

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção

ERIK JÚNIOR PAULINO

**INTEGRAÇÃO DOS PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO E TRANSPORTE PARA
INSTALAÇÃO DE PLANTAS GERADORAS DE BIOGÁS**

Bauru - SP

2025

ERIK JÚNIOR PAULINO

**INTEGRAÇÃO DOS PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO E TRANSPORTE PARA
INSTALAÇÃO DE PLANTAS GERADORAS DE BIOGÁS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, como exigência para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Adriana Cristina Cherri

Coorientador(a): Prof^a. Dr^a. Edilaine Martins Soler

Bauru - SP

2025

P328i Paulino, Erik Júnior
Integração dos problemas de localização e transporte para
instalação de plantas geradoras de biogás / Erik Júnior Paulino.
-- Bauru, 2025
123 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientadora: Adriana Cristina Cherri
Coorientadora: Edilaine Martins Soler

1. Pesquisa operacional. 2. Biodigestor. 3. Biomassa. 4.
Problema de localização-roteamento. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE ERIK JÚNIOR PAULINO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de junho do ano de 2025, às 8h30min, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de ERIK JÚNIOR PAULINO, intitulada **INTEGRAÇÃO DOS PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO E TRANSPORTE PARA INSTALAÇÃO DE PLANTAS GERADORAS DE BIOGÁS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. ADRIANA CRISTINA CHERRI NICOLA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / UNESP/Câmpus de Bauru, Dra. MARIA JOSÉ PINTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial / Instituto de Estudos Avançados, Prof. Dr. HELIO YOCHIHIRO FUCHIGAMI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia da Produção / Universidade Federal de São Carlos, Profª. Drª. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Biodiversidade e Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP, Prof. Dr. ENZO BARBERIO MARIANO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Estadual Paulista Unesp Faculdade de Engenharia Câmpus Bauru. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. ADRIANA CRISTINA CHERRI NICOLA



Documento assinado digitalmente

ADRIANA CRISTINA CHERRI NICOLA

Data: 27/08/2025 15:08:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dedico este trabalho aos meus pais Luiza
e Antônio (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me deu força e esperança durante todo o trabalho.

À minha família, pelos ensinamentos, compreensão e incentivo.

À minha namorada, Natália, pelo carinho e paciência.

À minha orientadora, professora Adriana Cristina Cherri, pela valiosa orientação, pelo apoio, pelos ensinamentos, disponibilidade e confiança. Agradeço pela amizade, dedicação e seu valoroso otimismo.

À minha coorientadora, professora Edilaine Martins Soler, pelo apoio, ensinamentos, incentivos, amizade e relevantes contribuições.

À professora Edméa Cássia Baptista (in memoriam), que, mesmo no breve período de orientação, deixou importante contribuição com seu incentivo, amizade e exemplo.

A todos os professores, amigos e funcionários da FEB/UNESP que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

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

“Força, energia e trabalho.”

RESUMO

O uso de energias renováveis tem-se intensificado diante dos problemas ambientais atuais. Ao contrário dos combustíveis fósseis, o uso de fontes de energia renovável reduz o impacto sobre o acúmulo de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. Entre as diferentes formas de energia renovável, a biomassa se destaca pela sua versatilidade, sendo a geração de biogás em plantas de biodigestores, uma aplicação com grande potencial de ampliação no Brasil. Os resíduos orgânicos gerados pela agricultura, cidades e indústrias são ótimas fontes de biomassa para a geração de energia por meio de biodigestores. No entanto, antes de iniciar o processo de geração de energia, são necessários locais adequados para a instalação de plantas geradoras de biogás (biodigestores), tendo em vista que alguns locais possuem restrições legais, ambientais, econômicas e sociais. Para que a produção de energia seja competitiva, as plantas devem ser instaladas em locais relativamente próximos às fontes de biomassa e aos destinos da energia gerada. Outra consideração importante está relacionada à cadeia de abastecimento das plantas através dos veículos coletores de biomassa. Nesse contexto, esse trabalho apresenta um método para classificar um território quanto à sua aptidão para a instalação de plantas de biogás e um modelo matemático para representar e auxiliar na alocação ideal de plantas em locais de alta aptidão. Para tratar o problema de forma mais abrangente, foi desenvolvido um estudo que integra o problema de localização das plantas e do roteamento dos veículos que fazem a coleta dos resíduos. Um modelo matemático e uma heurística baseada em *Tabu Search* foram propostos para obter a solução de problemas de grande porte. Os estudos desenvolvidos mostraram eficiência na resolução dos problemas abordados, que foi observada a partir dos testes computacionais realizados.

Palavras-chave: pesquisa operacional; biodigestor; biomassa; problema de localização-roteamento.

ABSTRACT

The use of renewable energies has intensified in the face of current environmental problems. Unlike fossil fuels, the use of renewable energy sources reduces the impact on the accumulation of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere. Among the different forms of renewable energy, biomass stands out for its versatility in use, and the generation of biogas in biodigester plants is an application with great potential for expansion in Brazil. Organic waste generated by agriculture, cities and industries are great sources of biomass for generating energy through biodigesters. However, before starting the energy generation process, suitable sites are needed for the installation of biogas generating plants (biodigesters), given that some sites have legal, environmental, economic and social restrictions. For energy production to be competitive, plants must be installed in locations relatively close to biomass sources and the destinations of the energy generated. Another important consideration is the supply chain to the plants via biomass collection vehicles. In this context, this work presents a method for classifying a territory in terms of its suitability for installing biogas plants and a mathematical model to represent and help with the optimal allocation of plants in highly suitable locations. To deal with the problem more comprehensively, a study was developed that integrates the problem of locating the plants and routing the vehicles that collect the waste. As well as a mathematical model, a heuristic based on Tabu Search was proposed to obtain the solution to large-scale problems. The studies carried out showed efficiency in solving the problems addressed, which was observed from the computational tests carried out.

Keywords: operations research; biodigesters; biomass; location-routing problem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo do carbono na geração de energia a partir da biomassa. Fonte: elaborado pelo autor	20
Figura 2.2 – Processos de conversão energética da biomassa. Fonte: adaptado de ANEEL (2005)	21
Figura 2.3 – Esquema da decomposição anaeróbia da biomassa. Fonte: adaptado de FNR (2010)	23
Figura 2.4 – Esquema de biodigestores: a) modelo indiano, b) modelo chinês. Fonte: PERLINGEIRO (2014)	24
Figura 2.5 – Biodigestor modelo CSTR em operação. Fonte: ZORG BIOGAS (2025)	25
Figura 2.6 – Conjunto moto-gerador movido a biogás. Fonte: ER-BR (2025)	27
Figura 3.1 – Número de plantas e capacidade instalada. Fonte: adaptado de CIBiogás (2024)	35
Figura 3.2 – Distribuição do biogás por estado: a) número de plantas em operação e b) capacidade instalada de produção milhões Nm ³ /ano. Fonte: adaptado de CIBiogás (2024)	36
Figura 4.1 – Caminhão usado para coleta de resíduo animal para biodigestão. Fonte: Pereira (2009)	40
Figura 4.2 – Representação gráfica de uma solução para o CVRP. Fonte: elaborado pelo autor	42
Figura 4.3 – Três tipos de VRPPD. Fonte: adaptado de Toth e Vigo (2014)	44
Figura 4.4 – Fusão de dois clientes em uma rota compartilhada. Fonte: adaptado de Novaes (2007)	47
Figura 4.5 – Aplicação do algoritmo 2-opt em uma solução do VRP. Fonte: elaborado pelo autor	49
Figura 5.1 – Localização da área de estudo: a) Brasil, b) Sistema rodoviário e ferroviário do estado de São Paulo. Fonte: elaborado pelo autor	54
Figura 5.2 – Visualização dos temas vetoriais do banco de dados usado no estudo. Fonte: elaborado pelo autor	55
Figura 5.3 – Localização das subestações de energia elétrica do Estado de São Paulo. Fonte: elaborado pelo autor	62
Figura 5.4 – O sistema planejado para coleta e uso energético de biomassa. Fonte: elaborado pelo autor	63

Figura 5.5 – Fluxograma do modelo conceitual e as diferentes análises. Fonte: elaborado pelo autor	65
Figura 5.6 – Zonas de exclusão para a instalação de plantas de biogás no estado de São Paulo. Fonte: elaborado pelo autor	67
Figura 5.7 – Classificação dos locais de acordo com sua aptidão para a localização das plantas. Fonte: elaborado pelo autor	691
Figura 5.8 – Polígonos candidatos à instalação das plantas obtidos da classe “Muito boa”. Fonte: elaborado pelo autor	70
Figura 5.9 – Localização dos centroides dos polígonos candidatos. Fonte: elaborado pelo autor	71
Figura 5.10 – Mesorregiões do estado de São Paulo segundo o IBGE. Fonte: elaborado pelo autor	72
Figura 5.11 – Estado de São Paulo com cinco Megarregiões de produção de biogás. Fonte: elaborado pelo autor	73
Figura 5.12 – a) Distância total de transporte, em função do número de plantas b) Distância média de transporte, em função do número de plantas. Fonte: elaborado pelo autor	75
Figura 5.13 – Valor da função objetivo, em função do número de plantas. Fonte: elaborado pelo autor	76
Figura 5.14 - Estado de São Paulo com quatro Megarregiões de produção de biogás. Fonte: elaborado pelo autor	76
Figura 5.15 – a) Distância total de transporte, em função do número de plantas b) Distância média de transporte, em função do número de plantas. Fonte: elaborado pelo autor	77
Figura 5.16 – Valor da função objetivo, em função do número de plantas. Fonte: elaborado pelo autor	78
Figura 5.17 – Estado de São Paulo com três Megarregiões de produção de biogás. Fonte: elaborado pelo autor	78
Figura 5.18 - a) <i>GAP</i> das soluções, em função do número de plantas b) Valor da função objetivo, em função do número de plantas. Fonte: elaborado pelo autor	80
Figura 5.19 – Valor da função objetivo, em função do número de plantas, considerando a soma de todas as Megarregiões em cada cenário. Fonte: elaborado pelo autor	80
Figura 5.20 – Mapa de localização das plantas com cinco Megarregiões. Fonte: elaborado pelo autor	81
Figura 6.1 – Ilustração da solução do problema proposto. Fonte: elaborado pelo autor	89

Figura 6.2 – Fluxograma do algoritmo proposto. Fonte: elaborado pelo autor	93
Figura 6.3 – Ilustração dos intercâmbios na solução. Fonte: elaborado pelo autor	95
Figura 6.4 – Comparação dos tempos computacionais médios. Fonte: elaborado pelo autor	98
Figura 6.5 – Comparação entre <i>gaps</i> médios. Fonte: elaborado pelo autor	99
Figura 6.6 – Comparação do tempo médio computacional. Fonte: elaborado pelo autor	100
Figura 6.7 – Comparação entre <i>gaps</i> médios. Fonte: elaborado pelo autor	101
Figura 6.8 – Variação da função objetivo em relação à capacidade dos veículos. Fonte: elaborado pelo autor	102
Figura 6.9 – Variação no número de plantas abertas e veículos, em relação à capacidade dos veículos. Fonte: elaborado pelo autor	103
Figura 6.10 – Solução ótima para a instância 3 a) Capacidade (h) = 15 ton b) Capacidade (h) = 65 ton. Fonte: elaborado pelo autor	103
Figura 6.11 – Variação da função objetivo em relação à capacidade das plantas. Fonte: elaborado pelo autor	104
Figura 6.12 – Variação no número de plantas abertas e veículos, em relação à capacidade das plantas. Fonte: elaborado pelo autor	105
Figura 6.13 – Solução ótima para a instância 3 a) Capacidade = $0,5t_i$ b) Capacidade = $1,75t_i$. Fonte: elaborado pelo autor	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Potencial brasileiro de biogás. Fonte: adaptado de ABiogás (2020)	30
Tabela 5.1 – Fonte de dados vetoriais	54
Tabela 5.2 – Localidades restritas para a instalação de uma planta de biogás	57
Tabela 5.3 – Matriz de comparação pareada	68
Tabela 5.4 – Pesos atribuídos para cada critério	68
Tabela 5.5 – Parâmetros gerais do modelo matemático	73
Tabela 5.6 – Potencial de geração de biogás para cinco Megarregiões	74
Tabela 5.7 – Potencial de geração de biogás para quatro Megarregiões	76
Tabela 5.8 – Potencial de geração de biogás para três Megarregiões	79
Tabela 6.1 – Custos e capacidades	97
Tabela 6.2 – Comparação entre os resultados das instâncias pequenas	98
Tabela 6.3 – Comparação entre os resultados das instâncias maiores	100
Tabela 9.1 – Matriz de comparação pareada	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 9.1 – Escala fundamental de Saaty para comparação pareada – AHP. Fonte: adaptado de Saaty (1977, 2008)	122
Quadro 9.2 – Índice randômico médio em função do tamanho da matriz. Fonte: Saaty (1977)	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABiogás	Associação Brasileira do Biogás e do Biometano
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás
ETE	Estações de Tratamento de Esgoto
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GDP	Gross Domestic Product
GEE	Gases do Efeito Estufa
GIS	Geographic Information System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LRP	Location Routing Problem
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OIE	Oferta Interna de Energia
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SIG	Sistemas de Informações Geográficas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS.....	20
2.1	BIOMASSA E ENERGIA.....	20
2.2	PRODUÇÃO E USO DO BIOGÁS.....	22
2.2.1	Biodigestão	22
2.2.2	Biodigestor.....	24
2.2.3	Usos energéticos do biogás.....	25
3	PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO BRASIL	28
3.1	FONTES PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	29
3.1.1	Setor sucroenergético.....	30
3.1.2	Setor do agronegócio	30
3.1.3	Setor de saneamento	31
3.2	PRODUÇÃO ATUAL DE BIOGÁS.....	32
3.2.1	Geração de energia elétrica	33
3.2.2	Produção de biometano.....	34
3.2.3	Plantas de biogás no Brasil	34
4	PROBLEMAS LOGÍSTICOS EM PLANTAS DE BIOGÁS.....	37
4.1	LOCALIZAÇÃO DAS PLANTAS DE BIOGÁS	38
4.2	TRANSPORTE DE BIOMASSA NAS PLANTAS DE BIOGÁS	39
4.2.1	Roteamento de veículos	40
4.2.1.1	Variantes do VRP	41
4.2.1.2	Métodos exatos para solução do VRP.....	44
4.2.1.3	Métodos aproximados para solução do VRP	46
4.3	TRANSPORTE E LOCALIZAÇÃO EM PLANTAS DE BIOGÁS.....	49
5	MODELO DE APTIDÃO E LOCALIZAÇÃO ÓTIMA PARA PLANTAS DE BIOGÁS	51
5.1	INTRODUÇÃO.....	51
5.2	ÁREA DE ESTUDO	53
5.2.1	Zonas de exclusão	55
5.2.2	Locais potenciais para a instalação de plantas de biogás.....	57
5.2.3	Fontes de biomassa.....	60
5.2.4	Destinos da energia gerada	61

5.2.5	Modelo matemático	62
5.3	RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DISCUSSÃO	65
5.3.1	Zonas de exclusão	66
5.3.2	Locais potenciais para a instalação de plantas de biogás	67
5.3.3	Locais ótimos para instalação das plantas de biogás.....	71
5.4	CONSIDERAÇÕES	82
6	PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO-ROTEAMENTO PARA PLANTAS DE	
BIOGÁS	84	
6.1	INTRODUÇÃO.....	84
6.1.1	O problema de localização-roteamento	84
6.2	MODELO MATEMÁTICO	87
6.3	HEURÍSTICA PARA LRP	92
6.4	RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DISCUSSÃO	96
6.4.1	Instâncias pequenas.....	97
6.4.2	Instâncias maiores.....	99
6.4.3	Análise de sensibilidade	101
6.5	CONSIDERAÇÕES	106
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
9	ANEXOS.....	121
9.1	PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA AHP	121

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética de um país ou região representa quantitativamente o conjunto de fontes de energia disponíveis para consumo. O planejamento da composição dessas fontes é importante para estimular o crescimento econômico, o desenvolvimento regional, garantir a segurança energética, os empregos, a geração de renda e o acesso da população aos serviços de energia (JESUS *et al.*, 2021). Além disso, a matriz energética é uma ferramenta usada por administradores públicos e por investidores em potencial na avaliação de oportunidades de investimentos no setor energético (GÓMEZ; ARANGO-ARAMBURO; LARSEN, 2017).

Atualmente, o mundo possui uma matriz energética composta principalmente por fontes não renováveis, como o petróleo, o carvão mineral, e o gás natural, sendo que em 2023 os combustíveis fósseis representaram 80% da matriz energética mundial (IEA, 2024). O Brasil, apesar da participação de fontes renováveis ser muito superior quando comparado aos países da OCDE e ao resto do mundo, ainda possui 50,9% da sua matriz energética composta por fontes não renováveis: petróleo e derivados (35,1%), gás natural (9,6%), carvão mineral (4,4%), urânio (1,2%), outras não renováveis (0,6%) (EPE, 2024a).

Essa forte dependência mundial de fontes não renováveis, como os combustíveis fósseis, tem acarretado efeitos danosos ao meio ambiente, com a liberação de gases do efeito estufa (GEE) e as consequentes mudanças climáticas. Essa alteração antrópica do clima tem impactado irreversivelmente diversos ecossistemas terrestres e aquáticos, além de milhões de pessoas em todo o mundo, principalmente, aquelas com maiores restrições ao desenvolvimento econômico e social (IPCC, 2023). Ainda em relação aos GEE, em 2019, o setor energético foi responsável por 34% das emissões globais, seguido da indústria com 24% (IPCC, 2023). No Brasil, devido à grande participação de fontes renováveis em sua matriz energética, as emissões de GEE do setor energético foi comparativamente menor, representando 24% do total de emissões em 2022 (EPE, 2024b). Isso mostra a importância de priorizar a adoção de fontes alternativas que emitam menos GEE.

No Brasil, em particular, as fontes renováveis têm um papel importante na matriz energética, principalmente a hidráulica e a biomassa. Em 2023, 49,1% da Oferta Interna de Energia (OIE) era composta por fontes renováveis, deste percentual, 32,7% foi obtida de biomassa e 12,1% de usinas hidrelétricas (EPE, 2024a). Quando

se avalia somente a matriz elétrica no mesmo ano, as fontes renováveis têm uma relevância ainda maior, representando 89,2% do fornecimento brasileiro (EPE, 2024a).

Uma das formas de aproveitar a energia da biomassa é por meio da geração de biogás pelo processo de biodigestão de resíduos orgânicos, como efluentes industriais, urbanos e rurais. O biogás possui aproximadamente 60% de metano (CH_4) em sua composição e, em virtude do elevado poder calorífico, permite a sua utilização na geração de calor e de energia elétrica. Além do potencial energético, outra vantagem da produção de biogás é a redução do potencial poluidor de efluentes e resíduos orgânicos. Outro benefício é que, além da geração de biogás, o efluente final do processo de biodigestão pode ser utilizado como biofertilizante para produção agrícola.

O processo de biodigestão ocorre em equipamentos denominados biodigestores, onde o biogás é produzido e armazenado. Uma das formas de aproveitamento do biogás mais usadas é por meio da geração de energia elétrica em moto-geradores. O conjunto essencial, biodigestor e moto-gerador é chamado de planta de biogás. Portanto, essas plantas funcionam como um local de recebimento da biomassa e como unidade geradora de energia elétrica.

A definição do local de instalação de uma planta de biogás é um processo complexo, em que os tomadores de decisão devem considerar tanto fatores econômicos, quanto ambientais e sociais (THOMPSON; WANG; LI, 2013). O aspecto ambiental é importante porque, quando o biodigestor está mal localizado, há o risco de contaminação ao meio ambiente a partir dos efluentes gerados, que podem poluir o lençol freático e contaminar o solo. O aspecto social também é relevante, pois biodigestores próximos a áreas urbanas podem causar desconforto a partir de barulhos e odores desagradáveis (SILVA; ALÇADA-ALMEIDA; DIAS, 2017). Não menos importante que os anteriores é o aspecto econômico, dado que a implantação e a sustentabilidade de um projeto de geração de energia devem, necessariamente, passar por uma viabilidade econômico-financeira.

Nos últimos anos, o problema de localização dos biodigestores foi abordado de diferentes formas na literatura. Há trabalhos integralmente quantitativos, que aplicaram modelos matemáticos para minimizar custos de suprimento de biomassa ao biodigestor (WU *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2017), como há outros que

utilizaram técnicas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para analisar a distribuição espacial da biomassa (HÖHN *et al.*, 2014; ZAREEI, 2018).

Apesar de alguns trabalhos considerarem o problema de localização de biodigestores, há a necessidade de mais estudos que abordem de forma conjunta tanto os fatores econômicos, como os ambientais e sociais. Outro ponto a ser explorado, além da localização dos biodigestores, é a otimização de toda a cadeia de suprimentos, desde a coleta de biomassa até o fornecimento de energia aos consumidores. A partir desse ponto de vista, outro problema importante diz respeito ao roteamento dos veículos coletores de biomassa que abastecem os biodigestores. A definição de um conjunto de rotas eficientes tem impacto positivo na viabilidade do projeto. Portanto, esses dois problemas – localização e roteamento – podem ser trabalhados de forma integrada quando se busca um tratamento mais geral em projetos de plantas de biogás.

Este trabalho contribui com a literatura por desenvolver estudos de bastante relevância em uma área de pesquisa com poucas referências. Um dos problemas abordados envolve a seleção de locais para a instalação de plantas produtoras de biogás, respeitando aspectos sociais, econômicos e ambientais. Técnicas de Sistemas de Informações Geográficas foram utilizadas e um modelo matemático proposto para representar o problema, o qual forneceu soluções ótimas em tempos computacionais viáveis. Outro estudo aborda a integração do problema de localização de locais ideais para a instalação de plantas geradoras de biogás com o problema de transporte dos resíduos para as plantas. Para resolver este problema, além de um modelo matemático, um procedimento metaheurístico também foi proposto para a obtenção de soluções inteiras em um tempo computacional viável. Ambos os estudos também consideraram que as plantas geradoras de biogás devem estar estrategicamente localizadas próximas às torres para a distribuição de energia na rede elétrica. Em resumo, esta tese produziu um novo conjunto de ferramentas tecnológicas voltadas à tomada de decisão de interesse ambiental, social e econômico. Além disso, parte dos estudos foi baseada em dados reais da área de estudo, fornecendo contribuições originais e aplicáveis ao estado de São Paulo.

Esta tese é composta por dois artigos científicos, cada um abordando um aspecto específico do problema geral investigado. Contudo, antes da apresentação dos artigos, é fornecida uma fundamentação teórica que contempla temas relacionados à pesquisa desenvolvida. Precisamente, a tese está dividida em 7

capítulos principais. Seguindo-se este capítulo referente à introdução, apresenta-se o Capítulo 2, o qual descreve os principais conceitos referentes à geração e uso do biogás. No Capítulo 3 é apresentado um panorama da produção de biogás no Brasil, destacando suas potencialidades e importância no contexto energético nacional. O Capítulo 4 contextualiza os problemas logísticos de localização e roteamento em plantas de biogás. O Capítulo 5 apresenta o primeiro artigo, fornecendo uma contribuição para o problema de definição de locais aptos e localização de plantas de biogás. Este estudo foi publicado na revista *Energy Reports* (PAULINO; CHERRI; SOLER, 2024). No Capítulo 6 é apresentada uma abordagem para o problema integrado de localização e roteamento de plantas de biogás. A partir dos estudos deste capítulo, foi gerado o segundo artigo científico (PAULINO; CHERRI; SOLER, 2025). Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as considerações finais do trabalho.

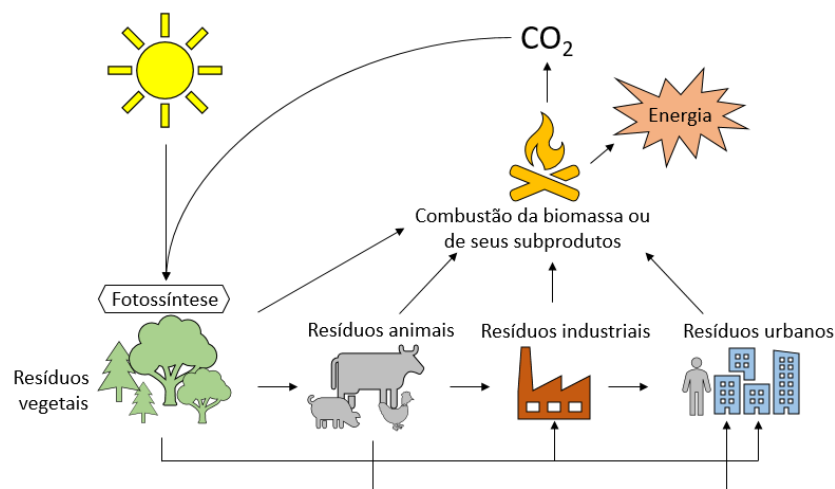
2 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

2.1 BIOMASSA E ENERGIA

De maneira genérica, a biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, formada pelo processo de fotossíntese (SOUZA, 2004). Portanto, são consideradas biomassas todas as plantas e todos os animais, inclusive seus resíduos, as matérias orgânicas transformadas, provenientes de processos industriais e, também a parte biodegradável dos resíduos urbanos. Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para a produção de energia (ANEEL, 2005).

Ao contrário dos combustíveis fósseis, em uma situação ideal, o uso de biomassa para gerar energia não contribui para o acúmulo de CO_2 na atmosfera. Um vegetal usado para produzir energia de biomassa, cresce absorvendo o CO_2 da atmosfera através da fotossíntese. Durante a geração de energia a partir da biomassa do vegetal, o CO_2 absorvido anteriormente é devolvido à atmosfera, no entanto, sem nenhuma mudança líquida de CO_2 na atmosfera (FIELD; CAMPBELL; LOBELL, 2008). Como pode ser observado na Figura 2.1, a biomassa se renova com o carbono circulando entre a atmosfera e os seres vivos.

Figura 2.1 – Ciclo do carbono na geração de energia a partir da biomassa

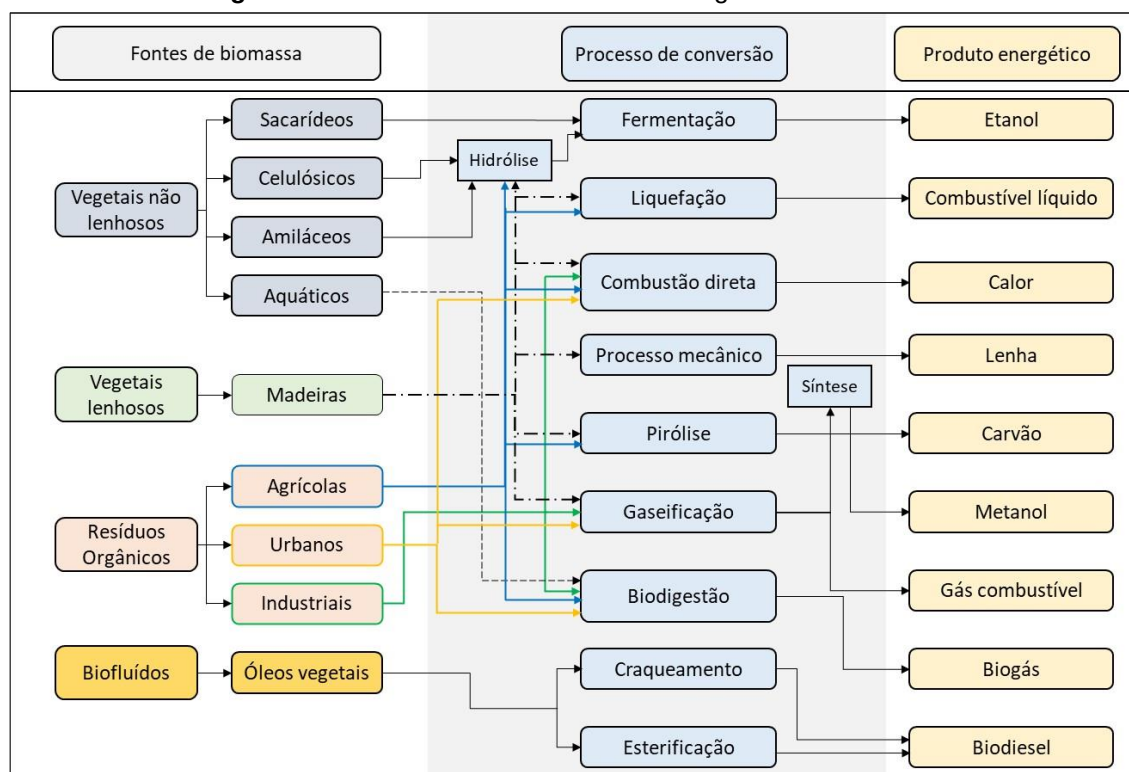


Fonte: elaborado pelo autor

A energia acumulada na biomassa pode ser liberada diretamente através da combustão direta, ou ser convertida, através de diferentes tecnologias, em produtos energéticos de naturezas distintas, tais como carvão, etanol, gases combustíveis, óleos vegetais e outros, cada qual com a sua eficiência energética e custos associados. A adequação da tecnologia ao tipo de resíduo orgânico é importante e está relacionada à viabilidade técnico-econômica do processo.

As tecnologias de conversão incluem processos simples, como a combustão direta, até processos físico-químicos e bioquímicos complexos como, por exemplo, para a obtenção de combustíveis líquidos e gasosos. A Figura 2.2 apresenta várias fontes de biomassa, os processos de conversão mais aplicados em cada fonte e os produtos energéticos gerados em cada processo. Alguns desses processos são descritos a seguir.

Figura 2.2 – Processos de conversão energética da biomassa



Fonte: adaptado de ANEEL (2005)

A combustão direta é a transformação da energia química da biomassa em calor. Embora seja um processo mais simples e, às vezes conveniente, o processo é normalmente pouco eficiente quando comparado à outras tecnologias. Outro problema da combustão direta é a baixa densidade energética do combustível, que

pode dificultar o seu armazenamento e transporte (ANEEL, 2005). Em algumas indústrias, como a canavieira, o aproveitamento energético ocorre através da geração de vapor em caldeiras que, por sua vez, vão movimentar turbinas acopladas à geradores de eletricidade.

A pirólise é a conversão da biomassa em outros produtos com maior densidade energética, em ambiente com oxigênio controlado. Quando o processo ocorre em temperaturas mais baixas (400 – 500 °C), o principal produto obtido é o carvão (VIEIRA *et al.*, 2013). Além do uso tradicional para geração de carvão vegetal, algumas pesquisas têm estudado o uso da pirólise no tratamento de resíduos urbanos (VIEIRA *et al.*, 2013; CALDAS, 2019).

A gaseificação é um processo termoquímico que corresponde à combustão incompleta da biomassa, através de um agente gaseificador (O_2 , ar ou vapor d'água). De forma simplificada, o carbono é oxidado a monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio passa a gás hidrogênio (H_2), formando o gás combustível. Uma etapa intermediária da gaseificação é a pirólise citada anteriormente. Um dos problemas da gaseificação é a dificuldade técnico-econômica da limpeza do gás produzido, já que no processo é comum a formação de substâncias indesejadas (RUIZ *et al.*, 2013).

Além dos processos físico-químicos citados anteriormente, há aqueles em que é necessária a atuação de agentes biológicos para transformação da biomassa no combustível final, são eles, a fermentação e a biodigestão. A biodigestão será tratada com maiores detalhes na próxima seção. A fermentação alcoólica é um processo anaeróbio (sem a presença de oxigênio) em que a matéria orgânica é transformada em etanol e dióxido de carbono, através da ação de microrganismos. O etanol tem uma participação muito importante na matriz energética brasileira, especificamente no setor de transportes (EPE, 2024a). No Brasil, o etanol é produzido, principalmente, de cana de açúcar e em menor proporção de milho.

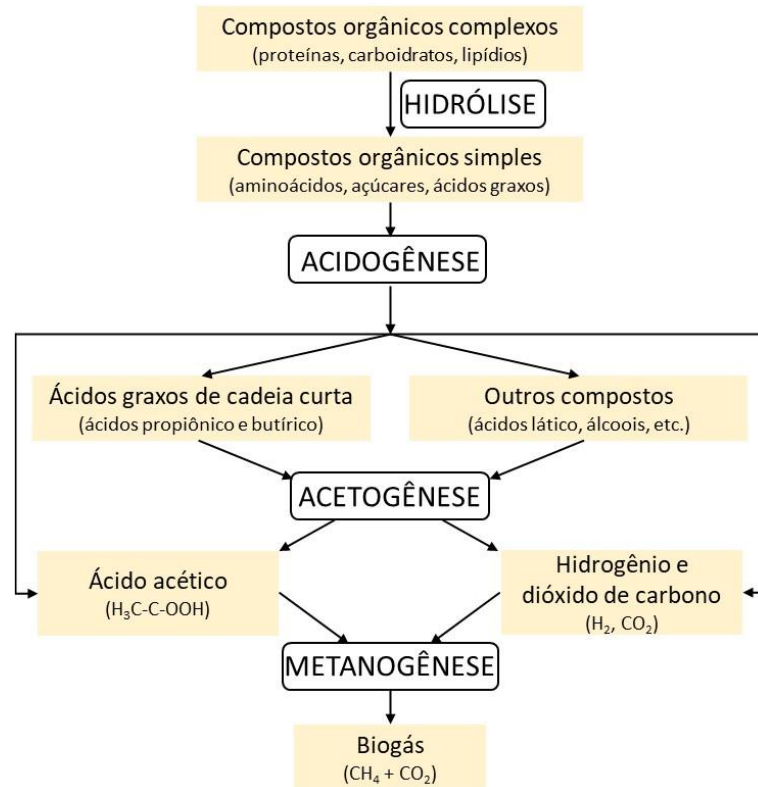
2.2 PRODUÇÃO E USO DO BIOGÁS

2.2.1 Biodigestão

A biodigestão (ou digestão anaeróbia) é o processo anaeróbio de decomposição do substrato (matéria orgânica em solução aquosa) promovido por microrganismos em que há a produção de biogás (COELHO *et al.*, 2018). Esse

processo ocorre em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, conforme apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Esquema da decomposição anaeróbia da biomassa



Fonte: adaptado de FNR (2010)

A hidrólise é a fase em que as bactérias decompõem os compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídios, em compostos orgânicos simples como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos. Em seguida, ocorre a acidogênese, em que os compostos formados na hidrólise são decompostos em ácidos graxos voláteis e outros compostos, como ácido láctico e álcoois. Na terceira fase, a acetogênese, os compostos formados na fase anterior são oxidados, dando origem ao ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Por fim, na metanogênese as bactérias convertem os compostos orgânicos da fase anterior em metano.

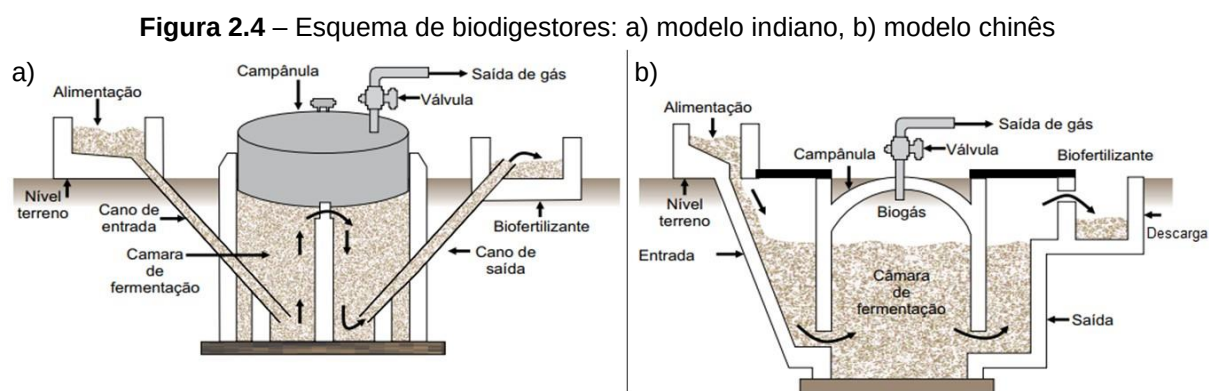
O produto principal da biodigestão é o biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbônico (CO_2). A composição química do biogás varia de acordo com o substrato a ser degradado e com as condições físico-químicas em que a biodigestão ocorre, como temperatura, presença de oxigênio e pH do meio. A composição volumétrica típica do biogás é cerca de 60% de CH_4 , 35% de CO_2 e 5% de outros gases: nitrogênio, amônia, gás sulfídrico, monóxido de carbono e oxigênio,

entre outros (WEREKO-BOBBY; HAGEN, 2000). O metano é o gás responsável pela capacidade do biogás de gerar energia.

Além do biogás, o lodo gerado na biodigestão também possui interesse econômico, dado que pode ser utilizado como biofertilizante agrícola. O biofertilizante gerado apresenta-se como um composto que pode ser utilizado em substituição aos fertilizantes minerais. A composição e as propriedades dos biofertilizantes são determinadas essencialmente pela biomassa utilizada no processo de biodigestão (FNR, 2010).

2.2.2 Biodigestor

A tecnologia utilizada para a produção de biogás por meio da biodigestão ocorre através do uso de biodigestores. Os primeiros biodigestores foram desenvolvidos pelos indianos e chineses, para o tratamento de dejetos de animais. Inicialmente, eram utilizados para a produção de biofertilizantes apenas e, só mais tarde, foi verificada a possibilidade de aproveitamento energético do biogás como combustível. Atualmente, há diferentes tipos de biodigestor, cada um adequando-se ao tipo de substrato e às condições técnico-econômicas da operação (FNR, 2010; COELHO *et al.*, 2020a). A Figura 2.4 ilustra os biodigestores, modelo chinês e indiano.



Fonte: PERLINGEIRO (2014)

O biodigestor modelo indiano possui uma parede central dividindo a câmara de fermentação em duas repartições, o que permite maior circulação do substrato por todo o biodigestor. Também possui uma campânula na parte superior, que pode se deslocar verticalmente conforme a produção de biogás, permitindo que o biodigestor opere com pressão constante (DEGANUTTI 2002). Já o biodigestor modelo chinês

possui uma câmara cilíndrica, geralmente de alvenaria, onde o teto funciona como reservatório do biogás (BENINCASA; ORTOLANI; LUCAS JUNIOR, 1990). Esses modelos de biodigestores possuem baixo nível tecnológico e não necessitam de controle de operação sofisticados, têm baixo custo e atendem a população de baixa renda. Outra característica é que, devido à sua construção subterrânea, possibilitam uma menor variação de temperatura (COELHO *et al.*, 2018).

Para produções em larga escala industrial há modelos mais sofisticados, como o CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), onde uma ampla gama de sensores faz a leitura dos parâmetros de produção e possibilita a automação e controle do processo. Esse tipo de biodigestor é constituído por uma câmara cilíndrica em posição vertical, com fundo de concreto e paredes de diversos materiais, entre eles, o aço inox. A parte superior é composta por uma membrana que permanece inflável durante o processo de biodigestão. Outra característica desse biodigestor é a presença de agitadores mecânicos para homogeneizar o substrato, o que promove maior produtividade de biogás (FNR, 2010). A Figura 2.5 ilustra o modelo de biodigestor CSTR.

Figura 2.5 – Biodigestor modelo CSTR em operação



Fonte: ZORG BIOGAS (2025)

2.2.3 Usos energéticos do biogás

Há diferentes possibilidades de utilização do biogás como produto energético. Fatores como demanda de mercado, infraestrutura disponível e objetivos do projeto, podem guiar para o seu uso final. Os usos mais comuns são: i) queima

direta para aproveitamento térmico; ii) geração de energia elétrica através de moto-geradores ou microturbinas a gás e iii) produção de biometano.

A queima direta do biogás ocorre para aproveitamento do calor na geração de vapor d'água em caldeiras. O vapor gerado tanto pode ser utilizado para aproveitamento da energia mecânica em processos industriais, como para mover uma turbina acoplada a um gerador de energia elétrica. No entanto, a queima direta exige uma demanda térmica próxima do local de geração do biogás, por esse motivo é uma utilização mais restrita (COELHO *et al.*, 2020a).

O biometano é o gás obtido através da purificação do biogás, onde são retirados, principalmente, umidade, CO₂ e H₂S. A vantagem do biometano sobre o biogás é que o seu poder calorífico é bem superior ao do biogás, enquanto que o biogás possui por volta de 60% de metano, no biometano a concentração é, geralmente, acima de 90%. Outro grande benefício é que o biometano pode substituir o gás natural (origem fóssil) em seus diversos usos, com a vantagem de ser uma fonte de energia renovável (COELHO *et al.*, 2018). Dentre os principais usos do biometano está a substituição de combustíveis fósseis em veículos e a injeção do gás em redes de gás natural (JOPPERT *et al.*, 2018). Uma informação importante é que no Brasil há dispositivos legais que regulam o uso do biometano em veículos e na injeção de redes de gás natural.

A geração de energia elétrica se consolidou como a principal utilização energética do biogás. Diferentes fatores contribuíram para isso, como a simplicidade do processo de geração elétrica, a possibilidade de injeção do excedente na rede elétrica interligada e a existência de modelos de negócios que incentivam a sua comercialização. Além disso, a energia elétrica permite o seu uso em locais afastados da sua produção.

A tecnologia mais utilizada para a geração de eletricidade é o uso de motores ciclo Otto acoplados a geradores elétricos. Nesse caso, a energia química do gás se converte em energia térmica no motor que, por sua vez, transfere a energia mecânica para o gerador que, finalmente, a converte em energia elétrica. Geralmente, são motores a gasolina adaptados para trabalharem com biogás. Um dado importante é que, quanto maior for a concentração de metano, menor será o consumo de biogás pelo motor, ou seja, a eficiência do sistema está atrelada à quantidade de metano presente no biogás gerado (ER-BR, 2025). A Figura 2.6 mostra um conjunto moto-gerador movido a biogás.

Figura 2.6 – Conjunto moto-gerador movido a biogás



Fonte: ER-BR (2025)

3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO BRASIL

O Brasil tem tradição no uso energético da lenha e do carvão vegetal de forma direta e na transformação da cana-de-açúcar e oleaginosas em etanol e biodiesel, respectivamente. Outra fonte de biomassa importante é o bagaço de cana em sistemas de cogeração de energia. Nesses sistemas são geradas energia térmica e eletromecânica dentro das próprias usinas e com a venda de energia elétrica excedente. Juntos, todos esses recursos energéticos contribuíram com mais de 27% da oferta interna de energia no país em 2023 (EPE, 2024a). No entanto, além destas, há outras alternativas de fontes de biomassa disponíveis para uso energético no país, como resíduos agroindustriais e pecuários, lodo de estações de tratamento de esgoto e resíduos sólidos urbanos, que podem ser utilizados para a produção de biogás, por exemplo.

Basicamente, a história do biogás começou no Brasil na década de 1970, quando o primeiro biodigestor modelo chinês foi instalado na Granja do Torto, em Brasília. Isso se deu quando o Governo incentivou o seu uso como forma de reduzir a dependência do petróleo, após o segundo choque de seu preço. No entanto, seguido de uma baixa do preço do petróleo e de problemas técnicos de operação, resultou no abandono temporário do uso de biodigestores (MARIANI, 2018).

Nos últimos anos, o uso de biodigestores para a produção de biogás voltou a ser fortemente discutido no Brasil como meio de diversificação das fontes de energia e desenvolvimento de uma nova cadeia de produção na economia (ABIOGÁS, 2015). Essa retomada se refletiu na atenção dada por empresas e centros de pesquisa ao biogás e na proposição de políticas públicas que incentivem o reaproveitamento energético dos resíduos e a comercialização da energia gerada.

Basicamente, os grandes avanços legais tiveram início em 2010 com a sanção da Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual inclui o aproveitamento energético como destinação ambientalmente adequada aos resíduos. Outra política federal importante é o Decreto nº 11.003/2022, que institui a estratégia federal de incentivo ao uso sustentável de biogás e biometano. Além destas, resoluções como a Resolução ANP nº 886/2022 e Resolução nº 734/2018 que estabeleceram, respectivamente, a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano e os requisitos para a produção e operação da instalação produtora de biocombustíveis, como o biometano.

3.1 FONTES PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O conhecimento da geração atual de biogás e de sua capacidade produtiva são estratégicos para subsidiar o Estado na elaboração de políticas públicas que incentivem a sua utilização e nortear investimentos e modelos de negócio nesse setor. Portanto, os benefícios advindos do biogás, como a diversificação da matriz energética e os ganhos ambientais, mencionados anteriormente, têm como base um diagnóstico preciso das potencialidades da região de estudo.

Em 2020, segundo a Associação Brasileira do Biogás e do Biometano (ABiogás) (ABIOGÁS, 2020), o Brasil tem o potencial de produzir 84,6 bilhões Nm^3/ano^1 de biogás, o que equivale a 44,7 bilhões Nm^3/ano de biometano. Em termos de energia elétrica, esse valor corresponde a 173.762,41 GWh/ano, o que seria suficiente para suprir todo o consumo residencial de energia elétrica do Brasil em 2023 (EPE, 2024a). Essas estimativas consideraram o potencial técnico de produção, ou seja, foram consideradas produções inferiores ao potencial teórico em função de perdas no processo e limites de eficiência na conversão.

Em se tratando de fontes potenciais para a geração de biogás, estas podem ser agrupadas em três grandes grupos: i) o setor sucroenergético, isolado de outros produtos agrícolas devido a sua importância; ii) o setor do agronegócio e iii) o setor de saneamento. Para cada um destes setores, foi estimada a capacidade de produção de biogás, considerando as particularidades e potencialidades de cada um.

A Tabela 3.1 mostra que o setor sucroenergético apresenta o maior potencial de produção de biogás, correspondendo a 47% da capacidade total. Importante ressaltar que nessas estimativas o bagaço de cana, tradicionalmente usado em caldeiras para a cogeração de calor e eletricidade, está sendo considerado para a produção de biogás. Outra fonte com grande capacidade de geração é o setor do agronegócio de origem animal, responsável por cerca de 31%.

¹ Normal Metro Cúbico (Nm^3), corresponde à quantidade de gás que ocupa um metro cúbico em condições normais de temperatura e pressão, estabelecidas como condições padrões.

Tabela 3.1 – Potencial brasileiro de biogás

Setor	Origem	Volume de biogás (Bilhões Nm ³ /ano)
Sucroenergético	-	39,76
Agronegócio	Animal	26,14
	Vegetal	12,25
Saneamento	-	6,45
Total		84,60

Fonte: adaptado de ABiogás (2020)

3.1.1 Setor sucroenergético

O setor sucroenergético, grande responsável pela produção de açúcar e álcool, tem destaque no cenário nacional e internacional, já que, segundo dados da FAO (FAO, 2023), a produção brasileira de cana-de-açúcar corresponde a mais de 40% da produção mundial. Diante dessa capacidade, é gerada grande quantidade de resíduos como o bagaço de cana, a palha, a vinhaça e a torta de filtro. Tradicionalmente, o bagaço já é usado em caldeiras para a geração combinada de calor e eletricidade, onde o excedente de energia elétrica geralmente é comercializado. Em relação aos outros resíduos, estudos têm avaliado a viabilidade econômica da geração de biogás para aumentar o excedente energético nas usinas (JOPPERT, 2019).

3.1.2 Setor do agronegócio

O setor do agronegócio é uma das principais atividades econômicas do país, sendo responsável por cerca de 20% do PIB brasileiro (CEPEA, 2024). Devido a sua destacada produção vegetal e animal, grande volume de resíduos sólidos e dejetos são gerados anualmente. Caso não seja fornecido um tratamento adequado para esse material, há o risco de contaminação ambiental. Além disso, ocorrendo decomposição do resíduo orgânico a céu aberto, há a liberação de metano para a atmosfera, que por sua vez, possui potencial de aquecimento global 28 vezes o do CO₂ (MYHRE *et al.*, 2013). Portanto, uma atenção especial é necessária no que tange ao uso energético dos resíduos do setor agropecuário.

3.1.3 Setor de saneamento

O saneamento básico é o conjunto de serviços públicos de abastecimento de água potável, de esgotamento sanitário, de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos (RSU) e de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas (ANA, 2025). Em relação à capacidade de produção de biogás, os materiais de interesse são o esgotamento sanitário e a fração orgânica do RSU.

O alto consumo de bens nos dias de hoje, tem causado grande preocupação em relação à geração e ao acúmulo de resíduos sólidos nas áreas urbanas. Em muitos casos, esses resíduos são lançados no meio ambiente sem o devido tratamento. De acordo com a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA) (ABREMA, 2024), em 2023 foram geradas 81 milhões de toneladas de RSU. Desse montante, 93,4% foram coletados via serviços públicos ou através de coleta informal. No entanto, quando se considera a destinação do resíduo, 35% de todo esse material ainda é despejado de forma inadequada. Essa limitação na gestão do RSU pode provocar diversos problemas, como a contaminação e poluição ambiental, a proliferação de animais vetores de diversas doenças, além de diversos outros problemas à população.

No meio rural também há grandes preocupações, pois boa parte dos resíduos vegetais e dejetos pecuários é descartada de forma incorreta, causando contaminação do solo, da água e do ar. Portanto, são necessárias leis para garantir que os diferentes setores tratem seus resíduos adequadamente quando não for possível evitar seu descarte. Nesse contexto, as leis no Brasil relacionadas a resíduos sólidos têm sido revisadas para proteger o meio ambiente, a saúde pública e minimizar quaisquer consequências adversas.

A PNRS, política estabelecida pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, é a principal lei aplicável aos resíduos sólidos, tendo a sustentabilidade, a proteção da saúde pública e a qualidade ambiental como alguns dos seus princípios e objetivos. Em seu 9º artigo, a PNRS estabelece que a gestão e o gerenciamento de RSU devem respeitar uma ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Nesse sentido, o aproveitamento energético da fração orgânica dos resíduos, através do biogás, mostra-se não somente como uma alternativa de tratamento, sobretudo, uma forma de produção de energia limpa.

Ainda no setor de saneamento, outro importante desafio está relacionado com a coleta e tratamento do esgoto sanitário no país. O esgoto sanitário é constituído pelo esgoto doméstico (água de higienização e necessidades fisiológicas), industrial (efluente de processo industrial) e água de infiltração (água do subsolo que penetra nas canalizações e contribuição pluvial) (ABNT, 1986).

No Brasil, apenas 52,2% do esgoto gerado é tratado, chegando a apenas 19,8% na região Norte (SNIS, 2022). A falta de tratamento do esgoto contribui para o aumento da poluição e da contaminação de recursos hídricos. Além da qualidade da água, também compromete a saúde da população com a disseminação de doenças de veiculação hídrica.

Há diversas técnicas de tratamento de esgoto, que são definidas de acordo com a quantidade, a origem e as características físico-químicas do esgoto a ser tratado, além das características do corpo receptor e da legislação vigente (ANA, 2017). Além disso, uma das etapas é o tratamento biológico, podendo ocorrer a degradação da matéria orgânica de forma aeróbia ou anaeróbia. Caso a degradação ocorra na ausência de oxigênio (degradação anaeróbia), há a geração de biogás através do uso de biodigestores.

Um dos grandes gargalos para aumentar a coleta e o tratamento de esgoto é a falta de viabilidade econômica da instalação das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e os altos custos operacionais com a energia elétrica nas atividades operacionais nessas estações (COELHO *et al.*, 2020a; SNIS, 2022). Nesse contexto, o aproveitamento energético do biogás, produzido a partir do tratamento do esgoto, pode ser uma opção adicional de geração de receita nas ETEs, contribuindo para sua viabilização econômica.

3.2 PRODUÇÃO ATUAL DE BIOGÁS

O levantamento da produção e utilização atual do biogás é importante para identificar em que estágio de desenvolvimento o setor se encontra e, desta forma, visualizar oportunidades, elaborar novos planos de negócios e identificar possíveis entraves que prejudiquem a sua expansão.

O biogás vem cada vez mais ganhando espaço no cenário energético nacional. De 2010 para 2023, a contribuição do biogás passou de 14 mil toneladas

equivalentes de petróleo² (tep) para 438 mil tep, ou seja, um aumento de 31 vezes em treze anos (EPE, 2024a). Fundamentado nos avanços das políticas públicas e na demanda por descarbonização de processos, as perspectivas do biogás se mantêm positivas para os próximos anos (EPE, 2024c). Nesse sentido, esta seção busca apresentar um diagnóstico do biogás no Brasil.

3.2.1 Geração de energia elétrica

As plantas de biogás cadastradas na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que geram eletricidade, podem ser divididas em plantas de micro e minigeração distribuída e plantas detentoras de registro ou autorização pela agência.

As micro e mini plantas caracterizam-se pelo pequeno porte, com capacidade máxima de geração instalada de 5 MW. Elas fazem parte do sistema de compensação de energia, onde é permitida a geração de créditos para abatimento no consumo. Nesse sistema, o consumidor injeta na rede da distribuidora local, o excedente de energia elétrica gerado na sua propriedade para, posteriormente, ser compensado com abatimentos no seu consumo (ANEEL, 2021). Sob esse sistema, havia 131 MW de potência instalada à biogás em 2023, distribuídos em 508 plantas e utilizando diferentes fontes de biomassa - resíduos animais, agroindustriais, urbanos e florestais (ANEEL, 2025a).

Em um outro grupo estão as plantas em operação que possuem registro e aquelas em fase de registro junto à ANEEL. Essas plantas são de maior porte e não são enquadradas no sistema de compensação de energia. Em 2023 havia 51 plantas nessa situação, que juntas totalizavam 233 MW de capacidade fiscalizada. A maior parte dessa capacidade, correspondente a 193 MW, usa resíduos sólidos para a geração de biogás (ANEEL, 2025b).

Além das plantas de biogás cadastradas em órgãos oficiais do Governo, há um levantamento próprio realizado pelo Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás) (CIBIOGÁS, 2024) em que adicionalmente a essas, também são contabilizadas aquelas plantas que têm operação isolada. Nesse levantamento, referente ao ano de 2023, o CIBiogás contabilizou 1.184 unidades de geração elétrica. Para a geração de eletricidade, essas plantas produzem 2.359 milhões Nm³/dia de biogás.

² Quantidade de calor produzida pela combustão de uma tonelada de petróleo.

3.2.2 Produção de biometano

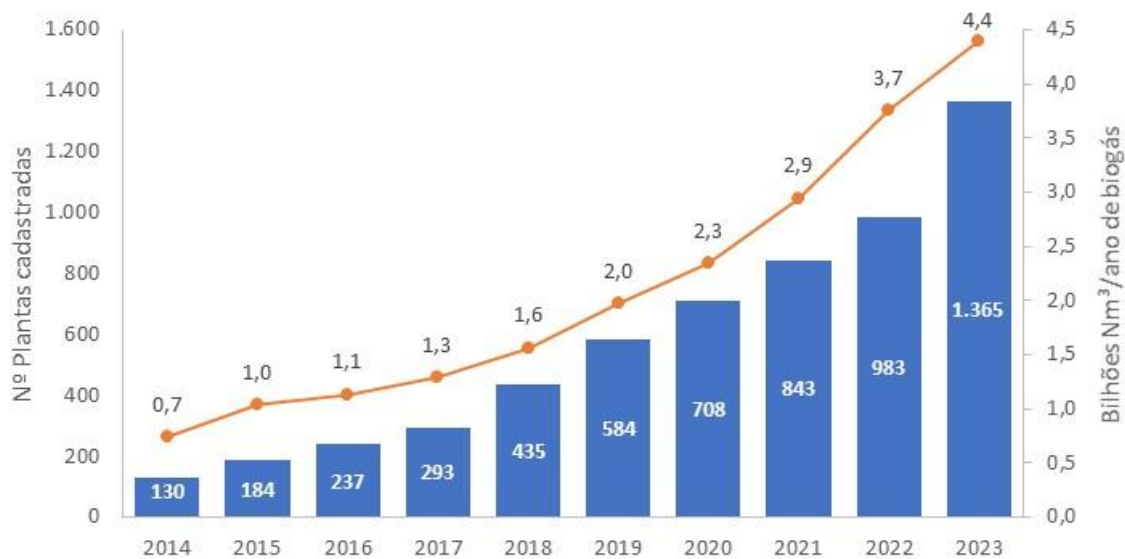
Ao final de 2023, haviam seis plantas com autorização junto à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil (ANP), para a produção de biometano (ANP, 2025). Em conjunto, essas plantas possuem uma capacidade total de produção de 417 milhões Nm^3/dia . Dessas seis plantas, cinco utilizam RSU como matéria-prima na geração de biometano, o que corresponde a 93% da capacidade total das plantas. Além dessas, na mesma data, haviam 24 plantas em processo de autorização junto à ANP que, caso sejam efetivadas, aumentariam em 1.137.956 Nm^3/dia a capacidade nacional de produção de biometano.

Além das plantas cadastradas na ANP, o CIBiogás (CIBIOGÁS, 2024) contabilizou, em 2023, 50 plantas destinadas a produção de biometano no país, com uma produção total de 580 milhões Nm^3/ano de biometano. Além das plantas de geração elétrica e de biometano, o centro também contabilizou outras 128 plantas que utilizam o biogás como fonte de energia térmica e seis para energia mecânica. Para esses dois usos, a produção de biogás foi de 174 milhões Nm^3/ano de biogás.

3.2.3 Plantas de biogás no Brasil

Segundo dados do CIBiogás (CIBIOGÁS, 2024), em 2023, haviam 1.365 plantas de biogás em seu cadastro, com uma capacidade já instalada de 4,4 bilhões Nm^3/ano de biogás. Ao comparar essa capacidade com o potencial de produção do Brasil (84,6 bilhões Nm^3/ano), verifica-se que somente 5% do potencial de produção está sendo aproveitado e que há grande oportunidade de expansão e investimentos no setor de biogás.

Por outro lado, o número de plantas e a capacidade de produção de biogás vem aumentando de forma expressiva ao longo dos últimos anos. Como pode ser visto na Figura 3.1, em dez anos, a produção de biogás aumentou quase seis vezes e o número de plantas cresceu dez vezes nesse período. Como discutido anteriormente, isso é consequência de diferentes fatores, como uma demanda por descarbonização nos diversos setores e dos incentivos e políticas públicas adotados pelos entes públicos em anos recentes.

Figura 3.1 – Número de plantas e capacidade instalada

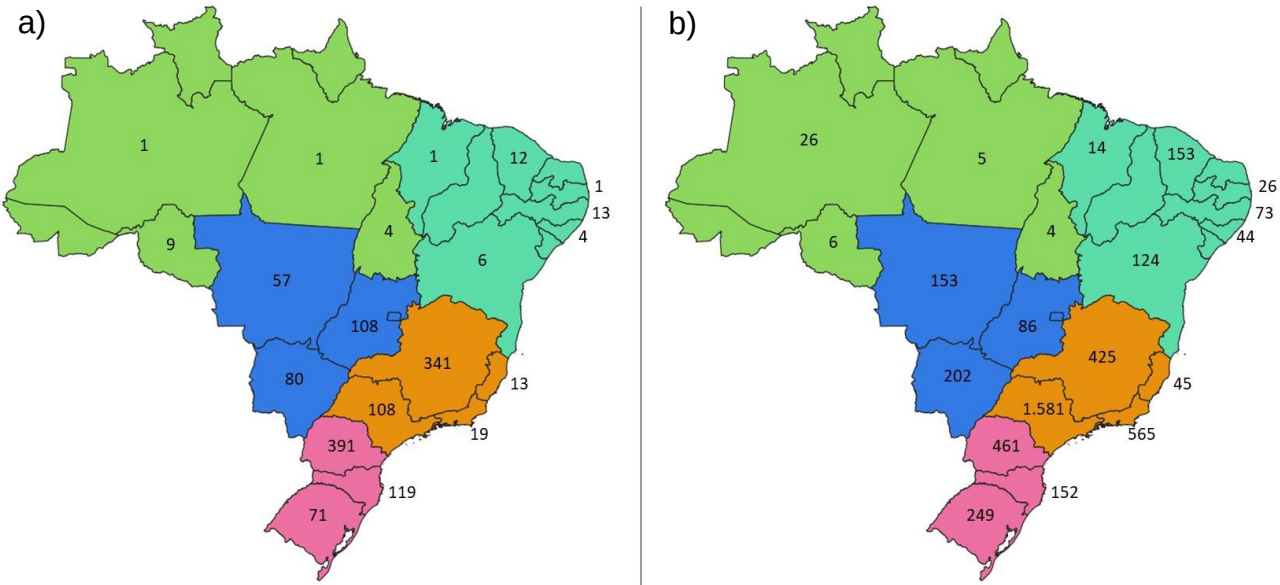
Fonte: adaptado de CIBiogás (2024)

Uma informação importante é o levantamento de como as plantas de biogás estão distribuídas espacialmente em uma região de estudo. Esse conhecimento é relevante em definições estratégicas, como: ampliação e/ou implantação de novas unidades para atendimento de novas demandas, desenho da cadeia de suprimento e escoamento das plantas, investigações sobre a vocação produtiva da região e pesquisas sobre oportunidades de novos negócios.

A Figura 3.2 ilustra a distribuição espacial das plantas já em operação e a capacidade de biogás instalada no território nacional, em nível de estado. Observa-se que as plantas estão concentradas majoritariamente nas regiões Sul e Sudeste. Do total de 1.359 plantas, as 1.062 plantas nos estados dessas regiões, correspondem a aproximadamente 78%. Ainda, do total de 4,4 bilhões Nm^3/ano , os 3,5 bilhões Nm^3/ano nos estados do Sul e Sudeste, correspondem a aproximadamente 79%. A região com o menor número de plantas é a região Norte, onde as 15 plantas identificadas possuem juntas uma capacidade de produção de apenas 41 milhões Nm^3/ano de biogás.

O estado do Paraná abriga o maior número de plantas de biogás, correspondendo a quase 29% das plantas do país. Isto se deve a alta vocação do estado do Paraná para a agropecuária, sendo o maior produtor de proteína animal do Brasil. Aliado a isso, o Estado vem adotando um conjunto de incentivos fiscais para a produção de biogás (IBGE, 2024a; PARANÁ, 2024).

Figura 3.2 – Distribuição do biogás por estado: a) número de plantas em operação e b) capacidade instalada de produção milhões Nm³/ano



Fonte: adaptado de CIBiogás (2024)

4 PROBLEMAS LOGÍSTICOS EM PLANTAS DE BIOGÁS

De acordo com o dicionário Aurélio, a palavra logística tem origem no francês, *logistique*, que por sua vez, deriva do verbo *loger* (alojar, abrigar). Originalmente, este termo se referia ao transporte, abastecimento e alojamento voltado para questões militares, uma vez que se referia à logística de suprimentos ou tropas para o momento de uma guerra (COSTA; DIAS; GODINHO, 2010). Atualmente, o termo abrange uma conceituação mais ampla, onde também incorpora atividades, como: transporte, localização, compras, serviço ao cliente, previsão da procura, retorno de materiais (logística reversa), etc. (GRANDO, 2017).

De acordo com Novaes (NOVAES, 2007), a definição do *Council of Supply Chain Management Professionals* é: “Logística é o processo de planejar, implementar e controlar, de maneira eficiente, o fluxo e a armazenagem de produtos, bem como os serviços e informações associados, cobrindo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender aos requisitos do consumidor.” Neste trabalho, a logística está relacionada, principalmente, à localização das plantas de biogás, ao suprimento de biomassa das plantas e à entrega da energia gerada aos destinos.

Para uma planta de biogás obter viabilidade técnico-econômica, é preponderante que fatores importantes sejam observados, tais como: disponibilidade de matéria-prima, estudo técnico da construção da unidade de biogás, atendimento a todos os requisitos legais, localização adequada da planta e destino da energia gerada. De certa forma, esses fatores correlacionam entre si em maior ou menor grau. E, no campo da logística, a definição das localizações das plantas e o transporte de biomassa são problemas de grande relevância.

Devido às características intrínsecas da biomassa, como a baixa densidade aparente³ e o menor poder calorífico em relação aos combustíveis fósseis, um volume maior de matéria-prima precisa ser transportado, armazenado e movimentado. Desta forma, uma porção considerável dos custos envolvidos na produção de bioenergia têm origem em processos logísticos (ALLEN *et al.*, 1998). Neste contexto, é de grande importância que as plantas sejam localizadas de forma estratégica e que o fornecimento de biomassa seja conduzido de forma eficiente para minimizar os custos logísticos e, conseqüentemente, o fornecimento final de energia.

³ Relação entre a massa de uma substância e o seu volume total, incluindo os espaços vazios entre as partículas.

4.1 LOCALIZAÇÃO DAS PLANTAS DE BIOGÁS

O problema de localização de plantas de biogás pode ser considerado como um problema de transbordo (TP, do inglês *Transshipment Problem*), em que as plantas atuam como o nó intermediário. Os problemas de transbordo são problemas de transporte em que um produto deve passar por nós intermediários antes de chegar a nós de destino específicos. Nesse tipo de problema, o que é transportado de cada nó intermediário para os nós de destino não pode ultrapassar a quantidade de produto que chega dos nós produtores aos nós intermediários (ARENALES *et al.*, 2011). Para a solução do problema de transbordo, deve-se buscar minimizar os custos de designação dos nós produtores aos nós intermediários e, dos nós intermediários aos nós de destino.

No caso particular das plantas de biogás, a biomassa é transportada das fontes (nós produtores) para as plantas de biogás (nós intermediários), onde é convertida em uma quantidade equivalente de energia. Em seguida, a energia gerada é encaminhada para os destinos finais (nós de destino). Busca-se então, a minimização dos custos de envio de biomassa e energia, diante das restrições do problema. Essa abordagem parte do conhecimento prévio do conjunto de plantas que podem ser abertas e de suas localizações. Porém, um estudo anterior deve ser realizado para fornecer ao problema os melhores locais candidatos para a instalação das plantas.

Apesar dos benefícios ao meio ambiente, decorrentes da substituição dos combustíveis fósseis pelo biogás, as atividades que ocorrem na cadeia de suprimento de biomassa podem ainda gerar diferentes impactos ambientais. Dentre esses impactos, estão incluídos a geração de ruído e o tráfego de caminhões pesados, as emissões desses veículos e o impacto visual aos moradores locais. Esses impactos têm um peso importante na aceitabilidade de um futuro projeto industrial e podem influenciar de maneira significativa nas decisões sobre a localização da planta. Portanto, é fundamental que os benefícios do uso da biomassa superem os seus impactos ambientais e sociais. Nesse sentido, nem sempre as localizações mais econômicas são as melhores opções do ponto de vista ambiental e da população local.

Diante das considerações anteriores, observa-se que a localização de plantas de biogás é, por natureza, um problema complexo, em que os tomadores de decisão devem lidar com decisões conflitantes e, por vezes, de natureza distinta.

Buscar a instalação de uma planta mais próxima do consumidor da energia gerada pode ser um equívoco se esse consumidor fica compreendido em um perímetro urbano. Nesse caso, há um conflito entre a redução da distância planta-consumidor e a inconveniência de proximidade com a área urbana. Além disso, essas duas questões antagônicas não são do mesmo tipo, uma é quantitativa e a outra qualitativa.

Para lidar com problemas como esses, propomos no Capítulo 5 uma metodologia para classificar as áreas quanto a aptidão para a instalação de plantas de biogás. Também apresentamos um modelo matemático para determinar a localização ótima das plantas em locais com alta aptidão.

4.2 TRANSPORTE DE BIOMASSA NAS PLANTAS DE BIOGÁS

O transporte é um elemento importante no fornecimento de biomassa para as plantas de biogás, ligando todas as atividades que precisam ocorrer entre os pontos de fornecimento de matéria-prima e de produção de energia. Além disso, o raio de captação de biomassa, ou seja, a distância de transporte na qual a biomassa deverá ser movida, depende de muitos fatores. Esses fatores incluem, principalmente, a disponibilidade de matéria-prima ao redor da planta, o tamanho da planta e a sua capacidade de estoque, a tecnologia de conversão energética e o tipo de veículo utilizado na coleta.

Existem diferentes modelos de veículos que podem ser usados para coletar e transportar biomassa para as plantas de biogás. A opção por um determinado modelo ou outro, faz-se em função, principalmente, dos custos, do tipo e qualidade da biomassa coletada e da capacidade de trafegabilidade das estradas. Outro ponto importante na seleção é a capacidade de carga dos veículos que, por sua vez, determina o número de coletas em cada viagem. A Figura 4.1 apresenta um caminhão com capacidade de carga de 13 toneladas, equipado com reservatório metálico e bomba de sucção, usado para coleta de resíduo animal para biodigestão.

Em um estudo sobre a viabilidade da coleta de resíduos suínos para geração de bioenergia no município de Toledo - PR, Pereira (PEREIRA, 2009) considerou a utilização de caminhões com capacidades de 13 e 24 toneladas. A autora conclui que o veículo com capacidade de 24 toneladas apresentou menor custo por quilômetro rodado e gerou rotas mais rápidas com a divisão da coleta em setores.

Figura 4.1 – Caminhão usado para coleta de resíduo animal para biodigestão



Fonte: Pereira (2009)

Além da seleção dos equipamentos de coleta e transporte de biomassa, a definição de rotas eficientes tem sido tema de vários trabalhos na literatura, em que diferentes abordagens têm sido propostas para otimizar a utilização de recursos do transporte (TOTH; VIGO, 2001, 2014). As seções seguintes apresentam conceitos relevantes sobre o problema de roteamento de veículos.

4.2.1 Roteamento de veículos

O problema de roteamento de veículos (VRP, do inglês *Vehicle Routing Problem*) busca determinar um conjunto ideal de rotas a serem executadas por uma frota de veículos para atender a um determinado conjunto de clientes, sendo um dos problemas de otimização combinatória mais importantes e estudados na literatura. A motivação para estudar esses problemas está relacionada à sua relevância prática e considerável dificuldade de resolução (TOTH; VIGO, 2014). Em um VRP, geralmente, é considerada a distribuição de bens entre depósitos e clientes (usuários finais). As aplicações típicas envolvem coleta de resíduos urbanos, roteamento de ônibus escolares, sistemas de transporte público, entrega de comida, etc.

Segundo Novaes (2007), um problema de roteamento é composto por três componentes principais: decisões, objetivos e restrições. As decisões dizem respeito à alocação de um grupo de clientes, que devem ser visitados, a um conjunto de veículos, envolvendo também a programação e o sequenciamento das visitas. Os objetivos estão relacionados com o atendimento de alto nível aos clientes, atrelado à manutenção dos custos mais baixos quanto possível. As restrições referem-se às

exigências de cumprir os compromissos e completar as rotas com os recursos disponíveis, respeitando os limites de tempo, restrições de trânsito, tamanho máximo dos veículos, etc.

O VRP foi introduzido, pela primeira vez, por Dantzig e Ramser (1959), em uma aplicação real que considerava a entrega de combustível em postos de gasolina. Em seu artigo, os autores propuseram o primeiro modelo de programação matemática e uma abordagem algorítmica para a solução do problema. Poucos anos depois, Clarke e Wright (1964) apresentaram uma heurística que melhorou a abordagem de Dantzig e Ramser. A partir desses trabalhos iniciais, muitos outros modelos matemáticos e algoritmos exatos e heurísticas surgiram para obter soluções exatas e aproximadas das diferentes versões do VRP.

Um caso particular do VRP ocorre quando somente um único veículo está disponível no depósito e nenhuma outra restrição adicional é imposta. Nesse caso, esse problema é chamado de Problema do Caixeiro Viajante (TSP, do inglês *Traveling Salesman Problem*). Muitas outras variantes do VRP foram surgindo através da inclusão de novas restrições ao problema. A seguir, serão descritas as variantes mais estudadas do VRP em suas versões mais básicas. Formulações de programação matemática desses problemas podem ser encontradas no abrangente trabalho de Toth e Vigo (2014).

4.2.1.1 Variantes do VRP

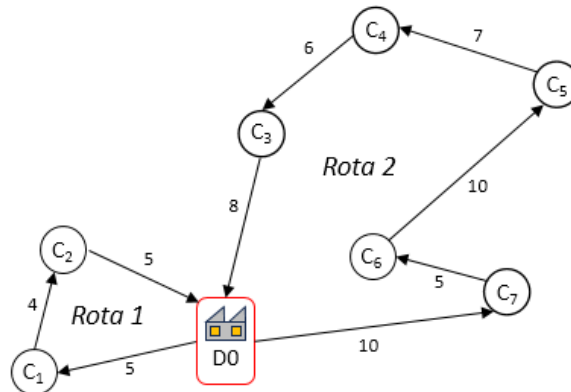
- a) Problema de Roteamento de Veículos Capacitados (CVRP, do inglês *Capacitated Vehicle Routing Problem*):

O CVRP é a versão básica do VRP, em que todas as demandas e entregas dos clientes são determinísticas e conhecidas antecipadamente. Os veículos são idênticos e baseados em um único depósito, e somente as restrições de capacidade dos veículos são impostas. O objetivo é minimizar o custo total (distância ou tempo de viagem) para atender todos os clientes.

O CVRP pode ser descrito como um problema da teoria dos grafos. Seja $G = (V, A)$ um grafo, onde os elementos do conjunto V são chamados de nós (ou vértices) e A é o conjunto de pares de nós, cujos elementos são chamados de arestas (ou arcos). Os arcos representam os trechos do caminho e os vértices correspondem às localizações dos depósitos e dos clientes. Um custo c_{ij} , é

associado a cada arco $(i, j) \in A$, e representa o custo da viagem para ir do vértice i ao vértice j . Se o grafo é não orientado, ou seja, ambos os sentidos podem ser percorridos nos arcos, então $(c_{ij} = c_{ji}) \forall (i, j) \in A$. Nesse caso, o problema é chamado de simétrico, caso contrário, assimétrico. A Figura 4.2 mostra a representação gráfica de uma solução para o CVRP constituído de sete clientes $(C_i, i = 1, \dots, 7)$, um depósito (D_0) , dois veículos e os custos (c_{ij}) indicados nas arestas.

Figura 4.2 – Representação gráfica de uma solução para o CVRP



Fonte: elaborado pelo autor

b) VRP com Restrição de Distância (DVRP, do inglês *Distance-Constrained VRP*)

O DVRP é uma variação do CVRP onde, para cada rota, a restrição de capacidade dos veículos é substituída por uma restrição de distância (ou tempo) máxima. Uma distância t_{ij} é associada a cada arco $(i, j) \in A$ e a distância total dos arcos de cada rota não pode exceder a distância máxima de rota T . Porém, quando o tamanho do arco representa tempo de viagem, um tempo de serviço, s_i , deve ser associado a cada cliente i , indicando o período de tempo que cada veículo deve ficar parado no local.

c) VRP com Janela de Tempo (VRPTW, do inglês *VRP with Time Windows*)

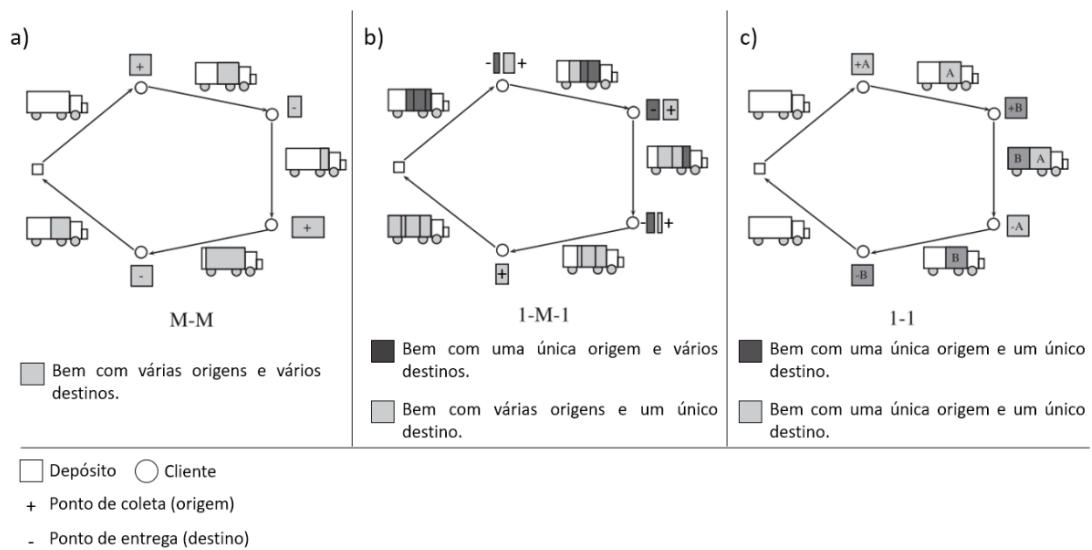
O VRPTW é uma extensão do CVRP em que as restrições de capacidade dos veículos são impostas e cada cliente i é associado a um intervalo de tempo $[a_i, b_i]$, chamado de janela de tempo. São fornecidos o instante em que o veículo deixa o depósito, o tempo de viagem t_{ij} , para cada arco $(i, j) \in A$ e um tempo adicional de serviço s_i , para cada cliente i . O atendimento de cada cliente deve

começar dentro da janela de tempo associada e o veículo deve ficar parado no cliente por um tempo s_i . Porém, caso o veículo chegue antecipadamente ao local do cliente i , o veículo geralmente tem permissão para esperar até o tempo a_i , ou seja, até que o serviço possa começar. Normalmente, é considerado que todos os veículos deixam o depósito no tempo zero.

d) VRP com Coleta e Entrega (VRPPD, do inglês VRP *with Pickup and Delivery*)

No VRPPD, bens devem ser transportados de diferentes origens para diferentes destinos. Esses problemas podem ser representados em um grafo, onde os vértices representam a origem ou destino dos bens que devem ser transportados. Cada cliente está associado a duas quantidades d_i e p_i , que representam a quantidade do bem a ser entregue e coletado no cliente i , respectivamente. Para cada cliente i , O_i representa o vértice que é a origem da demanda de entrega, e D_i representa o vértice que é o destino da demanda de coleta. O VRPPD pode ser classificado em três categorias, de acordo com o tipo de demanda e estrutura da rota considerada. Em problemas *many-to-many* (M-M), cada bem pode ter múltiplas origens e destinos e cada cliente pode ser a origem ou destino de vários bens (Figura 4.3a). Nos problemas *one-to-many-to-one* (1-M-1) alguns bens devem ser entregues a partir de um único depósito para muitos clientes e outros bens devem ser coletados a partir de vários clientes e transportados de volta para o depósito (Figura 4.3b). Finalmente, nos problemas *one-to-one* (1-1), cada bem tem uma única origem e um único destino entre os quais ele deve ser transportado (Figura 4.3c).

Figura 4.3 – Três tipos de VRPPD



Fonte: adaptado de Toth e Vigo (2014)

Conforme mencionado anteriormente, a partir dos trabalhos pioneiros de Dantzig e Ramser e também de Clarke e Wright, muitos outros algoritmos exatos e heurísticas surgiram nas últimas décadas para resolver o problema de roteamento de veículos. Aliado a isso, também ocorreu grande progresso no desempenho das ferramentas computacionais. Apesar de todo esse avanço, Toth e Vigo (2014), em sua completa revisão sobre VRP, afirmam que o problema de roteamento de veículos está longe de ser resolvido de forma satisfatória. Isso sinaliza a necessidade da manutenção de pesquisas científicas sobre esse tema.

Com relação aos métodos exatos para solução dos VRP, as abordagens mais clássicas são os algoritmos: *branch-and-bound* e *branch-and-cut*. Porém, técnicas mais recentes têm se mostrado eficientes, como o algoritmo *branch-and-cut-and-price* (BCP), que combina *branch-and-cut* com a geração de colunas (*column generation*) (FUKASAWA *et al.*, 2006). A seguir será apresentada uma breve explanação sobre os métodos exatos clássicos, *branch-and-bound* e *branch-and-cut*.

4.2.1.2 Métodos exatos para solução do VRP

a) Algoritmos *Branch-and-bound*

O algoritmo *branch-and-bound* é um método usado para resolver problemas de otimização através da enumeração inteligente das soluções

candidatas à solução ótima do problema. Para reduzir o espaço de busca da solução, o método separa o problema original em problemas menores de mais fácil resolução (*branch*) e avalia as suas soluções através dos limites calculados ao longo da enumeração (*bound*). Desta forma, somente uma parte das soluções factíveis é examinada. O primeiro algoritmo *branch-and-bound* para resolução de problemas do tipo CVRP foi proposto por Christofides e Eilon (1969), baseado no trabalho de Little *et al.* (1963) para solução do TSP. Maiores detalhes sobre o uso e funcionamento dos algoritmos *branch-and-bound* na solução de problemas CVRP podem ser encontrados nos trabalhos de Toth e Vigo (2014) e Laporte e Nobert (1987).

b) Algoritmos *Branch-and-cut*

Em um problema de otimização inteira, uma das formas de se reduzir o espaço de soluções e aproximar-se da sua envoltória convexa (*convex hull*), é através da técnica de planos de corte. Os planos de corte representam desigualdades válidas que são adicionadas ao problema original e reduzem a região de factibilidade do problema. O procedimento geral para construção de desigualdades válidas é conhecido como procedimento de Chvátal-Gomory (ARENALES *et al.*, 2011). O algoritmo *branch-and-cut* é uma combinação do *branch-and-bound* com os planos de corte, no qual a aplicação simultânea dessas duas técnicas melhora o desempenho na busca da solução ótima. O trabalho pioneiro no uso do *branch-and-cut* para resolver um problema do tipo CVRP, foi proposto por Laporte *et al.* (1985). Nesse trabalho, os autores relaxaram as restrições de capacidade e de integralidade das variáveis e, em seguida, aplicaram os cortes de Gomory no problema relaxado.

Nos últimos anos, muitos trabalhos têm apresentado uma variedade de métodos sofisticados para a solução dos problemas de roteamento através de uma abordagem exata. No entanto, apesar dos grandes avanços, as instâncias que podem ser resolvidas para a otimalidade ainda são relativamente pequenas, ou seja, o número máximo de clientes em cada problema é reduzido. Dependendo do contexto, isso pode ser um problema, já que em aplicações do mundo real as instâncias, geralmente, são grandes e precisam ser resolvidas em curto espaço de tempo (TOTH; VIGO, 2014). Diante disso, uma outra abordagem utilizada, para encontrar soluções aproximadas para esses problemas, são as heurísticas.

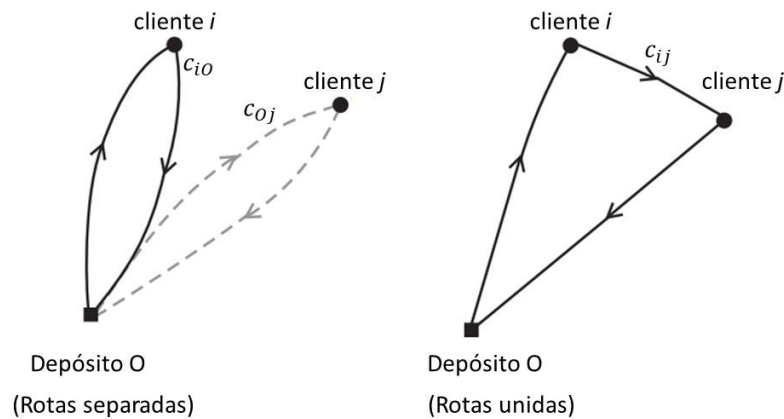
4.2.1.3 Métodos aproximados para solução do VRP

As heurísticas podem ser classificadas em duas classes principais, as heurísticas clássicas e as metaheurísticas. As heurísticas clássicas realizam uma exploração relativamente limitada do espaço de busca e, geralmente, produzem soluções de boa qualidade, em um tempo computacional reduzido. Outra vantagem é que a maioria delas pode ser facilmente adaptada para diversos tipos de restrições encontradas em aplicações do mundo real. As metaheurísticas, por outro lado, enfatizam em realizar uma exploração mais profunda em regiões promissoras do espaço de solução. Geralmente, combinam pesquisa de vizinhança, estruturas de memória e recombinação de soluções (TOTH; VIGO, 2001). As soluções produzidas pelas metaheurísticas são, em geral, muito melhores do que aquelas obtidas pelas heurísticas clássicas. Em seguida, serão apresentados alguns conceitos de algumas heurísticas clássicas e metaheurísticas usadas em problemas de roteamento de veículos. Para informações mais detalhadas e aplicações de outras heurísticas e metaheurísticas em problemas de roteamento, veja o trabalho de Toth e Vigo (2001).

a) Heurística de Clarke e Wright

O algoritmo de Clarke e Wright é a heurística mais conhecida para o problema de roteamento de veículos, aparecendo embutida em muitos *softwares* de roteamento. A heurística tem como objetivo gerar rotas que respeitem as restrições de capacidade e tempo, mas ao mesmo tempo, busca minimizar a distância total percorrida pelos veículos (NOVAES, 2007; TOTH; VIGO, 2001). A heurística baseia-se no conceito de *ganho* (*savings*), partindo de uma solução ruim para outra mais econômica.

Considere a situação em que um veículo sai do depósito O , para atender um único cliente i , e retorna para o depósito O , outro veículo sai do depósito O , para atender agora um único cliente j , e retorna para o depósito O . Caso a união dessas duas rotas seja factível, um ganho s_{ij} de distância é dado por $s_{ij} = c_{iO} + c_{Oj} - c_{ij}$, em que c_{ij} é distância entre os nós (i, j) . A Figura 4.4 mostra essa situação.

Figura 4.4 – Fusão de dois clientes em uma rota compartilhada

Fonte: adaptado de Novaes (2007)

A heurística de Clarke e Wright inicia-se com as combinações possíveis entre os nós tomados dois a dois e com a sua ordenação em ordem decrescente de ganhos s_{ij} . As combinações com os maiores ganhos tendem a ser formadas por nós distantes do depósito, mas próximas entre si, ou seja, as rotas vão sendo formadas a partir de nós mais distantes do depósito.

b) Metaheurística *Simulated Annealing*

O *Simulated Annealing* é uma metaheurística de busca local probabilística, que se fundamenta em uma analogia com o processo térmico de recozimento, muito utilizado em metalurgia. No processo de recozimento, o metal é aquecido até uma temperatura elevada, para em seguida ser resfriado lentamente. O resfriamento suficientemente lento permite que os átomos do metal formem uma estrutura cristalina com menos imperfeições, resultando em um material com melhores propriedades mecânicas. Por analogia, os estados possíveis do metal durante o recozimento correspondem às soluções do espaço de busca, enquanto a energia associada a cada estado corresponde ao valor da função objetivo.

Uma das características do *Simulated Annealing* é permitir que soluções inferiores em relação à solução atual S_{atual} , sejam selecionadas para exploração de sua vizinhança $N(S_{atual})$, a partir de uma probabilidade associada. A probabilidade de uma solução pior ser selecionada, vai diminuindo ao longo da busca devido ao fato da redução de uma variável θ_t , chamada temperatura. A cada iteração t , uma solução S , é selecionada aleatoriamente na vizinhança de S_{atual} .

Se o valor da solução $f(S) \leq f(S_{atual})$, então S_{atual} é definido como S ; caso contrário:

$$S_{atual} \leftarrow \begin{cases} = S & (\text{com probabilidade } p_t), \\ = S_{atual} & (\text{com probabilidade } 1 - p_t) \end{cases}$$

em que: p_t é uma função decrescente de t e de $[f(S) - f(S_{atual})]$, definida:

$$p_t = \exp(-[f(S) - f(S_{atual})]/\theta_t),$$

em que: θ_t é a temperatura em cada iteração t

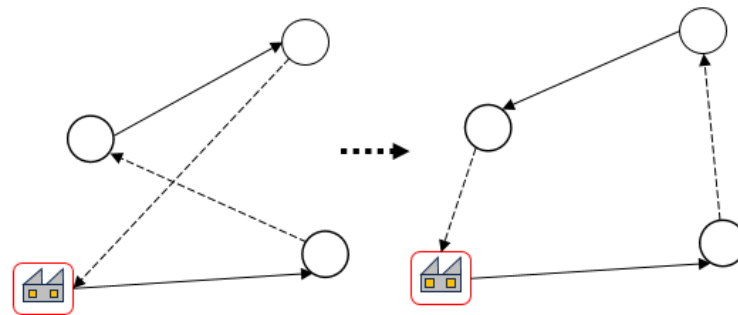
Geralmente, θ_t é uma função decrescente de t que, inicialmente, recebe um valor $\theta_1 > 0$ e é multiplicado por um fator α ($0 < \alpha < 1$), após cada T iterações. Isso faz com que a probabilidade de aceitar uma solução pior, diminua com o tempo.

c) Metaheurística *Tabu Search*

O termo tabu (do inglês, *taboo*) refere-se a algo sagrado, proibido ou evitado por convenções de costume ou tradição. A metaheurística *Tabu Search* recebe esse nome porque impõe restrições para guiar o processo de busca. Essas restrições atuam de forma a proibir certas buscas, classificadas como tabus em um determinado número de iterações.

A metaheurística *Tabu Search* parte de uma solução inicial S_0 e move-se, a cada iteração, para a melhor solução vizinha da solução S_{atual} . Para evitar a ciclagem, as soluções que foram examinadas recentemente, são armazenadas em uma lista tabu por um certo número de iterações, ou seja, não podem ser utilizadas durante estas iterações. Um dos critérios de parada que pode ser utilizado é o número máximo de iterações sem melhora no valor da melhor solução. O *Tabu Search* também pode ser aprimorado através de várias estratégias, como diversificação da pesquisa e a intensificação em regiões promissoras (GLOVER; LAGUNA, 1993a, 1997). Em problemas de roteamento, uma das formas de intensificação é a aplicação do algoritmo 2-opt, proposto inicialmente por Croes (1958), que consiste basicamente em selecionar duas arestas que cruzam em si mesmas e reordená-las para que não o façam. A Figura 4.5 mostra a aplicação do algoritmo 2-opt em uma solução do VRP.

Figura 4.5 – Aplicação do algoritmo 2-opt em uma solução do VRP



Fonte: elaborado pelo autor

Uma das primeiras abordagens utilizando *Tabu Search* em problemas VRP, foi apresentado por Willard (1989). Nesse trabalho, as vizinhanças foram definidas como todas as soluções factíveis obtidas a partir da solução atual, através das trocas 2-opt ou 3-opt. Em uma pesquisa mais recente, Zachariadis e Kiranoudis (2010), apresentam uma estratégia eficiente para reduzir a complexidade de avaliação das soluções vizinhas geradas em algoritmos de busca local, como o *Tabu Search*. Segundo os autores, ao passar de uma solução i para outra solução $i + 1$, somente algumas características da solução i são modificadas. Portanto, ao gerar a vizinhança da solução $i + 1$, não é necessário avaliar novamente movimentos que já foram avaliados em explorações anteriores, caso, devidamente gravados. Para evitar essa computação excessiva e repetitiva, eles introduzem uma estrutura de dados própria.

4.3 TRANSPORTE E LOCALIZAÇÃO EM PLANTAS DE BIOGÁS

Os problemas de localização das plantas e de roteamento dos veículos coletores de biomassa, são dois problemas importantes nos projetos de geração de biogás. Eles podem ser abordados independentemente ou de forma simultânea. No primeiro caso, inicialmente, são estabelecidas as localizações das plantas para, em seguida, definir as melhores rotas dos veículos coletores. Já no segundo tipo de abordagem, os problemas são resolvidos conjuntamente, considerando as interrelações entre eles. Há justificativas para os dois tipos de abordagem, sendo que a escolha entre elas vai depender de fatores como as características individuais de cada problema, da relevância de um problema em relação ao outro e da disponibilidade técnica-computacional para a abordagem em conjunto.

Em algumas ocasiões, pode ser que no planejamento, esses problemas devam ser considerados em níveis diferentes, em que a localização esteja dentro do planejamento estratégico e o roteamento dentro do planejamento tático ou mesmo operacional. Nesse caso, a localização das plantas deve ser mantida por um horizonte relativamente longo, já o roteamento deve ser frequentemente alterado e recalculado. Essa é a situação de uma planta que precisa ter a sua localização definida, mas que não tem um conjunto fixo e definitivo de fontes fornecedoras de biomassa.

Embora, em alguns casos, os problemas de localização e roteamento sejam tratados de forma separada, eles ainda assim mantêm uma relação significativa entre eles. Quando resolvidos separadamente, corre-se o risco de encontrar soluções sub-ótimas. Isso foi demonstrado por Salhi e Nagy (1999), onde os autores constataram que a resolução combinada dos problemas de localização e roteamento produziram soluções melhores do que a sua abordagem individual, mesmo em um horizonte de planejamento longo, no qual as rotas poderiam sofrer alterações ao longo do tempo.

Conforme mencionado anteriormente, no Capítulo 5 tratamos do problema de localização de forma isolada. Já no Capítulo 6, propomos um modelo matemático que integra os problemas de localização de plantas de biogás e o roteamento dos veículos. Apresentamos ainda neste capítulo, uma heurística para a obtenção de soluções aproximadas para problemas de grande porte.

5 MODELO DE APTIDÃO E LOCALIZAÇÃO ÓTIMA PARA PLANTAS DE BIOGÁS

5.1 INTRODUÇÃO

Uma avaliação criteriosa do potencial de geração de biogás é o primeiro passo para verificar a viabilidade de plantas bioenergéticas baseadas em biogás, sendo a disponibilidade de matéria-prima essencial nesse processo (SCARLAT *et al.*, 2019). Além disso, dependendo do modelo de geração e distribuição de energia, considerações sobre infraestrutura como rodovias e linhas de transmissão elétrica, podem ser determinantes para a efetividade do transporte de biomassa até as plantas e do envio da energia gerada até os locais de consumo. Sob certos aspectos sociais, uma planta de biogás pode ser uma instalação indesejável. A localização de um biodigestor próximo a residências pode levar a situações inconvenientes, como ruído, riscos à saúde, redução do valor das propriedades, problemas de segurança e mau cheiro (JESUS *et al.*, 2021). Por outro lado, a instalação de uma planta de biogás pode estar diretamente ligada ao desenvolvimento social da região.

Em geral, os fatores que favorecem ou afetam negativamente a localização de uma planta de biogás são agrupados em ambientais, econômicos e sociais. Dependendo dos locais candidatos à instalação, esses fatores podem ser de diferentes naturezas (por exemplo, quantitativos e qualitativos) e influenciar a decisão com intensidades muito diferentes. Combinar todos esses fatores adequadamente em um modelo que identifique o local ideal para uma planta de biogás é um desafio.

Na literatura, há vários estudos que combinam exclusão e análise de preferência para identificar locais adequados para a instalação de plantas de bioenergia. Jesus *et al.* (2021) identificaram que as técnicas mais usadas em problemas de localização de biodigestores são a análise de decisão multicritério combinada com o Sistema de Informações Geográficas (SIG), seguida pelo uso do SIG isoladamente. Nesses casos, um SIG pode ser usado para avaliar a distribuição espacial do potencial bioenergético e ajudar a identificar locais adequados para as instalações. O uso da análise de decisão multicritério também é justificado, pois facilita a análise ao dar peso às variáveis conflitantes.

Dentre os artigos que trataram da implementação de biodigestores usando apenas SIG, o estudo de Thompson *et al.* (2013) que usou SIG para orientar no

processo de identificação de possíveis locais para a instalação de biodigestores. O estudo analisou várias fazendas em uma região de Vermont, nos Estados Unidos, e os locais foram selecionados considerando uma distância máxima de coleta, buscando o maior número de fontes por planta. Em outro estudo desenvolvido por Scarlat *et al.* (2018), os autores identificaram locais de produção de bioenergia em grandes regiões da Europa, com ênfase nos potenciais de biogás de resíduos de gado e aves. Sua contribuição para a literatura está na realização da análise espacial dos potenciais de biogás. Entretanto, esse estudo não incluiu restrições ambientais e sociais. Zareei (2018) investigou as vantagens da produção de biogás, a partir de esterco de gado e resíduos rurais no Irã. O estudo usou GIS para desenvolver um mapa para determinar locais adequados para plantas de biogás, com base apenas na produção potencial deste biocombustível.

Uma tarefa importante em análise de decisão é a integração de diferentes critérios de preferência, por meio da atribuição de pesos a esses critérios. As técnicas de análise de decisão multicritério, como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), oferecem uma maneira poderosa de ponderar os critérios de seleção, reduzindo assim os vieses na tomada de decisões (MA, 2005). A combinação de AHP e GIS foi usada para determinar e classificar locais adequados para biodigestores, como no estudo de Jeong e Ramírez-Gómez (2017), que identificou locais para a produção de bioenergia em uma região da Espanha. Foram usados critérios econômicos, ambientais e sociais, e um mapa final de aptidão foi validado por meio de uma análise de sensibilidade, alterando os pesos dos critérios. Em um estudo semelhante, Ma *et al.* (2005) criaram um mapa de aptidão para a instalação de biodigestores no Condado de Tompkins, Nova York. Embora esses estudos indiquem localizações com os maiores índices de aptidão para a instalação, não houve garantia da otimalidade destes locais para a instalação das plantas.

Modelos matemáticos também podem ser usados em problemas de localização de plantas de biogás para encontrar soluções ótimas. No entanto, como os modelos possuem características quantitativas, limitam-se a não abordar profundamente os aspectos ambientais e sociais que, geralmente, são expressos de forma qualitativa, como a perda de biodiversidade, o odor desagradável e os riscos à saúde (JESUS *et al.*, 2021). Assim, a integração de modelos matemáticos com outras técnicas, como GIS e análise de decisão multicritério, deve ser explorada. De acordo com Ying *et al.* (2020), há uma tendência de combinar modelos matemáticos e GIS

para resolver o problema da localização de biodigestores. Yalcinkaya (2020) propôs uma metodologia que combina GIS, AHP e o modelo clássico p-medianas para a localização de biodigestores. O estudo foi realizado na cidade de Izmir, na Turquia, e ajudou a estabelecer sistemas locais de apoio à decisão com o objetivo de reduzir custos e proteger o meio ambiente. No entanto, os autores sugerem que, além das restrições econômicas e ambientais utilizadas, trabalhos futuros devem incluir também restrições sociais.

Um fator importante que não foi explorado diretamente em nenhum dos estudos citados é o local de consumo da energia gerada nas plantas. A distância das plantas até o destino da energia gerada pode ter um impacto importante no custo total de transporte. Portanto, as metodologias que classificam a aptidão dos locais e definem a localização ótima para a instalação de biodigestores, poderiam incluir as distâncias entre as plantas e os destinos da energia como uma das entradas do modelo matemático.

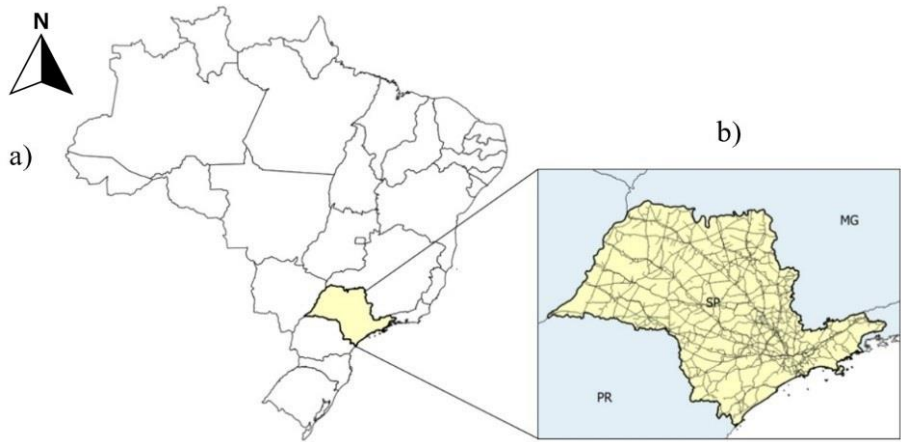
Nesse contexto, esta tese contribui para a literatura científica ao propor um método para classificar o território quanto a aptidão para a instalação de plantas de biogás. Um ambiente SIG é usado e aplicado o método AHP para ponderar diferentes critérios econômicos, ambientais e sociais. Além disso, um modelo matemático é proposto para determinar a localização ótima e o número de plantas em locais altamente adequados. Juntamente com outras restrições, o modelo matemático integra fatores relacionados aos custos de transporte, como a distância das fontes de biomassa e a distância dos destinos da energia gerada.

5.2 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado considerando o estado de São Paulo, que fica na região sudeste do Brasil. Entretanto, a metodologia desenvolvida pode ser aplicada a qualquer região de qualquer país. O estado de São Paulo é dividido em 645 municípios, tendo uma área total de aproximadamente 250.000 km², que equivale a 2,9% da área total do Brasil. Um amplo sistema rodoviário e ferroviário interliga seus municípios e outros estados (Figura 5.1). Com uma população de 46,6 milhões de habitantes, concentra 22% da população brasileira, sendo o estado mais populoso do país (IBGE, 2022). Além disso, o estado também tem a maior produção industrial do Brasil, sendo responsável por mais de um terço do

PIB brasileiro. O setor industrial é o maior consumidor de energia do estado, com mais da metade da energia consumida por esse setor proveniente de fontes de biomassa (SIMA, 2022).

Figura 5.1 – Localização da área de estudo: a) Brasil, b) Sistema rodoviário e ferroviário do estado de São Paulo



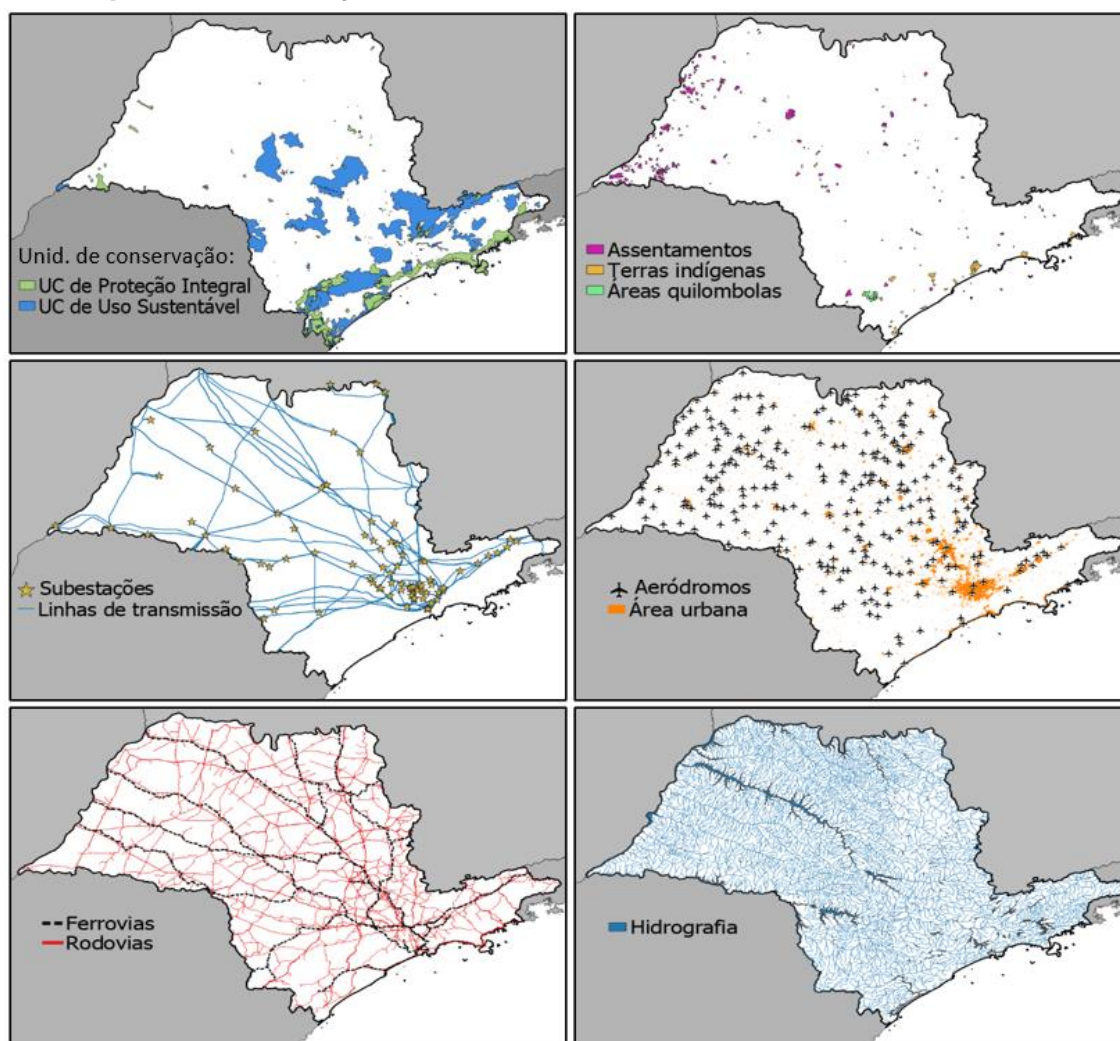
Fonte: elaborado pelo autor

Para essa pesquisa, foi necessário um banco de dados geoespacial adequado, bem como um sistema computacional capaz de reunir, armazenar, analisar e exibir informações geograficamente referenciadas. Os dados vetoriais, usados neste trabalho (Figura 5.2), são disponibilizados por instituições públicas brasileiras (Tabela 5.1) em formato *shapefile* e foram inseridos no modelo de localização ótima das plantas de biogás. Para a realização das análises geoespaciais e geração dos mapas temáticos, foi utilizado o software QGIS, versão 3.16.14 (QGIS, 2024).

Tabela 5.1 – Fonte de dados vetoriais

Instituição	Tema
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024b)	Divisão territorial
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2024)	Área urbana
MMA – Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2024)	Unidades de conservação
ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2024)	Aeródromos
INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA, 2024)	Assentamentos rurais
FUNAI – Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI, 2024)	Terras indígenas
ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2024)	Hidrografia
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2024)	Rodovias e ferrovias
EPE – Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024d)	Linhas de transmissão

Figura 5.2 - Visualização dos temas vetoriais do banco de dados usado no estudo



Fonte: elaborado pelo autor

Os procedimentos de análise espacial foram divididos em duas etapas: 1) identificação de zonas de exclusão; e 2) identificação de zonas aptas e locais potenciais para instalação das plantas de biogás.

5.2.1 Zonas de exclusão

Nem todo o território em estudo apresenta-se apto para a instalação de plantas de biogás. Alguns atributos do espaço são de natureza restritiva e, por isso, devem ser excluídos do modelo de localização. Nesse sentido, devem ser levadas em consideração as restrições de ordem legal, ambiental, econômica e aquelas relacionadas à segurança da população. Devido à sua função social ou ambiental, algumas áreas podem ter impedimento legal para a instalação de qualquer tipo de

empreendimento industrial, dentro ou em seu entorno. Outras áreas não são interessantes devido aos altos custos envolvidos com o transporte. Neste trabalho, essas áreas, denominadas zonas de exclusão, incluem os seguintes temas: aeródromos, áreas urbanas, assentamentos rurais, terras indígenas, áreas quilombolas⁴, unidades de conservação, hidrografia, linhas de transmissão, rodovias e ferrovias.

Na análise de exclusão foi desenvolvido um *buffer* (zona de amortecimento) para cada um dos temas, a fim de definir uma distância mínima das plantas de biogás em relação às zonas de exclusão (Tabela 5.2). A extensão de cada *buffer* foi baseada nas condições de cada área específica e nas diretrizes disponíveis em literatura anterior (MA, 2005; SULTANA; KUMAR, 2012; COSTA, 2014). Por exemplo, zonas de amortecimento com 1.000 m de largura foram criadas em torno da área urbana, a fim de proteger espaços residenciais. Ao longo de ferrovias, rodovias e linhas de transmissão, as zonas criadas tiveram largura de 30 m para evitar a localização de plantas de biogás nesses lugares. Para os outros locais, as delimitações foram definidas de acordo com as restrições legais regionais (BRASIL, 1980, 1986, 1990, 2000).

A partir dos dados geoespaciais, foi criado um mapa *raster* para cada zona de exclusão, com a dimensão da célula igual 30 m x 30 m. Um mapa *raster* é um modelo de dados espaciais que define o espaço como uma matriz de células de mesmo tamanho, dispostas em linhas e colunas, em que cada célula contém um valor de atributo e coordenadas de localização. Para gerar uma *layer* de exclusão para cada tema, os valores dos mapas *raster* foram convertidos em valores binários; reclassificando as células dentro das áreas excluídas como “0” e as células fora das áreas excluídas como “1”. Por fim, o mapa final de exclusão foi obtido ao multiplicar todas as *layers* de exclusão de cada tema. Essa operação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$C_{E,i} = \prod_{j=1}^n C_{i,j} \quad (5.1)$$

em que: $C_{E,i}$ é o valor booleano (0,1) atribuído a i -ésima célula do mapa final de exclusão, $C_{i,j}$ é o valor booleano (0,1) da i -ésima célula da j -ésima *layer* de exclusão,

⁴ Terras ocupadas por descendentes de escravos fugidos, protegidas por lei, utilizadas para assegurar sua continuidade física, social, econômica e cultural.

n é o número de zonas de exclusão consideradas na análise. No arquivo *raster* final, o valor “0” indica que a célula não é apta para a instalação das plantas, enquanto células com valor “1” representam locais potenciais para instalação.

Tabela 5.2 - Localidades restritas para a instalação de uma planta de biogás

Local	Tipo	Zona de exclusão
Área Urbana	-	Polígonos + (Largura $\leq$ 1 km)
Unidade de Conservação	Proteção	Polígonos + (Largura $\leq$ 10 km)
Aeródromo	Pista de	Largura $\leq$ 13 km
	Aeroporto	Largura $\leq$ 20 km
Terras quilombolas	-	Polígonos
Assentamentos rurais	-	Polígonos
Terras indígenas	-	Polígonos
Hidrografia	-	Largura $\leq$ 200 m
Rodovias, ferrovias e linhas de transmissão		Largura $\leq$ 30 m

5.2.2 Locais potenciais para a instalação de plantas de biogás

A instalação de um empreendimento como uma planta de biogás, é fortemente influenciada, positiva ou negativamente, por diferentes fatores relacionados ao espaço geográfico local. Esses fatores podem atuar, facilitando a acessibilidade à planta e ao escoamento dos produtos gerados, podem criar impedimentos devido questões ambientais e sociais, ou mesmo, podem favorecer a disponibilidade de matéria-prima e a mão-de-obra. Tendo em vista essas considerações, foram utilizados sete temas para caracterizar as regiões aptas em função da proximidade desses temas:

- Rodovias: Quanto mais próximo das rodovias, melhor para economizar no custo de transporte da biomassa.
- Ferrovias: Mesmo conceito das rodovias.
- Hidrografia: A proximidade dos recursos hídricos é vantajosa para as fábricas, que precisam de água em seus processos industriais.
- Área urbana: Quanto mais distante da área urbana, maior a adequação do local, pois os impactos de sua implementação sobre os moradores são atenuados.

- Aeródromos: O estoque de biomassa e resíduos, presentes na planta de biogás, eventualmente, pode atrair um grande número de pássaros. Para manter a segurança da navegação aérea, as plantas não devem ficar próximas aos aeródromos.
- Linhas de transmissão: Quanto mais próximo das linhas de transmissão, melhor para economizar nos custos de interconexão com a rede elétrica.
- Unidades de conservação de uso restrito e uso sustentável: Para minimizar possíveis impactos ambientais nessas unidades de conservação, as plantas devem estar o mais longe possível.

A partir destes temas, sete *rasters* de distâncias euclidianas⁵ foram gerados e, posteriormente, normalizados. A operação de normalização permite que critérios com diferentes faixas de valores ou unidades distintas sejam convertidos para a mesma faixa de valores (MA, 2005; RAMOS, 2000; ZANBOM *et al.*, 2005). Os números normalizados foram obtidos usando as equações (5.2) e (5.3), que são funções lineares crescente e decrescente da distância respectivamente.

$$C_{N,i,j} = \left(\frac{C_{i,j} - C_{j,min}}{C_{j,max} - C_{j,min}} \right) \cdot A \quad (5.2)$$

$$C_{N,i,j} = A - \left(\frac{C_{i,j} - C_{j,min}}{C_{j,max} - C_{j,min}} \right) \cdot A \quad (5.3)$$

em que: $C_{N,i,j}$ é a distância normalizada da i -ésima célula do j -ésimo tema, $C_{i,j}$ é a distância original calculada da i -ésima célula do j -ésimo tema, $C_{j,max}$ é a máxima distância do j -ésimo tema, $C_{j,min}$ é a mínima distância do j -ésimo tema e A é a amplitude dos valores normalizados.

Para os temas, unidades de conservação, aeródromos e área urbana, a normalização foi realizada usando a equação (5.2), ou seja, quanto mais longe melhor. Para os outros quatro temas, empregou-se a equação (5.3), o que significa que a proximidade a esses locais é satisfatória. A amplitude A utilizada para os valores normalizados, foi 10, ou seja, quanto mais próximo de 10, melhor é a aptidão do local. Em todos os temas a distância mínima $C_{j,min}$, foi considerada igual a zero.

⁵ A distância euclidiana corresponde à distância em linha reta entre os centros de duas células.

Para cada tema, foi considerada uma distância máxima $C_{j,max}$ para a normalização. Na literatura, os valores dessas distâncias têm sido definidos, em grande parte, de acordo com as características específicas da área em estudo (COSTA, 2014; TEIXEIRA, 2016). Nesse trabalho, para o tema Hidrografia, foi adotada a distância máxima de 5.000 m. Os modais rodoviários e ferroviários foram definidos com 10.000 m e 60.000 m de distância máxima respectivamente. Para o tema aeródromos, foi adotada uma distância máxima de 30.000 m. A área urbana foi definida com valor máximo de 25.000 m. Por fim, para os temas linhas de transmissão e unidades de conservação, foram adotadas as distâncias máximas de 60.000 m e 10.000 m respectivamente. Células com distâncias euclidianas maiores que $C_{j,max}$ receberam os valores 10 e 0 para as funções crescente e decrescente respectivamente.

Dos sete temas, selecionados para classificar a aptidão de um local, obviamente, alguns são mais importantes que outros. Para definir essa importância relativa, o método de análise de decisão multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP) foi usado para estimar pesos apropriados para cada critério (tema). O método AHP compara diferentes critérios, tomados dois a dois, e um valor de importância relativa é atribuído para a relação entre eles, de acordo com uma escala pré-definida. O método possui vários passos referentes à estrutura hierárquica, decidindo os pesos de importância absoluta e relativa de cada critério, organizando os pesos necessários de cada alternativa e determinando a pontuação final (JEONG; RAMÍREZ-GÓMEZ, 2017). Mais detalhes sobre a teoria e a metodologia são encontrados no Anexo 9.1.

Depois que os pesos foram definidos pela análise AHP, os critérios foram combinados usando o processo multicritério *Weighted Linear Combination* (WLC). Esse método é, frequentemente, aplicado em análises de uso/adequação de terras, seleção de locais e avaliação de recursos (JEONG; RAMÍREZ-GÓMEZ, 2017; YING; CHIEN; VAN, 2020; COSTA, 2014; GHOSH; LEPCHA, 2019). Um mapa de preferências foi calculado com base na equação (5.4):

$$C_{P,i} = \sum_{j=1}^n w_j C_{N,i,j} \quad (5.4)$$

em que: $C_{P,i}$ é a pontuação da i -ésima célula no mapa de preferências; w_j é o peso atribuído para o j -ésimo critério a partir da análise AHP; $C_{N,i,j}$ é a distância normalizada

para a i -ésima célula do j -ésimo critério; n é número total de critérios de preferência considerados na análise. Um alto valor para a célula indica local com alta aptidão.

Para identificar a aptidão efetiva do local, é necessário suprimir as áreas com restrição absoluta. Portanto, o mapa de preferências e o mapa de restrições (zonas de exclusão) foram usados para criar o mapa de aptidão do local, sendo que o valor em cada célula do mapa representa o índice de aptidão. O índice de aptidão foi calculado com base na equação (5.5):

$$S_i = C_{P,i} * C_{E,i} \quad (5.5)$$

em que: S_i é o índice de aptidão da i -ésima célula do mapa final de aptidão do local; $C_{P,i}$ é o valor atribuído para a i -ésima célula no mapa de preferências; $C_{E,i}$ é o valor booleano (0,1) atribuído para a i -ésima célula no mapa final de restrições.

As pontuações obtidas pelo índice de aptidão foram discretizadas, agrupando-se os seus valores em cinco classes (Muito ruim, Ruim, Média, Boa e Muito boa) usando o método *Jenks Natural Breaks*. O método *Jenks Natural Breaks* maximiza as diferenças entre classes, enquanto minimiza as variações dos valores dentro de uma mesma classe (JENKS, 1967). As áreas classificadas como “Muito boas” foram extraídas e convertidas em formato vetorial. Uma grade de 10 km x 10 km foi sobreposta a esse mapa e os polígonos, contidos em cada célula da grade, foram dissolvidos e unidos. Aquelas células contendo polígonos isolados, com uma área menor que 50.000 m² foram excluídas da análise, tendo em vista uma possível expansão industrial da planta de biogás no futuro. Finalmente, os centroides dos polígonos remanescentes foram determinados. Com este procedimento, obteve-se as coordenadas de cada um desses pontos para transformá-los em locais potenciais para a instalação das plantas.

5.2.3 Fontes de biomassa

Antes de definir os melhores locais para a instalação das plantas de biogás, é necessário dispor de informações sobre o potencial de geração de biomassa para envio às plantas. A partir do volume de biomassa e de fórmulas e fatores adequados de conversão, pode-se estimar o volume de biogás disponível para conversão em energia elétrica. Para isso, se faz necessário conhecer, a capacidade de geração de biogás para o tipo de biomassa analisado, a concentração de metano do biogás, o

poder calorífico inferior do metano e a eficiência de conversão energética da máquina térmica utilizada.

O potencial de geração de biogás no estado de São Paulo foi obtido a partir do estudo apresentado no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020a, 2020b), o qual apresenta estimativas do potencial de bioenergia para todo o território estadual. O Atlas fornece os valores de potencial de geração de biogás e eletricidade, a partir de diferentes resíduos de biomassa, classificados por tipo de resíduo em cada um dos seus 645 municípios. Nesta tese, cada um desses municípios é considerado de forma individual, uma fonte de biomassa.

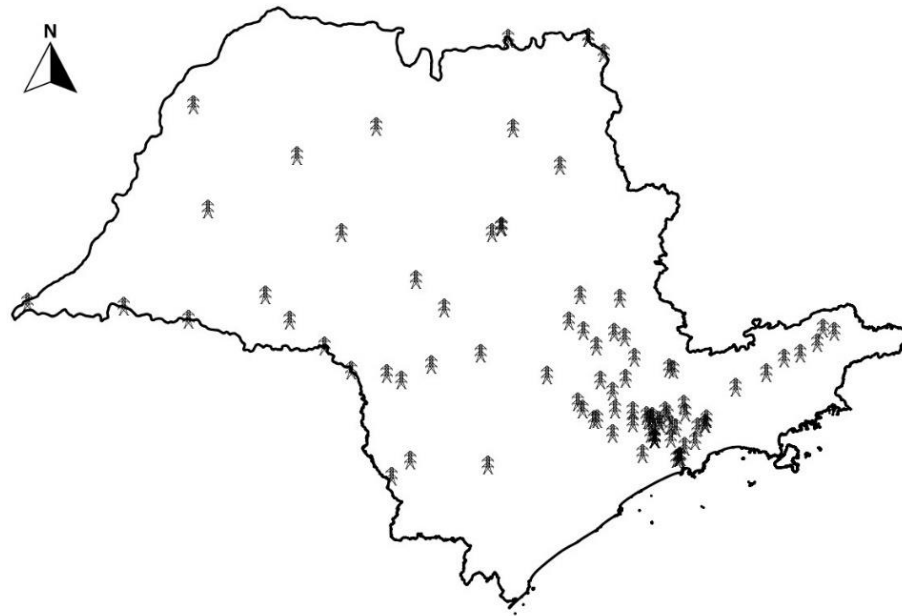
Embora o Atlas forneça, de forma detalhada, o volume de biogás potencial, ele não informa diretamente a quantidade de biomassa necessária para a sua geração. Assim, para estimar essa quantidade de biomassa, informação necessária para os estudos de transporte desenvolvidos posteriormente, foram aplicados fatores de conversão descritos por Achinas *et al.* (2017).

5.2.4 Destinos da energia gerada

Além da identificação de restrições quanto à instalação de plantas de biogás e do mapeamento e quantificação do potencial energético, a infraestrutura quanto à integração aos consumidores e ao escoamento do produto gerado é fundamental. Portugal-Pereira *et al.* (2015) usou a localização de resíduos e seu acesso às linhas de transmissão e subestações do sistema elétrico para encontrar as regiões mais adequadas ao aproveitamento de resíduos agrícolas no Brasil. Esses autores consideraram a instalação de plantas próximas às subestações de energia, de forma que pudessem ser conectadas a elas.

Neste trabalho, as subestações do sistema elétrico do estado de São Paulo foram consideradas destinos da energia gerada nas plantas de biogás. Desta forma, o biogás convertido em energia elétrica nas próprias plantas é enviado às subestações através de conexões à rede elétrica. Utilizando um *shapefile* contendo as coordenadas geográficas das 91 subestações de energia do Estado de São Paulo (EPE, 2022), foi gerado um mapa contendo a localização de cada subestação, que podem ser observadas na Figura 5.3.

Figura 5.3 - Localização das subestações de energia elétrica do Estado de São Paulo



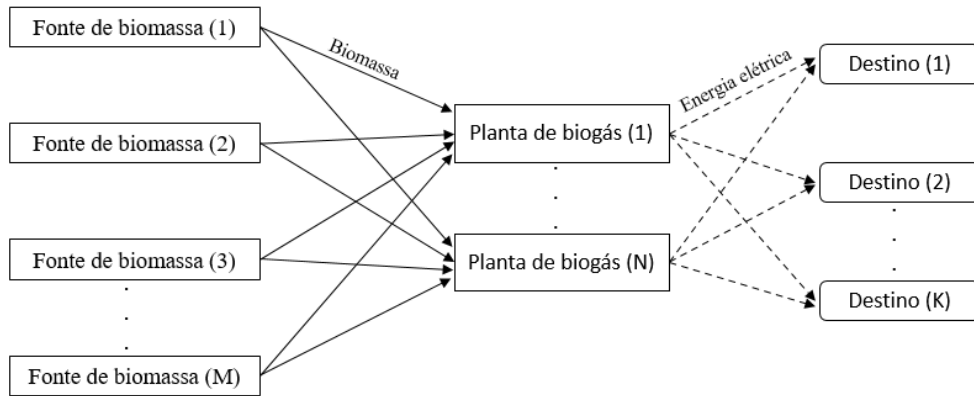
Fonte: elaborado pelo autor

5.2.5 Modelo matemático

Após estabelecido os locais potenciais para a instalação das plantas de biogás, o modelo matemático proposto busca definir a localização ótima para as plantas, considerando a distribuição espacial das fontes de biomassa e dos destinos da energia gerada. O modelo também considera as capacidades de fornecimento de cada fonte e a distância mínima entre as plantas de biogás instaladas. A otimização parte de locais candidatos para a instalação das plantas de biogás e seleciona aqueles que fornecerão o menor custo total de transporte, entre as fontes de biomassa e as plantas e, entre as plantas e os destinos da energia. Assim como outros autores (YALCINKAYA, 2020; FRANCO, 2015; CHUKWUMA, 2019), o modelo proposto busca minimizar a distância de transporte, ponderada pelo suprimento.

Com a abordagem proposta, a biomassa proveniente das fontes passa por transformação nos pontos intermediários (plantas de biogás) produzindo energia elétrica, essa energia é então encaminhada para os diferentes destinos (Figura 5.4).

Figura 5.4 - O sistema planejado para coleta e uso energético de biomassa



Fonte: elaborado pelo autor

Durante o processo de geração de energia, a biomassa é convertida em biogás e o biogás em eletricidade. Para manter a equivalência entre as unidades de suprimento, somente o volume equivalente de biomassa foi usado no modelo matemático. Os principais elementos do modelo proposto são descritos a seguir.

- Índices e conjuntos:

$i = 1, 2, \dots, M$: fontes de biomassa;

$j = 1, 2, \dots, N$: plantas de biogás;

$k = 1, 2, \dots, K$: clientes (subestações).

- Parâmetros:

M : número de fontes de biomassa disponíveis;

N : número de plantas de biogás;

K : número de clientes;

f_i : capacidade de produção de biomassa da fonte i ($i = 1, \dots, M$) (tonelada/ano);

d_k : demanda de biomassa convertida em energia elétrica do cliente k ($k = 1, \dots, K$) (tonelada/ano);

c_{ij} : custo de transporte (distância) da fonte i para a planta j ($i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N$) (km);

b_{jk} : custo de transporte (distância) da planta j para a subestação k ($j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K$) (km);

Q_j : capacidade da planta j ($j = 1, \dots, N$) (tonelada/ano);

p : número de plantas a serem abertas;

$Distplan_{ij}$: distância entre as plantas i e j ($i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N$) (km);

$distmin$: distância mínima permitida entre as plantas instaladas (km).

- Variáveis:

x_{ij} : biomassa transportada da fonte i para a planta j ($i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N$) (tonelada/ano);

z_{jk} : biomassa convertida em energia transportada da planta j para o destino k ($j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K$) (tonelada/ano);

y_j : variável binária que é igual a 1, se a planta j é instalada, $j = 1, \dots, N$.

O modelo matemático proposto é definido por:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K b_{jk} z_{jk} \quad (5.6)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} \leq f_i, \quad i = 1, \dots, M \quad (5.7)$$

$$\sum_{j=1}^N z_{jk} \leq d_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (5.8)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} - \sum_{k=1}^K z_{jk} = 0, \quad j = 1, \dots, N \quad (5.9)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} \leq Q_j y_j, \quad j = 1, \dots, N \quad (5.10)$$

$$\sum_{j=1}^N y_j = p \quad (5.11)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i>j}}^N (Distplan_{ij} - distmin * y_i - distmin * y_j + distmin) \geq 0, \quad j = 1, \dots, N \quad (5.12)$$

$$x_{ij}, z_{jk} \in \mathbb{R}, \quad i = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, N; \quad k = 1, \dots, K \quad (5.13)$$

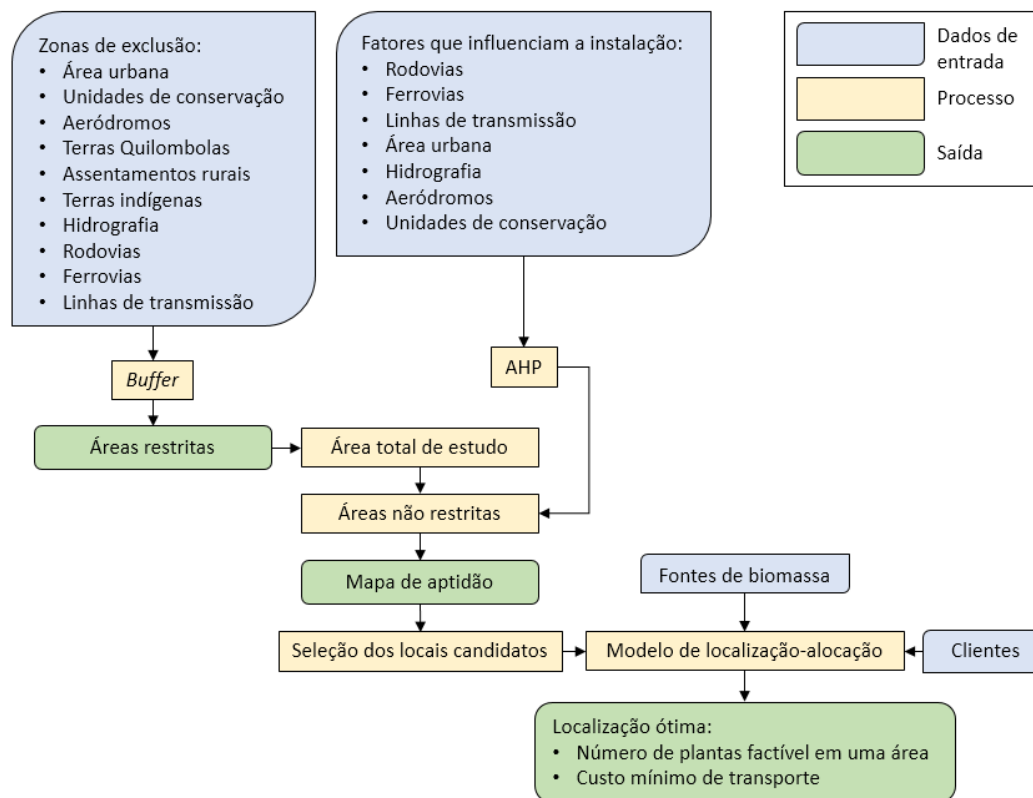
$$y_j \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, N \quad (5.14)$$

No modelo (5.6 – 5.14), a função objetivo (5.6) minimiza o custo total de transporte (distância x suprimento) entre as fontes de biomassa e, as plantas e entre as plantas e os destinos da energia. As restrições (5.7) asseguram que a quantidade de biomassa transportada da fonte i para a planta j não seja superior à capacidade da fonte. As restrições (5.8) referem-se à demanda de cada cliente k . As restrições (5.9) asseguram que todo o volume de biomassa entregue na planta j seja convertido

em energia elétrica. As restrições (5.10) referem-se à capacidade de produção de cada planta. Em (5.11), o número de plantas instaladas é restrito, enquanto as restrições (5.12) limitam a distância mínima entre as plantas instaladas. As restrições (5.13 – 5.14) definem o domínio das variáveis de decisão.

A metodologia desenvolvida para a resolução do problema foi resumida em um fluxograma, que mostra todo o processo (Figura 5.5). As etapas descritas anteriormente, resultaram neste modelo de aptidão e localização ótima das plantas de biogás.

Figura 5.5 - Fluxograma do modelo conceitual e as diferentes análises



Fonte: elaborado pelo autor

5.3 RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DISCUSSÃO

Devido à dispersão geográfica das fontes de biomassa e à diversidade regional desse tipo de matéria-prima, a coleta, o agrupamento e a análise de dados são um desafio, especialmente, em grandes áreas como a deste estudo. Além disso, a conversão de biomassa em energia por meio de plantas de biogás exige a identificação e a aplicação de uma série de restrições socioeconômicas e ambientais,

que precisam estar alinhadas com a legislação local. Outro ponto importante diz respeito à infraestrutura logística existente, que é um dos principais fatores que afetam a viabilidade do projeto. A coleta de todas essas informações de entrada foi um desafio, pois as fontes de dados são dispersas e o método utilizado, para cada fonte de dados, deve ser compatível com o trabalho proposto.

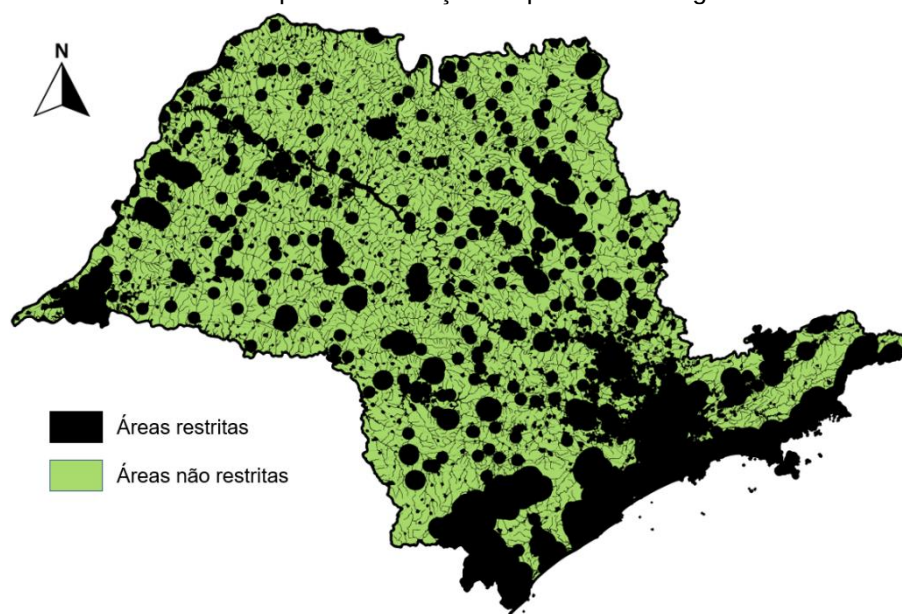
Os experimentos computacionais foram realizados em um computador com Intel(R) Core (TM)2 Duo CPU T6400 @ 2.00GHz 2.00 GHz e 3 GB RAM. As soluções do modelo de localização foram obtidas usando IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (Version 20.1).

5.3.1 Zonas de exclusão

A identificação das zonas de exclusão é essencial para a modelagem, pois permite a eliminação de áreas inadequadas. A exclusão dessas áreas reduz o volume de dados a serem analisados e, conseqüentemente, o tempo para a obter a solução do problema (SULTANA; KUMAR, 2012; RAMOS, 2000; DONG, 2008). A Figura 5.6 mostra as zonas de exclusão, criadas para o problema de localização de plantas de biogás no estado de São Paulo. As áreas restritivas foram excluídas do modelo, baseando-se em restrições absolutas, como solicita a legislação vigente, fatores ambientais, sociais, biofísicos ou de infraestrutura, que inviabilizam a instalação das plantas bioenergéticas.

Cerca de 46% do território paulista apresenta-se restritivo para a instalação de plantas de biogás à biodigestão, sendo que a presença das unidades de conservação de uso restrito e os aeródromos representaram a maior contribuição das áreas excludentes, somando 39,4% da área total de estudo. O valor total encontrado para a zona de exclusão está de acordo com os resultados apresentados por Costa (2014), que encontrou 49,7% de áreas inapropriadas para a instalação de usinas bioenergéticas de origem sucroalcooleira no Triângulo Mineiro, e de Teixeira (2016), que excluiu 40% da área do estado de Minas Gerais no modelo de aptidão para a produção de energia à base de biomassa florestal.

Figura 5.6 - Zonas de exclusão para a instalação de plantas de biogás no estado de São Paulo



Fonte: elaborado pelo autor

5.3.2 Locais potenciais para a instalação de plantas de biogás

Os locais potenciais para a instalação das plantas de biogás foram determinados a partir da normalização das distâncias euclidianas dos temas escolhidos: unidades de conservação (uso restrito e uso sustentável), linhas de transmissão, áreas urbanas, aeródromos, hidrografia, rodovias e ferrovias.

Embora os temas sejam usados como critérios para classificar as áreas candidatas à instalação das plantas, alguns deles são mais importantes do que outros dentro dessa classificação. Assim, a fim de minimizar possíveis imprecisões, é conveniente que pessoas com experiência no problema em questão integrem a equipe que faz o julgamento da importância relativa entre os critérios. Porém, para esse estudo inicial, uma equipe de tomadores de decisão, formada pelos autores deste trabalho, atribuiu os pesos para cada critério segundo a metodologia AHP (SAATY, 1977, 2008).

A partir de uma matriz quadrada $n \times n$, os pesquisadores definiram a ordem de importância dos critérios, listando-os na primeira linha e na primeira coluna da matriz. Em seguida, utilizando a escala para comparação pareada (Anexo 9.1 - Quadro 9.1), a matriz foi preenchida com os valores resultantes dos julgamentos que expressam a importância relativa entre os pares de critérios. Esses resultados são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Matriz de comparação pareada

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
C_1	1	3	3	5	5	5	7
C_2	1/3	1	1	3	3	5	7
C_3	1/3	1	1	3	3	5	7
C_4	1/5	1/3	1/3	1	3	5	5
C_5	1/5	1/3	1/3	1/3	1	3	5
C_6	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1	1
C_7	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	1	1

C_1 : Rodovias, C_2 : Ferrovias, C_3 : Linhas de Transmissão, C_4 : Área urbana, C_5 : Hidrografia, C_6 : Aeródromos, C_7 : Unidades de conservação.

Para avaliar a consistência dos pesos atribuídos aos critérios pelo método AHP, foi calculada a razão de consistência RC , sendo obtido o valor de 0,09, o que indica que os valores foram aceitáveis, uma vez que o RC é inferior a 0,1 (SAATY, 1991).

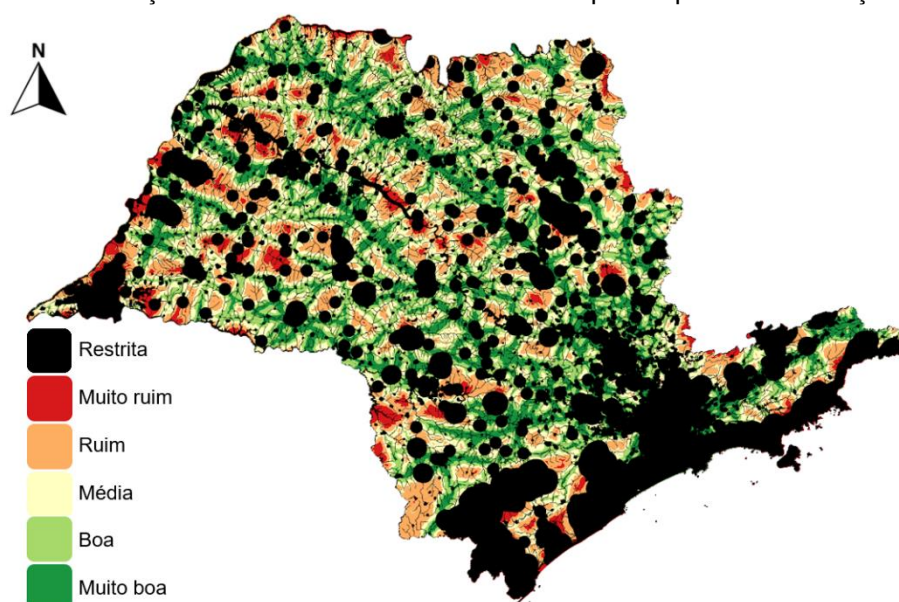
A Tabela 5.4 apresenta os pesos relativos atribuídos para cada critério, para fins de classificação dos locais potenciais. As rodovias e ferrovias foram os critérios mais importantes, já que são essenciais para qualquer economia nos custos de transporte. As linhas de transmissão também receberam uma classificação muito alta, porque a proximidade com as linhas de transmissão é importante para economizar nos custos de conexão com a rede elétrica. As áreas urbanas foram consideradas o próximo critério mais importante, pois a proximidade de plantas de biogás pode criar problemas, como odor e outros incômodos. A hidrografia foi classificada como moderada por ser um fator menos crítico. Os outros dois fatores receberam pesos ainda menores. Informações mais detalhadas sobre o método AHP estão presentes no Anexo 9.1.

Tabela 5.4 – Pesos atribuídos para cada critério

Critério	Peso
Rodovias	0,29
Ferrovias	0,20
Linhas de Transmissão	0,20
Área Urbana	0,15
Hidrografia	0,10
Aeródromos	0,03
Unidades de Conservação	0,03

Após a definição dos pesos relativos e, utilizando a equação (5.4), os critérios foram combinados para a geração do mapa de preferências. Porém, para suprimir as áreas com restrição absoluta e gerar o mapa de aptidão do local, foi aplicada a equação (5.5), que usa o mapa de restrições e o mapa de preferências. Finalmente, buscando facilitar a seleção dos locais mais adequados e levando em conta que é necessária uma área mínima para a implementação da infraestrutura, os índices classificatórios foram discretizados e agrupados em cinco classes pelo método *Jenks Natural Breaks* (Figura 5.7).

Figura 5.7 - Classificação dos locais de acordo com sua aptidão para a localização das plantas



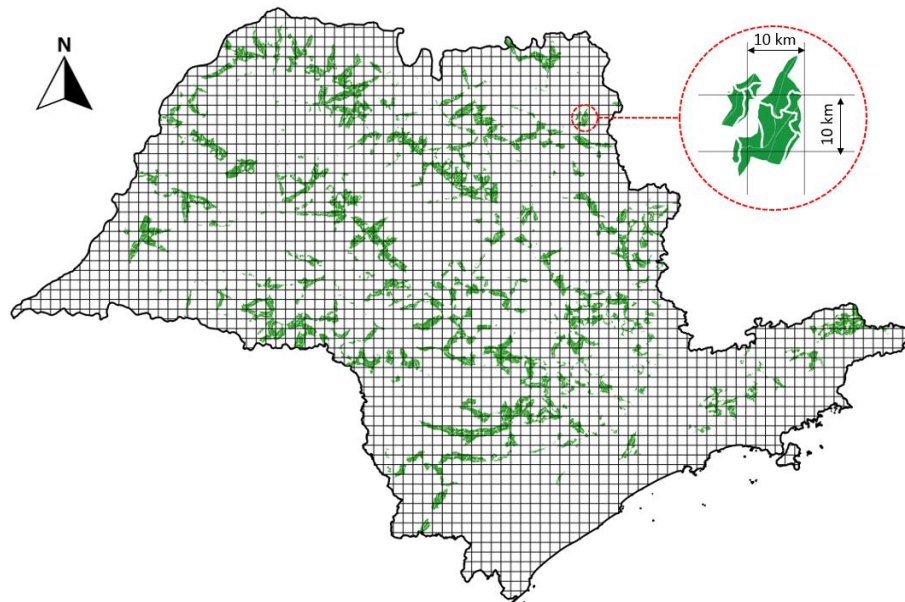
Fonte: elaborado pelo autor

Segundo a classificação territorial, 28,3% do território do estado apresenta áreas Médias, Ruins ou Muito ruins para a instalação das plantas bioenergéticas. Essas regiões foram influenciadas, principalmente, pela maior distância de rodovias, ferrovias e linhas de transmissão de energia, que são os critérios de classificação de maior peso. Por outro lado, 25,6% da área de estudo se situa dentro da categoria Boa ou Muito boa. Essas áreas, em geral, estão próximas das malhas rodoviárias e ferroviárias. Esses resultados mostram que o estado de São Paulo, apesar do elevado grau de urbanização, apresenta boa disponibilidade espacial para a instalação de plantas de biogás.

Além dos aspectos técnicos e econômicos, a instalação de tais plantas carrega uma forte consciência socioambiental, especialmente, em locais com alta

aptidão e, portanto, a aceitação social tende a ser alta. Assim, após a classificação pelo método de *Jenks*, foram selecionadas apenas as áreas pertencentes à classe “Muito boa”. Ao selecionar somente as áreas dessa classe, ainda assim, permanecem grandes extensões territoriais. Grandes polígonos contíguos são problemáticos para o processo de otimização, pois reduzem significativamente o número de locais candidatos e dificultam a sua atribuição à rede viária (COSTA, 2014). Para contornar esse problema, os polígonos contidos em cada célula de uma grade de 10 km x 10 km foram definidos, então, como os locais candidatos (Figura 5.8). A seleção dessa escala de 10 km² corresponde às características específicas desse estudo de caso (grande extensão territorial) e pode ser ajustada, se necessário, sem afetar a metodologia geral. Os polígonos com uma área menor que 50.000 m² foram excluídos da análise. Essa exigência visa assegurar que cada local escolhido possibilite uma futura expansão industrial da planta de biogás. Essa seleção gerou 1.267 locais candidatos no estado de São Paulo e o centroide de cada polígono, foi tomado como referência para obter suas coordenadas de localização (Figura 5.9).

Figura 5.8 - Polígonos candidatos à instalação das plantas obtidos da classe “Muito boa”



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 5.9 - Localização dos centroides dos polígonos candidatos



Fonte: elaborado pelo autor

5.3.3 Locais ótimos para instalação das plantas de biogás

A partir dos locais candidatos para instalação das plantas de biogás (1.267 polígonos), das fontes de biomassa (645 municípios do estado de São Paulo) e dos destinos para envio da energia gerada (91 subestações de energia do estado São Paulo), diferentes cenários foram criados variando-se o número de plantas e decompondo toda a área em grandes regiões, como será mais detalhado a seguir.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) subdividiu cada estado brasileiro em grandes regiões, chamadas Mesorregiões. Essas regiões congregam diversos municípios com similaridades econômicas e sociais. Elas não constituem uma entidade política ou administrativa em si, sendo utilizadas principalmente para fins estatísticos (IBGE, 1990). O estado de São Paulo, por sua vez, foi dividido em 15 Mesorregiões geográficas pelo Instituto (Figura 5.10). Neste estudo, partindo-se dessas 15 unidades, novos conjuntos de regiões foram criadas através da agregação de Mesorregiões vizinhas, buscando, quando possível, equilibrar a distribuição espacial da produção de biogás. Essas novas regiões foram denominadas de Megarregiões e, para cada teste realizado, esta nova classificação será ilustrada.

Figura 5.10 - Mesorregiões do estado de São Paulo segundo o IBGE



Fonte: elaborado pelo autor

Em cada cenário avaliado, foi considerado que as fontes de biomassa pertencentes à uma determinada Megarregião, só poderiam atender as plantas contidas nessa mesma Megarregião. Com esta estratégia, a complexidade do problema reduz, uma vez que o número de possibilidades de fornecimento de biomassa é reduzido. Por outro lado, um mesmo destino da energia gerada (subestação de energia elétrica) pode ser atendido por mais de uma Megarregião, simultaneamente. Além disso, foram feitas as seguintes considerações adicionais:

- 100% da produção potencial de biogás do estado (~ 16,7 bilhões Nm³/ano (COELHO *et al.*, 2020a, 2020b) deve ser gerado pelas plantas em cada cenário.
- A taxa de produção de biomassa é constante para cada fonte de biomassa.
- A biomassa é distribuída, igualmente, entre as plantas de uma mesma Megarregião e todas tem a mesma capacidade de geração de energia.
- Para reduzir a competição entre plantas por matéria-prima, cada planta instalada deve manter uma distância mínima de 50 km entre a planta mais próxima.
- As subestações de energia elétrica não possuem limite para recebimento de energia.

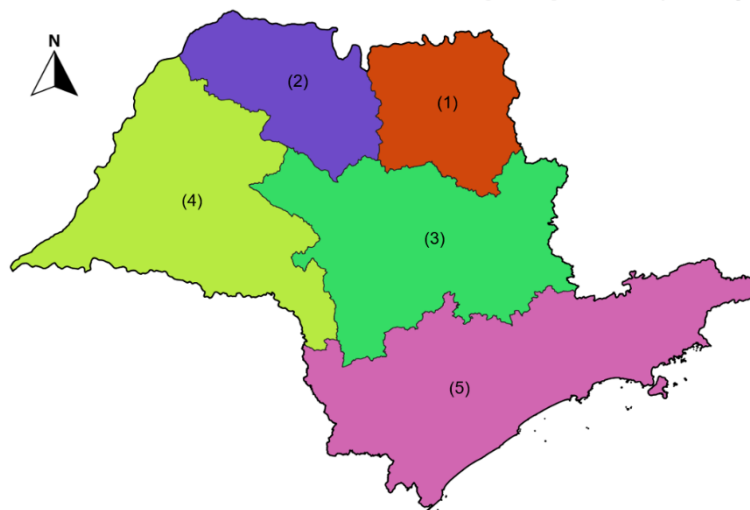
A Tabela 5.5 sintetiza os parâmetros adotados para o modelo matemático, considerando a totalidade da área de estudo.

Tabela 5.5 – Parâmetros gerais do modelo matemático

Parâmetros	Valor
Plantas de biogás candidatas (N)	1.267
Fontes de biomassa (M)	645
Subestações (K)	91
Distância mínima entre plantas instaladas ($distmin$)	50 (km)
Capacidade total de geração de biogás	16,7 bilhões (Nm ³ /ano)
Capacidade total das fontes ($\sum_{i=1}^M f_i$)	$1,65 \times 10^8$ (tonelada/ano)
Capacidade total das subestações ($\sum_{k=1}^K d_k$)	ilimitado (tonelada/ano)
Distância fonte-planta (c_{ij} ($i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N$))	0,3 – 865 (km)
Distância planta-subestação (b_{jk} ($j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K$))	0,5 – 878 (km)

No primeiro cenário, foi definida a formação de cinco Megarregiões no estado de São Paulo (Figura 5.11). A Megarregião 3 apresentou a maior capacidade de geração de biogás, totalizando aproximadamente 25% da produção total. A Megarregião 5, apesar de ter o maior número de fontes de biomassa (municípios), representa apenas um pouco mais de 8% do potencial de geração de biogás (Tabela 5.6). Essa fraca correlação entre o número de fontes e a capacidade de geração de biogás, por região, está relacionada, principalmente, ao grau de urbanização de cada Megarregião.

Figura 5.11 - Estado de São Paulo com cinco Megarregiões de produção de biogás



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 5.6 - Potencial de geração de biogás para cinco Megarregiões

Megarregião	Geração de biogás	Nº de fontes	Locais potenciais
1	23,6%	66	146
2	19,7%	109	180
3	24,9%	152	378
4	23,5%	145	290
5	8,3%	173	273
Total	100,0%	645	1.267

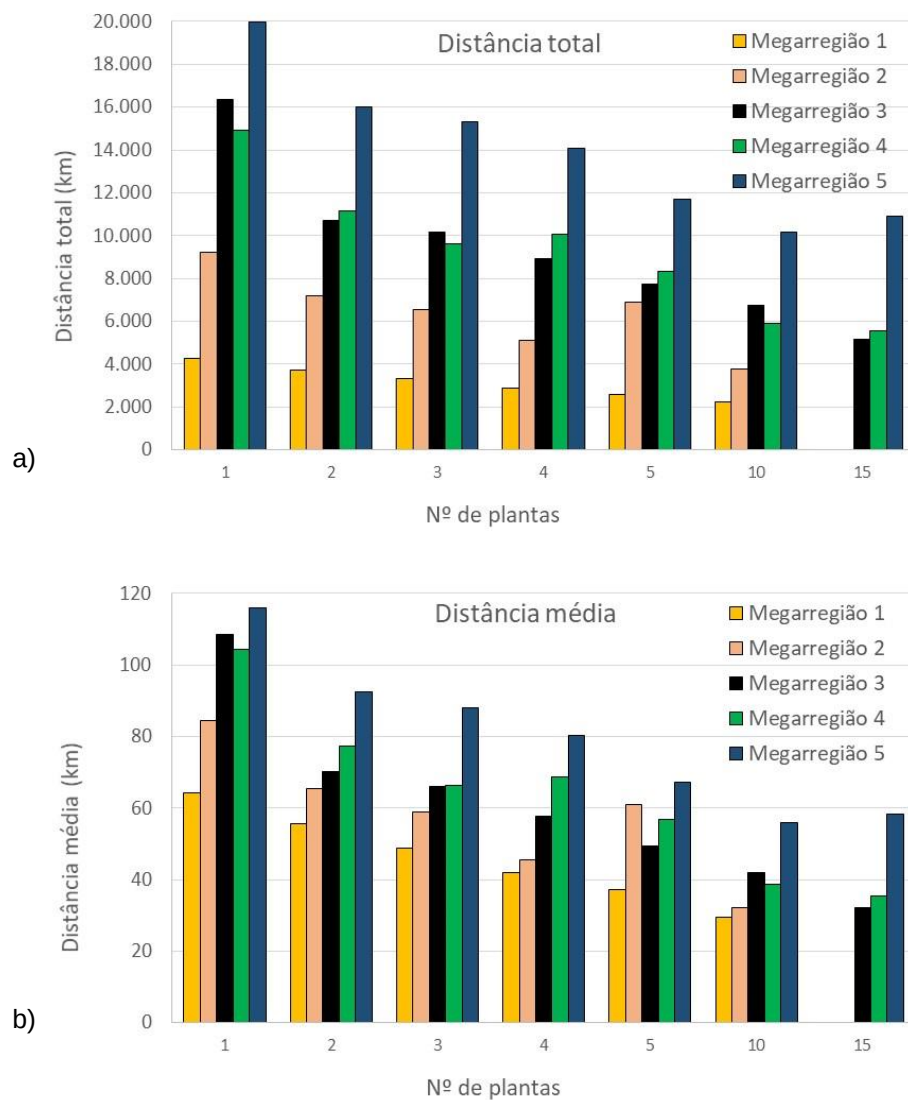
Para cada Megarregião, foram executados uma série de cenários, variando a quantidade de plantas instaladas, começando com uma planta até o limite de 15. A partir de cinco plantas, optou-se por variar essa quantidade em múltiplos de cinco, já que a partir desse ponto, as variações foram menos acentuadas. Os resultados obtidos ao utilizar o modelo matemático proposto (5.6 – 5.14) estão apresentados nas Figuras 5.12 e 5.13. Em cada execução, a capacidade individual de cada planta foi definida pela capacidade total das fontes de biomassa, dividida pelo número total de plantas. Devido à restrição de uma distância mínima de 50 km entre as plantas instaladas, as Megarregiões 1 e 2 não comportaram uma solução com 15 plantas (áreas menores), chegando a um limite de 10 plantas instaladas.

Ao instalar uma única planta em cada Megarregião, a solução para o problema resultou em um alto deslocamento total (entre 4.247 km e 19.956 km) (Figura 5.12a) e uma distância média elevada (entre 64 km e 116 km) para o transporte de biomassa até as plantas (Figura 5.12b). Além disso, o alto investimento em infraestrutura para instalar plantas desse porte é inviável em termos práticos. Observa-se que, em geral, à medida que o número de plantas aumenta, suas capacidades individuais reduzem e, as distâncias médias e totais, para o transporte de biomassa até as plantas diminuem, acentuadamente, até um determinado valor. Entretanto, a partir desse ponto, até a instalação de 15 plantas, observa-se uma queda mais lenta. Essa mesma tendência de comportamento, ou seja, uma curva exponencial negativa, quando o número de plantas aumenta, foi observada nos trabalhos de Yalcinkaya (2020), Sultana e Kumar (2012) e Dong (2008).

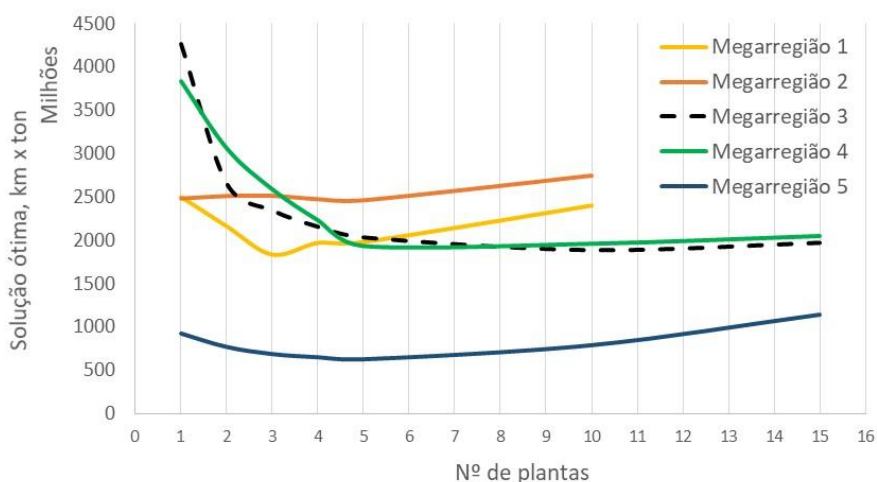
Ao avaliar a variação da função objetivo, a Figura 5.13 mostra uma tendência geral entre os cenários. O valor da função cai rapidamente, até que

cinco plantas sejam instaladas e, a partir desse ponto, o valor da função aumenta ou sofre poucas variações. Isso indica, que para os parâmetros do problema, cinco plantas instaladas tendem a ser o número ideal de instalações. É importante destacar que cada curva apresentada na Figura 5.13 representa, de forma independente, o comportamento observado em cada Megarregião.

Figura 5.12 – a) Distância total de transporte, em função do número de plantas b) Distância média de transporte, em função do número de plantas

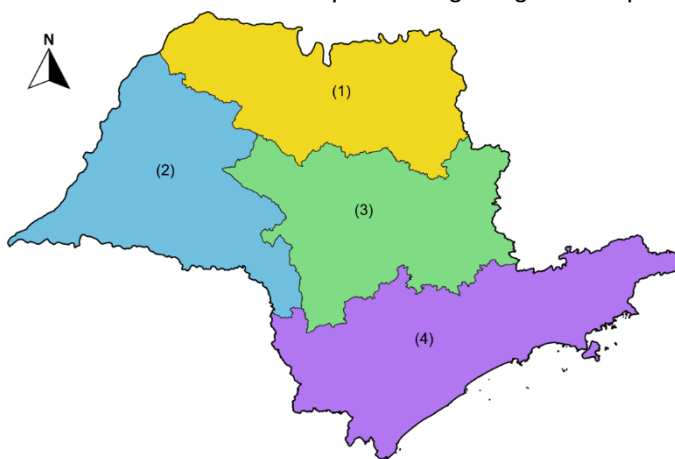


Fonte: elaborado pelo autor

Figura 5.13 - Valor da função objetivo, em função do número de plantas

Fonte: elaborado pelo autor

Outro cenário foi realizado considerando apenas quatro Megarregiões no estado (Figura 5.14). Nessa situação, o maior potencial de produção de biogás está concentrado no norte do estado, predominantemente, na Megarregião 1, que possui 43,3% da capacidade de produção (Tabela 5.7).

Figura 5.14 - Estado de São Paulo com quatro Megarregiões de produção de biogás

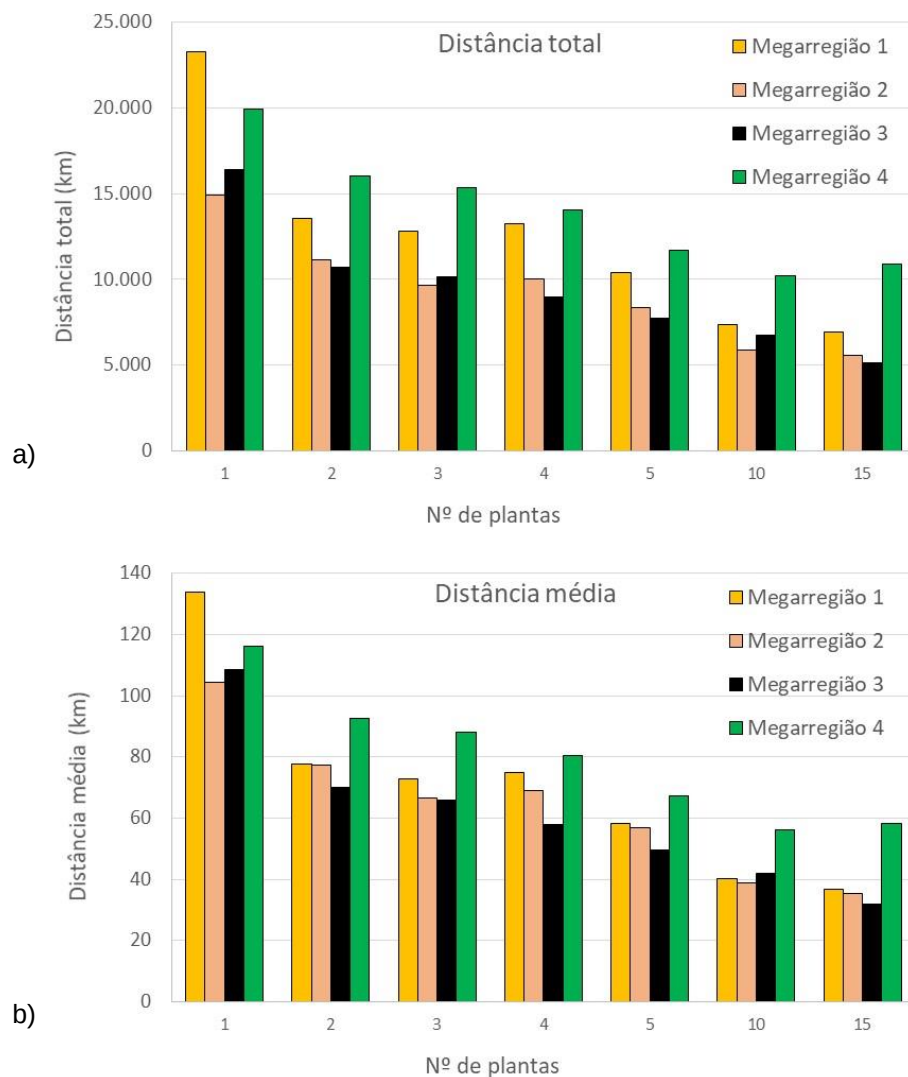
Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 5.7 - Potencial de geração de biogás para quatro Megarregiões

Megarregião	Geração de biogás	Nº de fontes	Locais potenciais
1	43,3%	175	326
2	23,5%	145	290
3	24,9%	152	378
4	8,3%	173	273
Total	100,0%	645	1.267

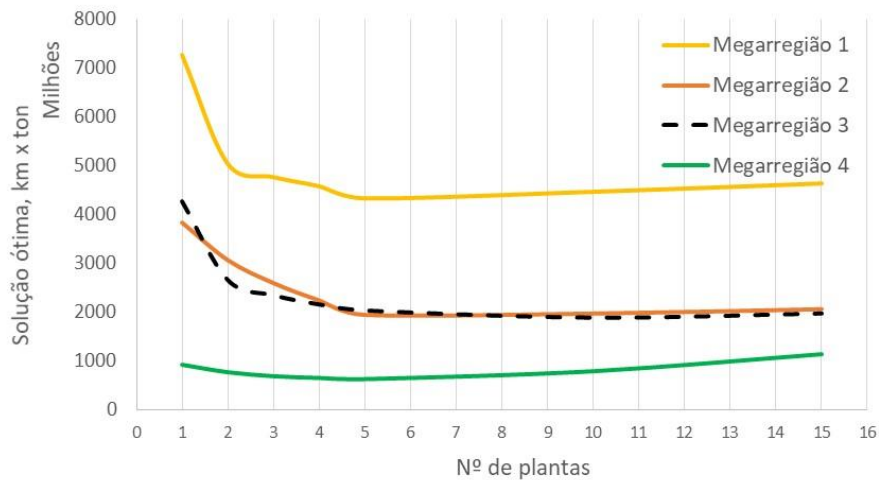
Analisando a Figura 5.15, percebe-se um comportamento semelhante ao do cenário anterior. A mesma tendência de diminuição exponencial das distâncias em função do número de plantas. Com relação ao valor da função objetivo, o comportamento também se repete, indicando que cinco é o número ideal de plantas instaladas em cada Megarregião, uma vez que a solução ótima apresenta valor mínimo nesse ponto (Figura 5.16).

Figura 5.15 – a) Distância total de transporte, em função do número de plantas b) Distância média de transporte, em função do número de plantas



Fonte: elaborado pelo autor

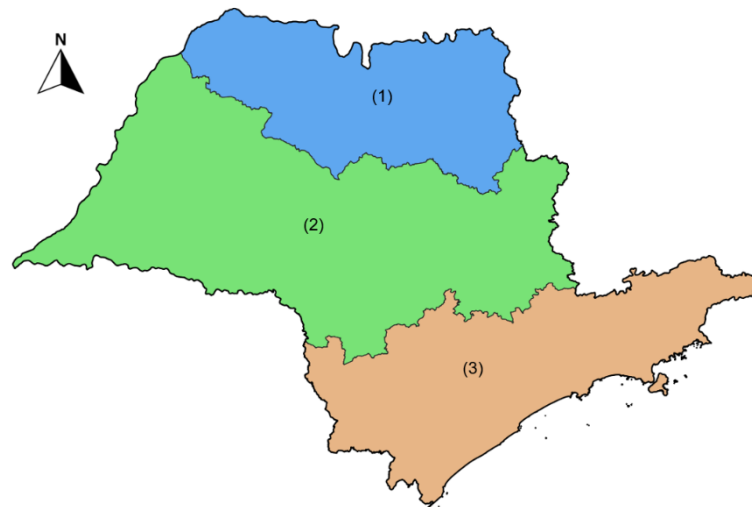
Figura 5.16 - Valor da função objetivo, em função do número de plantas



Fonte: elaborado pelo autor

Em adição aos testes descritos, também buscou-se verificar qual seria a quantidade mínima de regiões em que seria possível obter uma resposta do modelo de otimização, utilizando os recursos computacionais disponíveis. Para isso, o número de Megarregiões foi reduzido para três, unindo as Megarregiões 2 e 3 do cenário anterior. Com a união destas regiões em específico, buscou-se uma melhor distribuição do biogás entre as regiões (Figura 5.17). Neste novo cenário, com três regiões, a Megarregião 2 concentrou mais de 48% do potencial de produção de biogás e 297 possíveis fontes de biomassa (Tabela 5.8).

Figura 5.17 - Estado de São Paulo com três Megarregiões de produção de biogás



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 5.8 - Potencial de geração de biogás para três Megarregiões

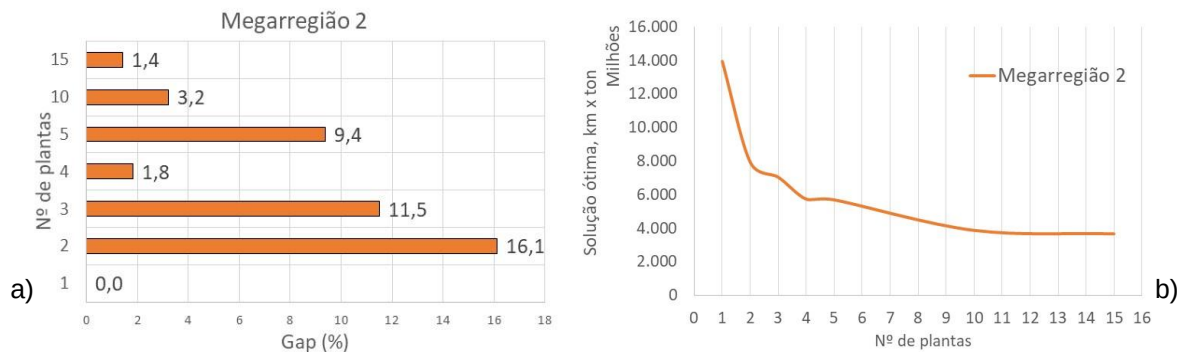
Megarregião	Geração de biogás	Nº de fontes	Locais potenciais
1	43,3%	175	326
2	48,4%	297	668
3	8,3%	173	273
Total	100,0%	645	1.267

Esse cenário mostrou ser dois, o número mínimo de regiões em que o estado de São Paulo pode ser decomposto dado que, para a Megarregião 2, não foi possível obter soluções exatas, em tempo hábil, a partir da instalação de duas plantas. No entanto, para observar o comportamento da função objetivo, para a Megarregião 2, diante do aumento do número de plantas, obteve-se soluções aproximadas, considerando um tempo de processamento computacional de 3.600 segundos. A Figura 5.18a mostra que o GAP^6 das soluções não-exatas variou entre 1,4% e 16,1%, com uma tendência de redução, com o aumento do número de plantas. Por outro lado, os valores da função objetivo mantiveram o comportamento dos cenários anteriores (cinco e quatro Megarregiões), ou seja, uma rápida redução com o aumento do número de plantas até tender à uma estabilização (Figura 5.18b).

Em cada cenário, assumiu-se que todo o volume potencial de biogás do estado (16,7 bilhões de Nm^3/ano) foi gerado e convertido em eletricidade nas plantas. Com isso, é possível comparar os resultados gerais dos cenários que dividem o estado em cinco, quatro e três grandes regiões. Para fazer essa comparação, foram somados os valores da função objetivo de cada uma das Megarregiões para cada número de plantas definido. A Figura 5.19 mostra que a divisão em cinco Megarregiões apresentou o menor custo total de transporte. Portanto, cinco Megarregiões comportando cinco plantas cada uma, tende a ser a melhor combinação.

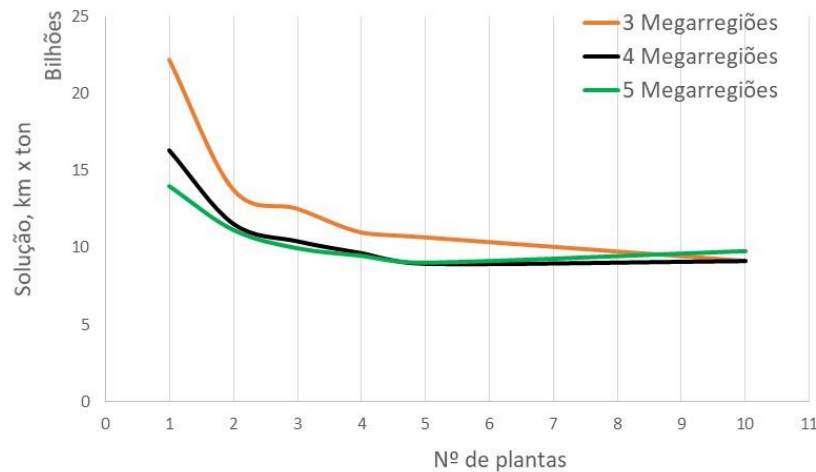
⁶ Diferença relativa entre a melhor solução inteira obtida e o limitante inferior do valor ótimo.

Figura 5.18 - a) GAP das soluções, em função do número de plantas b) Valor da função objetivo, em função do número de plantas



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 5.19 - Valor da função objetivo, em função do número de plantas, considerando a soma de todas as Megarregiões em cada cenário



Fonte: elaborado pelo autor

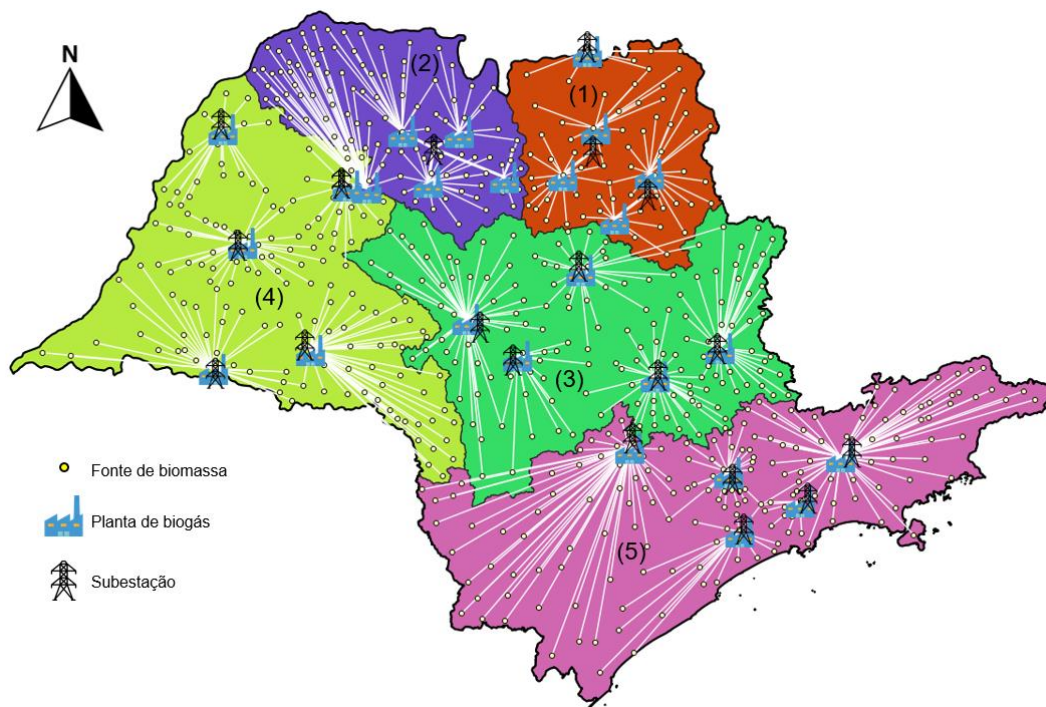
A escolha de dividir o estado em cinco Megarregiões e implementar um número maior de plantas menores, também se justifica em termos de desenvolvimento social e econômico regional. Com a diversificação dos empreendimentos, ocorre uma melhor distribuição da oferta de empregos diretos e indiretos e, conseqüentemente, a melhoria da qualidade de vida da população local (MORAES, 2014). Além disso, há uma melhora na disponibilidade de energia sustentável e barata nas regiões produtoras e seus entornos. De acordo com Herran e Nakata (2012), a descentralização do fornecimento de eletricidade é essencial para o desenvolvimento de comunidades rurais e isoladas e tem sido implementada em vários países da Ásia e da América Latina.

Embora a modelagem utilizada para a instalação das plantas, levar em consideração fatores ambientais, sociais, e de infraestrutura, Genus e Mafakheri

(2014) citam que outros fatores, como incentivos fiscais dos municípios, motivações políticas e também de ordem financeira, podem influenciar tanto na escolha de locais com menor aptidão quanto no número de plantas instaladas.

O mapa de localização das plantas de biogás com as cinco Megarregiões é mostrado na Figura 5.20. Todas as 645 fontes de biomassa foram alocadas à 25 plantas de biogás e, cada planta foi conectada a uma subestação. As linhas de alocação mostram a conectividade entre as plantas e as fontes de biomassa, e entre as plantas e as subestações. Como esperado, a distância entre as plantas e as subestações foi preferencialmente reduzida, sobretudo devido ao alto fluxo entre elas. Isso influenciou a localização das plantas em cada uma das Megarregiões, como nas Megarregiões 1, 3 e 4, em que as plantas de biogás ficaram mais distribuídas espacialmente. Na Megarregião 2, as plantas ficaram mais concentradas devido à baixa disponibilidade de subestações próximas (veja a Figura 5.3), enquanto na Megarregião 5, as plantas ficaram localizadas mais à leste da região, onde há uma maior concentração de fontes de biomassa e subestações disponíveis.

Figura 5.20 - Mapa de localização das plantas com cinco Megarregiões



Fonte: elaborado pelo autor

Embora possam haver fatores locais não incluídos no modelo, que afetem os resultados, a solução ótima encontrada vai em direção à sustentabilidade do ponto de vista econômico, social e ambiental. Primeiramente, porque a busca pelos menores custos de transporte é um requisito importante para a viabilidade econômica. O fator social também é afetado positivamente, não apenas por ser incluído como um dos critérios para a classificação dos locais, mas também porque a solução encontrada busca distribuir geograficamente a geração de energia e, assim, trazer os proveitos sociais mencionados anteriormente. Por fim, apesar do uso energético da biomassa já trazer consigo importantes benefícios para a natureza, deve-se buscar também a redução dos impactos ambientais advindos da geração de bioenergia. Por esse motivo, no modelo proposto, o fator ambiental desempenhou um papel importante na definição dos locais mais adequados para as unidades geradoras de energia. Soma-se a isso, o fato de que a redução dos custos de transporte está diretamente relacionada à diminuição no uso de combustíveis fósseis pelos veículos transportadores.

5.4 CONSIDERAÇÕES

Este estudo apresentou uma metodologia baseada em SIG e análise de decisão multicritério para indicar locais aptos para a instalação de plantas de biogás, bem como definir o número ótimo de plantas. A metodologia baseia-se no potencial de geração de biomassa, nas restrições de instalação e nas distâncias de transporte. O uso dos recursos SIG foram fundamentais para apoiar o processo de tomada de decisão, permitindo a identificação de limitações de ordem física e impedimentos de ordem legal, como também permitiu a detecção de áreas aptas para a instalação das plantas. Aproximadamente 46% do território do estado de São Paulo apresentou-se restrito para a instalação de plantas de biogás. A análise de decisão multicritério também se mostrou eficiente na geração dos índices de adequação dos locais. Com a espacialização desses índices, todo o território em estudo pôde ser classificado. Os resultados apontaram que o estado de São Paulo possui 25,6% de seu território adequado para a instalação de plantas de biogás, sendo que 1.267 locais foram identificados como os melhores candidatos para essa instalação.

Baseado nos locais candidatos e nas restrições do problema, o modelo matemático de localização foi capaz de selecionar o conjunto de locais com os menores custos totais de transporte em cada cenário. Os cenários que consideraram a divisão do Estado de São Paulo em cinco Megarregiões apresentaram os menores custos totais de transporte (distância x suprimento). Outro resultado importante indica que, à medida que o número de plantas aumenta, o custo total de transporte diminui até que haja cerca de cinco plantas em cada região. Em conjunto, esses resultados mostram que, dentre os cenários testados, a melhor solução encontrada foi a divisão de todo o território em cinco regiões, implementando cinco plantas em cada uma delas. Espera-se que esses resultados ajudem as entidades governamentais locais/estaduais, as concessionárias de energia e outras partes interessadas no planejamento do uso energético da biomassa. A metodologia desenvolvida neste estudo também pode ser adaptada e aplicada para investigar outras fontes de energia renovável. Dessa forma, ela ajudará a promover o uso mais eficiente desses recursos.

Embora o mapa de aptidão e o modelo matemático forneçam informações importantes sobre a localização e o número ótimo de plantas, peculiaridades locais não abordadas neste estudo, podem afetar a solução real, principalmente, a viabilidade econômica das plantas. Por esse motivo, a localização final das plantas deve ser avaliada localmente, caso a caso. Além disso, neste estudo, todas as plantas foram consideradas como tendo a mesma capacidade. Entretanto, alguns estudos (SCARLAT *et al.*, 2019; SULTANA; KUMAR, 2012) indicaram que, em locais com alta disponibilidade de biomassa, os custos tendem a ser menores quando são instaladas plantas maiores. Trabalhos futuros podem investigar como uma combinação de plantas com diferentes capacidades influenciará os resultados na área selecionada para estudo. Além disso, parâmetros como o custo de instalação e manutenção das plantas, também poderiam ser incluídos no modelo matemático proposto. Esses parâmetros podem influenciar a solução ao incluir possíveis variações locais de taxas e impostos e também ajudar em uma análise econômica mais detalhada.

6 PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO-ROTEAMENTO PARA PLANTAS DE BIOGÁS

6.1 INTRODUÇÃO

Apesar dos benefícios da produção de energia em biodigestores, a escolha do local de instalação da planta é uma atividade complexa que envolve diversos fatores. Devido a biomassa estar dispersa espacialmente, quando o local não é devidamente escolhido, há interferência na viabilidade operacional do projeto (JEONG; RAMÍREZ-GÓMEZ, 2017). Também não podem ser ignorados os impactos ambientais e sociais que toda a cadeia de abastecimento e geração de energia podem causar, como ruído, poluição visual, poluição da água, geração de tráfego, riscos à saúde e à segurança das pessoas. É fundamental, portanto, que os benefícios ambientais e a geração de energia decorrentes da planta de biogás superem os impactos ocorridos da sua operação.

Comparado aos combustíveis fósseis, a baixa densidade aparente da biomassa resulta em um maior volume para uma mesma massa de combustível. Isso resulta em um maior volume que precisa ser manuseado, transportado e armazenado. Esse fato associado ao baixo poder calorífico, faz com que as operações de fornecimento de biomassa para as plantas sejam responsáveis por uma parte significativa do custo de geração do biogás (ALLEN *et al.*, 1998; IOANNOU *et al.*, 2018). Portanto, é necessário que o fornecimento de biomassa para as plantas seja estruturado com eficiência para subsidiar a viabilidade da geração de energia.

O problema de localização das plantas e o problema de roteamento dos veículos coletores de biomassa estão fortemente relacionados. Entretanto, estes problemas são tratados de forma separada em estudos sobre o abastecimento de biomassa em plantas de biogás, gerando soluções afastadas do ótimo ou, até mesmo, ineficazes. Uma das formas de abordar esses problemas de forma integrada é a utilização de modelos matemáticos de localização-roteamento ou LRP (*location routing problem*). A próxima seção abordará o problema LRP.

6.1.1 O problema de localização-roteamento

O problema de localização-roteamento é um problema tradicional que considera um conjunto de potenciais facilidades e um conjunto de clientes com

uma demanda conhecida, em que as decisões principais são: i) o número de facilidades abertas, ii) a alocação dos clientes às facilidades abertas, e iii) o conjunto de rotas que vão atender aos clientes, utilizando uma frota de veículos (TORDECILLA *et al.*, 2023).

A localização de facilidades e o roteamento de veículos são áreas relacionadas (MARANZANA, 1964). No entanto, frequentemente essa interrelação é ignorada. Segundo Nagy (2007) as principais razões disso são: i) em alguns casos, os problemas de localização não têm aspecto de roteamento, ii) alguns pesquisadores consideram que localização é um problema estratégico, enquanto roteamento é um problema tático, logo incompatíveis e, iii) problemas LRP são conceitualmente mais difíceis de resolver do que problemas clássicos de localização.

Deve-se observar que, ao ignorar a interrelação entre os problemas de localização e roteamento, corre-se o risco de uma sub-otimização (RAND, 1976). Porém, ambos são de natureza NP-hard e, a integração entre eles, mantém essa característica.

O LRP também possui muitas variações, como o tipo de veículos e facilidades (capacitados e não capacitados), a natureza dos dados (determinísticos ou estocásticos), o tipo de função objetivo (simples ou multiobjetivo), etc. Para mais variações, consultar os trabalhos de revisão dos autores Nagy (2007) e Min *et al.* (1998). Além das variações citadas, o problema pode ser classificado de acordo com o tipo de abordagem utilizada, para resolver esse tipo de problema, como métodos exatos, heurísticas e técnicas híbridas, como as matheurísticas⁷.

As primeiras abordagens exatas para resolver o LRP partiram de casos particulares, sendo Laporte e Nobert (1981) os desenvolvedores do primeiro algoritmo exato para o caso geral de LRP. Nesse trabalho, um único depósito deve ser selecionado e um número fixo de veículos deve ser usado.

Laporte *et al.* (1983) consideraram a localização de vários depósitos e aplicação de relaxação com a introdução gradual de restrições. Os autores identificaram que, para o caso particular de um único veículo por depósito, foi mais eficiente reintroduzir, primeiro, as restrições de eliminação de sub-rota para, em

⁷ Combinação de programação matemática e heurística.

seguida, usar os cortes de Gomory para atingir a integralidade. Para os outros casos, os autores recomendaram usar, primeiro, os cortes de Gomory para, em seguida, reintroduzir as restrições de eliminação de sub-rota. Laporte *et al.* (1988) usaram uma transformação de grafo para reformular um LRP em um problema do tipo caixeiro-viajante. A transformação de grafo reformulou o problema, originalmente assimétrico, em um problema simétrico através de operações nos nós e arcos do grafo original. Os autores aplicaram um algoritmo *branch-and-bound*, no qual, na árvore de busca, cada subproblema passou a ser um problema de atribuição restrito e, portanto, podendo ser resolvido de forma mais eficiente.

Zografos e Samara (1989) desenvolveram um LRP multi-objetivo para a definição dos locais de descarte e das rotas de coleta de resíduos perigosos. A função objetivo do modelo proposto buscava minimizar o risco de transporte, o tempo de viagem e o risco de descarte dos resíduos. O problema foi resolvido utilizando a técnica de programação por metas (*goal programming*). Na técnica de programação por metas é declarado um alcance para cada objetivo, sendo que o alvo do método é encontrar uma solução que minimize a soma dos desvios em todos os objetivos declarados. Esse mesmo problema de localização e roteamento de resíduos perigosos foi estudado por ReVelle *et al.* (1991). Os autores propuseram um modelo multi-objetivo para minimizar, simultaneamente, o custo de transporte e a percepção de risco da população. O problema clássico das p-medianas foi usado como base para formulação do problema e, uma curva *tradeoff* foi criada para avaliar a influência de cada objetivo. Toro *et al.* (2017) desenvolveram um modelo que busca minimizar os custos operacionais e os impactos ambientais do consumo de combustível. Segundo os autores, o uso de um maior número de veículos gera rotas mais curtas, maior economia de combustível e, portanto, menos emissões.

Quando o LRP é aplicado em instâncias maiores, pode ser mais eficiente o uso de heurísticas e metaheurísticas na busca de soluções. Wu *et al.* (2002) estudou o LRP, com capacidade nas facilidades e nos veículos, com frotas homogêneas e heterogêneas. Eles dividiram o problema original em dois subproblemas, alocação e roteamento de veículos, respectivamente. Cada problema é resolvido de forma sequencial e iterativa através da metaheurística *Simulated Annealing*.

Tuzun e Burke (1999) desenvolveram uma heurística de duas fases baseada em *Tabu Search* com rotas capacitadas e facilidades não capacitadas. As duas fases são dedicadas ao roteamento e à localização. O princípio consiste em adicionar, iterativamente, uma facilidade à solução, até que a adição piore o custo total. Albareda-Sambola *et al.* (2005) também propuseram uma heurística de duas fases, baseada em TS, com uma única rota por depósito aberto não capacitado. As duas fases consistem em uma intensificação, que otimiza as rotas e uma diversificação que modifica o conjunto de depósitos abertos.

Tordecilla *et al.* (2020) propuseram um algoritmo simheurístico⁸ para resolver um LRP que tem como variável o dimensionamento das facilidades. Os autores consideraram que as demandas de todos os clientes são estocásticas. Os resultados foram avaliados em termos de custos totais e de confiabilidade. Cao *et al.* (2021) utilizaram uma abordagem híbrida para resolver, de forma integrada, o problema de localização e roteamento de veículos em cadeias de suprimento de biomassa. Eles integraram à estrutura do algoritmo proposto um modelo matemático de otimização.

Esta tese considera o LRP com instalação de facilidades e veículos capacitados, frota homogênea e, com a possibilidade de alocar mais de uma rota em cada facilidade aberta. O objetivo é determinar o conjunto de plantas de biogás abertas, as rotas originando de cada planta e as subestações que receberão a energia gerada pelas plantas. Um modelo de programação inteira mista e um algoritmo baseado em *Tabu Search* são propostos para resolver o problema. Um conjunto de testes foi realizado com instâncias de pequena e grande escala, para avaliar a abordagem proposta.

6.2 MODELO MATEMÁTICO

O modelo proposto busca definir a localização ideal para as plantas de biogás, fornecer as rotas de coleta de biomassa para o abastecimento dessas plantas e, além disso, indicar os locais para fornecimento da energia gerada. A distribuição espacial das fontes de biomassa, os locais candidatos para a instalação das plantas de biogás (plantas potenciais) e os destinos da energia gerada (subestações) são

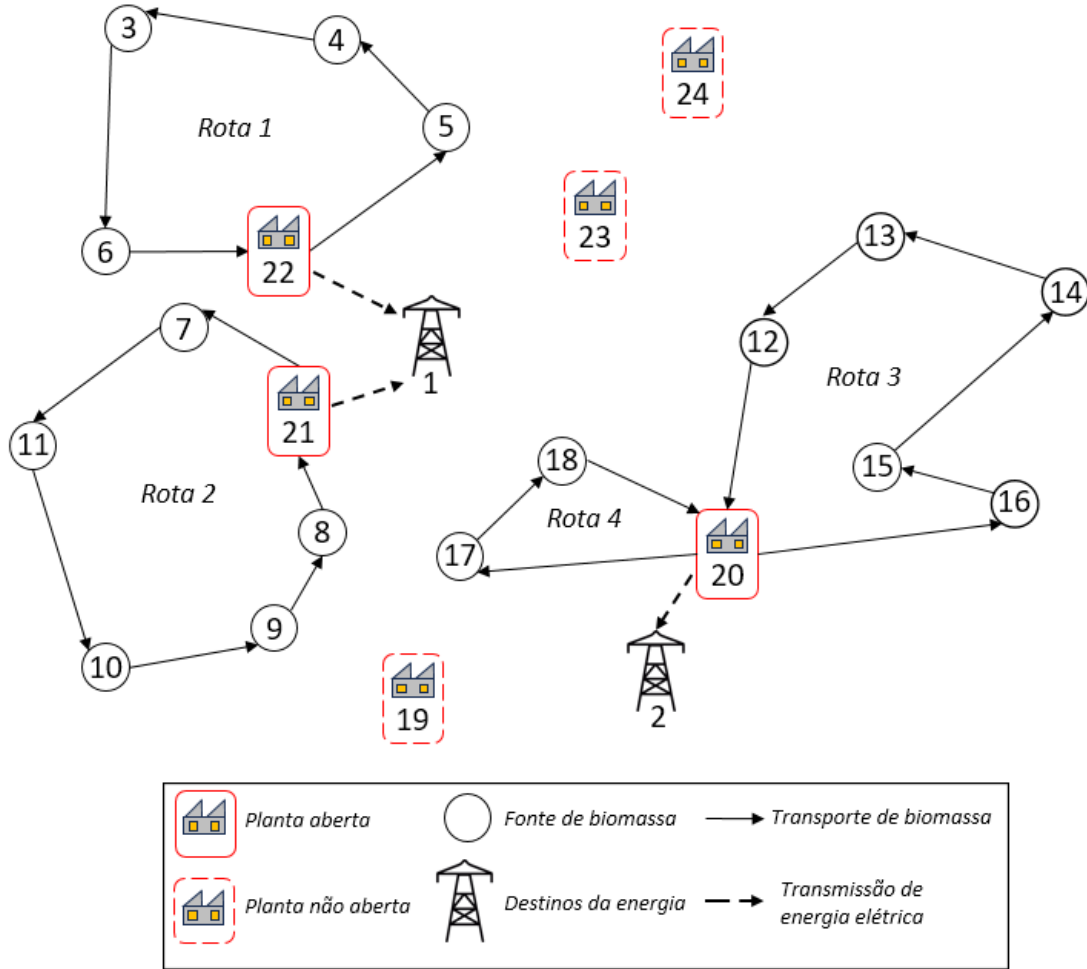
⁸ Algoritmos que integram simulação em uma estrutura orientada por metaheurísticas. Buscam resolver problemas de otimização estocásticos.

conhecidos. As soluções fornecidas pelo modelo indicam quais plantas devem ser abertas, quais rotas abastecem essas plantas com biomassa e quais subestações devem receber a energia dessas plantas.

O modelo de *location-routing problem* (LRP), é baseado no modelo usado por Cao *et al.* (2021) e pode ser definido como um grafo orientado $G = (V, A)$, em que V é o conjunto de todos os nós e A é o conjunto de arcos. O conjunto V é formado pela união dos conjuntos VS e VP , em que VS é o conjunto das fontes de biomassa e VP é o conjunto das plantas potenciais. A localização ótima das plantas e as rotas de coleta de biomassa serão influenciadas pela disponibilidade de biomassa e localização das fontes. Os veículos utilizados para a coleta de biomassa possuem a mesma capacidade h e o mesmo custo por quilômetro. Cada veículo percorre apenas uma rota e cada rota está associada a apenas um veículo. Durante o processo de geração de energia nas plantas, a biomassa é convertida em biogás e o biogás em eletricidade. A eletricidade que é gerada é enviada através de linhas de transmissão para um conjunto B , de subestações de energia com localizações previamente conhecidas. Diferentemente do modelo proposto nesse trabalho, no modelo de Cao *et al.* (2021), a biomassa não é convertida em energia, sendo simplesmente transportada entre os nós da rede, já que o seu objetivo é o envio de biomassa para biorrefinarias. Além disso, os modelos apresentam abordagens distintas para restrições fundamentais, como aquelas que impedem a formação de sub-rotas e as que estabelecem a conexão entre os nós da rede. Outra diferença é que, no modelo proposto neste trabalho, há maior flexibilidade na definição do número de rotas em cada planta.

A Figura 6.1 mostra a ilustração de uma solução para o problema em estudo. Na ilustração há 2 subestações/destinos da energia (nós 1-2), há 16 fontes enviando biomassa (nós 3-18), onde as localizações e capacidades são conhecidas. Há 6 potenciais plantas de biogás (nós 19-24), em que a localização, a capacidade de produção e os custos são conhecidos. Nesse exemplo, a planta 22 é aberta e coleta biomassa das fontes 3, 4, 5 e 6 através de um único veículo (rota 1). Em seguida a energia gerada nessa planta é encaminhada para o destino final (subestação 1). As plantas de biogás 19, 23 e 24 não foram abertas nesse exemplo.

Figura 6.1 – Ilustração da solução do problema proposto



Os principais elementos do modelo proposto são apresentados a seguir.

- Conjuntos:

VS : conjunto de fontes de biomassa;

VP : conjunto de plantas de biogás;

$V = VS \cup VP$: conjunto de nós;

B : conjunto de destinos da energia gerada (subestações);

K : conjunto de veículos;

- Parâmetros:

d_{ij} : distância entre o nó i e o nó j , $\forall i, j \in V$ (km);

q_i : capacidade de produção de biomassa da fonte i , $\forall i \in VS$ (tonelada/dia);

f_i : custo fixo da planta aberta i , $\forall i \in VP$ (R\$/dia);

v_i : custo de produção de energia na planta i , $\forall i \in VP$ (R\$/tonelada);

t_i : capacidade de processamento de biomassa da planta i , $\forall i \in VP$ (tonelada/dia);

u_{ib} : distância entre a planta i e a subestação b , $\forall i \in VP, b \in B$ (km);

c : custo da linha de transmissão elétrica entre a planta e a subestação (R\$/km/dia);

α : fator de conversão de energia elétrica para biomassa (tonelada/MWh);

h : capacidade dos veículos (tonelada);

e : custo por km dos veículos (R\$/km);

N : número máximo de rotas em cada planta ($N \leq$ número de veículos);

M : número positivo grande;

- Variáveis:

x_{ijk} : igual à 1 se o nó i precede o nó j na rota k ; 0, caso contrário; $\forall i, j \in V, k \in K$;

y_{ij} : igual à 1 se a fonte i é alocada à planta j ; 0, caso contrário; $\forall i \in VS, j \in VP$;

z_i : igual à 1 se a planta i é aberta; 0, caso contrário; $i \in VP$;

w_{ib} : energia enviada da planta i para a subestação b , $\forall i \in VP, b \in B$ (MWh/dia);

s_{ib} : igual à 1 se a planta i é alocada a subestação b ; 0, caso contrário; $\forall i \in VP, b \in B$;

m_k : igual à 1 se o veículo k é usado; 0, caso contrário; $\forall k \in K$;

u_i : variável auxiliar que representa o fluxo dos veículos após visitar a fonte i , $\forall i \in VS$;

O modelo matemático proposto é definido por:

$$\text{Min} \sum_{i \in VP} f_i z_i + c \sum_{i \in VP} \sum_{b \in B} u_{ib} s_{ib} + \sum_{i \in VS} \sum_{j \in VP} q_i v_j y_{ij} + e \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} d_{ij} x_{ijk} \quad (6.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\substack{j \in V \\ j \neq i}} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \forall i \in VS \quad (6.2)$$

$$\sum_{j \in VP} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 0, \forall i \in VP \quad (6.3)$$

$$\sum_{i \in VS} \sum_{j \in V} q_i x_{ijk} \leq h, \forall k \in K \quad (6.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq M \cdot m_k, \forall k \in K \end{array} \right. \quad (6.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in VP} \sum_{j \in VS} x_{ijk} = m_k, \forall k \in K \end{array} \right. \quad (6.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \in VS} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq N, \forall i \in VP \end{array} \right. \quad (6.7)$$

$$\sum_{i \in V} x_{jik} - \sum_{i \in V} x_{ijk} = 0, \forall j \in V, \forall k \in K \quad (6.8)$$

$$w_{ib} \leq M \cdot s_{ib}, \forall i \in VP, \forall b \in B \quad (6.9)$$

$$\sum_{b \in B} \alpha \cdot w_{ib} - \sum_{j \in VS} q_j y_{ji} = 0, \forall i \in VP \quad (6.10)$$

$$\sum_{j \in VS} q_j y_{ji} \leq t_i z_i, \forall i \in VP \quad (6.11)$$

$$\sum_{l \in V} x_{ilk} + \sum_{l \in V} x_{jlk} - y_{ij} \leq 1, \forall i \in VS, j \in VP, k \in K \quad (6.12)$$

$$\sum_{i \in VP} \sum_{b \in B} \alpha \cdot w_{ib} - \sum_{i \in VS} q_i = 0 \quad (6.13)$$

$$u_j - u_i + h - h x_{ijk} \geq q_j \quad \forall i \in VS, j \in VS, k \in K, i \neq j \quad (6.14)$$

$$x_{ijk}, y_{ij}, z_j, m_k, s_{ib} \in \{0, 1\} \quad (6.15)$$

$$u_i, w_{ib} \in \mathbb{R} \quad (6.16)$$

No modelo (6.1 – 6.16), a função objetivo (6.1) minimiza o custo total de geração e envio de energia. As restrições (6.2) asseguram que cada fonte está associada a um e somente um veículo (rota) k e a outro nó posterior (planta ou fonte). As restrições (6.3) garantem que as plantas não podem conectar-se entre si. Nas restrições (6.4), o volume transportado por um veículo k não pode exceder a sua capacidade. As restrições (6.5) asseguram que se o veículo k é usado em algum transporte, então $m_k = 1$. As restrições (6.6) garantem que para cada veículo (rota) k usado, haverá uma única planta conectada anteriormente a uma fonte. Essas restrições asseguram que cada veículo utilizado, saia uma única vez de uma única planta. Nas restrições (6.7), o número de veículos (rotas) que podem ser associados à cada planta é definido. Cada planta será conectada posteriormente a no máximo N fontes. Observe que já garantimos nas restrições (6.6) que o veículo k saia de uma única planta apenas uma vez. As restrições (6.8) asseguram que se o nó é conectado em um nó posterior, um outro nó anterior deve ser conectado a ele. Essas restrições garantem a formação de anéis. As restrições (6.9) asseguram que se $w_{ib} > 0$, então $s_{ib} = 1$. Nas restrições (6.10), o volume que entra na planta deve ser equivalente à energia elétrica que sai dela. As restrições (6.11) garantem que o volume que chega na planta não deve ser maior que a sua capacidade. As restrições (6.12) asseguram que se a fonte e a planta estão na mesma rota, a fonte é atribuída a essa planta. Nas restrições (6.13), o equilíbrio geral do transporte é garantido. As restrições (6.14) impedem a formação de sub-rotas na rede. As restrições (6.15 – 6.16) definem o domínio das variáveis de decisão.

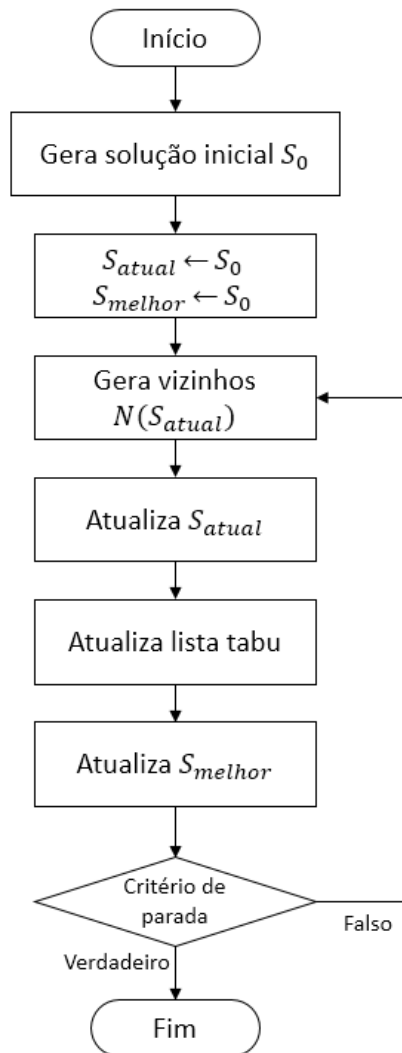
Usando o modelo (6.1 – 6.16), é possível encontrar soluções ótimas para pequenas instâncias. Um procedimento heurístico baseado em *Tabu Search* também foi desenvolvido para resolver problemas maiores, que se aproximavam mais dos problemas reais.

6.3 HEURÍSTICA PARA LRP

Resolver o problema LRP utilizando o modelo (6.1 – 6.16) pode resultar em um alto tempo computacional. Tal afirmação pode ser demonstrada ao se verificar que o problema do Caixeiro Viajante constitui um caso particular do LRP, quando há apenas um depósito, um único veículo disponível e nenhuma restrição adicional é imposta. Portanto, uma vez que o problema do Caixeiro Viajante é conhecidamente um problema NP-hard, conclui-se que o problema LRP também pertence a essa classe de complexidade. Com isso, métodos de soluções heurísticos têm sido bastante pesquisados para resolver este tipo de problema em tempo computacional viável.

Um método heurístico usado para resolver o LRP é a metaheurística *Tabu Search*, que explora o espaço da solução movendo-se de uma solução para sua melhor vizinha, mesmo que isso resulte em uma deterioração do valor da função objetivo. Essa estratégia permite que a busca saia dos ótimos locais e explore outras regiões do espaço de solução (veja Glover (1993b, 1995)) para mais detalhes da teoria).

Para resolver com eficiência o LRP estudado nesta tese, um algoritmo baseado na metaheurística TS foi desenvolvido. O algoritmo parte de uma solução inicial factível S_0 , em que são formadas rotas contendo todas as fontes de biomassa e plantas aleatoriamente selecionadas. A solução atual S_{atual} , e a melhor solução obtida até o momento S_{melhor} , tornam-se a solução inicial. Em seguida, são geradas soluções vizinhas $N(S_{atual})$ da solução atual e o melhor vizinho é selecionado para tornar-se a nova solução atual. A lista tabu é atualizada e, caso S_{atual} seja melhor que S_{melhor} , esta última é atualizada. O critério de parada do algoritmo refere-se ao número máximo de iterações sem melhora de S_{melhor} e, caso não seja atendido, uma nova solução de vizinhança é gerada a partir de S_{atual} . O processo se repete até atingir o critério de parada. A Figura 6.2 mostra o fluxograma do algoritmo proposto.

Figura 6.2 – Fluxograma do algoritmo proposto

Fonte: elaborado pelo autor

O algoritmo TS parte de uma solução inicial factível, que é gerada através do algoritmo de inicialização (Algoritmo Inicial). O algoritmo de inicialização aloca de forma aleatória, cada fonte i do conjunto VS a uma planta j do conjunto VP e a um veículo k , que esteja vinculado à planta j . Durante a alocação das fontes são verificadas as restrições de capacidades das plantas e dos veículos. O algoritmo de inicialização é descrito a seguir.

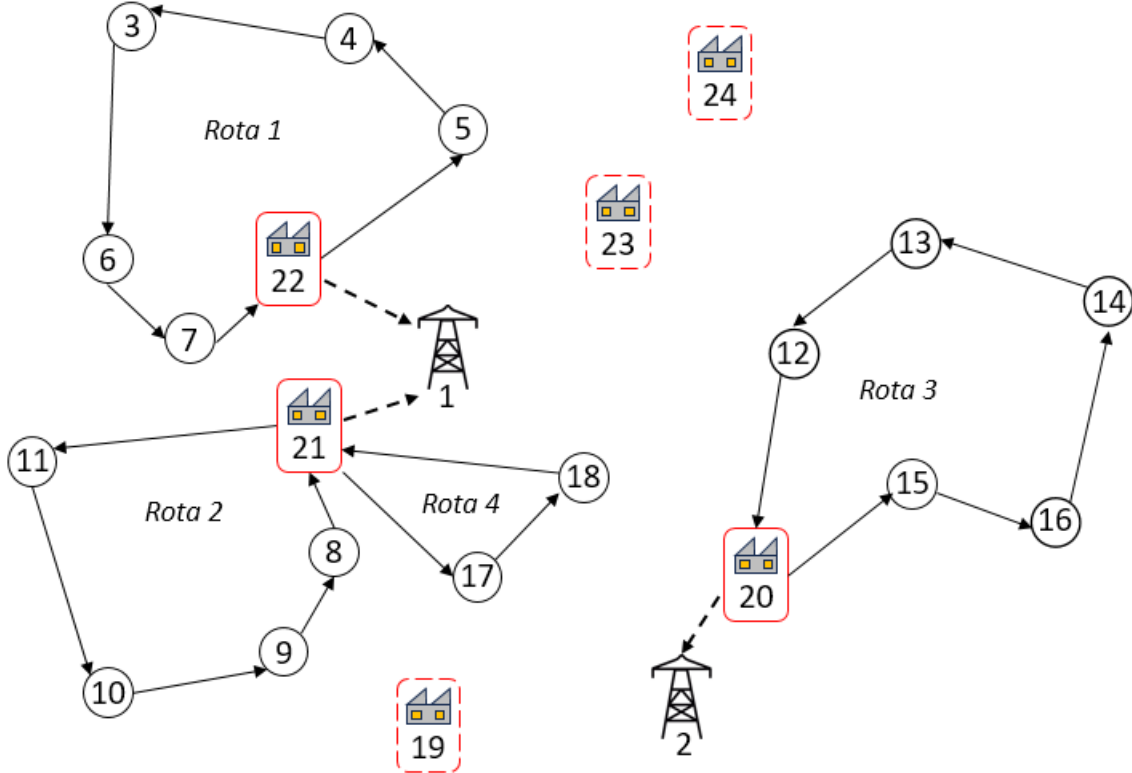
Algoritmo Inicial: Solução inicial factível S_0 K_i : conjunto de veículos alocados à planta i F_k : conjunto de fontes alocadas ao veículo k **for** i **in** VS reiniciar $\leftarrow 0$ **while** reiniciar = 0 **do** $j_0 \leftarrow$ aleatório ($j \in VP$) {seleciona aleatoriamente a planta j , $\forall j \in VP$ } $k_0 \leftarrow$ aleatório ($k \in K_{j_0}$) {seleciona aleatoriamente o veículo k , $\forall k \in K_{j_0}$ } estoque1 $\leftarrow 0$ estoque2 $\leftarrow 0$ **for** k **in** K_{j_0} **for** f **in** F_k {percorre todas as fontes alocadas ao veículo k } estoque1 $\leftarrow$ estoque1 + q_f {estoque corrente da planta j_0 } **if** $k = k_0$ estoque2 $\leftarrow$ estoque2 + q_f {estoque corrente do veículo k_0 } **end if** **end for** **end for** **if** estoque1 + $q_i \leq t_{j_0}$ {restrição para a capacidade da planta} **if** estoque2 + $q_i \leq h$ {restrição para a capacidade do veículo} planta(j_0). veículo (k_0) $\leftarrow$ fonte(i) {a fonte i é alocada ao veículo k_0 } reiniciar $\leftarrow 1$ **else** planta(j_0) $\leftarrow$ fonte(i) {novo veículo é alocado à planta j_0 para receber a fonte i } reiniciar $\leftarrow 1$ **end if** **end if** **end while****end for**

No algoritmo TS, a definição de uma estrutura de vizinhança adequada é a parte mais importante do algoritmo. A forma como a vizinhança é construída vai definir os tipos de modificações que a solução atual vai sofrer, de modo a pesquisar diferentes soluções vizinhas no espaço de solução. Nesse trabalho, definimos três estratégias de vizinhanças para uma determinada solução. Em conjunto, essas estratégias buscam intensificar a pesquisa em boas soluções, quando o conjunto de plantas abertas permanece fixo durante as modificações. Por outro lado, também podem diversificar, ao modificar o conjunto inicial de plantas abertas. Seja S_{atual} a solução atual, e $N(S_{atual})$ a vizinhança de S_{atual} . Essas vizinhanças são definidas da seguinte forma:

- 1) **Intercâmbio interno:** em uma mesma rota as posições de duas fontes aleatórias são trocadas entre si. A Figura 6.3 ilustra o intercâmbio interno entre as fontes

- 15 e 16 ocorrido na rota 3, quando comparada com a solução da Figura 6.1.
- 2) **Intercâmbio externo entre rotas e plantas:** seleciona uma fonte e a move para outras plantas e para outras rotas na mesma planta. A Figura 6.3 ilustra o intercâmbio externo entre as plantas 21 e 22, em que a fonte 7 foi inserida na rota 1 da planta 22 (vide Figura 6.1).
- 3) **Troca de planta** seleciona uma rota e move-a integralmente para outra planta. Esse movimento, além de aumentar ou reduzir o número de rotas associadas à planta, também pode fechar e abrir novas plantas. A Figura 6.3 ilustra o movimento entre as plantas 20 e 21, em que a rota 4 foi movida da planta 20 para a planta 21 (vide Figura 6.1).

Figura 6.3 – Ilustração dos intercâmbios na solução



Fonte: elaborado pelo autor

Em cada iteração as três estratégias de vizinhança são utilizadas para gerar um conjunto de soluções vizinhas $N(S_{atual})$, da solução atual S_{atual} . O número de soluções geradas pode ser estimado com base na equação (6.17).

$$N_T = K'_{atual} + VS(K_{atual} - 1) + K_{atual}(VP_{atual} - 1) \quad (6.17)$$

em que: N_T é o total de soluções vizinhas geradas; K_{atual} é o número total de veículos de S_{atual} ; K'_{atual} é o número de veículos de S_{atual} que coletam em mais de duas

fontes; VS é o conjunto de fontes de biomassa; VP_{atual} : é o número de plantas abertas em S_{atual} .

Se entre essas soluções, o melhor vizinho não estiver na lista tabu, a solução atual é atualizada. Cada solução atual é sempre anexada no final da lista tabu. Se o tamanho da lista tabu atingir o tamanho máximo permitido, a primeira solução da lista tabu será descartada para permitir anexar uma nova solução.

6.4 RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DISCUSSÃO

Para avaliar o desempenho da abordagem proposta, foram realizados testes computacionais abrangentes. Para isso, os parâmetros que alimentam o modelo foram coletados através da literatura e tomados como fixos ou gerados aleatoriamente dentro de um intervalo. Os custos envolvidos na geração de energia elétrica em plantas de biogás possuem grande variação de uma planta para outra. Diversos fatores, além da distância de coleta de biomassa, influenciam diretamente nos custos, como o tipo de matéria-prima que será processada, a eficiência da tecnologia empregada, a capacidade de produção da planta e as despesas com mão-de-obra. Portanto, devido ao caráter exploratório desse estudo, os custos foram calculados de forma simplificada, levando-se em conta algumas aproximações a partir de valores da literatura (FNR, 2010; CAO *et al.*, 2021; MOREIRA *et al.*, 2019; VELASCO *et al.*, 2006; PASSAGLIA *et al.*, 2019) e convertidos em custos diários. A Tabela 6.1 mostra os valores usados para as capacidades, os custos de transporte e os custos de geração de energia.

Os experimentos computacionais foram realizados em um computador com Intel(R) Core (TM)2 Duo CPU T6400 @ 2.00GHz 2.00 GHz e 3 GB RAM. As soluções exatas do modelo foram obtidas usando IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (Version 20.1) e as soluções aproximadas através da implementação dos algoritmos em linguagem Python 3.12.7. Para todas as instâncias, o tempo limite permitido (TL) foi de 3.600 s.

Tabela 6.1 – Custos e capacidades

Custos	Valor
Custos fixos da planta (f_i)	200,00 (R\$/dia)
Custo da produção de energia na planta (v_i)	150,00 (R\$/tonelada)
Custo por quilômetro do veículo (e)	5,00 (R\$/km)
Custo da linha de transmissão elétrica (c)	15,05 (R\$/km/dia)
Capacidades	Valor
Planta (t_i)	30 – 80 (tonelada/dia)
Fonte (q_i)	4 – 15 (tonelada/dia)
Veículos (h)	25 (tonelada)

6.4.1 Instâncias pequenas

Dez instâncias pequenas foram geradas aleatoriamente variando-se o número de fontes e plantas. Essas instâncias foram resolvidas usando o modelo matemático proposto, assim como o algoritmo TS. Os resultados computacionais são mostrados na Tabela 6.2.

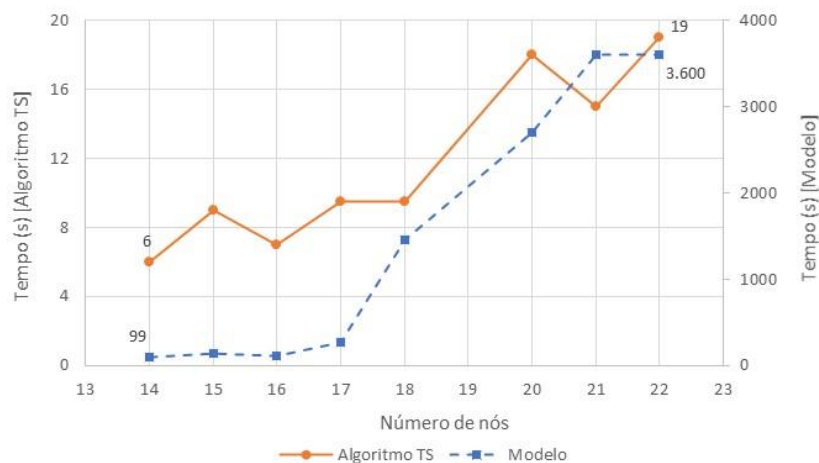
Na Tabela 6.2, a primeira coluna refere-se ao número da instância do problema. A coluna referente à Escala do problema apresenta as disponibilidades de fontes, plantas e subestações (Subes.). As colunas referentes ao Modelo e ao Algoritmo TS apresentam o valor da função objetivo (Fun. Obj.) obtido dentro do tempo limite (TL), limitado em 3.600 segundos. Nestas colunas, o tempo computacional em segundos (Tempo (s)) utilizado para obter a solução também é apresentado. Ainda, na coluna Modelo, apresenta-se o melhor limitante inferior (*Best Bound*) encontrado pelo modelo se o problema não obteve solução dentro do TL. A coluna *Gap* (%) apresenta o *gap* entre a solução obtida pelo modelo e o algoritmo TS. O *gap* é definido de acordo com a Equação (6.18).

$$Gap = \frac{|Fun. Obj (TS) - Fun. Obj (Modelo)|}{Fun. Obj (Modelo)} \times 100\% \quad (6.18)$$

Tabela 6.2 – Comparação entre os resultados das instâncias pequenas

Instância	Escala do problema			Modelo			Algoritmo TS		Gap (%)
	Fontes	Plantas	Subes.	Fun. Obj.	Best Bound	Tempo	Fun. Obj.	Tempo	
1	8	4	2	14.732	-	99	14.735	6	0,02
2	10	3	2	19.384	-	144	19.384	9	0,00
3	10	4	2	17.986	-	106	17.986	7	0,00
4	10	5	2	18.656	-	401	18.707	8	0,28
5	10	6	2	18.373	-	1.939	18.373	10	0,00
6	12	3	2	20.303	-	126	20.303	11	0,00
7	12	4	2	21.170	-	975	21.327	9	0,74
8	15	3	2	28.525	-	2.696	28.580	18	0,19
9	15	4	2	21.630	20.472	TL	21.630	15	0,00
10	15	5	2	26.169	25.175	TL	26.288	19	0,45

Como pode ser visto na Figura 6.4, o tempo computacional médio do modelo aumentou muito rapidamente com o aumento do número de nós, variando de 99 s ao TL. O algoritmo TS mostrou-se muito mais rápido, com um tempo entre 6 e 19 s para obtenção das soluções. Na média, o algoritmo TS foi 83 vezes mais rápido para problemas que o modelo resolveu dentro do TL.

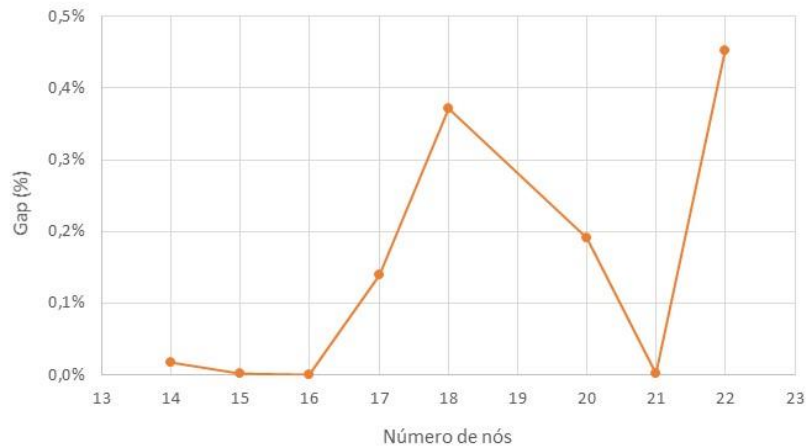
Figura 6.4 – Comparação dos tempos computacionais médios

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 6.5 mostra a eficiência do algoritmo TS na resolução de problemas de pequena escala, com um *gap* variando entre 0 e 0,45%. O *gap* médio ficou em torno de 0,2%. Nas instâncias 2, 3, 5, 6 e 9 o algoritmo conseguiu encontrar a solução ótima em um tempo inferior a 16 s. Nos testes realizados manteve-se o número máximo de iterações igual a 100. É importante enfatizar

que, ao aumentar o número de iterações, aumenta-se a chance de encontrar melhores soluções.

Figura 6.5 – Comparação entre *gaps* médios



Fonte: elaborado pelo autor

6.4.2 Instâncias maiores

Para verificar o desempenho das estratégias desenvolvidas em instâncias maiores, além de instâncias geradas aleatoriamente (instâncias 11 – 14), a qualidade das soluções também foi verificada usando instâncias de referência (instâncias 15 – 18) para problemas LRP. As instâncias de referência, não constituem dados reais, sendo geradas de forma aleatória a partir de intervalos previamente definidos pelos autores (BARRETO *et al.*, 2007; BELENGUER, 2011). Além disso, os parâmetros utilizados pelas instâncias de referência não representam, necessariamente, o problema central desse estudo – alocação de plantas de biogás, roteamento de veículos coletores e distribuição da energia gerada – portanto, o valor da função objetivo é utilizado simplesmente para comparação entre as soluções. Outra diferença está relacionada à ausência de subestações (conjunto *B*) nas instâncias de referência, no entanto, isso foi considerado como um caso especial do nosso modelo, em que só há uma subestação em cada instância.

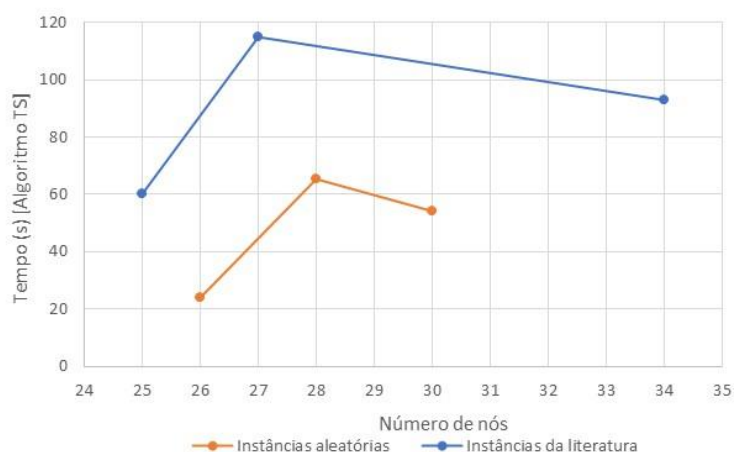
A Tabela 6.3 apresenta as instâncias geradas, as instâncias de referência da literatura e os resultados computacionais. As colunas da Tabela 6.3 possuem a mesma definição das colunas da Tabela 6.2.

Tabela 6.3 – Comparação entre os resultados das instâncias maiores

Instância	Escala do problema			Modelo			Algoritmo TS		Gap (%)
	Fontes	Plantas	Subes.	Fun. Obj.	Best Bound	Tempo	Fun. Obj.	Tempo	
11	20	4	2	29.214	27.002	TL	29.242	24	0,09
12	20	6	2	38.408	37.187	TL	38.253	75	0,40
13	22	4	2	41.551	39.290	TL	41.704	56	0,37
14	22	6	2	34.942	33.125	TL	34.692	54	0,71
Instâncias de referência									
15 (Coord-20-5-1a)	20	5	-	54.793*	-	-	56.134	56	2,45
16 (Coord-20-5-2a)	20	5	-	48.908*	-	-	49.003	64	0,19
17 (Gaskell-22-5)	22	5	-	585,1*	-	-	616.9	115	5,43
18 (Gaskell-29-5)	29	5	-	512,1*	-	-	523.4	93	2,21

* Solução ótima.

A Figura 6.6 mostra que o tempo computacional para obter a solução tende a crescer com o aumento do número de nós, variando de 24 a 66 s e de 56 a 115 s nas instâncias geradas aleatoriamente e nas instâncias da literatura, respectivamente. Isso mostra que o tempo computacional para as instâncias maiores permaneceu aceitável para fins práticos.

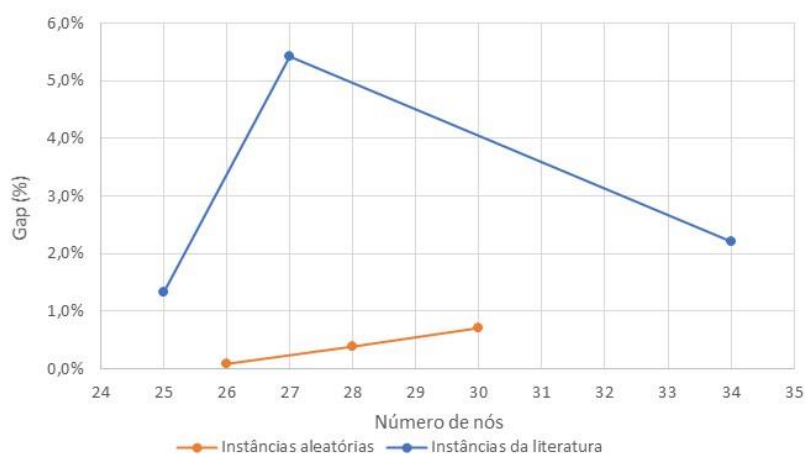
Figura 6.6 – Comparação do tempo médio computacional

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 6.7 apresenta o *gap* em função do número de nós para os dois conjuntos de instâncias. Nas instâncias aleatórias, o *gap* variou de 0,1 a 0,7% em relação ao total de soluções obtidas pelo modelo dentro do TL. Nas instâncias 12 e 14, a solução encontrada foi inferior à solução obtida pelo modelo dentro do TL. Nas instâncias da literatura, o valor do *gap* ficou entre 1,3 e 5,4% em relação à solução

ótima de cada instância. Esse resultado mostra que o algoritmo TS permaneceu eficiente para os maiores exemplos testados.

Figura 6.7 – Comparação entre *gaps* médios

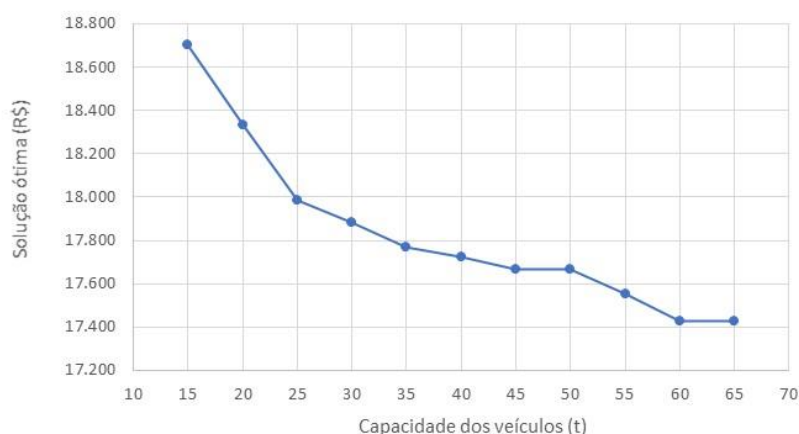


Fonte: elaborado pelo autor

6.4.3 Análise de sensibilidade

Nesse estudo, os veículos utilizados para coletar biomassa são considerados homogêneos e têm uma capacidade de 25 toneladas. No entanto, o tamanho ideal dos veículos pode variar em função de diferentes fatores, como acessibilidade dos locais de coleta, tipo de biomassa, custos, permissão de tráfego nas estradas etc. Para avaliar a influência da capacidade dos veículos na solução do LRP, a instância 3 foi tomada, particularmente, para análise de sensibilidade, entretanto, qualquer outra instância poderia ter sido selecionada.

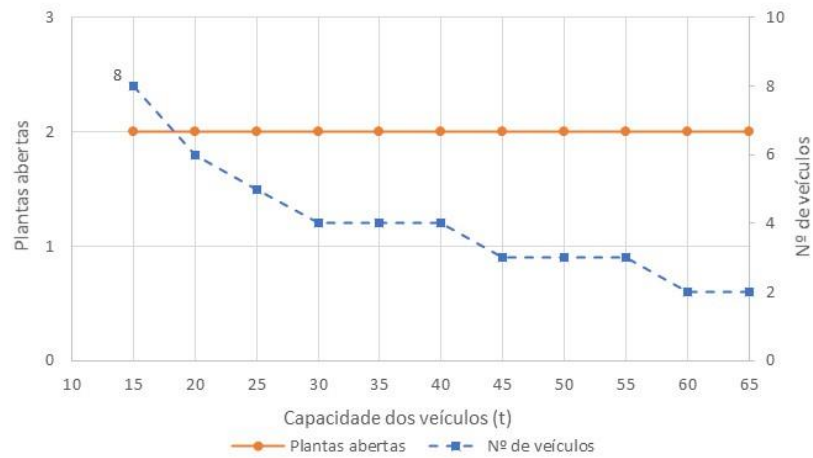
A Figura 6.8 mostra que o valor da função objetivo reduz com o aumento da capacidade dos veículos de 15 – 60 toneladas. A partir de 60 toneladas o tamanho dos veículos não influenciou na solução dessa instância. Isso demonstra que a partir de determinado ponto, outros parâmetros devem ser avaliados para a obtenção de melhores soluções. É importante observar que outras questões não analisadas nesse trabalho, e mencionadas anteriormente, devem ser levadas em consideração para a definição final do tamanho dos veículos.

Figura 6.8 – Variação da função objetivo em relação à capacidade dos veículos

Fonte: elaborado pelo autor

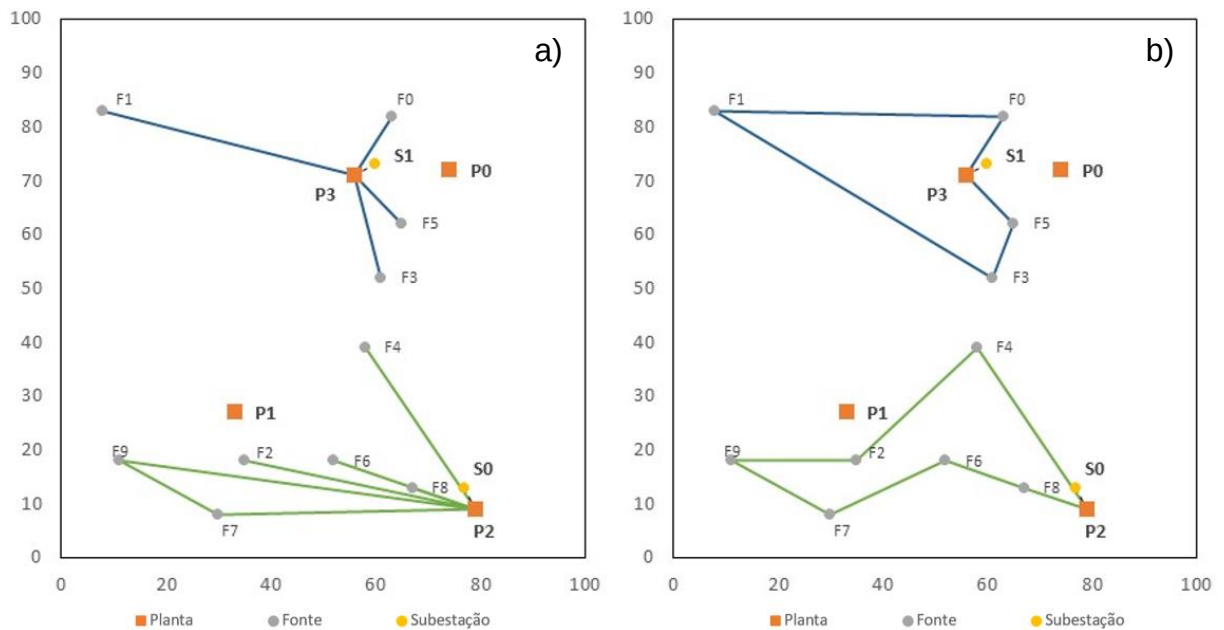
Como pode ser visto na Figura 6.9 e na Figura 6.10, o número de veículos variou de oito até o mínimo de dois veículos, ou seja, até certo ponto veículos maiores permitiram a geração de rotas maiores, mais econômicas e em menor número. Outra observação importante é que, considerando os parâmetros usados, a capacidade dos veículos não influenciou no número de plantas abertas na instância avaliada. Nesse caso, em função do arranjo espacial das fontes, a redução nos custos fixos obtida pela diminuição do número de plantas instaladas é inferior ao aumento observado nos custos de transporte. Quando comparadas às soluções das capacidades mínima e máxima analisadas (Figura 6.10), verifica-se uma redução no número de veículos necessários para o abastecimento de cada planta aberta. A utilização de veículos com maior capacidade permitiu uma diminuição no número de saídas e retornos para as plantas, o que consequentemente, reduziu a distância percorrida e melhorou o valor da função objetivo. Esses resultados mostram a flexibilidade do modelo em problemas do tipo LRP.

Figura 6.9 – Variação no número de plantas abertas e veículos, em relação à capacidade dos veículos



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.10 – Solução ótima para a instância 3 a) Capacidade (h) = 15 ton
b) Capacidade (h) = 65 ton

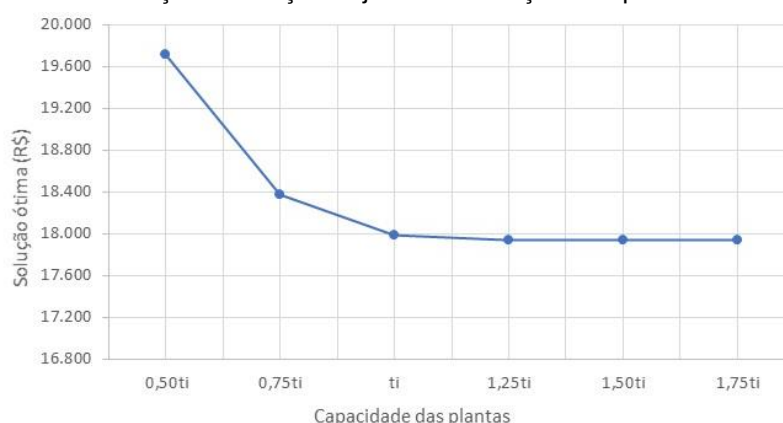


Fonte: elaborado pelo autor

Além da capacidade dos veículos, a capacidade das plantas t_i , também afeta a localização das plantas de biogás, o roteamento dos veículos e, consequentemente o custo final da solução. Nesse trabalho, como mencionado anteriormente, a capacidade de cada planta foi gerada aleatoriamente dentro de um intervalo estabelecido (Tabela 6.1). Para analisar o efeito da capacidade das plantas na solução da instância 3, a capacidade de cada planta t_i foi multiplicada pelos fatores [0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75].

É possível observar na Figura 6.11 que o valor da função objetivo tende a reduzir com aumentos sucessivos na capacidade das plantas até certo ponto ($1,25t_i$), após o qual, aumentos na capacidade das plantas não influenciam o seu valor. Assim, como mencionado para a capacidade dos veículos, a decisão final sobre o tamanho das plantas deve levar em consideração outros fatores, além dos abordados nesse estudo, como disponibilidade de mão de obra, tecnologia utilizada, etc.

Figura 6.11 – Variação da função objetivo em relação à capacidade das plantas

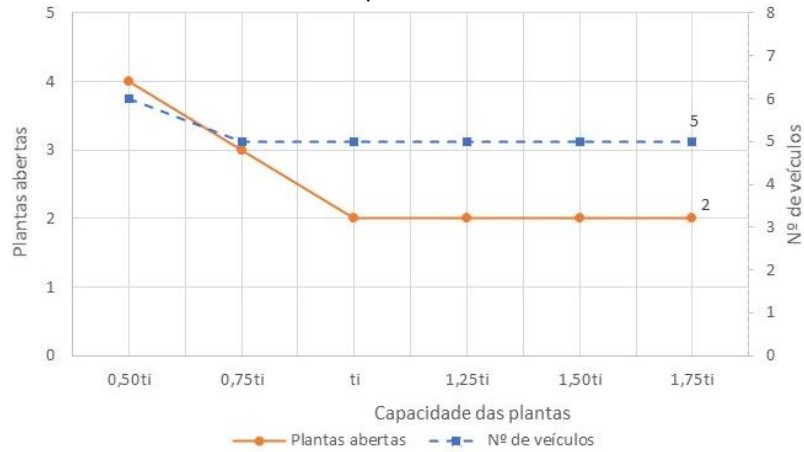


Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 6.12 mostra que a capacidade das plantas influenciou não somente no número de plantas abertas, mas também no número de veículos. A utilização de plantas de menor capacidade força a abertura de novas plantas para atender a oferta das fontes de biomassa. O número de veículos teve um impacto menor, reduzindo de seis para cinco com o incremento no tamanho das plantas. Isso mostra que a capacidade dos veículos é mais importante na determinação do número de veículos.

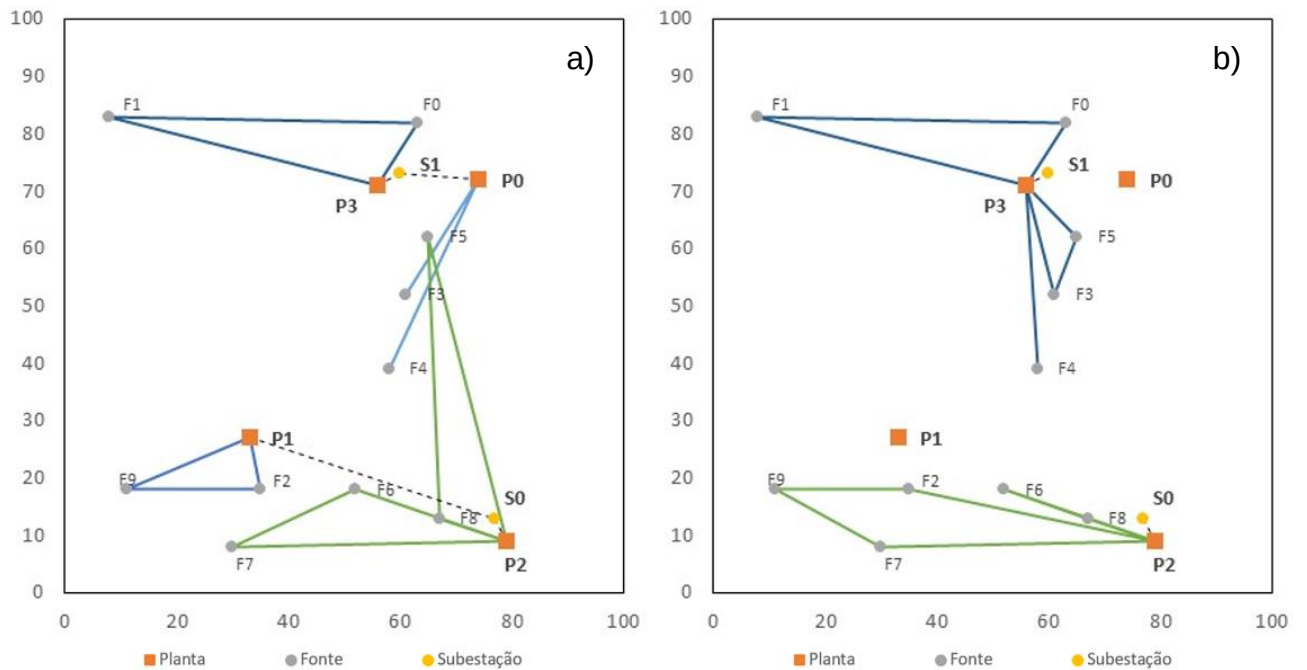
Ao comparar as soluções com os tamanhos mínimo e máximo das plantas (Figura 6.13), observa-se o fechamento da planta P1, com a transferência das fontes (F2 e F9) para a planta P2. Neste caso, a maior distância dessas fontes em relação à planta P2, foi compensada pela redução dos custos fixos com o fechamento da planta P1. O aumento na capacidade da planta P3, também permitiu o fechamento da planta P0, com isso as fontes (F3 e F4) puderam ser transferidas para uma fonte mais próxima. De modo geral, o aumento da capacidade das plantas permitiu uma redução nos custos fixos das plantas e a formação de rotas mais compactas e econômicas.

Figura 6.12 – Variação no número de plantas abertas e veículos, em relação à capacidade das plantas



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.13 – Solução ótima para a instância 3 a) Capacidade = $0,5t_i$
b) Capacidade = $1,75t_i$



Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados dessa seção mostram que o problema de roteamento de veículos e o problema de localização de plantas são fortemente correlacionados, justificando a integração desses dois tipos de problemas. Além disso, a capacidade dos veículos e o tamanho das plantas influenciam no número de veículos necessários, na quantidade de plantas abertas e, consequentemente, no valor da função objetivo.

6.5 CONSIDERAÇÕES

Neste estudo, os problemas de localização de plantas de biogás e o roteamento dos veículos coletores de biomassa são integrados em um único problema de tomada de decisão. O objetivo é minimizar os custos totais da produção de energia através da determinação das rotas e das localizações das plantas. Inicialmente, o problema foi formulado como um modelo de programação inteira mista, resolvido na otimalidade para instâncias de pequena escala.

Por ser um problema NP-hard, instâncias maiores não são resolvidas através de métodos exatos em tempo computacional aceitável. Para solucionar esse problema, propomos uma heurística baseada em *Tabu Search*. A heurística parte de uma solução inicial factível com a formação de rotas em plantas aleatoriamente selecionadas. Os testes computacionais foram realizados em dois conjuntos de instâncias, de pequena e grande escala. No conjunto de instâncias maiores, foram testadas instâncias da literatura, além de instâncias geradas aleatoriamente. Os testes realizados mostraram que a heurística é efetiva para a resolução do problema de roteamento e localização das plantas de biogás, sendo que a solução ótima foi obtida para algumas instâncias pequenas. De modo geral, o tempo computacional foi aceitável e os *gaps* obtidos foram muito pequenos. Finalmente, na análise de sensibilidade realizada, foi mostrado que a capacidade dos veículos e a capacidade de produção das plantas afetaram o número de veículos, a quantidade de plantas abertas e os custos totais.

Futuramente, as seguintes investigações poderão complementar este trabalho: i) considerar a capacidade dos veículos e das plantas como variáveis de decisão ao invés de parâmetros de entrada; ii) o efeito da variação não-linear dos custos ao invés de custos fixos e lineares pode ser estudado, uma vez que, no mundo real, diferentes fatores podem afetar os custos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biogás tem tido cada vez mais importância na composição da matriz energética do Brasil, onde, favoravelmente, têm-se buscado por uma maior diversificação das fontes de energia. Essa progressiva adoção do biogás é resultado, principalmente, de um conjunto de políticas públicas que incentivam o reaproveitamento dos resíduos orgânicos e de iniciativas para o desenvolvimento tecnológico relacionado ao biogás. Nesse sentido, o desenvolvimento do setor de biogás é tão importante para o setor energético quanto para o setor de saneamento, gerando assim, benefícios para esses dois campos estratégicos do país.

Como pôde ser observado nesse estudo, o Brasil possui um alto potencial para a geração de biogás e, embora o seu aproveitamento ainda esteja bem aquém dessa capacidade, observou-se avanços expressivos, na última década, referentes à ao número de plantas instaladas, seja para a geração de eletricidade ou para a produção de biometano. Esse cenário mantém otimistas as perspectivas do biogás para os próximos anos.

Com a expectativa de um número cada vez maior de plantas produzindo biogás no Brasil, surge a necessidade de um planejamento adequado para que o uso da energia derivada do biogás seja viável e competitivo com outras fontes de energia. É necessário, portanto, um conhecimento prévio de toda a complexidade que envolve a localização do potencial de produção, a viabilidade locacional das plantas e as demandas energéticas locais e regionais. Nesse contexto, este trabalho contribui com o desenvolvimento do setor de biogás através da proposição de técnicas efetivas para subsidiar tomadas de decisão referentes à instalação de plantas de biogás e ao suprimento de biomassa destas mesmas plantas.

Os mapas apresentados no Capítulo 5 fornecem informações relevantes para a definição de estratégias energéticas no estado de São Paulo, a partir do uso do biogás. Além disso, usando a metodologia proposta, estes mapas podem ser elaborados para quaisquer outras regiões de interesse e, em diferentes escalas cartográficas. Baseando-se nos mapas gerados, o modelo matemático de localização proposto foi capaz de selecionar, de forma eficiente, o conjunto de plantas com os menores custos de transporte. As abordagens, apresentadas no Capítulo 6, com a integração dos problemas de localização e roteamento, fornecem alternativas à abordagem individual e, com isso, possibilitam a obtenção de resultados

potencialmente melhores do que aqueles obtidos quando a localização e o roteamento são tratados separadamente. O modelo matemático, apresentado no Capítulo 6, foi capaz de resolver para a otimalidade, instâncias de pequena escala em tempo computacional aceitável. Para instâncias maiores, a metaheurística proposta mostrou-se eficiente, com tempos de processamento baixos e *gaps* pequenos.

Entretanto, essa pesquisa não é isenta de limitações, as quais podem representar oportunidades para investigações futuras. Tais limitações, no entanto, não se referem diretamente às técnicas desenvolvidas, mas ao escopo do trabalho e às simplificações necessárias quanto a determinados parâmetros.

Como propostas de trabalhos futuros, sugere-se investigar a influência de plantas com diferentes capacidades nas soluções geradas pelo modelo de localização. Outra oportunidade de pesquisa refere-se à inclusão das capacidades dos veículos e das plantas como variáveis de decisão no modelo de localização e roteamento (LRP). Além dessas sugestões, outros parâmetros de custos também podem ser incorporados a ambos os modelos, ampliando sua abrangência e a capacidade de representar cenários mais realistas.

Em resumo, esta tese desenvolveu um novo conjunto de ferramentas tecnológicas voltadas à tomada de decisão com relevância ambiental, social e econômica. Além disso, parte dos estudos foi baseada em dados reais da área de estudo, fornecendo contribuições originais e aplicáveis ao estado de São Paulo. Espera-se que os resultados aqui apresentados possam integrar o conjunto de soluções voltadas a impulsionar o desenvolvimento sustentável e o progresso social, por meio da ampliação do uso do biogás como uma das alternativas energéticas renováveis.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGÁS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano**. São Paulo: ABiogás, 2015.

ABIOGÁS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. Nota Técnica: **O potencial brasileiro de biogás**. São Paulo: ABiogás, 2020. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/protectedfiles/6390e394c734a95f3032a2da_NOTA-TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf>. Acessado em: jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9648**: estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama do Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/panorama/>> Acessado em: jan. 2025

ACHINAS, S.; ACHINAS, V.; EUVERINK, G. J. W. A technological overview of biogas production from biowaste. **Engineering** 3(3):299–307, 2017.

ALBAREDA-SAMBOLA, M.; DÍAZ, J. A.; FERNÁNDEZ, E. A compact model and tight bounds for a combined location-routing problem. **comput oper res** 32(3):407-428, 2005. [https://doi.org/10.1016/s0305-0548\(03\)00245-4](https://doi.org/10.1016/s0305-0548(03)00245-4)

ALLEN, J.; BROWNE, M.; HUNTER, A.; BOYD, J.; PALMER, H. Logistics management and costs of biomass fuel supply. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, Vol. 28 No. 6, pp. 463-477, 1998. <https://doi.org/10.1108/09600039810245120>

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas Esgotos – Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília-DF: ANA, 2017.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Metadados. 2024**. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/0c698205-6b59-48dc-8b5e-a58a5dfcc989>>. Acessado em: fev. 2024.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **O Saneamento no Brasil**. 2025. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/saneamento/>> Acessado em: jan. 2025

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Lista de aeródromos civis cadastrados**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aerodromos/lista-de-aerodromos-civis-cadastrados>>. Acessado em: fev. 2024.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. – Brasília: Aneel, 268 p, 2005.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa ANEEL n. 1.000, de 07 de dezembro de 2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. **Diário Oficial da União**: 20 de dezembro de 2021.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Unidades com Geração Distribuída**. Brasília, 2025a. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxliw%20idCI6ljQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>> Acessado em: jan. 2025.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. Brasília, 2025b. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWZWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6lj%20QwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>> Acessado em: jan. 2025.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS DO BRASIL. **Relatório dinâmico das instalações produtoras de biocombustíveis autorizadas pela ANP e dos processos em andamento de construção e ampliação de planta de produção de biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/autorizacao-para-producao-de-biocombustiveis/autorizacao-para-producao-de-biocombustiveis>> Acessado em: jan. 2025.

ARENALES, M., ARMENTANO, V., MORABITO R., YANASSE, H. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011.

BARRETO, S.; FERREIRA, C.; PAIXÃO, J.; SOUSA SANTOS, B. Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem. **European Journal of Operational Research**, Volume 179, Issue 3, Pages 968-977, 16 June 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.06.074>

BELENGUER, J. M.; BENAVENT, E.; PRINS, C.; PRODHON, C.; CALVO, R. W. A branch-and-cut method for the capacitated location-routing problem. **Computers & Operations Research** 38, 6, 931-941, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.09.019>

BENINCASA, M.; ORTOLANI, A. F.; LUCAS JUNIOR, J. **Biodigestores convencionais**. Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus Jaboticabal. Jaboticabal, São Paulo, 1990.

BRASIL. Portaria MINTER no 124, de 20 de agosto de 1980. Estabelece normas para a localização de indústrias potencialmente poluidoras junto à coleções hídricas. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Lei no 7.565, de 19 de dezembro de 1986. Dispõe sobre o Código Brasileiro de Aeronáutica. Presidência da República. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Resolução Conama no 13, de 6 de dezembro de 1990. Dispõe sobre normas referentes às atividades desenvolvidas no entorno das Unidades de Conservação. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Lei no 9.985, de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil.

CALDAS, F. A. **Análise da utilização de usinas de pirólise para geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Administração de Organizações) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2019.

CAO, J. X.; ZHANG, Z.; ZHOU, Y. A location-routing problem for biomass supply chains. **Comput. Ind. Eng.**, 152, Article 107017, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107017>.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB do Agronegócio: 3º semestre de 2024, 2024**. Disponível em: <https://cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB%20do%20Agroneg%C3%B3cio_Sum%C3%A1rio%20Executivo_3TRI2024.pdf> Acessado em: jan. 2025

CHRISTOFIDES, N.; EILON, S. An algorithm for the vehicle dispatching problem. **Operational Research Quarterly**, 20, pp. 309–318, 1969.

CHUKWUMA, E. C. Facility location allocation modelling for bio-energy system in Anambra State of Nigeria: Integration of GIS and location model. **Renewable Energy** 141, 460-467, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.022>.

CIBIOGAS - CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – BIOGÁS. **Panorama do Biogás no Brasil 2023**. CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº 001/2024 – Foz do Iguaçu, CIBiogás, 22p, 2024. Disponível em: <<https://materiais.cibiogas.org/panorama-do-biogas-2023>>. Acessado em: jan. 2025.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. V. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations Research**, 12:568-581, 1964.

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; FERRAZ JUNIOR, A. D. N.; SANTOS, M. M.; JOPPERT, C. L. **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo: IEE-USP, 2018

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; SANTOS, M. M.; ESCOBAR, J. F.; PERECIN, D.; SOUZA, D. B. **Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo**. São Paulo: IEE-USP, 250p, 2020a.

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; SANTOS, M. M.; ESCOBAR, J.F.; PERECIN, D.; SOUZA, D. B. **Biogás, Biometano e Potência Elétrica em São Paulo**. São Paulo: IEE-USP, 2020b. Disponível em: <https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=280ffdedd6e74724903ff161803a1462&extent=-53.9090,-25.0137,-43.3621,-20.1000>. Acessado em: jan. 2025.

COSTA, F. R. **Modelo de aptidão e de localização-alocação de usinas bioenergéticas utilizando Sistemas de Informações Geográficas**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). 74 f. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2014.

COSTA, J. P.; DIAS, J. M.; GODINHO, P. **Logística**. Imprensa da Universidade de Coimbra, 2010.

CROES, G. A. A Method for Solving Traveling-Salesman Problems. **Operations Research** 6(6):791-812, 1958. <https://doi.org/10.1287/opre.6.6.791>

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. **Management Science**, 6:80, 1959.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R. **Biodigestores Rurais: Modelos Indiano, Chinês e Batelada**. Trabalho apresentado no AGRENER GD 2002. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Bauru, São Paulo, 2002.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Dados de transporte**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit/bit-mapas>>. Acessado em: fev. 2024.

DONG, J. **GIS and Location Theory Based Bioenergy Systems Planning**. Thesis, Master of Applied Science in Systems Design Engineering. University of Waterloo. Waterloo, Canada, 2008.

EMBRAPA -Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **GeoInfo**. 2024. https://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode%3Aareas_urbanas_br_15>. Acessado em: fev. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>> Acessado em: ago. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023 / Empresa de Pesquisa Energética**. – Rio de Janeiro: EPE, 274 p, 2024a.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. PDE 2034 - **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 30 p, 2024b.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis**: Ano base 2023 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 102 p, 2024c.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Webmap EPE**. 2024d. Disponível em: <<https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>>. Acessado em: fev. 2024.

ER-BR – ENERGIAS RENOVÁVEIS LTDA. **Grupo gerador a biogás**, 2025. Disponível em: <<https://www.erbr.com.br/produtos/1/grupo-geradores>> Acessado em: jan. 2025.

FALCÃO, E. C. **Análise de riscos à degradação ambiental utilizando avaliação multicritério espacial, no município de Boa Vista-PB**. 2013. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2013.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Countries by commodity: sugar cane - year 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity> Acessado em: jan. 2025.

FIELD, C. B.; Campbell, J. E.; Lobell, D. B. Biomass energy: the scale of the potential resource. **Trends in Ecology & Evolution**, Volume 23, Issue 2, 65-72, 2008. doi:10.1016/j.tree.2007.12.001

FNR – FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. **Guia Prático do Biogás Geração e Utilização**. Editor: FNR 5. ed., 2010.

FRANCO, C.; BOJESSEN, M.; HOUGAARD, J. L.; NIELSEN, K. A fuzzy approach to a multiple criteria and Geographical Information System for decision support on suitable locations for biogas plants, **Applied Energy**, Vol. 140, 304-315, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.060>

FUKASAWA, R.; LONGO, H.; LYSGAARD, J.; POGGI DE ARAGÃO, M.; REIS, M.; UCHOA, E.; WERNECK, R. F. Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem. **Mathematical Programming**. 106, pp. 491–511, 2006.

FUNAI – Fundação Nacional dos Povos Indígenas. **Geoprocessamento e mapas**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas>>. Acessado em: fev. 2024.

GENUS, A.; MAFAKHERI, F. A neo-institutional perspective of supply chains and energy security: Bioenergy in the UK. **Applied Energy**. v. 123, p. 307-315, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.084.

GHOSH, P.; LEPCHA, K. Weighted linear combination method versus grid based overlay operation method - a study for potential soil erosion susceptibility analysis of Malda district (West Bengal) in India. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, 22 (1), pp. 95-115, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.07.002>

GLOVER, F.; LAGUNA, M. **Tabu search**. In C.R. Reeves, editor, *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Blackwell, Oxford, UK, pp. 70-150, 1993a.

GLOVER, F.; LAGUNA, M.; **Tabu Search**, in: Reeves, C. (Ed.), *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1993b.

GLOVER, F. **Tabu Search fundamentals and uses**. Technical Paper. University of Colorado, Boulder, CO, 1995.

GLOVER, F.; LAGUNA, M. **Tabu Search**. Kluwer, Boston, MA, 1997.

GÓMEZ, C. R.; Arango-Aramburo, S.; Larsen, E. R. Construction of a Chilean energy matrix portraying energy source substitution: A system dynamics approach. **J. Clean. Prod.** 162, 903–913, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.111>.

GRANDO, R. L. **Mapeamento tecnológico da cadeia produtiva do biogás**. Tese (Doutor em Ciências) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017. Rio de Janeiro, 2017. 227 f.

HERRAN, D. S; NAKATA, T. Design of decentralized energy systems for rural electrification in developing countries considering regional disparity. **Applied Energy**. v. 91, n. 1, p. 130-145, 2012. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.09.022.

HÖHN, J.; LEHTONEN, E.; RASI, S.; RINTALA, J. A Geographical Information System (GIS) based methodology for determination of potential biomasses and sites for biogas plants in southern Finland. **Appl. Energy** 113, 1–10, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.005>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Divisão do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas**. Rio de Janeiro, v1, 1990. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv2269_1.pdf>; Acessado em: 09 mai. 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e estados**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp.html>>. Acessado em: mai. 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE: Estatística da Produção Pecuária**. 2024a. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2380/epp_2024_1tri.pdf> Acessado em: jan. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Geociências**. 2024b. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acessado em: fev. 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2024**. IEA, Paris, 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>>

INCRA – INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA.

Certificação. 2024. Disponível em:

<https://certificacao.incra.gov.br/csv_shp/export_shp.py?code=eyJraWQiOiJjb2RIQ3J5cHRvZ3JhcGh5IiwiaWxnljoiZGlyliwiZW5lIjoiTl1NkdDTSJ9..pGOxd3PdP9OcJbl5.RZpFrSubVmXyHIG9ncsGa_6eKnYEs3vRyajXqquZn6kvIA.slxmg2LzqrUioo0CTGmDQA>. Acessado em: fev. 2024.

IOANNOU, K.; TSANTOPOULOS, G.; ARABATZIS, G.; ANDREOPOULOU, Z.; ZAFEIRIOU, E. A Spatial Decision Support System Framework for the Evaluation of Biomass Energy Production Locations: Case Study in the Regional Unit of Drama, Greece. **Sustainability** (Switzerland), v. 10, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10020531>

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2023: Summary for Policymakers.** In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

JENKS, G. F. The Data Model Concept in Statistical Mapping. **International Yearbook of Cartography**, vol. 7, pp. 186–190, 1967.

JEONG, J. S.; RAMÍREZ-GÓMEZ, A. A multicriteria GIS-based assessment to optimize biomass facility sites with parallel environment - A case study in Spain. **Energies**, v10, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10122095>.

JESUS, R. H. G.; SOUZA, J. T.; PUGLIERI, F. N.; PIEKARSKI, C. M.; FRANCISCO, A. C. Biodigester location problems, its economic – environmental - social aspects and techniques: Areas yet to be explored. **Energy Reports**. 7, 3998–4008, 2021. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.06.090.

JOPPERT, C. L.; GARCILASSO, V. P.; SANTOS, M. M.; PEREIRA, A. S.; PERECIN, D.; POVEDA, M.; Coelho, S. T. The Perspectives of Biomethane to Contribute to Increase the Natural Gas Supply in the State of São Paulo. **26th European Union Biomass Conference and Exhibition (EUBCE)** (Copenhagen), 2018. DOI:10.5071/26THEUBCE2018-5BV.3.10

JOPPERT, CAIO L. **Análise da substituição energética de bagaço de cana-de-açúcar por biogás produzido a partir de resíduos de usinas de açúcar e álcool para produção de etanol 2G.** Dissertação (Mestrado em ciências). Área de Concentração: Energia. Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2019.

LAPORTE, G.; NOBERT, Y. An exact algorithm for minimizing routing and operating costs in depot location. **European Journal of Operational Research** 6, 224-226, 1981. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(81\)90212-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(81)90212-5)

LAPORTE, G.; NOBERT, Y. Exact algorithms for the vehicle routing problem. **Annals of Discrete Mathematics**, 31:147-184, 1987.

LAPORTE, G.; NOBERT, Y.; DESROCHERS, M. Optimal routing under capacity and distance restrictions, **Operations Research**, 33, pp. 1050–1073, 1985.

LAPORTE, G.; NOBERT, Y.; PELLETIER, P. Hamiltonian location problems. **European Journal of Operational Research** 12, 82-89, 1983.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90182-0](https://doi.org/10.1016/0377-2217(83)90182-0)

LAPORTE, G.; NOBERT, Y.; TAILLEFER, S. Solving a family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems. **Transportation Science** 22, 161-172, 1988.
<https://doi.org/10.1287/trsc.22.3.161>

LITTLE, J. D. C.; MURTY, K. G.; SWEENEY, D. W.; KAREL, C. An algorithm for the traveling salesman problem, **Operations Research**, 11, pp. 972–989, 1963.

MA, J.; SCOTT, N. R.; DEGLORIA, S. D.; LEMBO, A. J. Sitting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS. **Biomass Bioenergy**, 28:591-600, 2005.

MARANZANA, F. E. On the location of supply points to minimise transport costs. **Operational Research Quarterly** 15, 261-270, 1964.
<https://doi.org/10.2307/3007214>

MARIANI, L. **Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil**. 2018. 144 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas - SP, 2018.

MIN, H.; JAYARAMAN, V.; SRIVASTAVA, R. Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions. **European Journal of Operational Research** 108, 1-15, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00172-0)

MMA – Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Download de dados geográficos**. 2024. Disponível em:
<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acessado em: fev. 2024.

MORAES, M. A. F. D.; NASSAR, A. M.; MOURA, P.; LEAL, R. L. V.; CORTEZ, L. A. B. Jet biofuels in Brazil: Sustainability challenges. **Renewable and Sustainable Energy Review**. v. 40, p. 716-726, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.210.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; REIS, C. A. F.; SIMIONI, F. J.; OLIVEIRA, V. L. E. de. **Análise de viabilidade econômica da produção de eucalipto para energia em Rio Verde, GO**. Colombo: Embrapa Florestas, 27 p, 2019.

MYHRE, G. *et al.* **Anthropogenic and Natural Radiative Forcing**. In Stocker, T. F. *et al.* Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.

NAGY, G.; SALHI, S. Location-routing: Issues, models and methods. **European Journal of Operational Research**., 177, 649-672, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107017>

NOVAES, A. G. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 404 p.

PARANÁ. Secretaria da Fazenda. **Paraná vai isentar de ICMS biogás, biometano e combustível sustentável de avião**. 2024. Disponível em: <<https://www.fazenda.pr.gov.br/Noticia/Parana-vai-isentar-de-ICMS-biogas-biometano-e-combustivel-sustentavel-de-aviao>> Acessado em: jan. 2025.

PASSAGLIA, R. C.; KUNZ, A. **Estudo de viabilidade econômica de geração de biogás para atender as necessidades de energia elétrica de uma unidade de suinocultura**. Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

PAULINO, E. J.; CERRI, A. C.; SOLER, E. M. Suitability model and optimal location of biodigesters in the state of São Paulo, **Energy Reports**, Volume 11, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.04.038>.

PAULINO, E. J.; CERRI, A. C.; SOLER, E. M. A location-routing problem for biogas plants. [**artigo em revisão**]. 2025.

PEREIRA, M. S. **Estudo dos custos operacionais e da viabilidade de implantação de um sistema de coleta de dejetos suínos para geração de bioenergia, no município de Toledo - PR**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Desenvolvimento Regional e Agronegócio, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, 2009.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Biocombustíveis no Brasil**: Fundamentos, Aplicações e Perspectivas. Capítulo 5 – Biogás – Biocombustíveis ANP. 1. ed., Rio de Janeiro: Synergia: Acta, 2014.

PORTUGAL-PEREIRA, J.; SORIA, R.; RATHMANN, R.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. Agricultural and Agro-industrial Residues- to-energy: Techno-economic and Environmental assessment in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, 81, p. 521-533, 2015.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Available online: Disponível em: <<https://qgis.org/en/site/>> Acessado em: fev. 2024.

RAMOS, R. A. R. **Um modelo espacial para o Noroeste de Portugal**. 2000. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2000.

RAND, G. K. Methodological choices in depot location studies. **Operational Research Quarterly** 27, 241-249, 1976. <https://doi.org/10.1057/jors.1976.39>

REVELLE, C.; COHON, J.; SHOBRY, D. Simultaneous Siting and Routing in the Disposal of Hazardous Wastes. **Transportation Science** 25(2):138-145, 1991. <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.25.2.138>

RUIZ, J. A.; JUÁREZ, M. C.; MORALES, M. P.; MUÑOZ, P.; MENDÍVIL, M. A. Biomass gasification for electricity generation: **Review of Current Technology Barriers**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174-183, 2013.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v.15, n.3, p. 234-281, 1977.
[https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **Int. J. Serv. Sci.** 1, 83, 2008. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Prediction, projection and forecasting**. Boston: Kluwer Academic. 1991.

SALHI, S.; NAGY, G. Consistency and robustness in location routing. **Studies in Locational Analysis**. 13, 3–19, 1999.

SCARLAT, N., FAHL, F., DALLEMAND, J.-F., MONFORTI, F., MOTOLA, V., 2018. A spatial analysis of biogas potential from manure in europe. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94, 915-930. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.035>.

SCARLAT, N.; FAHL, F.; LUGATO, E.; MONFORTI-FERRARIO, F.; DALLEMAND, J. F. Integrated and Spatially Explicit Assessment of Sustainable crop residues potential in Europe. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 257-269, 2019.

SILVA, S.; ALÇADA-ALMEIDA, L.; DIAS, L. C. Multiobjective programming for sizing and locating biogas plants: A model and an application in a region of Portugal. **Comput. Oper. Res.** 83, 189–198, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.016>.

SIMA – SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE - São Paulo. **Balanco Energético do Estado de São Paulo 2022**: Ano Base 2021. 270 p, 2022.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto 2023**. Ano de referência: 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis>> Acessado em: jan. 2024

SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; PAVAN, A. A.; SORDI, A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Acta Scientiarum**. Technology, Maringá, v.26, p.127-133, 2004.

SULTANA, A.; KUMAR, A. Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system. **Applied Energy**. v. 94, p. 192-201, 2012.

TEIXEIRA, T. R. **Cenários para instalação de usinas de biomassa florestal em Minas Gerais**. Dissertação (mestrado). 70 f. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2016.

THOMPSON, E.; WANG, Q.; LI, M. Anaerobic digester systems (ADS) for multiple dairy farms: A GIS analysis for optimal site selection. **Energy Policy** 61, 114–124, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.035>.

TORDECILLA, R. D.; MONTOYA-TORRES, J. R.; QUINTERO-ARAUJO, C. L.; PANADERO, J.; JUAN, A. A. The location routing problem with facility sizing decisions. **International Transactions in Operational Research**, 30, 2, 915-945, 2023. <https://doi.org/10.1111/itor.13125>

TORDECILLA, R. D.; PANADERO, J.; QUINTERO-ARAUJO, C. L.; MONTOYA-TORRES, J. R.; JUAN, A. A. A simheuristic algorithm for the location routing problem with facility sizing decisions and stochastic demands. In **Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference**, IEEE, Piscataway, New Jersey, pp. 1265-1275, 2020. <https://doi.org/10.1109/WSC48552.2020.9384053>

TORO, E. M.; FRANCO, J. F.; ECHEVERRI, M. G.; GUIMARÃES, F. G. A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact. **Computers & Industrial Engineering**, 110, pp. 114-25, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.013>

TOTH P.; VIGO, D. **Vehicle routing: problems, methods, and applications**. 2 ed. University of Bologna, Bologna, Italy, 2014.

TOTH, P.; VIGO, D. **The Vehicle routing problems**. University of Bologna, Bologna, Italy, 2001.

TUZUN, D.; BURKE, L. I. A two-phase tabu search approach to the location routing problem. **European Journal of Operational Research** 116, 1, 87-99, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00107-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00107-6)

VELASCO, G. D. N.; LIMA, A. M. L. P.; Couto, H. T. Z. Análise comparativa dos custos de diferentes redes de distribuição de energia elétrica no contexto da arborização urbana. **Rev. Árvore** 30 (4), ago. 2006.

VIEIRA, G. G.; PEDROZA, M. M.; DE SOUSA, J. F.; & PEDROZA, C. M. O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto: uma revisão. **Revista Liberato**, 12(17), 81–96, 2013.

WEREKO-BOBBY, C. Y.; HAGEN, E. B. **Biomass conversion and technology**. Editora John Wiley & Sons. P. 2-224. New York, 2000.

WILLARD, J. A. G. **Vehicle routing using r-optimal tabu search**. M.sc. dissertation, The Management School, Imperial College, London, 1989

WU, B.; SARKER, B. R.; PAUDEL, K. P. Sustainable energy from biomass: Biomethane manufacturing plant location and distribution problem. **Appl. Energy** 158, 597–608, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.080>.

WU, T-H.; LOW, C.; BAI, J-W. Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. **Computers and Operations Research** 29, 1393-1415, 2002.
[https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(01\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00038-7)

YALCINKAYA, S. A spatial modeling approach for siting, sizing and economic assessment of centralized biogas plants in organic waste management. **J. Clean. Prod.** 255, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120040>.

YING, H. P.; CHIEN, C. B. P.; VAN, F. Y. Operational management implemented in biofuel upstream supply chain and downstream international trading: Current issues in Southeast Asia. **Energies**, v13, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13071799>.

ZACHARIADIS, E. E.; KIRANOUDIS, C. T. A strategy for reducing the computational complexity of local search-based methods for the vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, 37, pp. 2089–2105, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.02.009>

ZANBOM, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoeletricas utilizando SIG. **Pesquisa Operacional**, v.25, n.2, p.183-199, agosto de 2005.

ZAREEI, S. Evaluation of biogas potential from livestock manures and rural wastes using GIS in Iran. **Renew. Energy** 118, 351-356, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.026>.

ZOGRAFOS, K. G.; SAMARA, S. Combined location-routing model for hazardous waste transportation and disposal. **Transportation Research Record** 1245, 52-SY, 1989.

ZORG BIOGAS. **Industry Solutions**. Disponível em: <<https://zorg-biogas.com/about-zorg/portfolio?object=68>> Acessado em: jan. 2025.

9 ANEXOS

9.1 PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA AHP

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), proposto por Saaty (1977), é uma metodologia de comparação pareada para atribuição de pesos a critérios relativos. Esta técnica considera que os diferentes critérios são comparados dois-a-dois e um valor de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre eles, conforme uma escala pré-definida (FALCÃO, 2013).

A etapa inicial do processo é a geração de uma matriz quadrada $n \times n$, na qual os critérios C_i são estabelecidos nas linhas e nas colunas seguindo uma mesma ordem (Tabela 9.1). O valor a_{ij} representa a importância relativa do critério da linha i em relação ao critério da coluna j , onde $a_{ij} = 1/a_{ji}$ e $a_{ii} = 1$ indicam que a matriz é recíproca. A atribuição dos valores de importância relativa entre os critérios é realizada com base na escala de referência apresentada no Quadro 9.1, a qual expressa os diferentes graus de importância de um critério em relação a outro.

Estabelecidas as comparações, calcula-se o autovetor normalizado w_{CN} , da matriz de comparação pareada. Esse vetor representa os pesos w_{CN_i} , associados a cada critério i , conforme definido na equação (9.1).

$$w_{CN_i} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (9.1)$$

em que: n é a ordem da matriz A , de comparação pareada.

Tabela 9.1 – Matriz de comparação pareada

	C_1	C_2	...	C_n
C_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
C_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
C_n	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{nn}

Quadro 9.1 – Escala fundamental de Saaty para comparação pareada – AHP

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Fraca importância	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Forte importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Muito forte importância	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: adaptado de Saaty (1977, 2008)

Após a determinação dos pesos a cada critério, é verificada a consistência entre as comparações. A medida dessa consistência é representada pela razão de consistência, RC . Este indicador fornece ao decisor a necessidade, ou não, de revisão dos julgamentos da matriz de comparação pareada. Segundo Saaty e Vargas (1991), valores recomendáveis para a RC devem ser inferiores a 0,1. Caso o valor de RC ultrapasse esse limite, a equipe retomará o processo de avaliação, realizando um novo preenchimento da matriz de comparação, de modo que um novo valor para a RC seja gerado. A razão de consistência é calculada conforme a equação (9.2).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (9.2)$$

em que: IC é o índice de consistência; IR é o índice randômico.

O índice randômico é padronizado e depende do tamanho da matriz n , como mostra o Quadro 9.2.

Quadro 9.2 – Índice randômico médio em função do tamanho da matriz

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>IR</i>	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1977)

O índice de consistência *IC*, é dado pela equação (9.3).

$$IC = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (9.3)$$

em que: $\lambda_{máx}$ é o máximo autovalor da matriz *A* de comparação pareada; *n* é a ordem da matriz *A*.

O autovalor $\lambda_{máx}$, pode ser calculado pela equação (9.4).

$$\lambda_{máx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{u_i}{w_{CNi}} \quad (9.4)$$

em que: $\mathbf{u} = A \cdot \mathbf{w}_{CN}$ é o vetor resultante do produto da matriz *A* pelo autovetor $\mathbf{w}_{CN}$; *n* é a ordem da matriz *A*.