoio a decisões logísticas. Na pesquisa foram utilizados dados de Origem-Destino (O/D) obtidos nas bases do *GRASS GIS* e as análises foram feitas no *GeoData*. Chaves [76] estimou a matriz O/D usando dados de telefonia na região metropolitana do Rio de Janeiro como metodologia para o planejamento de transporte, mostrando a aplicabilidade dos dados georreferenciados nesse tipo de pesquisa.

Esse tipo de dados, de origem e destino referem-se às informações sobre os locais de partida e chegada em um sistema de transporte ou rede. Esses dados são essenciais para calcular rotas eficientes e planejar o fluxo de bens, serviços ou pessoas entre diferentes pontos. Podendo

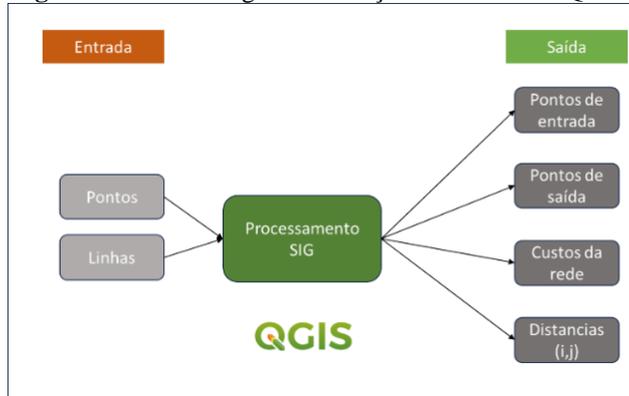
ser uma abordagem promissora para melhoria em problemas de alocação para pesquisas futuras. Já os custos de rede, representam os valores associados à utilização da infraestrutura, como estradas, ferrovias, linhas de comunicação, entre outros.

Quando se trata de análises logísticas, a disponibilidade e aquisição de dados é limitada e complexa, exigindo a elaboração de metodologias para apoiar as pesquisas. Na literatura os algoritmos modelados em grafos são amplamente empregados para análise de rede e problemas de roteirização, entretanto não se encontrou uma abordagem integrada, do algoritmo genético com QGIS, como a apresentada neste trabalho para fins de comparação.

A atratividade do uso de SIGs em pesquisa de transporte, está ligada à relativa facilidade de se obter esses dados de uma forma não disruptiva e aos custos mais baixos, em comparação com os métodos tradicionais [46]. Além também, de oferecer a visualização dos resultados em mapas e a análise da evolução da aptidão ao longo das gerações, fornecendo *insights* valiosos sobre o comportamento do algoritmo e a qualidade das soluções encontradas.

A obtenção dos dados em um SIG é feita de acordo com o diagrama da Figura 18 a seguir.

Figura 18: Metodologia de obtenção dos dados no QGIS.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

E no neste caso específico, o sistema além de proporcionar a visualização dos resultados, permite a extração de dados que poderão ser utilizados posteriormente. A inexistência de uma infraestrutura de gás natural, resultou na elaboração de um modelo que oferece pontos ótimos/quase ótimos para uma implementação futura de rede de postos e que poderá se tornar um futuro corredor de GNV (Corredores Azuis) no estado do Maranhão (ver Figura 15). Esse incremento à demanda de GN no Maranhão poderá direcionar um maior esforço à formação de uma cadeia de alto valor agregado para este energético.

4.3. Análise das distâncias e custos associados

Especialmente no Brasil, a obtenção de dados para o desenvolvimento de trabalhos logísticos é um fator que pode limitar uma pesquisa, sendo que há uma carência de dados, principalmente dados locais. No entanto, no estudo aqui apresentado, foi possível reunir dados como pontos otimizados com base na população, custos de rede, distâncias e coordenadas usando um software gratuito e código aberto em linguagem *python*. Apesar de que, a maioria das pesquisas presente na literatura que tratam de problemas de roteirização fazem usos de software pagos próprios.

A infraestrutura de transporte e a topografia do terreno podem influenciar significativamente os custos locacionais de um determinado empreendimento ou atividade. Por exemplo, rotas mais curtas podem exigir passagem por terrenos montanhosos ou estradas com pedágios, o que aumentaria os custos, enquanto rotas mais longas podem ser mais planas e acessíveis, resultando em custos mais baixos. Além disso, algumas rotas podem ser mais eficientes em termos de tempo e recursos, mesmo que sejam mais longas em distância. Por exemplo, uma rota mais longa pode permitir o uso de estradas com melhor qualidade, o que reduziria os custos de manutenção dos veículos e o tempo de viagem, resultando em custos totais mais baixos.

Os dados sobre a geometria das rodovias são regularmente atualizados para refletir mudanças nas condições das estradas, como novas construções, reparos, alterações de sinalização e modificações na infraestrutura viária (CNT,2023). Isso garante que as informações utilizadas para planejar rotas e calcular custos sejam precisas e atualizadas, apesar das possíveis distorções. Por esta razão, o uso destes dados é relevante em pesquisas de otimização espacial.

No estudo de Klein [77] e Zhang et al. [45] foi verificada e analisada a influência das características geométricas de trechos de rodovias no custo total dos usuários, os resultados mostraram que a geometria pode ter grande influência nos custos. Em Gonçalves et al. [44] foi analisada a diferença entre as distâncias Euclidianas e a distância Rodoviária Real no Brasil, desenvolvendo um fator de correção para ajustes da rede. Visto que segundo do CNT existem distorções de geometrias em parte da malha rodoviária [28], trabalhos nesse sentido podem contribuir para melhoria dos dados de infraestrutura regionais.

E ainda, em Nobili et al. [78] os autores analisaram efeitos das características geométricas

e operacionais das estradas. No estudo, os autores verificaram a influência do desenho geométrico horizontal e da operação do veículo no consumo de combustível e nas emissões de gases produzidos pelos automóveis de passageiros. Os resultados mostraram que a taxa de mudança de curvatura e a velocidade média têm um impacto significativo no consumo médio de combustível e nas emissões de gases.

A partir da simulação de Dijkstra em ambiente GIS para geração das redes, foi possível a extração de dados que podem ser empregados em novas análises como já dito, desta forma utilizando as configurações ótimas oferecidas a partir do GA, as distâncias (km) e os custos (admissional) referentes a cada um dos pontos saindo de São Luís, os dados podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3: Distancias (km) e custos para cada configuração.

Pontos	Ponto ótimos_01		Ponto ótimos_02		Ponto ótimos_03		Ponto ótimos_04	
	Distancias	Custo	Distancias	Custo	Distancias	Custo	Distancias	Custo
1	12.958	0,116405	342.472	3,076476	357.291	3,209597	794.023	7,132834
2	18.990	0,17059	518.844	4,660855	701.776	6,304158	13.109	0,117761
3	365.942	3,287316	177.247	1,592238	779.071	6,998516	427.795	3,842946
4	9.766	0,087726	224.416	2,015965	519.029	4,662517	620.357	5,57276
5	17.318	0,155566	204.974	1,841309	187.203	1,681671	390.039	3,503783
6	626.293	5,626088	224.974	2,020974	17.314	0,155539	621.863	5,586286
7	16.208	0,145597	251.332	2,257751	610.926	5,488043	389.774	3,501401
8	252.488	2,268141	844.275	7,584248	626.302	5,626166	618.332	5,554568
9	16.208	0,145597	400.117	3,594308	377.786	3,39371	17.302	0,155424
10	19.009	0,170764	752.204	6,757166	282.632	2,538929	16.161	0,145173

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Observa-se que os dados da rede obtidos são variados, entretanto a distância média entre os pontos é de 341.603 km. Cabe lembrar aqui que, a distância euclidiana do GA e a distância da rede são distintas. Visto que enquanto a distância euclidiana no mapa é uma medida direta entre dois pontos, ignorando obstáculos e características geográficas, a distância calculada pelo algoritmo de Dijkstra considera a topologia do terreno e a rede de estradas, fornecendo uma estimativa mais precisa da distância real percorrida.

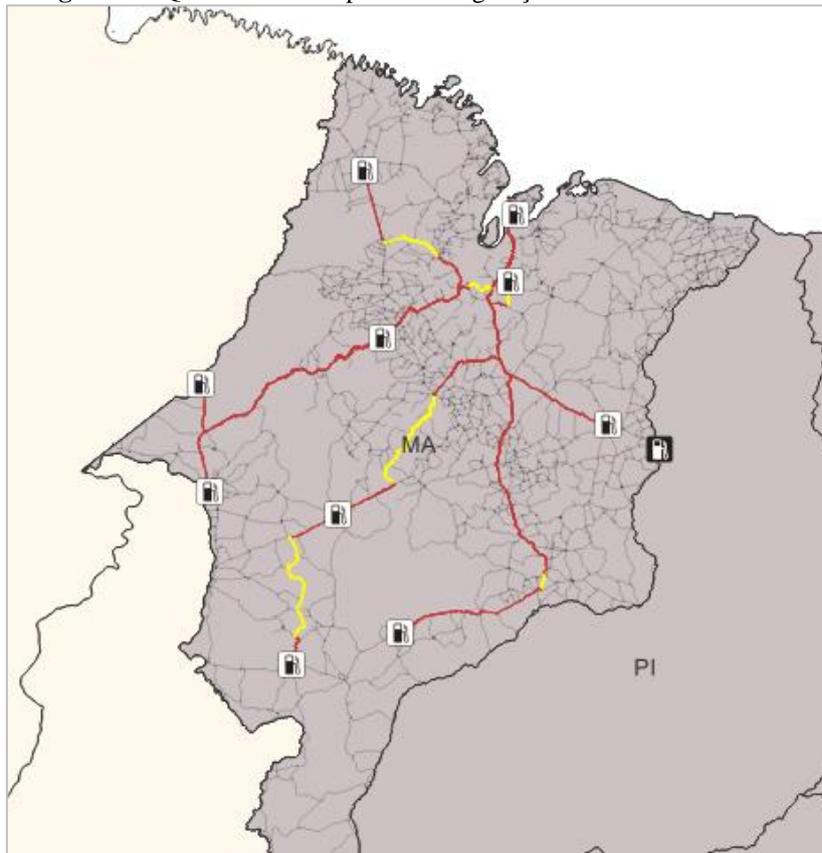
Em termos de custos viários, os algoritmos em ambiente GIS para obtenção de um caminho mínimo considera as distancias, visto que o objetivo é o menor caminho. Todavia, em função disso, de acordo com a geometria das rodovias o percurso gera um custo, é mostrado na Figura 19 em vermelho os trechos pavimentados e em amarelo de revestimento primário solto.

Essa constatação pode ser usada em estudos de tempo de entrega por exemplo e para o planejamento de rotas eficientes já que é possível visualizar aqueles trechos com uma baixa

qualidade de infraestrutura e buscar novas alternativas. Desta forma as informações apresentadas na Figura 19 para a configuração 3 mostra trechos que necessitam de uma atenção especial quanto ao tempo de entrega e segurança da rota.

Os maiores trechos, em amarelo, são MA-245, MA-334 e MA-114 de acordo com a base de dados esses trechos estão classificados como revestimento primário solto, ou seja, são trechos não pavimentados.

Figura 19: Qualidade viária para a configuração 3.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

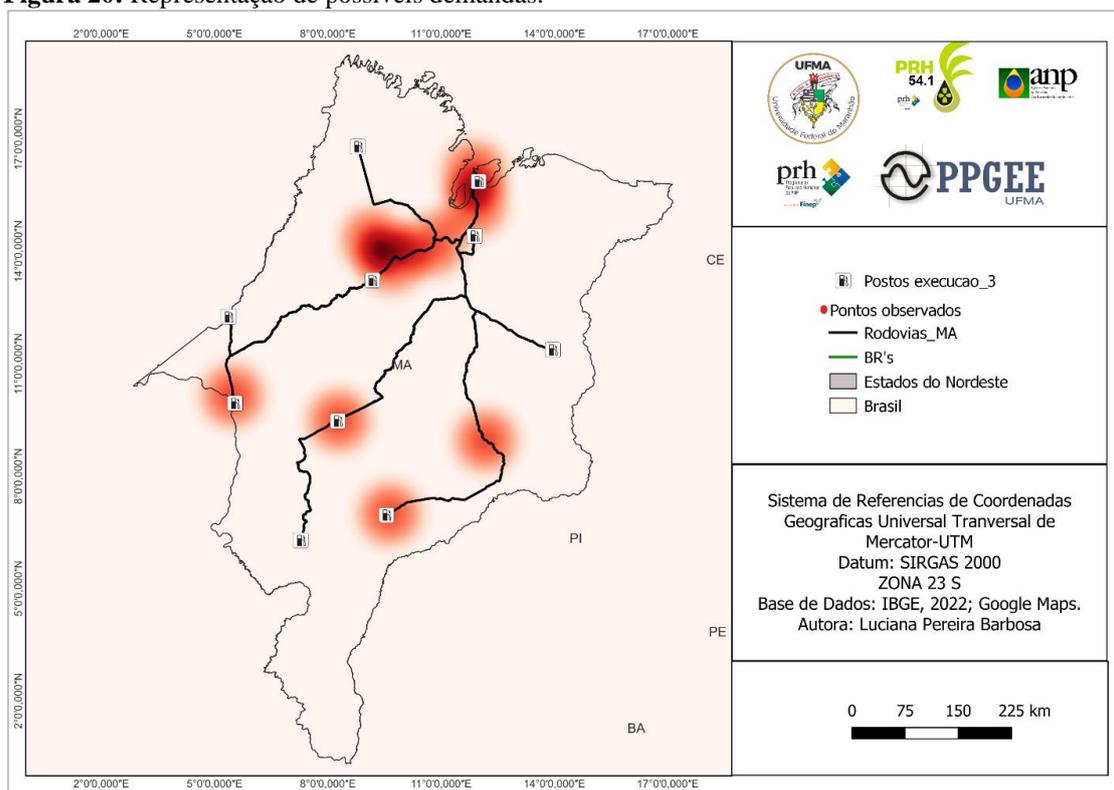
Dentre as 150 gerações foi escolhido as quatro melhores soluções. A análise de rede para os quatro arranjos de pontos analisados, devido à natureza da localização dos pontos por um único município, fez com que os custos da configuração da Ponto ótimos_01 fosse relativamente menor, já que 5/10 pontos foram alocados em na capital, São Luís (Figura 15). Os Ponto ótimos_02 se concentraram mais a leste, deixando municípios com potencial para o GNV, como Imperatriz e Açailândia, de fora da rede.

O arranjo do Ponto ótimos_03 teve tanto as distâncias como os custos mais elevados, no

entanto essa configuração apresentou uma cobertura mais completa para alocação de postos por estarem distribuídos nas regiões mais desenvolvidas do estado de onde a demanda pode surgir mais rapidamente, o que poderia configurar um arranjo favorável para o fornecimento do GNV ininterrupto no estado. Já o Ponto ótimos_04, descartou municípios como Imperatriz, Açailândia, e Grajaú que é um polo de produção de gesso.

Além disso, configuração 3, também foi que atendeu a maior parte dos pontos onde foram contabilizados os fluxos de veículos pesados dentro das rodovias do estado, sendo que apenas 3 dos pontos para a alocação dos postos estavam fora da rede. Esses fluxos, foram comparados com contagem de anos anteriores a partir dos dados do CNT. Estes resultados podem ser vistos na Figura 20 com o mapa de calor.

Figura 20: Representação de possíveis demandas.

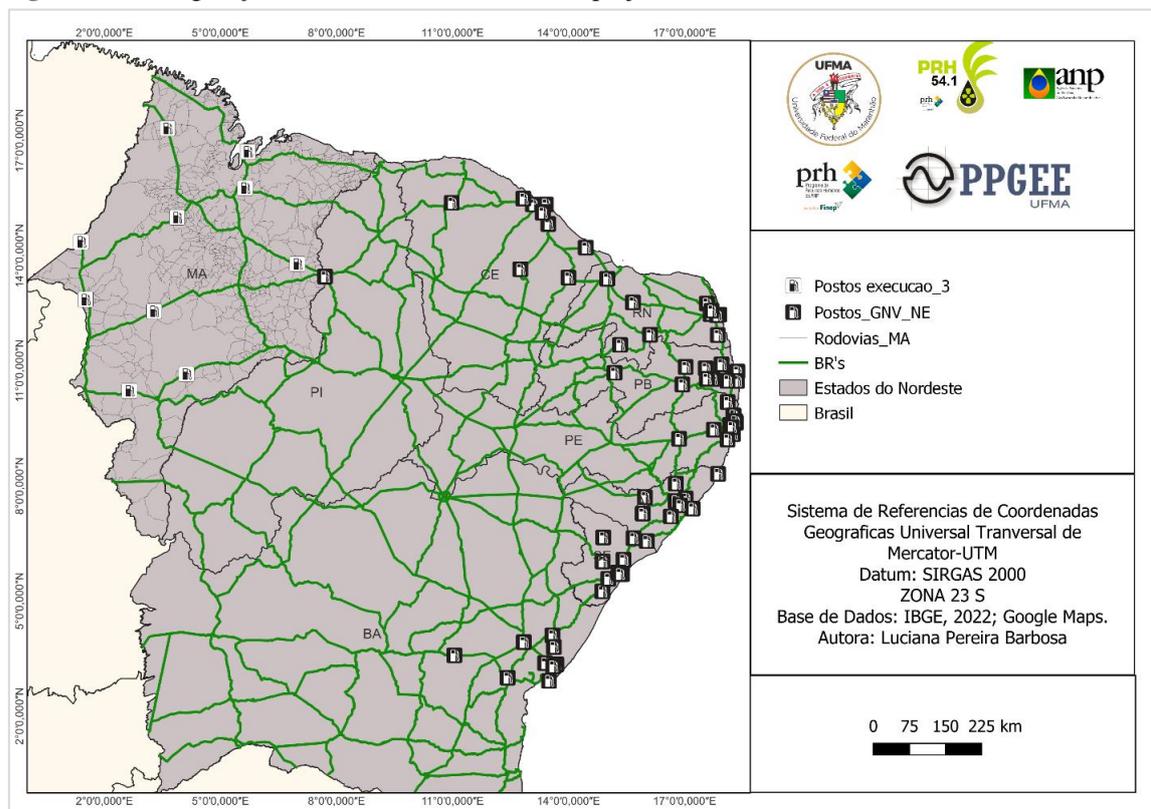


Fonte: Elaboração própria, 2024.

O Maranhão possui grandes extensões e com regiões com características de desenvolvimento local, distintas. Mas o desenvolvimento é resultado também da qualidade dos sistemas logísticos, sendo que o fluxo de mercadoria é constante. O fornecimento do GNV pode elevar os benefícios econômicos, ambientais e sociais. Visto que o GNV se apresenta como um combustível de baixo custo e baixo teor de emissões de poluentes.

A configuração resultante de redes de caminho mínimo por si sós, já apresentam como importante configurações para a distribuição do GNV dentro do estado no atendimento dessa possível demanda. E por conseguinte, visando complementar a rede de postos de GNV no Nordeste uma nova configuração é proposta com os pontos da execução 3, apresentando uma rede de GNV no estado do Maranhão em um cenário de adoção otimista do GN para GNV como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21: Configuração da inclusão do Maranhão no projeto de Corredores Azuis.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

A demanda de gás natural no estado do Maranhão está intrinsecamente ligada às necessidades e expectativas dos potenciais consumidores, especialmente em setores-chave como ferro gusa, papel e celulose, gesso e expansão agrícola. Compreender essas demandas e as características do mercado é essencial para a alocação eficiente de recursos e para garantir a satisfação dos clientes.

No entanto, o avanço do GNV no estado enfrenta várias restrições, incluindo limitações de recursos, como veículos, mão de obra e infraestrutura necessária para a implantação. Questões regulatórias também desempenham um papel crucial.

Apesar desses desafios, os benefícios ambientais e econômicos associados ao uso de GNV no setor de transporte oferecem uma oportunidade promissora. Um cenário otimista pode resultar em uma mudança significativa no consumo de combustível usado pelos veículos que transitam o estado do Maranhão, proporcionando uma alternativa mais limpa e sustentável.

5 CONCLUSÃO

O gás natural possui grandes vantagens que favorecem seu papel protagonista no processo de transformação energética dos setores. No entanto, dada a carência de infraestrutura, estratégias de interiorização deste recurso são fundamentais para gerar demandas onde não há gasodutos.

Em acompanhamento das reformas estruturais das sociedades, a demanda energética crescerá em todos os setores da economia. Sendo o fornecimento desse recurso um componente importante para a segurança energética. O setor de transporte, dentro do setor energético, é um dos maiores consumidores e também um dos mais discutidos em termos de transformação de combustível em função das altas emissões de poluentes.

Apesar do Maranhão ser um dos poucos estados com produção de gás natural *onshore*, o que é produzido atualmente é usado para suprir a demanda do complexo termelétrico do Parnaíba, sendo necessário aumento da produção/importação para suprir eventuais demandas em outros setores, seja o industrial ou de transporte. Estudos para a implantação de GNV tem sido amplamente realizado, principalmente em regiões com disponibilidade de infraestrutura. Todavia em regiões com uma infraestrutura escassa, como no Brasil são quase inexistentes. Sendo o transporte o rodoviário o meio mais adequado para o processo de interiorização do GN através de GNC/GNL.

Neste estudo, a proposta de rede de GNV para o Maranhão ofereceu *insights* importantes como desafios de infraestrutura, regiões de possível demanda e necessidade de oferta de GN para GNV. A abordagem integrada do algoritmo genético e algoritmo de Dijkstra do QGIS, apresentou-se como uma metodologia viável e de baixo custo pelo o uso de softwares livres, e que pode ser aplicada tanto no Maranhão, quanto em outros estados, ou para outros tipos de alocação. Além disso, também mostraram aplicabilidade dos dados georreferenciados, como recursos importantes para os estudos de levantamento de dados regionais para apoio a decisão, favorecendo a criação de banco de dados locais.

Mas, a futura implementação de tal infraestrutura depende da viabilidade dos investimentos, aumento da disponibilidade de GN, aceitação por parte dos potenciais consumidores e uma sinergia com o governo e políticas regionais.

O GN pode corroborar com o desenvolvimento regional, se forem comprovadas as viabilidades econômicas e técnica do GNV do Maranhão. Do lado da demanda, um cenário de implantação dos chamados Corredores Azuis poderia contribuir para o avanço do gás natural no estado, contribuindo para aumento dos pontos de demanda. Além de impactar positivamente na redução de poluentes. E isso gera ganhos ambientais e de saúde para a população Maranhense.

Portanto para esse trabalho, conclui-se que os estudos de demanda podem se beneficiar das análises dos padrões uma vez que se conhece quando e onde o usuário costuma penetrar a rede e dessa forma viabilizaria uma oferta mais assertiva ao sistema. No entanto, estudos mais profundos devem ser realizados para os avanços de estratégias de GNV no Maranhão.

5.1.Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, destaca-se a necessidade de pesquisa sobre a aceitação do GNV pelos consumidores e otimização do tempo de abastecimento. Além disso, sugere-se a aplicação de técnicas avançadas, como aprendizado de máquina, para refinar a alocação de postos de GNV e melhorar a eficiência do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] OLIVEIRA, Jádison Brandão. Análise do novo mercado de gás natural e as perspectivas para a geração termelétrica. 2020.
- [2] SILVA, D. F. A., Honoré, A., Melo, T. M. (2023). Desenvolvimento do mercado de gás natural nos sistemas isolados do Brasil: lições do estado do Amazonas para o Maranhão. Ensaio Energético, 14 de junho, 2023.
- [3] Consulgás. ESTUDO DOS CORREDORES AZUIS – REGIÃO NORDESTE: Infraestrutura de abastecimento para o mercado de veículos pesados, 2022.
- [4] GASMAR. GASMAR e Eneva assinam contrato para distribuição de GNV no Maranhão. Disponível em: <https://www.gasmar.com.br/noticias.php?id=115>. Acesso em janeiro 2024.
- [5] SANTOS, Roberto Amaral de Castro Prado. Veículos GNV, meio ambiente e mercado de combustíveis. POLICY, n. 4, 2020.
- [6] TEIXEIRA, Cássio Adriano Nunes et al. Gás natural: um combustível-chave para uma economia de baixo carbono. 2021.
- [7] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP (2012). Dados Estatísticos. Importação e Exportação (barris). Disponível em <http://www.anp.gov.br> acessado em: agosto de 2023.
- [8] PEREIRA, Aloizio; REIS, Domiciano Eli dos; SANTOS, Lucas Eduardo. A Implementação do Gás Natural Veicular (GNV) em Veículos Pesados. 2021.
- [9] GUTIERREZ, Maria Bernadete Gomes Pereira Sarmiento. O setor de gás natural no Brasil: Uma comparação com os países da OCDE. Texto para Discussão, 2022.
- [10] EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021-ano base 2021. Rio de Janeiro, 2021. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-68/Anuário_2021.pdf.
- [11] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Base de dados Cartográficos. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html>.
- [12] BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Painel CNT do Transporte. Número e data. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/painel-cnt-transporte>. Acesso em: 08 dez 2023.
- [13] DNIT-Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Contagem de Tráfego. 2023. Disponível em: <https://servicos.dnit.gov.br/dadosabertos/dataset/contagem-de-trafego>.
- [14] QGIS DEVELOPMENT TEAM, A. E. et al. QGIS geographic information system. Open source geospatial foundation project, p. 504-507, 2019. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/.
- [15] BRASIL. Lei nº9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 6 ago. 1997. Seção 1, p. 16925.
- [16] LESSA, Raíssa da Silva et al. Arcabouço estratigráfico e possíveis horizontes geradores de hidrocarbonetos em uma seção devoniana da borda sudoeste da Bacia do Parnaíba. 2021.
- [17] Agência Internacional de Energia, energia mundial chave de 2013. Estatísticas (2013). http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013_FINAL_WE_B.pdf.
- [18] MORAIS, José Mauro de. A Nova Lei do Gás e a desconcentração no mercado de gás natural no Brasil. 2021.
- [19] SILVA, D. F. Transição Energética e Exploração de Gás Natural no Maranhão: possibilidades e limites a partir de 2013. 146 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em

- Desenvolvimento Socioeconômico) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.
- [20] ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Bacia do Parnaíba: sumário geológico e setores em oferta. Organização Daniel Brito de Araújo André Lopes Ferreira, Rodada Brasil 15: Concessões de Petróleo e Gás, 2017.
- [21] ENEVA S.A. Nossos negócios. Disponível em: <https://eneva.com.br/nossos-negocios/exploracao-e-producao/>. Acesso, 13 de novembro de 2023.
- [22] DE MIO, E. et al. Melhorias na Modelagem de Sistemas Petrolíferos Atípicos na Bacia do Parnaíba, NE do Brasil. In: 84ª Conferência e Exposição Anual EAGE. Associação Europeia de Geocientistas e Engenheiros, 2023. p. 1-5.
- [23] ENERGIA, FGV. O novo mercado de gás natural: opiniões de especialistas, perspectivas e desafios para o Brasil. ed. Edição Especial-Caderno Opinião, 2019.
- [24] PFOSE, Sarah; SCHAUER, Oliver; COSTA, Yasel. Acceptance of LNG as an alternative fuel: Determinants and policy implications. *Energy Policy*, v. 120, p. 259-267, 2018.
- [25] LIAW, Cylon. Novas fronteiras de expansão para o gás natural: o suprimento em pequena escala através da malha ferroviária brasileira. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [26] YEH, Sonia. An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles. *Energy policy*, v. 35, n. 11, p. 5865-5875, 2007.
- [27] KHAN, Muhammad Imran. Policy options for the sustainable development of natural gas as transportation fuel. *Energy Policy*, v. 110, p. 126-136, 2017.
- [28] DOS SANTOS, Yago Ryan Pinheiro et al. Classificação e diagnóstico do estado de conservação de uma via em pavimentação asfáltica do município de Caruaru, Pernambuco, Brasil. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 17, p. e212101724257-e212101724257, 2021.
- [29] INMETRO: Instaladoras Registradas. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/oficinas/>. 2023. Acesso dezembro 2023.
- [30] OLIVEIRA, Sonia Maria Marques de; GERMANI, Egon; CORREA, Eduardo. Gás natural veicular (GNV) Instituto de Tecnologia do Paraná - TECPAR 16/4/2007.
- [31] FUKUMOTO, Guilherme Yuji; LANGHI, Paula PILOTO. Teoria Dos Grafos Na Tomada De Decisão. *ETIC-ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA-ISSN 21-76-8498*, v. 11, n. 11, 2015.
- [32] JURKIEWICZ, Samuel. Grafos—uma introdução. São Paulo: OBMEP, 2009.
- [33] PIRZADA, Shariefuddin. Uma introdução à teoria dos grafos. *Acta Universitatis Sapientiae*, v. 4, n. 2, pág. 289, 2012.
- [34] NOGUEIRA JÚNIOR, Dárcio Costa. Grafos e problemas de caminhos. 2017.
- [35] PIRZADA, Shariefuddin. Uma introdução à teoria dos grafos. *Acta Universitatis Sapientiae*, v. 4, n. 2, pág. 289, 2012.
- [36] MAGZHAN, Kairanbay; JANI, Hajar Mat. A review and evaluations of shortest path algorithms. *Int. J. Sci. Technol. Res*, v. 2, n. 6, p. 99-104, 2013.
- [37] DE OLIVEIRA, Caroline Maruchi; Kleina, Mariana. Roteirização De Veículos: Aplicação E Comparação Das Heurísticas Método De Varredura E Método Das Economias.
- [38] ERFANI, Seyed Mohammad Hassan et al. A novel approach to find and optimize bin locations and collection routes using a geographic information system. *Waste Management & Research*, v. 35, n. 7, p. 776-785, 2017.
- [39] BAEZA, D., Ihle, C. F., & Ortiz, J. M. (2017). A comparison between ACO and Dijkstra algorithms for optimal ore concentrate pipeline routing. *Journal of Cleaner Production*, 144, 149-160.
- [40] DOS REIS, Gabriela Cacilda Godinho; ALMEIDA, Rodolfo Maduro. Caracterização e análise da malha viária urbana de Santarém/PA utilizando medida de centralidade por intermediação em teoria dos grafos. XXI Encontro Nacional de Modelagem Computacional

- e IX Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais, 2018.
- [41] DE MEDEIROS PEREIRA, Henrique et al. Sistema de suporte à decisão para priorização de investimentos em rodovias utilizando inteligência geográfica. 2018.
- [42] SILVA, Antônio Néelson Rodrigues da; MELO, Jônatas José de Oliveira; BRONDINO, Nair Cristina Margarido. Uma introdução ao planejamento de transportes com sistemas de informação geográfica. 2021.
- [43] HUANG, Pei; SUN, Yongjun. Geographic Information System-Assisted Optimal Design of Renewable-Powered Electric Vehicle Charging Stations in High-Density Cities. In: Future Urban Energy System for Buildings: The Pathway Towards Flexibility, Resilience and Optimization. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. p. 383-403.
- [44] GONÇALVES, Daniel Neves Schmitz et al. Analysis of the difference between the euclidean distance and the actual road distance in Brazil. *Transportation Research Procedia*, v. 3, p. 876-885, 2014.
- [45] ZHANG, Ge et al. Optimal location and size of a grid-independent solar/hydrogen system for rural areas using an efficient heuristic approach. *Renewable Energy*, v. 156, p. 1203-1214, 2020.
- [46] ZAIDAN, Ricardo Tavares. Geoprocessamento conceitos e definições. *Revista de Geografia-PPGEO-UFJF*, v. 7, n. 2, 2017.
- [47] BATISTA, Emerson O. Sistemas de informação. Saraiva Educação SA, 2017.
- [48] DAVIS JR, Clodoveu Augusto. Aumentando a eficiência da solução de problemas de caminho mínimo em sig. Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte, 1997.
- [49] ZHANG, Xiaodong et al. Modeling impacts of highway circular curve elements on heavy-duty diesel trucks' CO2 emissions. *International journal of environmental research and public health*, v. 16, n. 14, p. 2514, 2019.
- [50] AYALA FILHO, German Gregório Monterrosa; LOPES, Simone Becker. Uso de plataformas livres de sistemas de informação geográfica na engenharia de transportes. In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. 2018.
- [51] MORAES, Angelo Casali de. Classificação de estradas florestais e determinação de rota de transporte utilizando Sistema de Informação Geográfica. 2014.
- [52] KHAN, Muhammad Imran; YASMIN, Tabassum; SHAKOOR, Abdul. International experience with compressed natural gas (CNG) as environmental friendly fuel. *Energy Systems*, v. 6, n. 4, p. 507-531, 2015.
- [53] OSORIO-TEJADA, J. L.; LLERA-SASTRESA, E.; SCARPELLINI, S. Liquefied natural gas: Could it be a reliable option for road freight transport in the EU? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 71, p. 785-795, 2017.
- [54] GRAÇA, Pedro Daniel Pereira da. Análise da viabilidade do uso de Gás Natural nos automóveis. 2020. Tese de Doutorado.
- [55] TEIXEIRA, A. C. R. et al. PM emissions from heavy-duty trucks and their impacts on human health. *Atmospheric Environment*, v. 241, p. 117814, 2020.
- [56] DE FIGUEIREDO, Jorge FG et al. Introdução dos Veículos a Gás Natural na frota dos Transportes Colectivos do Barreiro. 2016.
- [57] ZACHARIAS, Luis Guilherme Larizzatti et al. Natural gas as a vehicular fuel in Brazil: Barriers and lessons to learn. *Energy Policy*, v. 167, p. 113056, 2022.
- [58] MOUETTE, Dominique et al. Costs and emissions assessment of a Blue Corridor in a Brazilian reality: The use of liquefied natural gas in the transport sector. *Science of the total environment*, v. 668, p. 1104-1116, 2019.
- [59] LORENZI, Guido; BAPTISTA, Patrícia. Promotion of renewable energy sources in the Portuguese transport sector: A scenario analysis. *Journal of cleaner production*, v. 186, p. 918-932, 2018.

- [60] HAGOS, Dejene Assefa; AHLGREN, Erik O. Well-to-wheel assessment of natural gas vehicles and their fuel supply infrastructures–Perspectives on gas in transport in Denmark. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 65, p. 14-35, 2018.
- [61] NASCIMENTO, Gabriel Araújo do et al. Variabilidade na geração baseada em fontes renováveis: o potencial do Maranhão no fornecimento de flexibilidade ao sistema interligado nacional. 2020.
- [62] GAS, UNECEWPO. NATURAL GAS FOR VEHICLES (NGV). 2012.
- [63] LAI, Xiaorong; SCHONFELD, Paul. Concurrent optimization of rail transit alignments and station locations. *Urban Rail Transit*, v. 2, n. 1, p. 1-15, 2016.
- [64] MENSOUR, O. Nait et al. A geographical information system-based multi-criteria method for the evaluation of solar farms locations: A case study in Souss-Massa area, southern Morocco. *Energy*, v. 182, p. 900-919, 2019.
- [65] SALATA, Ferdinando et al. Effects of local conditions on the multi-variable and multi-objective energy optimization of residential buildings using genetic algorithms. *Applied Energy*, v. 260, p. 114289, 2020.
- [66] MOHAMMED, Mazin Abed et al. Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution. *Journal of computational science*, v. 21, p. 255-262, 2017.
- [67] MUSTAFA, Ahmed et al. Modelling built-up expansion and densification with multinomial logistic regression, cellular automata and genetic algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 67, p. 147-156, 2018.
- [68] CAO, Kai; LI, Wenwen; IGREJA, Ricardo. Big data, otimização espacial e planejamento. *Meio Ambiente e Planejamento B: Análise Urbana e Ciência da Cidade*, v. 6, pág. 941-947, 2020.
- [69] LONGLEY, Paul A. et al. *Ciência e sistemas de informação geográfica*. John Wiley & Filhos, 2015.
- [70] MACHADO, Pedro Gerber et al. Natural gas vehicles in heavy-duty transportation–A political-economic analysis for Brazil. *Case Studies on Transport Policy*, v. 9, n. 1, p. 22-39, 2021.
- [71] GALBIERI, Rodrigo et al. Bus fleet emissions: new strategies for mitigation by adopting natural gas. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 23, p. 1039-1062, 2018.
- [72] HAFEZANIA, Hamed; POURFAYAZ, Fathollah; MALEKI, Akbar. An assessment of Iran's natural gas potential for transition toward low-carbon economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, p. 71-81, 2017.
- [73] AKAY, Abdullah E. et al. A GIS-based decision support system for determining the shortest and safest route to forest fires: a case study in Mediterranean Region of Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, v. 184, p. 1391-1407, 2012.
- [74] SEMEIDA, Ahmed M. Impact of highway geometry and posted speed on operating speed at multi-lane highways in Egypt. *Journal of Advanced Research*, v. 4, n. 6, p. 515-523, 2013.
- [75] NETO, ALBERTO; LIMA, RENATO. Roteirização de veículos de uma rede atacadista com o auxílio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). *Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção*, n. 5, p. 18-39, 2006.
- [76] CHAVES, Júlio César. Estimativa de matrizes de origem-destino a partir de registros de chamadas de telefonia celular. 2018.
- [77] KLEIN, Frederico de Carvalho. Análise da influência de características geométricas de rodovias nos custos dos usuários utilizando o programa HDM-4. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [78] NOBILI, Federica et al. Environmental effects of road geometric and operational features. *Transportation research procedia*, v. 37, p. 385-392, 2019.

6. ANEXO I:

Dados de entrada GA

Ponto	BR	Nome	Cidade	Latitude	Longitude
0		Porto	Sao Luis	2°33'48.7"S	44°21'51.1"W
1	316	Posto Crystal	Caxias	04°45'22.1"S	43°39'13.3"W
10	316	Posto Chicão I	Olho D'água das	4°04'10.0"S	45°04'07.6"W
11	316	Posto BR 316	PIO XII	3°53'09.1"S	45°10'02.9"W
12	316	Auto Posto Gabriel	Bela Vista do Mar	3°44'16.3"S	45°15'21.7"W
13	316	POSTO BRASIL I	Gov.Nunes Freire	2°08'02.2"S	45°53'06.4"W
14	316	Posto Shell	Gov.Nunes Freire	2°07'55.4"S	45°53'07.9"W
15	316	Posto Shell Selec	Gov.Nunes Freire	2°07'47.0"S	45°53'11.3"W
16	316	Posto Do Junco	Junco do Maranhá	1°52'50.1"S	46°04'11.9"W
17	316	Posto I10	Maranhãozinho	2°14'21.0"S	45°51'26.6"W
18	135	Posto Maranhens	Pedreiras	3°11'05.7"S	44°20'54.2"W
19	135	Posto Shell	São Luís	2°33'06.5"S	44°12'39.8"W
2	316	Posto Mais Boa E	Timon	05°04'08.8"S	42°52'35.6"W
20	135	Posto Petrobrás	São Luís	2°33'02.3"S	44°12'26.2"W
21	135	Posto Shell	São Luís	2°32'02.3"S	44°13'44.4"W
22	135	Posto Jr	São Luís	2°35'48.8"S	44°14'44.8"W
23	135	Posto Gulf	São Luís	2°35'53.9"S	44°14'44.9"W
24	135	Posto Roma	São Luís	2°37'24.5"S	44°15'34.5"W
25	135	Roma Truck Cent	São Luís	2°37'25.9"S	44°15'35.8"W
26	135	Posto Maracanã	Maracanã	2°37'38.7"S	44°15'44.8"W
27	135	Posto Petrobrás	Maracanã	2°38'48.8"S	44°16'39.4"W
28	135	Posto Magnólia 2	Maracanã	2°38'49.5"S	44°16'39.6"W
29	135	Posto BR	São Luís	2°40'01.7"S	44°17'20.3"W
3	316	Posto São José	Timon	05°00'51.8"S	42°59'49.3"W
30	135	Posto Soene	São Luís	2°40'03.6"S	44°17'20.1"W
31	135	Posto Americano	São Luís	2°37'54.4"S	44°18'50.4"W
32	135	Posto Mais São L	São Luís	2°39'30.3"S	44°18'11.6"W
33	135	Dislub Combustív	São Luís	2°39'35.1"S	44°18'10.0"W
34	135	Posto Petrobrás	Tajipurús São Lui	2°40'33.9"S	44°17'38.4"W
35	135	Posto Magnólia 2	São Luís	2°40'47.0"S	44°17'38.9"W
36	135	Posto Magnólia 2	São Luís	2°40'48.1"S	44°17'42.9"W
37	135	Posto Ipiranga	São Luís	2°40'48.8"S	44°17'43.4"W
38	135	Posto Millena	São Luís	2°41'20.96"S	44°17'59.26"W
39	135	Posto Ipiranga	São Luís	2°41'30.8"S	44°18'09.8"W
4	316	Posto Petrobras	Caxias	04°57'06.7"S	43°08'11.0"W
40	135	Posto Nordestão	São Luís	2°41'30.7"S	44°18'10.6"W
41	135	Posto Monte Carl	Estiva São Luis	2°44'02.8"S	44°20'01.5"W
42	135	Posto Petrobrás	Itapecuru Mirim	3°22'45.7"S	44°21'34.3"W
43	226	Posto Mateus 2	Timon	5°08'14.1"S	42°50'22.0"W
44	226	InterPosto Santa	Presidente Dutra	5°16'54.2"S	44°29'47.4"W
45	226	AutoPosto Arara	Tuntum	5°19'19.02"S	44°36'4.45"W
46	226	Posto Bianca	Tuntum	5°20'36.2"S	44°41'17.0"W
47	226	Posto Cigana	Tuntum	5°22'52.5"S	44°47'19.1"W
48	226	Posto Ale	Jenipapo dos Viei	5°29'05.2"S	45°30'49.5"W
49	226	POSTO VEREDA	Grajaú	5°48'10.2"S	46°06'58.5"W
5	316	Posto Full	Caxias	04°52'55.7"S	43°20'40.9"W
50	226	Auto Posto Nacio	Grajaú	5°48'15.36"S	46° 7'1.68"W
51	222	Posto Shell	Chapadinha	3°41'45.4"S	43°34'14.0"W
52	222	Posto Petrobrás	Chapadinha	3°41'45.2"S	43°34'30.5"W
53	222	Posto Petrobrás I	Vargem Grande	3°32'49.1"S	43°55'07.0"W
55	222	Posto Ipiranga	Itapecuru Mirim	3°24'04.2"S	44°21'20.6"W
56	222	Posto Shell	Arari	3°27'44.2"S	44°46'34.2"W
57	222	Posto São Cristóv	Santa Luzia	3°58'32.4"S	45°40'11.2"W
58	222	Posto Petrobrás	Santa Luzia	3°58'41.25"S	45°40'31.88"W
59	222	Posto BR Petrobr	Buriticipu	4°18'44.73"S	46°17'57.16"W
6	316	Posto Shell	Alto Alegre do Me	4°12'30.3"S	44°26'56.4"W
60	222	Posto Petrobrás	Açailandia	4°56'21.9"S	47°27'49.1"W
61	230	Posto BR Petrobr	Pastos Bons	6°35'23.7"S	44°04'34.6"W
62	230	Posto Ipiranga	Estreito	6°53'16.7"S	47°00'24.5"W
63	230	Auto Posto Chap	Carolina	7°19'35.7"S	47°26'35.6"W
64	230	Posto Boiadeiro	Carolina	7°24'24.2"S	47°13'15.6"W
65	230	Posto Nato	Riachão	7°22'07.6"S	46°37'29.4"W
66	230	Posto Alvorada	Riachão	7°21'53.1"S	46°36'58.9"W
67	230	Posto Ipiranga	Riachão	7°21'23.4"S	46°35'42.5"W
68	230	Posto Magnólia 1	Balsas	7°30'56.3"S	46°04'35.5"W
69	230	Posto Petrossoja	Balsas	7°31'23.0"S	46°02'24.6"W
7	316	Posto Shell	Alto Alegre do Me	4°12'10.4"S	44°27'01.1"W
70	230	Posto Petro	Balsas	7°31'19.9"S	46°02'23.2"W
71	230	Posto Petrobrás	Balsas	7°30'44.1"S	46°02'02.1"W
72	230	Posto HD 23	São Raimundo da	7°13'46.3"S	45°53'00.1"W
73	230	Posto Costa	São Raimundo da	7°01'38.5"S	45°29'22.8"W
74	230	Auto Posto Parait	São Raimundo da	7°01'21.8"S	45°28'54.1"W
75	230	Posto Clementino	Loreto	6°51'16.0"S	45°10'05.0"W
76	230	Posto Triunfo	São Domingos A	6°48'54.6"S	44°36'55.9"W
77	10	Posto Petrobrás	Ribamar Fiquene	5°56'15.3"S	47°23'04.5"W
78	10	Auto Posto Ribeir	Gov. Edison Lobã	5°44'56.1"S	47°21'36.3"W
79	10	Posto Petrobrás/E	Gov. Edison Lobã	5°40'48.1"S	47°22'24.0"W
8	316	Posto Petrobrás	Alto Alegre do Me	4°11'56.7"S	44°26'21.7"W
80	10	Posto Shell	Imperatriz	5°34'30.7"S	47°26'36.8"W
81	10	Posto Caminhone	Imperatriz	5°33'13.7"S	47°27'25.4"W
82	10	Posto Ipiranga	Imperatriz	5°32'31.2"S	47°27'56.8"W
83	10	Posto Petrobrás	Imperatriz	5°31'48.1"S	47°28'18.6"W
84	10	Posto Shell	Imperatriz	5°30'42.2"S	47°28'19.7"W
85	10	Posto Regina 1	Imperatriz	5°29'28.0"S	47°28'17.1"W
86	10	Posto Shell	Imperatriz	5°28'56.0"S	47°28'18.0"W
87	10	Posto Shell	Cidelandia	5°06'37.7"S	47°33'01.3"W
88	10	Posto Shell	Açailandia	4°57'17.0"S	47°30'16.0"W
89	10	Auto Posto Chap	Itinga do MA	4°57'17.0"S	47°30'16.0"W
9	316	Posto Shell	Bacabal	4°14'05.0"S	44°52'57.4"W
90	10	Posto Shell	Itinga do MA	4°27'04.8"S	47°31'36.4"W

7. ANEXO II:

Tabela de Coordenadas de pontos ótimos

Coordenadas dos pontos resultado do GA					
Pontos	Execução_01		Pontos	Execução_02	
	Latitude	Longitude		Latitude	Longitude
1	-2,12972	-45,88647	1	-3,97813	-45,67552
2	-2,68022	-44,29539	2	-3,97813	-45,67552
3	-2,66767	-44,28892	3	-2,73411	-44,33375
4	-2,12972	-45,88647	4	-3,73786	-45,25603
5	-4,06944	-45,06878	5	-5,34339	-44,68806
6	-5,48478	-45,51375	6	-2,67608	-44,29400
7	-7,02736	-45,48967	7	-5,11047	-47,55036
8	-2,73411	-44,33375	8	-1,88058	-46,06997
9	-7,22953	-45,88336	9	-4,75614	-43,65369
10	-2,68916	-44,29979	10	-7,36878	-46,62483
Pontos	Execução_03		Ponto	Execução_04	
	Latitude	Longitude		Latitude	Longitude
1	-5,34339	-44,68806	1	-5,06911	-42,87656
2	-4,31243	-46,29921	2	-2,65975	-44,30278
3	-7,22953	-45,88336	3	-3,46228	-44,77617
4	-7,52219	-46,03978	4	-5,55381	-47,45706
5	-4,95472	-47,50444	5	-4,31243	-46,29921
6	-4,20289	-44,45031	6	-5,01439	-42,99703
7	-7,36878	-46,62483	7	-3,46228	-44,77617
8	-2,67608	-44,29400	8	-4,45133	-47,52678
9	-4,95472	-47,50444	9	-2,13206	-45,88553
10	-5,54200	-47,46578	10	-2,59831	-44,24581