

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

ROBERTO SABINO SPINA

**ANÁLISE DE REDUÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL E DE CUSTOS EM
UNIDADE INDUSTRIAL ATRAVÉS DA ADOÇÃO DA BIOMASSA COMO FONTE
ENERGÉTICA**

São Paulo

2024

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

ROBERTO SABINO SPINA

**ANÁLISE DE REDUÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL E DE CUSTOS EM
UNIDADE INDUSTRIAL ATRAVÉS DA ADOÇÃO DA BIOMASSA COMO FONTE
ENERGÉTICA**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
diploma de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Dr. João Amato Neto

São Paulo

2024

AGRADECIMENTOS

A jornada na Escola Politécnica com certeza mudou minha vida em todos os aspectos. Academicamente, pude aprender e praticar habilidades que enriqueceram minha visão de mundo e que me capacitaram para auxiliar a sociedade diante dos maiores problemas contemporâneos. Profissionalmente, a Escola, com o olhar analítico e sistêmico que a Engenharia de Produção promove, me abriu portas para contribuir em grandes organizações do mercado de trabalho de forma significativa. E, pessoalmente, pude construir amizades que perdurarão para o resto da minha vida.

Expresso meu profundo agradecimento a todos que fizeram tudo isso ser possível. Aos meus pais e familiares, que me apoiam desde o primeiro dia de vida a seguir meus sonhos. Aos professores, servidores e demais membros da comunidade USP que tornam todo esse ambiente de ensino e pesquisa possível. Aos amigos de Produção, do time de tênis e todos os demais grupos de extensão que fiz parte, por compartilharem todas as alegrias e dificuldades dessa jornada comigo. E, por fim, ao meu orientador Prof. Dr. João Amato e as empresas que contribuíram com este projeto, que, com seus direcionamentos, permitiram a este trabalho sintetizar grande parte do que aprendi na Engenharia de Produção.

Nunca me esquecerei dos anos na Poli. E, espero que eu possa usar esta experiência para contribuir com o desenvolvimento da Engenharia e da sociedade, como um todo.

*“Para fazer as coisas bem, é necessário:
primeiro, o amor, segundo, a técnica.”*

Antoni Gaudí

RESUMO

Título: Análise de redução de impacto ambiental e de custos em unidade industrial através da adoção da biomassa como fonte energética

Autor: Roberto Sabino Spina

Resumo: Este trabalho investiga a viabilidade de substituir o gás natural por biomassa como fonte de energia em uma unidade industrial de produção de sabão em pó. A análise, estruturada com base nos pilares técnico, econômico e ambiental, explora cenários otimizados utilizando cavacos de eucalipto e bagaço de cana. Os resultados mostram que a substituição é viável, com reduções significativas de emissões de gases de efeito estufa, atingindo até 96% no cenário otimizado, e economia de custos operacionais superiores a 49%. A análise econômica destaca um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 91,5 milhões para o cenário com cavaco de eucalipto e R\$ 59,7 milhões para o bagaço de cana, com paybacks de 30 meses e 37 meses, respectivamente. Este estudo reforça o papel da engenharia de produção na promoção da sustentabilidade industrial e aborda os desafios e oportunidades relacionados à transição energética no Brasil.

Palavras-chave: transição energética, indústria de sabão em pó; biomassa; gás natural; impacto ambiental; redução de custos; otimização industrial; ESG; sustentabilidade

ABSTRACT

Title: Analysis of environmental impact and cost reduction in industrial factory through the adoption of biomass as an energy source

Author: Roberto Sabino Spina

Abstract: This study examines the feasibility of replacing natural gas with biomass as an energy source in an industrial powder detergent production facility. The analysis, structured around technical, economic, and environmental pillars, explores optimized scenarios using eucalyptus chips and sugarcane bagasse. The results demonstrate that substitution is feasible, achieving up to 96% reduction in greenhouse gas emissions and operational cost savings of over 49%. The economic analysis highlights a Net Present Value (NPV) of R\$ 91.5 million for the eucalyptus chip scenario and R\$ 59.7 million for sugarcane bagasse, with payback periods of 30 months and 37 months, respectively. This study emphasizes the role of production engineering in promoting industrial sustainability and addresses the challenges and opportunities associated with Brazil's energy transition.

Keywords: Energy transition; powder detergent industry; biomass; natural gas; environmental impact; cost reduction; industrial optimization; ESG; sustainability

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Divisão do consumo de água por categoria de uso (2023).....	47
Gráfico 2: Divisão do consumo de energia por fonte energética (2023).....	57
Gráfico 3: Divisão do custo de energia por fonte energética (2023).....	59
Gráfico 4: Pareto de emissão total por fonte energética (2023).....	63
Gráfico 5: Evolução do consumo de energia por fonte do setor industrial brasileiro.....	65
Gráfico 6: Divisão do consumo de energia por fonte no setor industrial químico.....	66
Gráfico 7: Evolução do consumo de energia no setor industrial químico brasileiro.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável relacionados a transição energética.....	18
Figura 2: Esquemático da estrutura do estudo.....	21
Figura 3: Fotos da visita à fábrica – Estoque de matéria-prima e embalagens.....	39
Figura 4: Fotos da visita à fábrica – Instalação principal de produção.....	40
Figura 5: Fotos da visita à fábrica – Docas de recebimento de matéria-prima a granel.....	40
Figura 6: Planta esquemática da fábrica estudada – Indaiatuba (SP).....	41
Figura 7: Fotografia aérea da unidade industrial – Indaiatuba (SP).....	42
Figura 8: Fluxograma do processo produtivo da unidade industrial estudada – Indaiatuba.....	52
Figura 9: Esboço do sistema de geração de gases quentes a biomassa.....	78
Figura 10: Esquemático do funcionamento do sistema de geração de gases quentes a biomassa.....	79
Figura 11: Fotos de visita realizada pelo autor em fábrica com sistema ICAVI.....	80
Figura 12: Indicação do armazém disponível para funcionar como depósito de biomassa.....	83
Figura 13: Indicação das plantações de cana mais próximas da fábrica.....	87
Figura 14: Indicação das plantações de eucalipto mais próximas da fábrica.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação das principais áreas da fábrica	42
Tabela 2: Relação das marcas e SKUs produzidos na fábrica (2023)	44
Tabela 3: Relação das matérias-primas utilizadas e consumo anual (2023)	46
Tabela 4: Divisão do consumo atual de energia por setor (2023)	56
Tabela 5: Custo de energia elétrica adquirida pela fábrica (2023)	59
Tabela 6: Custo de combustíveis adquiridos pela fábrica (2023)	59
Tabela 7: Cálculo das emissões associadas a cada fonte energética (2023).....	63
Tabela 8: Quadro comparativo de alternativas ao gás natural.....	76
Tabela 9: Estimativa de suprimento diário de biomassa necessário.....	84
Tabela 10: Estimativa de custos CAPEX necessários para a transição do sistema.....	90
Tabela 11: Estimativa de custos variáveis de biomassa necessários para a transição do sistema.....	91
Tabela 12: Estimativa de custos logísticos variáveis necessários para a transição do sistema....	92
Tabela 13: Resultado consolidado dos custos estimados.....	92
Tabela 14: Resultado da análise econômica.....	94
Tabela 15: Fluxo de caixa resumido.....	94
Tabela 16: Estimativa da quantidade adicional de diesel consumida	97
Tabela 17: Cálculo das emissões associadas a cada cenário.....	98
Tabela 18: Resultado consolidado comparativo dos cenários analisados.....	98
Tabela 19: Análise de sensibilidade ao preço da biomassa - TIR.....	102
Tabela 20: Análise de sensibilidade ao preço do gás - TIR.....	102
Tabela 21: Análise de sensibilidade a distância da biomassa – Redução de emissões	104
Tabela 22: Fatores de emissão para combustão de fontes estacionárias (2023).....	112
Tabela 23: Potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa.....	113

LISTA DE SIGLAS

GEE: Gases do efeito estufa

ONU: Organização das Nações Unidas

IPCC: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

ODS: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

LCOE: Levelized Cost of Energy (Custo Nivelado de Eletricidade)

IRENA: International Renewable Energy Agency (Agência Internacional de Energia Renovável)

ACV: Análise do Ciclo de Vida

LAS: Linear Alquilbenzeno Sulfonato

GHG Protocol: Protocolo de Gases de Efeito Estufa

GLOSSÁRIO

Engenharia de Produção: Campo da engenharia que foca no projeto, melhoria e implementação de sistemas integrados de pessoas, materiais, informações, equipamentos e energia para produzir bens e serviços de forma eficiente.

Transição Energética: Mudança de uma matriz energética baseada em combustíveis fósseis para uma baseada em fontes renováveis, visando reduzir emissões de GEE e promover a sustentabilidade.

Biomassa: Material de origem biológica utilizado como fonte de energia, incluindo resíduos agrícolas, florestais e urbanos.

Emissões de GEE: Emissão de gases como CO₂, CH₄ e N₂O, responsáveis pelo efeito estufa e aquecimento global.

Análise do Ciclo de Vida (ACV): Metodologia que avalia os impactos ambientais de um produto desde a extração da matéria-prima até a disposição final.

Secagem por Atomização (Spray-Drying): Processo de secagem que transforma líquidos em pó por meio de pulverização em ar quente.

ODS: Metas definidas pela ONU para promover sustentabilidade e reduzir desigualdades.

LAS: Composto químico utilizado como tensoativo em produtos de limpeza.

Tensoativo: Substância que reduz a tensão superficial, essencial para a formação de espumas e emulsões em produtos de limpeza.

Eficiência Energética: Medida da quantidade de energia usada de forma útil em um processo em comparação com a energia total consumida; fundamental para reduzir desperdícios e custos.

Produtividade: Indicador de eficiência que mede a quantidade de produção gerada por unidade de insumo, como mão-de-obra ou energia.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE GRÁFICOS.....	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS	12
GLOSSÁRIO.....	13
SUMÁRIO.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Motivação e importância do tema	17
1.2 Especificação do estudo	19
1.3 Estrutura do estudo.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Transição Energética.....	23
2.2 Biomassa	24
2.3 Impacto Ambiental do Uso da Biomassa em Processos Industriais	25
2.4 Impactos Econômicos da Biomassa	27
2.5 Análise do Ciclo de Vida da Biomassa	28
2.6 Panorama de consumo de Energia Elétrica no Brasil	30
3. METODOLOGIA.....	32
3.1 Coleta de dados e cenário atual/ <i>As-Is</i>	32
3.1.1 Objetivos.....	32
3.1.2 Métodos	33
3.1.3 Resultados Esperados	34
3.2 Análise e otimização (cenário <i>To-Be</i>):.....	34
3.2.1 Objetivos.....	34
3.2.2. Construção do Cenário	35
3.2.3. Resultados Esperados	36
3.3 Discussão e Análise de Sensibilidade	36

4. ANÁLISE DO CENÁRIO ATUAL DA FÁBRICA.....	38
4.1 Descrição e caracterização da Unidade Industrial Estudada.....	38
4.1.1 Visita à fábrica.....	39
4.1.2 Layout da fábrica	41
4.1.3 Principais dados operacionais.....	43
4.1.4 Descrição geral do processo produtivo de sabão em pó na fábrica	48
4.1.5 Fluxograma esquemático geral do processo produtivo de sabão em pó.....	51
4.1.6 Considerações finais sobre a descrição da unidade industrial	53
4.2 Descrição da situação energética atual da fábrica.....	54
4.2.1 Consumo atual da unidade industrial.....	55
4.2.2 Fontes energéticas atuais	56
4.2.3 Custo energético atual.....	58
4.2.4 Análise consolidada da situação energética atual	60
4.3 Cálculo das emissões energéticas de gases do efeito estufa <i>As-Is</i>	61
4.3.1 Emissões pelo método GHG Protocol Brasil.....	61
4.3.2 Contextualização das emissões da fábrica estudada no cenário industrial brasileiro	64
4.4 Discussão Consolidada do Cenário <i>As-Is</i>	68
5. ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE CENÁRIO OTIMIZADO	71
5.1 Objetivos da otimização	71
5.2 Priorização de escopo.....	72
5.2.1. Análise Comparativa das Fontes Energéticas.....	72
5.2.2. Conclusão da Priorização	73
5.3 Levantamento de alternativas ao gás natural	73
5.4 Estruturação de cenário otimizado com biomassa	77
5.4.1. Viabilidade Técnica	77
5.4.2. Viabilidade Econômica.....	89
5.4.3. Viabilidade Ambiental.....	95
6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	101
6.1 Limitações do Estudo.....	101
6.2 Análise de Sensibilidade	102

6.2.1 Variação no preço da biomassa	102
6.2.2 Variação no preço do gás.....	102
6.2.3 Variação na distância dos fornecedores de biomassa	104
6.3 Próximos Passos e Estudos possíveis.....	105
7. CONCLUSÃO.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
ANEXOS	111
ANEXO A – Fotos adicionais da visita à fábrica realizada pelo autor	111
ANEXO B – Tabela de fatores de emissão do GHG Protocol Brasil 2023	112

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e importância do tema

A utilização de fontes de energia fóssil, tais como petróleo, carvão e gás natural, tem sido a base do desenvolvimento industrial e econômico global desde a Revolução Industrial. No entanto, essa dependência de fontes fósseis acarreta uma série de problemas ambientais, econômicos e sociais. A queima de combustíveis fósseis é a principal responsável pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x), que contribuem significativamente para o aquecimento global e as mudanças climáticas. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a concentração de CO_2 na atmosfera aumentou de 280 ppm (partes por milhão) antes da era industrial para mais de 410 ppm em 2024, resultando em elevações de temperatura global média que impactam ecossistemas, biodiversidade e comunidades humanas.

Além dos impactos ambientais, a volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis representa um desafio econômico considerável. A oscilação nos preços do petróleo, por exemplo, pode desestabilizar economias dependentes, afetar a competitividade das indústrias e resultar em incertezas no planejamento econômico a longo prazo.

Os custos relacionados ao uso de combustíveis fósseis não se restringem apenas aos gastos diretos com a extração, transporte e refino. Existem custos ocultos, frequentemente denominados de externalidades, que incluem os danos ambientais, os impactos na saúde pública e os subsídios governamentais necessários para manter a competitividade dessas fontes de energia. Estudos, como o de Sovacool et al (2021), indicam que as externalidades negativas do uso de combustíveis fósseis para geração de eletricidade e transporte podem equivaler a 24,6 trilhões de dólares por ano globalmente. Estas externalidades incluem custos com cuidados de saúde devido a doenças respiratórias e cardiovasculares causadas pela poluição do ar, custos associados à degradação ambiental e os impactos econômicos das mudanças climáticas, como a perda de produtividade agrícola, danos a infraestruturas e desastres naturais mais frequentes e intensos.

Além disso, a manutenção de infraestruturas de extração e processamento de combustíveis fósseis é custosa e frequentemente sujeita a riscos de acidentes, como derramamentos de petróleo, explosões em plataformas e minas, que acarretam danos ecológicos e econômicos significativos.

Diante deste cenário, a transição energética, entendida como a mudança de um sistema energético baseado em combustíveis fósseis para um sistema baseado em fontes renováveis, é

imperativa. A adoção de energias renováveis, como a solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, não apenas reduz a emissão de GEE e demais impactos ambientais, mas também promove a segurança energética e a sustentabilidade econômica.

A importância da transição energética é tão relevante, que praticamente todos os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU (ODS ONU, 2024) tem relação com o tema, mas com 5 dos 17 dependendo diretamente da transição energética para serem alcançados, sendo eles, os seguintes:

- **ODS 7: Energia Limpa e Acessível**
- **ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura**
- **ODS 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis**
- **ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis**
- **ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima**

Figura 1: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável relacionados ao tema de transição energética



Fonte: Organização das Nações Unidas

Para realizar a transição de forma abrangente e transversal, muitos stakeholders precisam ser envolvidos, desde entidades públicas até sociedade civil. No ambiente industrial, considerando a responsabilidade e o escopo da Engenharia de Produção, o engenheiro é um profissional com papel fundamental neste processo. Segundo **Fleury (2007)**, "a Engenharia de Produção trata do projeto, aperfeiçoamento e implantação de sistemas integrados de pessoas, materiais, informações, equipamentos e energia, para a produção de bens e serviços, de maneira econômica, respeitando os preceitos éticos e culturais". Nesse contexto, o engenheiro de produção é responsável por avaliar e implementar soluções energéticas mais sustentáveis, e

integrá-las nos processos produtivos de forma eficiente. Além disso, o engenheiro precisa balancear os aspectos econômicos e ambientais, garantindo que as mudanças contribuam para uma operação mais sustentável, sem comprometer a competitividade. Dessa forma, sua atuação é essencial para viabilizar a transição energética e promover a sustentabilidade no longo prazo.

No Brasil, a transição energética é facilitada pelo país já contar com uma matriz relativamente limpa, com destaque para a hidroeletricidade, além de possuir acesso para expandir o uso de outras fontes renováveis, como solar, eólica e biomassa, de forma a garantir segurança energética e atender aos compromissos climáticos. Nesse processo, o engenheiro de produção pode contribuir para a integração de diferentes fontes de energia renovável, adaptando os processos industriais para aproveitar os recursos disponíveis em cada região de maneira eficiente. Com uma abordagem voltada para a análise de viabilidade técnica, econômica, e ambiental, o engenheiro de produção é essencial para implementar soluções que permitam a transição energética no setor industrial, equilibrando custos e benefícios ambientais para promover um desenvolvimento mais sustentável e competitivo.

Sendo assim, com a problemática da transição energética e as responsabilidades e atribuições de um Engenheiro de Produção em vista, está clara a relevância e pertinência de um trabalho neste tema como forma de consolidar todo aprendizado ocorrido durante a graduação em Engenharia de Produção na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

1.2 Especificação do estudo

Diante das motivações apresentadas, o presente trabalho consiste em uma análise e proposta de transição energética em uma unidade industrial, que, no caso estudado, têm a biomassa como fonte energética renovável mais viável para o cenário atual (explicado na etapa de análise). A fábrica estudada é propriedade de uma grande empresa multinacional de bens de consumo, que conta com uma das maiores unidades produtoras de sabão em pó do Brasil, situada em Indaiatuba (SP). O autor conseguiu acesso a este caso graças ao seu estágio na Belge Engenharia, uma empresa de modelagem e simulação de processos que tinha a multinacional como cliente. Vale destacar que a Belge atuou apenas como intermediária para a conexão entre o autor e o time da unidade industrial, ou seja, nenhum colaborador da Belge participou da realização deste trabalho. O estudo foi realizado em colaboração com o time de engenharia da fábrica, que contribuiu com dados, entrevistas, visitas e discussões sobre a análise proposta. Além do time da empresa, diversos especialistas de outras organizações, tanto privadas quanto públicas (i.e. USP, fundos de investimento, fabricantes de caldeiras, fornecedores de biomassa, entre outros), foram consultados e entrevistados. Estas fontes contribuíram com referências

bibliográficas, suporte na estruturação da análise, *benchmarks* de mercado e muitos outros dados que foram fundamentais para garantir a completude e assertividade do trabalho.

Na fábrica estudada, combustíveis fósseis, principalmente gás natural, eram queimados em um sistema de geração de gases quentes, composto por caldeiras, fornalhas, tubulações e demais equipamentos, para uso em processos fabris. O objetivo do trabalho proposto é analisar como realizar a transição energética neste contexto, avaliando fontes alternativas e viabilidade técnico-econômica-ambiental. Os capítulos seguintes detalham todo o estudo realizado, que culminou na análise da biomassa como fonte adequada para essa transição.

Neste cenário, vale destacar já de início que a transição para a biomassa como fonte energética em unidades industriais oferece uma série de benefícios. Primeiramente, a biomassa é uma fonte de energia renovável que pode ser gerida de maneira sustentável, proporcionando um ciclo fechado de carbono, onde o CO₂ emitido durante a combustão é reabsorvido pelas plantas durante o crescimento. Em segundo lugar, a utilização de biomassa pode reduzir a dependência de importação de combustíveis fósseis, fortalecer economias locais e criar oportunidades de emprego em setores como o agronegócio, silvicultura e tecnologia de energia renovável.

Para as indústrias, a adoção da biomassa não deve ser apenas uma decisão de caráter ambiental, mas também uma estratégia econômica. A eficiência operacional e a redução de custos são cruciais para manter a competitividade no mercado global. A biomassa, além de ser uma fonte renovável, pode ser mais econômica a longo prazo quando comparada aos combustíveis fósseis, considerando-se os custos totais e as externalidades negativas evitadas. A adoção de tecnologias eficientes para a conversão de biomassa em energia, bem como a otimização de processos produtivos, são fundamentais para maximizar os benefícios econômicos e ambientais.

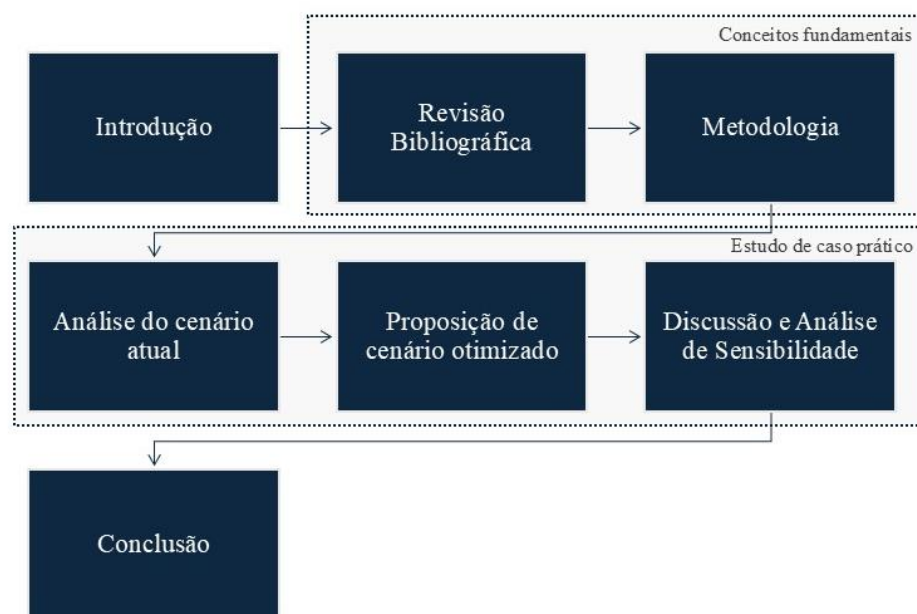
A transição energética é essencial para o controle das mudanças climáticas e para a promoção de um desenvolvimento industrial sustentável. O objetivo deste trabalho é analisar e evidenciar as vantagens e desafios da implementação da biomassa como estratégia para tal em unidades industriais, contribuindo para o conhecimento acadêmico e prático nesta área emergente e de extrema relevância para o futuro das operações fabris e do meio ambiente.

1.3 Estrutura do estudo

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, incluindo introdução e conclusão, de forma a garantir a abordagem dos aspectos fundamentais para a análise da transição energética proposta. A seguir, apresentam-se os objetivos e o conteúdo de cada capítulo:

1. **Introdução:** Motivação, objetivos e relevância do estudo.
2. **Revisão Bibliográfica:** Busca entender o estado da arte metodológico, os conceitos teóricos e estudos prévios relacionados à transição energética, métodos de aplicação no setor industrial, fontes renováveis e panorama atual dos temas no Brasil.
3. **Metodologia:** Detalha o plano de execução do estudo, incluindo os métodos utilizados para analisar o cenário atual da fábrica e para propor o cenário otimizado.
4. **Cenário Atual:** Caracteriza a fábrica estudada, com foco em seus processos produtivos, consumo energético e emissões, consolidando a base para as análises subsequentes.
5. **Cenário Otimizado:** Avalia a viabilidade técnica, econômica e ambiental da substituição do gás natural por biomassa, detalhando o cenário proposto e seus impactos.
6. **Discussão dos Resultados e Análise de Sensibilidade:** Consolida os resultados obtidos, analisa a robustez das decisões frente a variações nos parâmetros críticos e discute limitações e possíveis aprimoramentos do estudo.
7. **Conclusão:** Retoma os principais pontos discutidos, destacando as contribuições do estudo para a engenharia de produção e para a sustentabilidade no setor industrial.

Figura 2: Esquemático da estrutura do estudo



Fonte: Elaborado pelo autor

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica tem como objetivo analisar criticamente a literatura existente sobre a transição energética em unidades industriais, incluindo o uso de biomassa como fonte de energia, com foco nos impactos ambientais e econômicos. O propósito desta seção é identificar e sintetizar os principais estudos que discutem a viabilidade técnica, econômica e ambiental das fontes renováveis, além de explorar as vantagens e desafios associados à sua implementação em ambientes industriais. A análise busca fornecer uma visão abrangente e atualizada do estado da arte, contribuindo para o embasamento teórico do presente trabalho e oferecendo um suporte sólido para a discussão dos resultados e propostas de melhorias.

Para a realização desta revisão, foi adotada uma abordagem sistemática de busca e seleção de fontes científicas. As principais bases de dados utilizadas incluem Google Scholar, Scopus, ScienceDirect e Web of Science. A pesquisa abrange artigos acadêmicos, relatórios de instituições renomadas, como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), além de livros e dissertações relacionadas ao tema. Foram incluídos estudos publicados nos últimos quinze anos, com prioridade para aqueles que abordam a aplicação de biomassa em processos industriais, seus efeitos sobre a redução de emissões de gases de efeito estufa e os custos envolvidos na transição para esta fonte renovável de energia. A seleção foi guiada pela relevância das publicações para o contexto industrial, pela qualidade metodológica dos estudos e pela diversidade de perspectivas apresentadas.

A revisão será estruturada em três eixos principais. O primeiro eixo examinará o conceito de fontes renováveis, suas principais características e as diversas formas de aplicações em processos industriais. No caso específico da biomassa, serão abordados os tipos mais utilizados, como resíduos agrícolas, florestais e urbanos, bem como as tecnologias mais empregadas para sua conversão em energia. No segundo eixo, será analisado o impacto ambiental do uso da biomassa em comparação com combustíveis fósseis, com ênfase na redução de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa, bem como na mitigação de resíduos. O terceiro eixo tratará dos impactos econômicos, discutindo os custos associados à adoção de biomassa, tanto em termos de investimentos iniciais quanto de economia a longo prazo, e os efeitos nas cadeias produtivas locais e globais.

A importância desta revisão bibliográfica reside na necessidade de fundamentar as escolhas metodológicas do presente estudo e contextualizar o tema dentro de um panorama mais amplo de transição energética e sustentabilidade industrial. Ao consolidar o conhecimento existente sobre o uso da biomassa em unidades industriais, espera-se que esta revisão contribua para a compreensão dos desafios e oportunidades associados à sua adoção. Além disso, ao destacar os avanços e lacunas na literatura, esta seção servirá como base para a análise crítica dos dados empíricos a serem apresentados no desenvolvimento do trabalho. Assim, a revisão não só oferece um referencial teórico robusto, como também identifica áreas de pesquisa ainda pouco exploradas, sugerindo caminhos para futuros estudos.

2.1 Transição Energética

A transição energética é um processo que busca reconfigurar os sistemas energéticos globais em direção a fontes renováveis e tecnologias de baixo carbono, com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas e aumentar a sustentabilidade ambiental. Esse conceito, frequentemente estruturado nos pilares dos "3Ds" — Descarbonização, Descentralização e Digitalização —, é amplamente reconhecido como fundamental para a redução das emissões globais de gases de efeito estufa (GHG) (Machado, 2024).

No Brasil, a transição energética apresenta características únicas devido à matriz energética predominantemente renovável, onde aproximadamente 88% da eletricidade gerada em 2022 teve origem em fontes como hidroeletricidade, eólica, solar e biomassa (EPE, 2022). Esse cenário coloca o país em uma posição de destaque internacional, sendo frequentemente citado como exemplo de baixa emissão per capita em comparação com blocos econômicos como União Europeia e Estados Unidos (Peyerl et al., 2023).

Contribuições significativas para a pesquisa sobre o tema têm origem na Escola Politécnica da USP e no Instituto de Energia e Ambiente, que destacam que o Brasil combina um potencial expressivo para expansão de tecnologias renováveis, como energia solar e biocombustíveis, com desafios estruturais e geopolíticos. Segundo Peyerl et al., em seu livro *Energy Transition in Brazil* (Springer, 2023), o avanço da transição energética no Brasil está intimamente ligado à democratização do acesso à energia e à implementação de políticas públicas que promovam eficiência energética e modernização da infraestrutura elétrica.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), órgão governamental responsável por estudos de planejamento energético, enfatiza a importância de iniciativas como o uso de biomassa e biogás e o incentivo a tecnologias emergentes, como o hidrogênio verde. Além disso, há destaque para a necessidade de adaptação às mudanças climáticas, utilizando-se de práticas

como captura e armazenamento de carbono (CCUS) e reflorestamento para potencializar a remoção de carbono da atmosfera (Machado, 2024).

Apesar de avanços notáveis, o Brasil enfrenta desafios relacionados à descentralização do sistema energético e à inclusão de comunidades historicamente marginalizadas nesse processo. O conceito de “justiça energética”, amplamente debatido por estudiosos, aponta para a necessidade de uma transição inclusiva, que leve em conta não apenas as necessidades econômicas, mas também os impactos sociais e ambientais da reestruturação do sistema (Peyerl et al., 2023).

Dessa forma, o panorama brasileiro da transição energética ilustra um equilíbrio entre potencial e desafios. Questões como o financiamento sustentável de grandes projetos, a integração de novas tecnologias no sistema nacional e a análise dos impactos de diferentes cenários no cumprimento das metas climáticas globais ainda precisam de desenvolvimento tanto no âmbito político quanto no segundo setor.

2.2 Biomassa

A biomassa é uma das mais antigas fontes de energia utilizadas pela humanidade e, atualmente, tem se consolidado como uma alternativa promissora para substituir combustíveis fósseis em processos industriais. Segundo o International Energy Agency (IEA, 2020), a biomassa inclui qualquer material de origem biológica que pode ser utilizado como fonte de energia, como resíduos agrícolas, florestais, resíduos urbanos, bem como subprodutos da indústria madeireira e agrícola. As plantas, ao realizarem a fotossíntese, capturam dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera e o convertem em matéria orgânica, que pode ser utilizada para a geração de calor, eletricidade ou biocombustíveis, criando um ciclo fechado de carbono que reduz a pegada de carbono quando comparado ao uso de combustíveis fósseis (Chum et al., 2011).

No contexto industrial, a biomassa pode ser aplicada em diversos processos, desde a queima direta de resíduos orgânicos para geração de calor, até a produção de biocombustíveis líquidos, como o etanol e o biodiesel, que podem substituir diretamente derivados de petróleo em motores de combustão interna. Demirbas (2009) discute como os resíduos agrícolas, como casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar, podem ser convertidos em energia por meio de tecnologias de conversão térmica, como a combustão, a gaseificação e a pirólise. Esses processos permitem que indústrias agrícolas e florestais utilizem seus próprios resíduos para suprir parte ou toda a demanda energética, reduzindo custos com energia e mitigando o problema do descarte inadequado de resíduos.

Além disso, a biomassa pode ser utilizada em sistemas de cogeração, que produzem simultaneamente calor e eletricidade, aumentando a eficiência energética dos processos industriais. Karellas et al. (2012) apontam que sistemas de cogeração a biomassa são amplamente utilizados em países como Suécia e Finlândia, onde resíduos florestais são transformados em pellets e utilizados para alimentar caldeiras industriais, proporcionando uma fonte de energia renovável e de baixo custo. Essas aplicações têm sido especialmente importantes para indústrias de papel e celulose, onde os resíduos gerados no processamento da madeira são usados para atender à demanda energética interna, criando um ciclo fechado e sustentável.

Outro uso relevante da biomassa em processos industriais é a produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos. Monlau et al. (2013) discutem como o biogás pode ser utilizado como combustível para caldeiras e turbinas em fábricas, além de poder ser purificado e convertido em biometano, que pode substituir o gás natural em muitas aplicações industriais. Essa tecnologia tem se mostrado eficiente na gestão de resíduos sólidos orgânicos em indústrias alimentícias e na agricultura, contribuindo para a economia circular e para a redução da dependência de combustíveis fósseis.

A aplicação de biomassa em processos industriais tem mostrado ser uma alternativa viável do ponto de vista ambiental, e também do ponto de vista técnico e econômico. As tecnologias para a conversão de biomassa estão em constante evolução, permitindo a utilização mais eficiente de diferentes tipos de resíduos e subprodutos. A disponibilidade de biomassa em regiões rurais e sua integração nos processos industriais podem fomentar o desenvolvimento sustentável e gerar benefícios econômicos para as indústrias locais e regionais (Gavrilescu, 2008). No entanto, a aplicação prática ainda enfrenta desafios, como a necessidade de investimentos em infraestrutura para a conversão de biomassa e o desenvolvimento de cadeias de suprimento robustas para garantir a disponibilidade constante de matéria-prima.

2.3 Impacto Ambiental do Uso da Biomassa em Processos Industriais

O uso da biomassa como fonte de energia em processos industriais oferece uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, principalmente no que diz respeito à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). A biomassa, quando gerida de forma sustentável, pode ser considerada carbono neutro, uma vez que o CO₂ liberado durante sua combustão é compensado pela quantidade de CO₂ absorvida pelas plantas durante seu crescimento. Isso contrasta com os combustíveis fósseis, que liberam carbono armazenado há milhões de anos,

contribuindo significativamente para o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera e para o aquecimento global (Cherubini et al., 2009).

Estudos recentes indicam que a substituição de combustíveis fósseis por biomassa em processos industriais pode reduzir significativamente as emissões. Goh et al. (2014) analisaram o impacto da cogeração de biomassa em uma indústria de papel e celulose e constataram uma redução de até 70% nas emissões de CO₂ em comparação com o uso de carvão. A pesquisa também destaca que o uso de biomassa pode reduzir outras emissões prejudiciais ao meio ambiente, como os óxidos de enxofre (SO_x) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), que contribuem para a chuva ácida e a poluição atmosférica. No entanto, o estudo ressalta que a magnitude dessas reduções depende fortemente da eficiência das tecnologias de conversão de biomassa e da qualidade da matéria-prima utilizada.

Além da redução das emissões de GEE, o uso da biomassa em processos industriais contribui para a gestão mais eficiente de resíduos. A produção de energia a partir de resíduos agrícolas e florestais reduz a quantidade de lixo que seria descartado em aterros, minimizando os impactos negativos sobre o solo e os recursos hídricos. Sawatdeenarunat et al. (2015) argumentam que a digestão anaeróbica de resíduos orgânicos para a produção de biogás, além de ser uma fonte de energia limpa, evita a liberação de metano (CH₄), um GEE mais potente que o CO₂, em aterros sanitários. Este aspecto é particularmente relevante para indústrias que geram grandes volumes de resíduos orgânicos, como a indústria alimentícia, florestal e agrícola, proporcionando uma solução integrada para o gerenciamento de resíduos e a geração de energia.

Entretanto, apesar dos benefícios ambientais potenciais, é importante considerar que o uso de biomassa também pode ter impactos negativos se não for gerido de maneira sustentável. Searchinger et al. (2009) alertam que a produção excessiva de biomassa para fins energéticos pode levar à desmatamento e à degradação dos ecossistemas, especialmente quando grandes áreas de floresta são convertidas em plantações de monocultura para a produção de biocombustíveis. Além disso, o uso inadequado de fertilizantes e pesticidas nessas plantações pode resultar em contaminação dos solos e dos recursos hídricos, gerando impactos ambientais adversos. Para mitigar esses riscos, é fundamental que políticas públicas e regulamentos sejam implementados para garantir que a biomassa utilizada em processos industriais seja proveniente de fontes sustentáveis e que as práticas agrícolas adotadas minimizem os danos ao meio ambiente.

Portanto, o impacto ambiental do uso da biomassa em processos industriais apresenta um equilíbrio entre benefícios e desafios. Cherubini et al. (2011) apontam que, quando gerida de forma sustentável, a biomassa tem o potencial de contribuir significativamente para a

mitigação das mudanças climáticas, ao mesmo tempo em que promove a economia circular por meio da reutilização de resíduos. Contudo, para maximizar os benefícios ambientais, é crucial que a biomassa seja proveniente de fontes renováveis e que as tecnologias de conversão energética sejam continuamente aprimoradas para aumentar a eficiência e reduzir emissões não desejadas. O sucesso da biomassa como fonte energética, portanto, depende da aplicação de princípios sustentáveis ao longo de toda a cadeia produtiva.

2.4 Impactos Econômicos da Biomassa

A utilização da biomassa como fonte de energia em processos industriais não apenas oferece benefícios ambientais, como também pode resultar em vantagens econômicas significativas, especialmente quando se considera o longo prazo. A transição para a biomassa, quando bem implementada, tem o potencial de reduzir os custos operacionais das indústrias, diminuir a dependência de combustíveis fósseis importados e fortalecer as economias locais por meio do desenvolvimento de cadeias produtivas regionais. De acordo com a International Renewable Energy Agency (IRENA, 2020), o custo nivelado de eletricidade (LCOE) da biomassa tem se tornado cada vez mais competitivo em relação às fontes fósseis, especialmente em regiões onde a matéria-prima é abundante, como resíduos agrícolas e florestais.

A substituição de combustíveis fósseis por biomassa pode levar à redução dos custos de energia nas indústrias, principalmente em setores que geram grandes volumes de resíduos que podem ser reaproveitados como fonte de energia. Por exemplo, indústrias como a de papel e celulose, que tradicionalmente utilizam grandes quantidades de energia em seus processos, podem se beneficiar da cogeração de biomassa, utilizando resíduos como serragem e casca de árvore. Smeets et al. (2009) destacam que as indústrias de países escandinavos, como a Finlândia e a Suécia, têm conseguido economizar significativamente ao integrar a biomassa em seus sistemas de cogeração, reduzindo a necessidade de adquirir combustíveis fósseis e mitigando a volatilidade dos preços do petróleo e do gás natural no mercado internacional.

Outro impacto econômico positivo é o desenvolvimento de cadeias de valor locais. A biomassa, muitas vezes, pode ser cultivada ou coletada em regiões rurais, criando oportunidades de emprego e desenvolvimento econômico em áreas menos favorecidas. Slade et al. (2014) enfatizam que a criação de uma cadeia produtiva de biomassa pode gerar empregos em vários estágios do processo, desde a produção agrícola e florestal até o transporte, processamento e distribuição da biomassa. Essa dinamização da economia local pode resultar em um efeito multiplicador, fomentando o desenvolvimento regional e aumentando a renda em comunidades que tradicionalmente dependem de atividades agrícolas de subsistência.

Além disso, os investimentos iniciais necessários para a transição energética envolvendo biomassa podem ser compensados ao longo do tempo por meio da redução de custos operacionais e pela mitigação das externalidades negativas associadas ao uso de combustíveis fósseis. IRENA (2020) aponta que, embora os custos de instalação de tecnologias de conversão de biomassa possam ser elevados, especialmente para sistemas avançados como gaseificação e cogeração, os benefícios econômicos a longo prazo tendem a superar esses investimentos iniciais. A redução de custos com tratamento de resíduos, a geração de energia interna e a possibilidade de venda de créditos de carbono podem contribuir para o retorno financeiro desses projetos, especialmente em países que adotam políticas de incentivos à energia renovável.

Por outro lado, o uso de biomassa também enfrenta desafios econômicos que precisam ser considerados. Um dos principais desafios é a logística envolvida no transporte e armazenamento da biomassa, que pode representar um custo significativo em regiões onde os recursos estão dispersos. Hamelinck et al. (2005) sugerem que a viabilidade econômica da biomassa depende fortemente da proximidade entre a fonte de biomassa e as unidades industriais que a utilizam. Quanto maior a distância entre a fonte e o local de consumo, maiores serão os custos logísticos, o que pode impactar a competitividade da biomassa em relação a outros combustíveis. Além disso, flutuações nos preços das commodities agrícolas e a disponibilidade de biomassa ao longo do tempo também podem afetar a viabilidade econômica da biomassa em alguns setores industriais.

Em suma, os impactos econômicos do uso da biomassa em processos industriais dependem de uma série de fatores, incluindo a disponibilidade de matéria-prima, a eficiência das tecnologias de conversão e a estrutura da cadeia de suprimentos. Quando bem implementada, a biomassa pode oferecer uma solução economicamente vantajosa para a transição energética, promovendo economias locais e reduzindo os custos energéticos das indústrias. No entanto, para que esses benefícios sejam realizados de maneira sustentável e duradoura, é necessário superar desafios relacionados à logística, à variabilidade dos recursos e ao investimento inicial, o que pode exigir o suporte de políticas públicas e incentivos econômicos direcionados.

2.5 Análise do Ciclo de Vida da Biomassa

O artigo "Review in life cycle assessment of biomass conversion through pyrolysis - issues and recommendations" de Gahane et al. (2022) na revista *Green Chemical Engineering*, examina o processo de conversão de biomassa por meio da pirólise, destacando a importância do uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para medir os impactos ambientais associados a

essa técnica. A biomassa é amplamente considerada uma fonte de energia renovável e neutra em carbono, sendo um substituto promissor para os combustíveis fósseis. A pirólise, um método eficiente de conversão da biomassa em bioenergia e produtos químicos, tem ganhado destaque devido à sua capacidade de gerar produtos de valor agregado, como bio-óleos e biogás, sem a necessidade de adicionar produtos químicos adicionais ao processo.

O artigo se concentra nas questões metodológicas relacionadas ao uso da ACV na análise da pirólise da biomassa. A ACV é uma ferramenta que avalia os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto ou processo, desde a extração das matérias-primas até a disposição final. No entanto, os resultados das ACVs variam amplamente entre diferentes estudos, devido à diversidade de métodos e escolhas metodológicas. O artigo identifica quatro principais etapas da ACV (definição do objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida, avaliação de impacto e interpretação dos resultados) e oferece recomendações para melhorar a consistência e a comparabilidade dos resultados entre diferentes estudos.

Entre os principais pontos abordados, destacam-se:

- **Definição do Objetivo e Escopo:** O artigo enfatiza a importância de definir claramente os limites do sistema e a unidade funcional (a base para as comparações entre diferentes cenários).
- **Inventário do Ciclo de Vida:** A coleta de dados precisa e a utilização de bancos de dados adequados são essenciais para garantir a precisão da análise. A falta de dados padronizados é um desafio significativo em estudos de ACV.
- **Avaliação de Impacto:** O potencial de aquecimento global (GWP) é o impacto ambiental mais comum avaliado em estudos de ACV de pirólise de biomassa. No entanto, outros impactos, como potencial de acidificação e eutrofização, também são discutidos.
- **Interpretação dos Resultados:** A análise de sensibilidade é sugerida como uma ferramenta crucial para testar a robustez dos resultados da ACV, especialmente em relação às variações nos dados e nas premissas utilizadas no estudo.

O artigo também compara diferentes tipos de biomassa (resíduos agrícolas, resíduos florestais e microalgas) em termos de impacto ambiental. Os resíduos florestais, por exemplo, apresentam um menor impacto de GWP em comparação com outros tipos de biomassa. No entanto, os autores alertam que mais estudos são necessários para melhorar a compreensão dos impactos ambientais de diferentes tipos de biomassa e para desenvolver diretrizes mais unificadas na realização de estudos de ACV sobre a pirólise de biomassa.

Por fim, os autores recomendam que futuras pesquisas sobre ACV se concentrem na padronização de unidades funcionais e na ampliação dos estudos para incluir mais impactos ambientais além do GWP, bem como na consideração de produtos de valor agregado obtidos através da pirólise.

2.6 Panorama de consumo de Energia Elétrica no Brasil

O *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023* fornece uma análise detalhada do consumo de eletricidade no Brasil em 2022, destacando as principais fontes de geração de energia e sua distribuição no país. A capacidade instalada total de energia no Brasil alcançou 206,5 GW, distribuída entre diversas fontes. A hidroeletricidade permanece como a principal fonte de energia, representando 53,2% da capacidade instalada. Fontes não fósseis, como solar e eólica, também apresentaram crescimento significativo.

Em 2022, as principais fontes de geração de eletricidade no Brasil foram:

- **Hidráulica:** Responsável por 63,1% da eletricidade gerada (427.114 GWh).
- **Eólica:** Representou 12,1% da geração total, com destaque para o aumento da capacidade instalada.
- **Biomassa:** Contribuiu com 7,6% da geração total, reforçando seu papel como fonte renovável.
- **Solar:** Teve um crescimento expressivo de 79,8% em relação ao ano anterior, chegando a 4,4% da geração total.
- **Gás Natural:** Ainda representa 6,2% da geração, embora tenha ocorrido uma redução de 52,9% no uso de combustíveis fósseis (gás natural, carvão e derivados de petróleo) entre 2021 e 2022.

O consumo total de energia elétrica no Brasil foi de 509 TWh em 2022, com um crescimento de 2,4% em relação ao ano anterior. O Sudeste foi a região com maior consumo (49,9%), seguido pelas regiões Sul, Nordeste, Centro-Oeste e Norte. Além disso, o consumo de eletricidade per capita variou entre as regiões, sendo o maior registrado na região Sul (3.084 kWh/hab).

O relatório destaca uma tendência de migração dos consumidores para o mercado livre de energia, que tem crescido significativamente nos últimos anos, principalmente no setor industrial. O setor comercial também registrou um crescimento no consumo de eletricidade, com destaque para o setor de serviços.

Por fim, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor de geração elétrica no Brasil caíram 43% em 2022 em relação a 2021, totalizando 44,3 milhões de toneladas de CO₂.

Isso reforça o papel das fontes renováveis no mix energético brasileiro e a tendência de descarbonização do setor elétrico.

3. METODOLOGIA

Esta seção descreve os métodos e as abordagens adotadas para a realização da análise do consumo de energia da fábrica estudada, com o objetivo de avaliar o potencial para transição energética e quais fontes alternativas de energia poderiam ser utilizadas. A metodologia foi elaborada para permitir uma análise detalhada dos impactos econômicos e ambientais decorrentes da transição, visando identificar tanto as vantagens quanto os desafios desse processo.

A análise será dividida em três etapas principais: a coleta e análise dos dados operacionais e energéticos da empresa, a modelagem de cenários com diferentes tipos de fontes, em comparação com fontes de energia tradicionais, e a avaliação dos resultados quanto à redução de custos operacionais e impactos ambientais, com foco nas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Serão utilizados indicadores de eficiência energética, cálculos de custo-benefício, e ferramentas de análise de ciclo de vida e cálculo de emissões para comparar os cenários.

O estudo se concentrará na fábrica de sabão em pó de uma grande multinacional de bens de consumo, localizada em Indaiatuba (SP). O perfil de consumo energético inclui fontes convencionais, como eletricidade e combustíveis fósseis, principalmente gás natural, em um sistema de geração de gases para os processos fabris. A coleta de dados será realizada por meio de relatórios internos da empresa, bem como dados secundários obtidos de estudos de caso semelhantes. Esses dados serão analisados com o auxílio de softwares especializados em simulação de consumo energético e impactos ambientais.

Esta metodologia permitirá uma avaliação prática e aplicável, fornecendo insights sobre a viabilidade econômica e ambiental da transição na matriz energética na fábrica. Os resultados esperados incluem uma estimativa de redução nos custos energéticos e uma análise quantitativa da diminuição das emissões de GEE, contribuindo assim para uma operação mais sustentável e eficiente.

3.1 Coleta de dados e cenário atual/*As-Is*

3.1.1 *Objetivos*

O principal objetivo da análise do cenário *As-Is* é compreender os processos e perfil energético atual da fábrica de Indaiatuba, avaliando seu consumo de energia, os custos associados, e os impactos ambientais causados pelas fontes energéticas que utiliza. Este cenário inicial servirá como ponto de comparação para os cenários futuros, nos quais fontes renováveis serão consideradas como uma possível substituição parcial ou total das fontes de energia

convencionais. A análise permitirá identificar os principais desafios e oportunidades da fábrica em termos de eficiência energética e sustentabilidade, criando uma base sólida para a avaliação dos benefícios da transição.

3.1.2 Métodos

A. Coleta de Dados Operacionais e Energéticos:

A primeira etapa da análise envolve a coleta de dados detalhados sobre a operação da empresa e seu consumo energético. Os dados foram obtidos a partir de:

- Fluxograma de processos
- Plantas fabris
- Inventário de equipamentos
- Relatórios de consumo de eletricidade e combustível (mensais ou anuais);
- Faturas de energia, que detalham os custos por tipo de fonte energética (por exemplo, eletricidade da rede distribuída, diesel, gás natural);
- Informações sobre a infraestrutura da empresa, como tipos de equipamentos utilizados, eficiência das máquinas, e níveis de perdas energéticas.

Será dada especial atenção ao levantamento dos dados históricos de consumo energético, que possibilitarão identificar padrões de uso, picos de demanda e sazonalidades, além de fornecerem informações sobre a variação nos custos ao longo do tempo.

B. Análise de Consumo Energético:

Com base nos dados coletados, será realizada uma análise de consumo energética dos processos da fábrica. Isso incluirá a avaliação de quais equipamentos e setores mais consomem energia. O objetivo é identificar onde ocorre a maior parte do consumo, quais fontes são utilizadas e ineficiências que possam ser mitigadas com a substituição ou complementação das fontes de energia atuais por fontes renováveis.

C. Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE):

Para avaliar os impactos ambientais do cenário *As-Is*, serão calculadas as emissões de GEE associadas ao consumo das fontes de energia utilizadas pela empresa. Esse cálculo será baseado em fatores de emissão fornecidos por bases de dados reconhecidas internacionalmente, como o GHG Protocol Brasil e IPCC, para cada tipo de combustível fóssil (diesel, gás natural, etc.). O cálculo permitirá determinar a quantidade de CO₂ equivalente emitido por unidade de energia consumida, fornecendo uma métrica clara dos impactos ambientais do cenário atual.

D. Análise de Custos Energéticos:

A análise de custos envolverá o levantamento de todas as despesas relacionadas ao consumo de energia, incluindo custos diretos com aquisição de eletricidade e combustíveis.

3.1.3 Resultados Esperados

A partir da análise do cenário *As-Is*, espera-se alcançar uma compreensão abrangente da atual situação operacional e energética da fábrica, incluindo:

- **Descrição e caracterização da unidade industrial:** Entendimento completo de como é o layout, processos e estrutura da fábrica estudada
- **Perfil de Consumo Energético:** Identificação das fontes energéticas mais utilizadas, a quantidade de energia consumida por cada uma e a variação de consumo ao longo do tempo e para cada processo fabril.
- **Custos:** Levantamento detalhado dos custos associados ao consumo de energia, permitindo a visualização de possíveis pontos de redução de despesas.
- **Impactos Ambientais:** Cálculo das emissões de GEE associadas ao consumo de combustíveis fósseis e eletricidade, fornecendo uma métrica clara dos impactos ambientais gerados pelas operações da empresa.
- **Eficiência Energética:** Identificação de oportunidades de melhorias na eficiência energética dos processos industriais, que poderão ser potencializadas com a transição energética.

Com base nesses resultados, será possível traçar cenários alternativos que considerem a substituição de parte ou da totalidade das fontes de energia fósseis por renováveis, visando reduzir tanto os custos operacionais quanto os impactos ambientais. O cenário *As-Is* funcionará como um marco de referência contra o qual serão comparados os resultados dos cenários futuros, destacando os ganhos potenciais em termos de sustentabilidade e competitividade econômica.

3.2 Análise e otimização (cenário *To-Be*):

3.2.1 Objetivos

A montagem do cenário otimizado com fontes renováveis, como a biomassa, tem como principal objetivo avaliar os potenciais benefícios econômicos e ambientais da substituição parcial ou total das fontes de energia convencionais na fábrica de Indaiatuba. A alternativa será desenvolvida considerando as características específicas da empresa, como a disponibilidade de fontes renováveis na região, os tipos de processos industriais utilizados, e a infraestrutura

existente. O cenário otimizado buscará maximizar a eficiência energética e minimizar os custos operacionais, ao mesmo tempo em que reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

3.2.2. Construção do Cenário

A construção do cenário otimizado será realizada em etapas, cada uma focada em garantir a viabilidade técnica, econômica e ambiental das alternativas:

A. Identificação das Fontes Renováveis Disponíveis:

A primeira etapa envolverá o levantamento das fontes renováveis disponíveis na região em que a empresa opera, como solar, hidrelétrica e biomassa. No último exemplo, serão considerados resíduos agrícolas, florestais, urbanos e industriais, de modo a identificar fontes de biomassa que possam ser adquiridas a um custo competitivo e em quantidades suficientes para atender às necessidades energéticas da fábrica. A análise incluirá fatores como o custo de transporte, processamento e armazenamento de cada fonte, além de questões logísticas relacionadas à sua integração na matriz energética da fábrica.

B. Escolha da Fonte mais adequada:

Considerando os processos da empresa, as fontes disponíveis, e as viabilidades técnicas e econômicas, será analisada e escolhida a fonte mais adequada para a realização da transição energética na fábrica. A escolha da tecnologia será guiada pela compatibilidade com os processos, com as necessidades da empresa, buscando maximizar o aproveitamento energético e minimizar as perdas durante o processo.

C. Simulação do Consumo Energético com Fonte Renovável:

Será realizada uma modelagem da operação da empresa com a substituição das fontes de energia atuais. A simulação permitirá estimar o consumo energético com a fonte escolhida, as emissões de GEE resultantes da conversão, e o impacto financeiro sobre os custos operacionais. Serão modelados diferentes níveis de substituição, variando desde uma substituição parcial até uma substituição total das fontes convencionais por renováveis.

D. Avaliação dos Custos e Benefícios:

Será realizada uma análise de custo-benefício considerando os investimentos necessários para a instalação das tecnologias, os custos operacionais associados ao uso/operação, e os possíveis ganhos econômicos a longo prazo. A análise incluirá a avaliação de incentivos fiscais ou subsídios governamentais que possam reduzir os custos da transição, bem como a possibilidade de comercialização de créditos de carbono resultantes da redução das emissões de GEE.

3.2.3. Resultados Esperados

Com a montagem do cenário otimizado, espera-se atingir os seguintes resultados:

- **Redução dos Custos Operacionais:** A substituição de combustíveis fósseis deve reduzir os custos com aquisição de energia, especialmente se a fonte escolhida for obtida localmente a preços competitivos. A otimização dos processos industriais com tecnologias de conversão mais eficientes também poderá reduzir o consumo total de energia.
- **Redução das Emissões de GEE:** Espera-se uma redução significativa das emissões de gases do efeito estufa (GEE) em comparação com o cenário *As-Is*.

3.3 Discussão e Análise de Sensibilidade

A discussão dos resultados do cenário otimizado incluirá uma comparação detalhada com o cenário atual, destacando as melhorias em termos de custo, eficiência e impacto ambiental. Será feita uma análise crítica dos benefícios obtidos e das possíveis dificuldades de implementação da nova fonte como meio energético. Essa discussão levará em conta tanto os aspectos técnicos quanto os financeiros, avaliando a viabilidade de adoção em larga escala pela fábrica.

A análise de sensibilidade será realizada para testar a robustez do cenário otimizado em relação a variações nos principais parâmetros de entrada, como:

- **Disponibilidade e custo da fonte renovável:** Como o custo pode variar significativamente de acordo com a fonte, localização e a época do ano, será testada a sensibilidade dos resultados financeiros a flutuações no preço e na oferta.
- **Eficácia das tecnologias de conversão:** A análise examinará o impacto de variações na eficiência das tecnologias de conversão, considerando cenários onde a eficiência seja superior ou inferior às expectativas iniciais.
- **Mudanças nos preços dos combustíveis fósseis:** Serão simulados cenários com diferentes previsões de preços para combustíveis fósseis, avaliando como essas mudanças impactariam a competitividade da biomassa a longo prazo.

Os resultados da análise de sensibilidade ajudarão a identificar os principais fatores de risco e oportunidades do projeto, permitindo uma tomada de decisão mais informada sobre a viabilidade da transição. A análise fornecerá um entendimento claro sobre as condições em que o cenário otimizado seria mais vantajoso, além de destacar áreas onde pode ser necessário ajustar a estratégia para garantir o sucesso da adoção de fontes renováveis.

Com essa metodologia, espera-se atingir os objetivos propostos pelo estudo, fornecendo uma análise detalhada e comparativa entre o cenário atual de consumo energético da empresa e o cenário otimizado com fontes renováveis. A abordagem visa não apenas identificar os potenciais ganhos econômicos e ambientais, mas também fornecer insights sobre a viabilidade prática da transição energética. Ao integrar a análise de sensibilidade, pretende-se garantir que as conclusões sejam robustas e aplicáveis em diferentes condições de mercado e disponibilidade de recursos, oferecendo assim uma base sólida para tomadas de decisão estratégicas em relação à sustentabilidade e competitividade da empresa no longo prazo.

4. ANÁLISE DO CENÁRIO ATUAL DA FÁBRICA

Nesta seção, será feita uma análise detalhada do cenário atual da fábrica estudada em termos operacionais, de consumo energético e impacto ambiental de emissões atrelado. Serão discutidos os processos realizados na fábrica de Indaiatuba, além de sua infraestrutura, os tipos de energia utilizados, os custos operacionais envolvidos e as emissões de gases de efeito estufa. A análise fornecerá um panorama da situação atual e estabelecerá a base para a proposta de melhoria com a adoção de fontes renováveis.

4.1 Descrição e caracterização da Unidade Industrial Estudada

A fábrica analisada está localizada em Indaiatuba, São Paulo, e é uma das maiores unidades de produção de sabão em pó no Brasil, pertencente a uma grande multinacional do setor de bens de consumo. Esta planta desempenha um papel crucial na cadeia de abastecimento da empresa, sendo responsável por uma parcela significativa da produção nacional de sabão em pó. A fábrica opera com alta demanda energética, utilizando diversas fontes de energia para alimentar suas linhas de produção e sistemas de suporte, como aquecimento, movimentação de materiais e tratamento de efluentes.

A energia consumida pela fábrica provém de uma combinação de eletricidade da rede distribuída (via mercado livre de energia) e geração local com combustíveis fósseis, como gás natural e diesel, utilizados principalmente em caldeiras e geradores de backup. Além do consumo direto de energia, a planta também gera emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas às atividades produtivas e logísticas. Dada a magnitude da operação, a busca por maior eficiência energética e alternativas mais sustentáveis tem se tornado uma prioridade estratégica, tanto para reduzir custos operacionais quanto para alinhar-se com as metas globais de sustentabilidade da empresa.

Neste contexto, a planta em Indaiatuba representa uma excelente oportunidade para explorar o potencial da transição energética, visando a substituição parcial ou total das fontes convencionais. Este estudo focará em analisar o cenário energético atual da fábrica, seus principais desafios e oportunidades, e qual fonte renovável pode ser integrada à operação para promover a redução dos custos energéticos e das emissões de GEE.

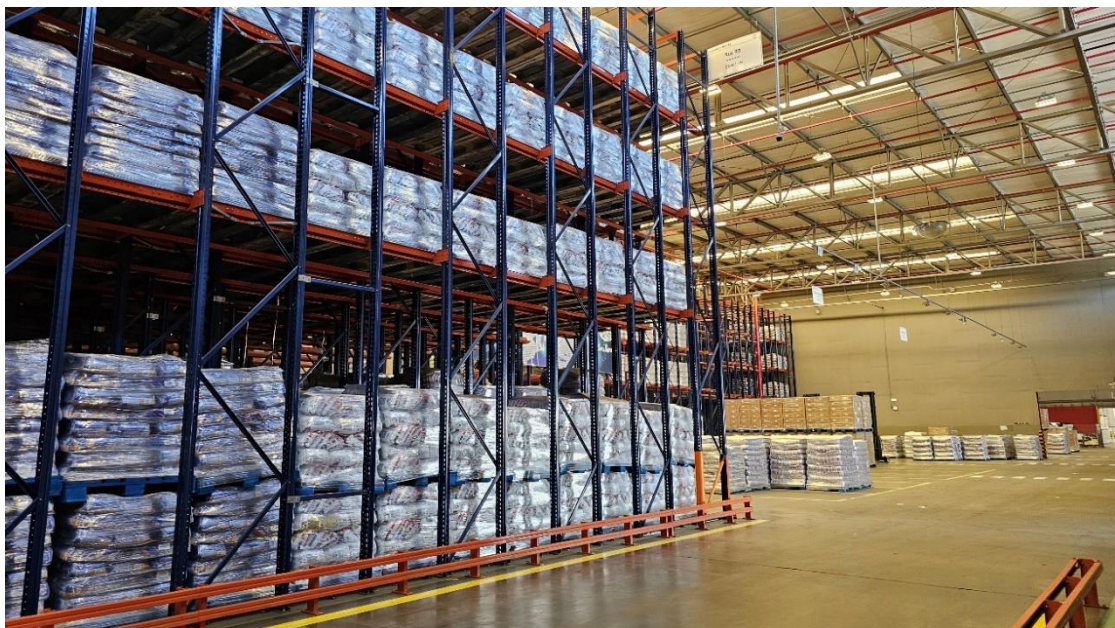
4.1.1 Visita à fábrica

A análise da fábrica se iniciou com uma visita realizada pelo autor em conjunto com dois membros do time de engenharia. Durante a visita, foi possível conhecer detalhadamente as instalações e entender de perto o funcionamento das operações. A visita teve início com uma apresentação geral sobre a planta, onde foram explicadas as principais etapas do processo de produção do sabão em pó, desde a recepção das matérias-primas até a entrega do produto no depósito de produtos acabados.

Ao longo da visita, foram percorridas áreas como o setor de mistura, onde são preparadas as soluções iniciais, e a torre de secagem por atomização, que utiliza gases quentes para transformar a mistura líquida em pó seco. Também foram visitadas as áreas de envase e armazenamento, onde o produto final é embalado e preparado para distribuição. Em cada etapa, os engenheiros explicaram as demandas energéticas específicas e os equipamentos envolvidos, destacando os principais pontos críticos em termos de consumo de energia.

Além disso, a equipe de engenharia forneceu informações sobre as iniciativas atuais para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões, assim como os desafios enfrentados para substituir fontes convencionais por alternativas renováveis. A visita permitiu obter uma perspectiva prática e valiosa para a análise do cenário energético da fábrica, fundamentando a avaliação das oportunidades de transição energética.

Figura 3: Fotos da visita à fábrica – Estoque de matéria prima e embalagens



Fonte: Fotografias tiradas pelo autor

Figura 4: Fotos da visita à fábrica – Instalação principal de produção



Fonte: Fotografias tiradas pelo autor

Figura 5: Fotos da visita à fábrica – Docas de recebimento de matéria prima a granel



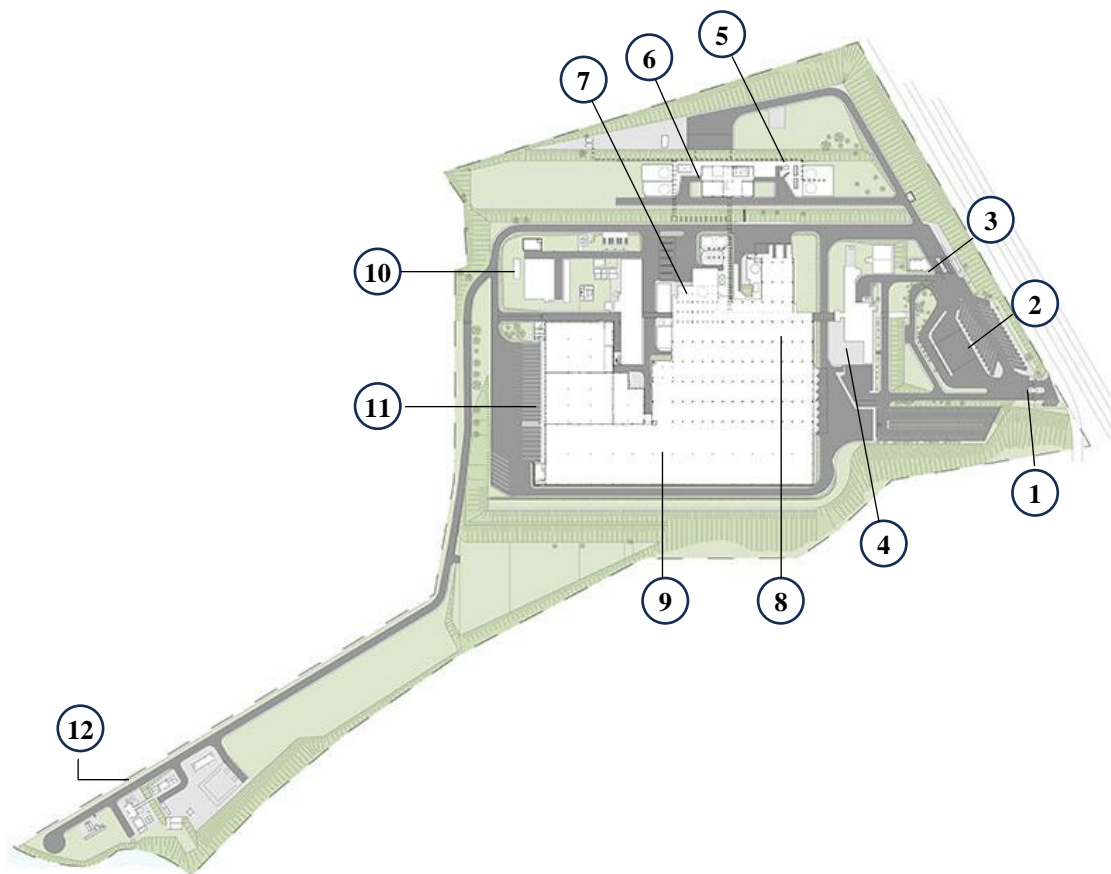
Fonte: Fotografias tiradas pelo autor

Durante a visita, além da captura de fotos como acima (veja mais fotos no ANEXO A), foram já coletadas algumas bases de dados e plantas impressas da unidade fabril. Estes dados incluíram posicionamento dos equipamentos e maquinários dentro da fábrica, histórico de produção do dia e listas de movimentações de caminhões de matéria prima. Posteriormente, o time de engenharia disponibilizou online o restante dos dados necessários para a execução do trabalho, incluindo fluxogramas de processos, custos com energia, base de consumo de combustíveis, entre outros.

4.1.2 Layout da fábrica

Com a visita e a análise da planta (figura 5), pode-se entender o layout da fábrica, permitindo uma visão inicial sistêmica da produção realizada na unidade. A área total do terreno é de, aproximadamente, 280.000 m², com um perímetro de 3000 m. Já de área construída, ela possui cerca de 105.000 m², divididas entre as áreas/setores marcados na planta abaixo:

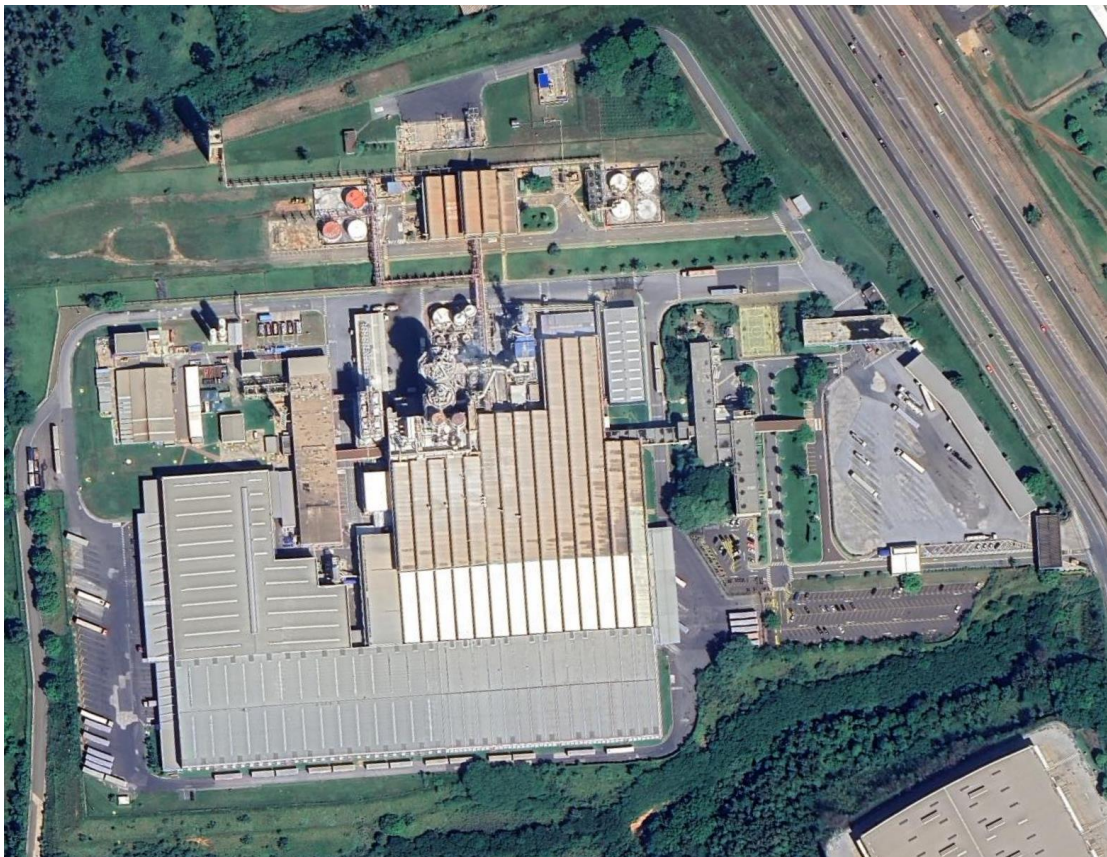
Figura 6: Planta esquemática da fábrica estudada (Indaiatuba-SP)



Fonte: Dados disponibilizados pela empresa

Tabela 1: Relação das principais áreas da fábrica

Número do marcador	Nome da Área / Setor
1	Entrada da fábrica
2	Pátio de manobras para caminhões
3	Portaria de check-in e pesagem
4	Escritório corporativo e de controle
5	Depósito de combustíveis e matérias primas gasosas
6	Silos de armazenagem
7	Sistema de geração de gases quentes
8	Depósito de matérias primas sólidas
9	Área principal de produção
10	Ferramentaria e sistemas auxiliares
11	Depósito de produto acabado
12	Estação de tratamento de resíduos e efluentes

Figura 7: Fotografia aérea da unidade industrial – Indaiatuba (SP)

Fonte: Google Earth

Este layout propicia um fluxo circular de veículos e produtos, que entram pela direita e por cima, saindo pela esquerda e por baixo (sentido anti-horário). Este fluxo foi construído assim para acomodar a forma como a produção é feita na fábrica. No caso, o arranjo físico adotado segue um modelo linear, em processo contínuo de produção de sabão em pó. Isso se deve a alta padronização do produto e alta demanda de produção, com milhares de quilogramas sendo produzidos diariamente (mais detalhes na seção 4.1.3). Este projeto de fábrica permite a empresa operar com eficiência, mesmo com o alto fluxo de veículos e de produção que precisa ser suportado.

No âmbito energético, os principais pontos de consumo estão na área de produção principal (9) e no sistema de geração de gases quentes (7). O controle da eletricidade é feito por um painel elétrico central, localizado no prédio de controle (4), que redistribui a energia para cada setor, com seus painéis e sistemas próprios. Já o controle do combustível queimado em (9) é feito no próprio setor, que comanda a taxa de geração de gases.

Esta visão do layout proporciona um entendimento sistêmico da unidade produtiva de Indaiatuba, permitindo identificar os fluxos de materiais, energia e resíduos, além dos principais pontos de controle e consumo energético. Essa compreensão é fundamental para avaliar a eficiência operacional e identificar oportunidades para a adoção de soluções mais sustentáveis. O arranjo físico e a disposição dos setores facilitam o acesso aos sistemas de distribuição de energia e combustível, o que é essencial para implementar melhorias no gerenciamento do consumo energético e otimizar os processos produtivos de forma integrada e contínua.

4.1.3 Principais dados operacionais

Percebe-se que, pelo tamanho da infraestrutura e escala da operação, a fábrica movimenta muitos produtos por dia e necessita de uma grande quantidade de funcionários em sua operação. Entender a escala da operação é essencial para analisar e propor melhorias de eficiência energética que estejam alinhadas com as necessidades e características da unidade industrial. Para obter este entendimento, foram colhidos e analisados os principais dados operacionais da fábrica, que fornecem uma visão abrangente das atividades e capacidades produtivas. Esses dados providenciam o contexto em que a análise de eficiência energética será realizada, pois permitem identificar fatores que podem influenciar o consumo de energia e os potenciais ganhos de eficiência. A caracterização dos aspectos operacionais serve como base para contextualizar a análise energética e orientar as propostas de melhorias. Os dados operacionais a serem considerados incluem:

4.1.3.1 Número de Colaboradores

Cerca de 1500 colaboradores atuam na fábrica, divididos entre times de engenharia, operação, suporte e logística. A unidade opera 24 horas por dia, 7 dias na semana, com 3 turnos de 8 horas por dia.

4.1.3.2 Volume de Produção Anual

A quantidade de sabão em pó produzido ao longo do ano varia ao redor de 700.000 toneladas. Em 2023, cujos dados de produção foram disponibilizados ao autor pelo time de engenharia, a produção total foi de 705.122 ton.

4.1.3.3 Linhas de Produção

A unidade industrial estudada possui 3 linhas de produção em paralelo, sendo uma a principal, responsável pela manufatura do sabão em pó, e duas de suporte, onde ocorre a produção dos aditivos químicos, fragrâncias e demais componentes do produto (veja fluxograma na seção 4.1.5).

4.1.3.4 Famílias de produtos produzidas

Na fábrica, são produzidas 5 marcas de sabão em pó diferentes, com cerca de 60 SKUs distintos (variações de fragrâncias e tamanho de embalagem)

Tabela 2: Relação das marcas e SKUs produzidos na fábrica (2023)

Marcas	Segmento / Público-alvo	Características	Número de SKUs	% da produção
Marca A	Premium / Classes A e B	Alta qualidade, fragrâncias especiais	20	22%
Marca B	Roupas especiais / Classes A e B e C	Roupas com tingimento especial, vestidos, infantis	8	8%
Marca C	Padrão / Classes C e D	Preço baixo, praticidade	12	25%
Marca D	Padrão / Classes C e D	Preço baixo, praticidade	12	15%
Marca E	Lavanderias / Hotéis / Atacado	Embalagens grandes, eficiência na lavagem	8	30%

Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa

As 5 marcas são produzidas nas mesmas linhas de produção, ocorrendo apenas as trocas de insumos e fragrâncias dependendo do SKU produzido no turno/lote. Como o processo é linear e contínuo, as trocas de produtos exigem ajustes rápidos na dosagem de matérias-primas e na adição de fragrâncias ou aditivos específicos, garantindo que cada formulação atenda aos padrões de qualidade de cada marca. O processo é projetado para que essas mudanças ocorram de forma otimizada, com tempo mínimo de inatividade e poucas perdas de insumos, mantendo a eficiência da linha. Dessa forma, a utilização de uma única linha de produção permite um aproveitamento eficiente dos recursos e infraestrutura da fábrica, mesmo com as variações entre os diferentes produtos.

4.1.3.5 Taxa de Perda

Em fábricas de produtos químicos, como a de Indaiatuba, a perda de material pode variar bastante dependendo da eficiência dos processos, do controle de qualidade e da tecnologia empregada. Em unidades industriais bem otimizadas, as perdas de material costumam ser reduzidas, mas ainda assim, uma margem entre 1% e 5% do total de insumos pode ser esperada devido a fatores diversos.

No caso da fábrica estudada, o time de engenharia mencionou que a taxa de perda de insumos estava em 1,1%, sendo geradas pelos seguintes motivos:

- **Resíduos de mistura e limpeza:** Pequenas quantidades de matéria-prima são perdidas durante o carregamento, mistura e nos processos de troca e limpeza de equipamentos.
- **Perdas no processo de secagem:** No processo de *Spray-Drying* (secagem por atomização, detalhada na seção 4.1.4.3), parte do pó pode se perder na forma de partículas muito finas, que não são capturadas no produto final.
- **Controle de qualidade:** Produtos que não atendem aos requisitos de qualidade, e que não são podem mais ser reprocessados, são descartados.
- **Manutenção e falhas nos equipamentos:** As poucas paradas inesperadas e manutenções corretivas resultam em perdas em algumas etapas.

É importante destacar que este estudo não se aprofundou nas causas e motivos de perda de materiais, que indiretamente contribuem com aumento da pegada de carbono e desperdício de energia. No entanto, as perdas de matérias-primas não representam a maior parte do consumo energético da fábrica (veja seção 4.2). O consumo principal de energia está concentrado nas operações de mistura, aquecimento e secagem, onde a demanda energética é elevada para garantir a qualidade do produto final. Apesar disso, um estudo focado na redução de perdas de materiais poderia complementar a presente análise, contribuindo para uma operação mais

sustentável ao diminuir tanto o desperdício de recursos quanto as emissões associadas. A redução das perdas poderia, portanto, aliviar a pegada de carbono da fábrica, trazendo benefícios ambientais adicionais ao reduzir a necessidade de processamento de matérias-primas e de tratamento de resíduos.

4.1.3.6 Uso de Matérias-Primas

A partir dos dados disponibilizados pelo time de engenharia, pode-se listar os principais insumos utilizados na produção de sabão em pó em um ano, considerando a taxa de perdas informada como equivalente para todos as MPs *

Tabela 3: Relação das matérias-primas utilizadas e consumo anual (2023)

Matéria-Prima	Proporção no Produto Final (%)	Consumo Anual (ton)	Quantidade pós-perdas (ton)
Tensoativo (sulfato de sódio e LAS)	28	199.630	197.434
Carbonato de Sódio (barrilha)	20	142.593	141.024
Silicato de Sódio	15	106.945	105.768
Zeólitas (substituto de fosfatos)	13	92.685	91.666
Peróxido de Sódio (agente branqueador)	11	78.426	77.563
Enzimas (protease, amilase, lipase)	4	28.519	28.205
Fragrâncias e Perfumes	2	14.259	14.102
Corantes e Agentes de Controle de Espuma	2	14.259	14.102
Outros Aditivos e Aglutinantes	5	35.648	35.256
Total	100	712.965	705.122

Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa

Pode-se notar que a escala da operação exige grandes volumes de matéria-prima, que devem ser movimentadas, armazenadas e integradas aos processos produtivos de maneira

Nota: A quebra de perdas por tipo de matéria-prima e por processo não foi disponibilizada ao autor. Porém, o time de engenharia indicou que a taxa de 1,1% pode ser considerada transversal entre todas as categorias

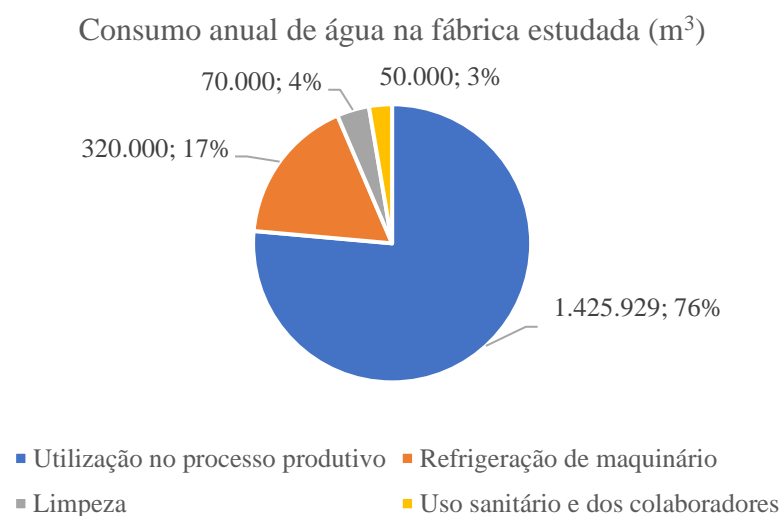
eficiente. O conjunto destas tarefas, que compõem o *supply chain management* da empresa, impacta indiretamente o consumo energético e a pegada de carbono da fábrica. Por exemplo, se determinada matéria-prima é importada, as emissões associadas ao seu transporte tendem a ser maiores do que se fosse escolhido um insumo de origem nacional, afetando a sustentabilidade do processo como um todo. No entanto, este estudo não se propõe a avaliar essas escolhas de abastecimento em detalhe, focando exclusivamente nos aspectos energéticos internos e nas possibilidades de otimização dentro da planta

4.1.3.7 Consumo de água e gestão de resíduos

A água é frequentemente utilizada na fabricação de sabão em pó, especialmente nas etapas iniciais, onde ela atua como veículo de mistura para dissolver e homogeneizar os ingredientes. Durante o processo de produção, os ingredientes sólidos são dissolvidos ou suspensos em água para criar uma mistura uniforme (conhecida como "*slurry*"). No entanto, ao final do processo, a água é quase totalmente removida na etapa de secagem por atomização (*Spray-Drying*), resultando em um produto com pouca umidade.

Assim, embora a água desempenhe um papel importante no processamento e na mistura dos ingredientes, ela não faz parte da composição final do sabão em pó, que é um produto seco. Além da água utilizada no processo, que, segundo o time de engenharia, é cerca de 2 litros para cada quilograma de produto seco, a fábrica consome água através de seus processos de limpeza, do uso dos colaboradores, e dos sistemas de refrigeração de maquinário. A partir de dados disponibilizados pelo gerente consultado, foi possível construir o seguinte gráfico de consumo:

Gráfico 1: Divisão do consumo de água por categoria de uso (2023)



Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa

Importante destacar que a fábrica possui duas estações para tratamento dos efluentes e resíduos, sendo uma para os efluentes industriais e outra para os sanitários. Esses despejos são reutilizados em sua totalidade, ou seja, não há descarte da água mesmo após tratada, a qual retorna ao processo industrial e também aos sistemas de refrigeração. Todo o restante da água é evaporado no processo de *Spray-Drying*, retornando ao ambiente através do ciclo hídrico da chuva. Portanto, considerando que a energia elétrica utilizada nas bombas já vem de fontes renováveis (ver seção 4.2.2) e que toda a água é tratada, a gestão hídrica da planta é, em grande parte, eficiente e sustentável. A fábrica adota práticas sustentáveis de gestão de resíduos, reciclando a maioria dos materiais recicláveis gerados durante o processo produtivo. Além disso, resíduos orgânicos são destinados a um sistema de compostagem, garantindo um tratamento ambientalmente responsável. Essas iniciativas fazem parte do compromisso da fábrica com a sustentabilidade, reduzindo o impacto ambiental e promovendo o reaproveitamento de materiais.

Embora um estudo para reduzir ainda mais o consumo de água e geração de resíduos seja pertinente, especialmente em relação ao uso nas etapas de mistura e refrigeração, tal análise não é o foco deste trabalho, que se concentra em achar oportunidades de transição energética, que já foi realizada neste contexto da seção.

4.1.4 Descrição geral do processo produtivo de sabão em pó na fábrica

Em conjunto com os dados operacionais apresentados acima, a compreensão geral do processo produtivo é fundamental para entender como cada etapa do processo contribui para o consumo energético e as emissões associadas. Esse entendimento detalhado permite identificar os principais pontos de demanda de energia, avaliar ineficiências e localizar oportunidades para implementar melhorias. O conhecimento do processo é, portanto, essencial para planejar uma transição energética eficaz, orientando decisões estratégicas para otimizar o uso de fontes renováveis e reduzir o impacto ambiental sem comprometer a produtividade.

O processo de fabricação de sabão em pó na fábrica de Indaiatuba envolve várias etapas complexas e contínuas, que combinam princípios de química e engenharia industrial para transformar matérias-primas em um produto homogêneo e de alta qualidade. Abaixo, descreve-se sinteticamente cada uma dessas etapas.

4.1.4.1 Recepção e Preparação das Matérias-Primas

O processo inicia-se com a recepção e armazenamento das matérias-primas nos setores 5 e 8 do layout (ver seção 4.1.2). Existe um alto volume de tráfego diário na unidade industrial,

com cerca de 200 caminhões entrando e saindo com matérias-primas e produtos acabados. Dentre as principais matérias-primas recebidas e armazenadas na fábrica, estão as seguintes:

- **Tensoativos (surfactantes):** Compostos responsáveis pela ação de limpeza, como o sulfato de sódio e o linear alquilbenzeno sulfonato (LAS).
- **Sequestrantes:** Produtos que neutralizam íons de cálcio e magnésio da água, como silicatos, para melhorar a eficiência da limpeza.
- **Alcalinizantes:** Ajustam o pH do produto, como o carbonato de sódio (barrilha).
- **Enzimas:** Agentes biológicos para remover manchas específicas, como amilase e protease.
- **Aditivos e fragrâncias:** Compostos que adicionam aroma e características particulares ao sabão em pó.

Essas matérias-primas são armazenadas em silos, tanques, containers e porta-paletes, de forma organizada para serem dosadas nos processos subsequentes. O armazenamento adequado é essencial para garantir a segurança, a qualidade e o fluxo contínuo de materiais na produção.

4.1.4.2 Mistura e Reação Química

Já dentro da planta principal de produção (setor 9), ocorre a primeira etapa de manufatura: a etapa de mistura. Neste momento, ocorre a combinação controlada das matérias-primas para formar uma massa líquida ou pasta homogênea, chamada "*slurry*". Esse processo ocorre em tanques de mistura, onde as matérias-primas são dosadas com precisão para atender às especificações de cada formulação.

- Tensoativos são adicionados à água, formando a base do sabão.
- Alcalinizantes e sequestrantes são incorporados para ajustar o pH e melhorar a ação de limpeza.
- Enzimas e aditivos são adicionados com controle rigoroso de temperatura e condições de agitação, evitando a degradação dos compostos sensíveis.

O objetivo é criar uma mistura uniforme que servirá como base para o sabão em pó. A precisão na dosagem e no controle de variáveis, como a temperatura, é crucial para garantir a qualidade e a consistência do produto.

4.1.4.3 Secagem por Atomização (Spray-Drying)

A etapa de secagem por atomização é uma das mais importantes e energeticamente intensivas do processo. A mistura líquida ("*slurry*") é bombeada para dentro de uma torre de secagem, onde passa por um processo de atomização:

- A mistura é pulverizada por meio de bicos de alta pressão, criando pequenas gotas em contato com uma corrente de ar quente, aquecido em um sistema de geração de gases quentes com gás natural.
- Esse calor evapora rapidamente a água das gotículas, transformando a mistura em partículas secas de sabão em pó.
- O pó resultante é recolhido na base da torre, e a umidade remanescente é mínima, o que confere ao produto final a característica de pó seco.

A secagem por atomização é uma etapa de alto consumo energético, pois requer calor intenso para vaporizar a água. Portanto, ela representa um ponto crítico na análise de eficiência energética e nas oportunidades de transição para fontes de energia mais sustentáveis.

4.1.4.4 Pós-Mistura e Adição de Ingredientes Sensíveis

Após a secagem, o sabão em pó passa para a etapa de pós-mistura, onde são adicionados ingredientes sensíveis ao calor que não podem ser incorporados antes da secagem:

- Enzimas sensíveis são adicionadas para garantir sua eficácia, pois temperaturas elevadas poderiam destruí-las.
- Fragrâncias e perfumes são incorporados para evitar perda de aroma, pois a exposição ao calor poderia evaporar os compostos voláteis.

A pós-mistura é feita em misturadores de precisão, assegurando que esses ingredientes se distribuam uniformemente no pó seco, o que mantém a qualidade e o desempenho do produto.

4.1.4.5 Tamisação e Controle de Qualidade

Após a adição dos ingredientes sensíveis, o sabão em pó passa pelo processo de tamisação. Essa etapa envolve:

- A peneiração do produto para remover aglomerados ou partículas fora do padrão, garantindo a uniformidade.
- A quebra de eventuais grumos para criar uma textura fina e homogênea, característica essencial para o sabão em pó.

Além disso, amostras do produto são submetidas a rigorosos testes de controle de qualidade, que incluem:

- Composição química: Verificação das concentrações dos ingredientes ativos.
- Capacidade de limpeza: Testes para assegurar a eficácia na remoção de manchas.
- Estabilidade de fragrância: Avaliação da retenção de perfume e do perfil sensorial.

Esses testes garantem que o produto atenda aos padrões da marca e às expectativas dos consumidores.

4.1.4.6 Envase e Embalagem

Após aprovado no controle de qualidade, o sabão em pó é enviado para as linhas de envase. As embalagens variam conforme o tamanho e o tipo de produto, sendo os formatos mais comuns:

- Caixas de papelão para pacotes menores, voltados ao consumidor final.
- Sacos plásticos reforçados para embalagens econômicas ou volumes maiores.

As máquinas de envase são automatizadas para garantir precisão e rapidez, evitando desperdício de produto e assegurando que a quantidade correta seja embalada.

4.1.4.7 Distribuição

Uma vez embalado, o sabão em pó é etiquetado e armazenado no depósito de produtos acabados (setor 11) para ser distribuído. A logística de transporte é planejada para otimizar a distribuição e minimizar o tempo de entrega, mantendo o produto disponível de maneira eficiente.

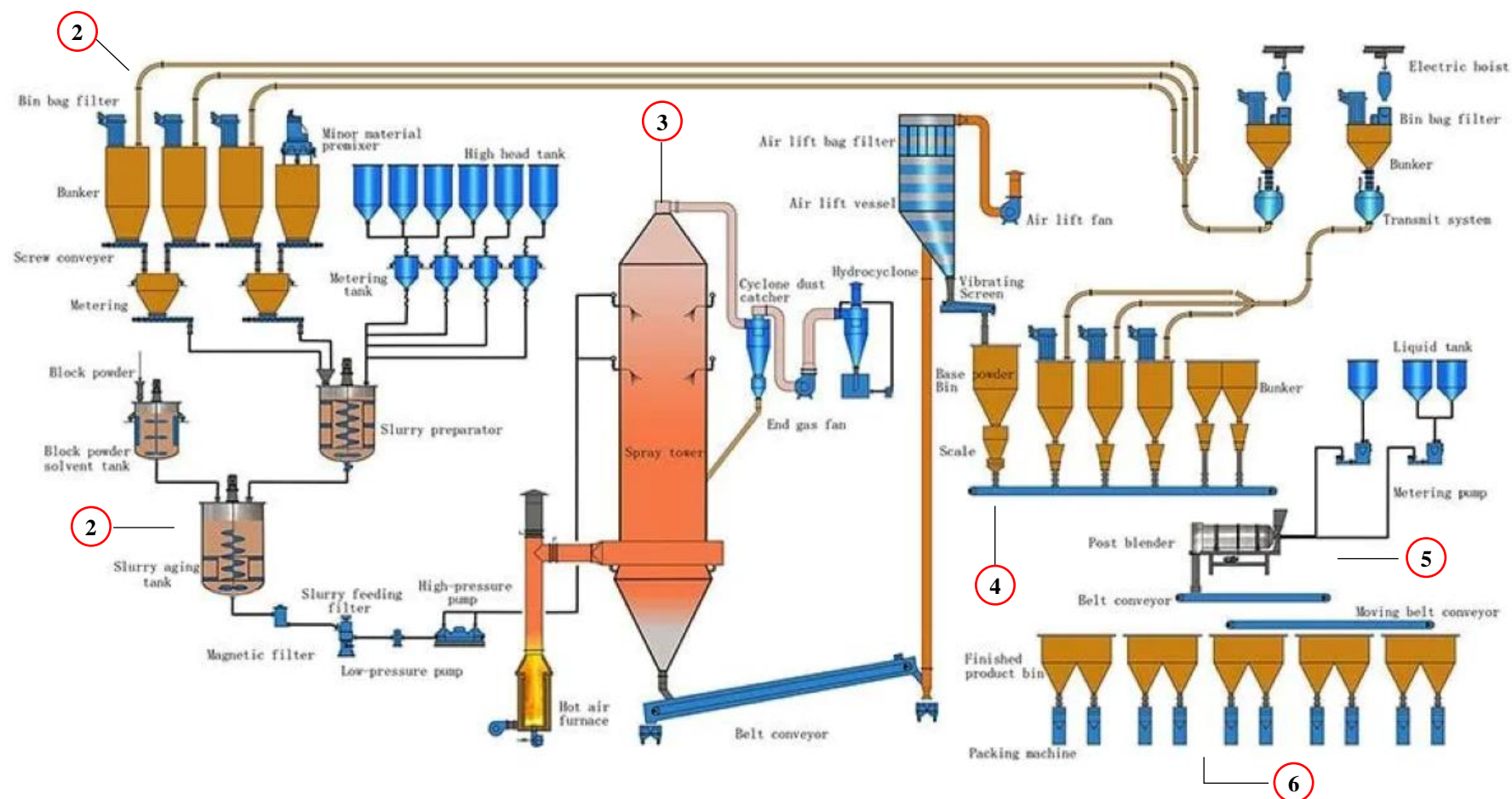
Essas etapas constituem o processo geral de fabricação do sabão em pó em Indaiatuba, desde a recepção das matérias-primas até a distribuição final. Cada etapa do processo possui demandas energéticas específicas (descritas na seção 4.2.1) e podem representar uma oportunidade de otimização para reduzir o consumo de energia e as emissões associadas, aspectos fundamentais para a transição para uma matriz energética mais sustentável.

4.1.5 Fluxograma esquemático geral do processo produtivo de sabão em pó

Além do entendimento do processo e dos dados operacionais, é importante analisar como cada etapa está atrelada a outra com um fluxograma, para gerar uma compreensão do processo produtivo de maneira visual e sequencial.

O fluxograma abaixo foi disponibilizado pelo time de engenharia da fábrica, a pedido do autor, retratando de forma esquemática como funciona o fluxo de produção em Indaiatuba. Nele, estão assinaladas em círculos vermelhos as etapas do processo descritas na seção anterior.

Figura 8: Fluxograma do processo produtivo da unidade industrial estudada – Indaiatuba (SP)



Fonte: Fluxograma disponibilizado pela empresa

A fábrica possui um alto nível de automação, operando com uma linha de produção totalmente integrada. Esse nível de automação permite que os operadores realizem apenas o monitoramento e o controle das máquinas, sem a necessidade de intervenções manuais nos processos. Desde a dosagem das matérias-primas até o envase e a embalagem do sabão, todas as etapas são conduzidas por equipamentos automatizados, que garantem precisão e consistência na produção. Esse controle automatizado aumenta a eficiência operacional, além de minimizar o risco de erros humanos, assegurando que a qualidade e a segurança do produto sejam mantidas de forma contínua.

4.1.6 Considerações finais sobre a descrição da unidade industrial

A análise do processo produtivo e do layout da fábrica evidencia uma operação de grande escala, que produz 700 mil toneladas de sabão em pó por ano, com processos integrados que minimizam a necessidade de intervenções manuais e asseguram precisão na produção. O nível de automação, aliado a uma estrutura de layout aparentemente otimizada, permite que a linha funcione de forma contínua e com um controle rigoroso, reduzindo o risco de paradas inesperadas e assegurando a qualidade constante do sabão em pó produzido. Além disso, a gestão de efluentes com reuso total da água, reciclagem transversal de resíduos sólidos e outras iniciativas descritas reforçam o compromisso ambiental da fábrica, contribuindo para uma operação mais sustentável.

O fluxograma e os dados operacionais apresentados mostram como cada etapa do processo funciona, promovendo um entendimento abrangente do funcionamento da fábrica de Indaiatuba. Embora este trabalho se concentre principalmente nas oportunidades de transição energética, o mapeamento do processo e do layout também oferece uma base sólida para identificar oportunidades de melhorias de eficiência e produtividade em outras áreas. Ajustes finos nos processos e no fluxo de materiais, por exemplo, poderiam ajudar a reduzir ainda mais os desperdícios e aumentar a produtividade sem a necessidade de grandes mudanças estruturais.

É importante ressaltar que estudos adicionais focados na melhoria contínua da eficiência operacional e da produtividade poderiam trazer benefícios indiretos para o impacto ambiental da fábrica. Ao reduzir desperdícios de insumos, tempo de ciclo e paradas técnicas, a operação se tornaria ainda mais eficiente, diminuindo os custos e as emissões associadas ao uso de energia e à geração de resíduos. Esses estudos complementares poderiam incluir desde ajustes no layout e no fluxo de trabalho até otimizações nos processos de controle e automação.

Por fim, a presente descrição e caracterização da unidade industrial estudada serve como um ponto de partida para entender o impacto energético do processo atual, mas outros estudos

voltados para a produtividade e a eficiência em todas as etapas do processo produtivo certamente contribuiriam para uma operação ainda mais sustentável e competitiva. Dessa forma, a fábrica poderia fortalecer sua posição como referência em práticas industriais responsáveis e alinhadas com os princípios de sustentabilidade.

4.2 Descrição da situação energética atual da fábrica

Com a descrição detalhada do processo produtivo e das operações da fábrica concluída, é possível focar na análise do cenário energético atual. A partir do entendimento do layout, do fluxograma de produção e das práticas operacionais, esta seção abordará o consumo de energia na fábrica, examinando como cada etapa produtiva contribui para a demanda energética e identificando as principais fontes de energia utilizadas. A análise energética é essencial para compreender onde estão concentrados os maiores consumos e, com isso, direcionar esforços para uma transição mais eficiente e sustentável.

A análise será conduzida com base na metodologia estabelecida anteriormente, que inclui tanto a avaliação quantitativa do consumo de energia nos diversos setores da fábrica quanto a estimativa das emissões de gases de efeito estufa associadas a esse consumo. Para o cálculo das emissões, será utilizado o GHG Protocol Brasil (Greenhouse Gas Protocol), um padrão desenvolvido pela Fundação Getúlio Vargas e Ministério do Meio Ambiente amplamente adotado para a quantificação e gestão de emissões de carbono. Esse protocolo permite categorizar as emissões nos três escopos de contabilização e calcular de forma precisa o impacto ambiental das fontes de energia empregadas, considerando tanto o consumo de eletricidade quanto o uso de combustíveis fósseis como o gás natural.

Os setores que compõem a estrutura de consumo energético da fábrica incluem as áreas de produção, onde o consumo é intensivo nas etapas de mistura e secagem, e os sistemas de suporte, como refrigeração, transporte interno e tratamento de efluentes. A secagem por atomização, em particular, é um dos processos mais intensivos em energia, devido à necessidade de aquecimento constante para evaporar a água da mistura. Outras áreas, como o envase e a embalagem, consomem energia em menor escala, mas são igualmente importantes para o mapeamento completo do uso energético na planta.

Em termos de fontes de energia, a fábrica utiliza principalmente eletricidade e gás natural. A eletricidade é utilizada para alimentar a maioria das máquinas e sistemas de controle, enquanto o gás natural é a principal fonte de calor nas operações de secagem. Além disso, fontes de energia adicionais, como diesel, podem ser utilizadas em sistemas de backup ou para equipamentos específicos, como algumas empilhadeiras. Esse mix de fontes permite à fábrica

operar com flexibilidade, mas representa um desafio em termos de custos e impacto ambiental, especialmente considerando as emissões associadas ao uso de combustíveis fósseis.

Ao entender a distribuição do consumo energético e as fontes utilizadas, esta análise busca destacar os pontos de maior potencial para otimização e identificar setores onde a substituição por fontes renováveis poderia ser implementada de forma eficaz. A visão holística do cenário atual, complementada pela estimativa de emissões de acordo com o GHG Protocol, é essencial para fundamentar propostas de melhoria e transição, possibilitando uma abordagem direcionada e eficiente para reduzir o impacto ambiental da fábrica sem comprometer sua produtividade.

4.2.1 Consumo atual da unidade industrial

Para compreender o cenário energético atual da fábrica, foi realizada uma análise das planilhas de consumo para cada setor produtivo com base nos dados disponíveis. O processo de secagem por atomização (*Spray-Drying*) destaca-se como o maior consumidor de energia da planta, correspondendo a aproximadamente 66% do consumo total. Esse processo é fundamental para transformar a mistura líquida ("slurry") em pó seco, exigindo um volume significativo de energia térmica para evaporar a água da solução. Com um consumo anual de 229 GWh, o spray drying representa um dos principais pontos de foco para qualquer análise de otimização energética.

Os demais setores, que juntos representam os 35% restantes do consumo total, apresentam uma demanda energética mais distribuída. Entre esses, destaca-se a etapa de mistura e preparação de matérias-primas, que consome 44 GWh anualmente. Esse processo exige energia elétrica em seus equipamentos e maquinário para realizar a dosagem, mistura e homogeneização dos ingredientes, garantindo uma consistência ideal para a produção subsequente.

Outro setor significativo é o de refrigeração e climatização, que possui um consumo de 36 GWh. Esse consumo é característico de instalações industriais que necessitam de sistemas de resfriamento para manter a temperatura adequada de equipamentos e processos. Em seguida, destaca-se o consumo de 14 GWh do sistema de tratamento de efluentes, que limpa toda água utilizada pela fábrica com uso de energia elétrica. Já com uso de combustíveis como gasolina e diesel, o segmento de transporte de interno consome 10 GWh para realizar todas as operações de empilhadeiras e fluxo de caminhões interno. Por fim, as áreas de envase e embalagem, sistemas de apoio e administrativo possuem demandas menores, com 9 e 6 GWh, respectivamente, de energia elétrica para realização de seus processos.

Tabela 4: Divisão do consumo atual de energia por setor (2023)

Setor	Consumo por Setor (GWh) - 2023	%	Tipo de energia consumida
Spray Drying (Secagem por Atomização)	229	66%	Térmica
Mistura e Preparação de Matérias-Primas	44	13%	Eletricidade
Refrigeração e Climatização	36	10%	Eletricidade
Tratamento de Efluentes	14	4%	Eletricidade
Transporte interno	10	3%	Térmica / Mecânica
Envase e Embalagem	9	3%	Eletricidade
Sistemas de Apoio e Administrativo	6	2%	Eletricidade
Total	348	100%	

Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa

A tabela apresentada fornece uma visão clara da distribuição do consumo de energia entre os diferentes setores da planta. Essa análise, ao destacar as áreas de maior demanda, oferece a base para identificar oportunidades de otimização. Ou seja, como parte significativa do consumo total de 348 GWh/ano está concentrada na etapa de *Spray-Drying*, otimizar este setor pode resultar nos maiores resultados de diminuição de emissões e custos. Além disso, torna-se possível traçar estratégias específicas para cada setor, visando a transição para fontes de energia renováveis de maneira eficaz.

4.2.2 Fontes energéticas atuais

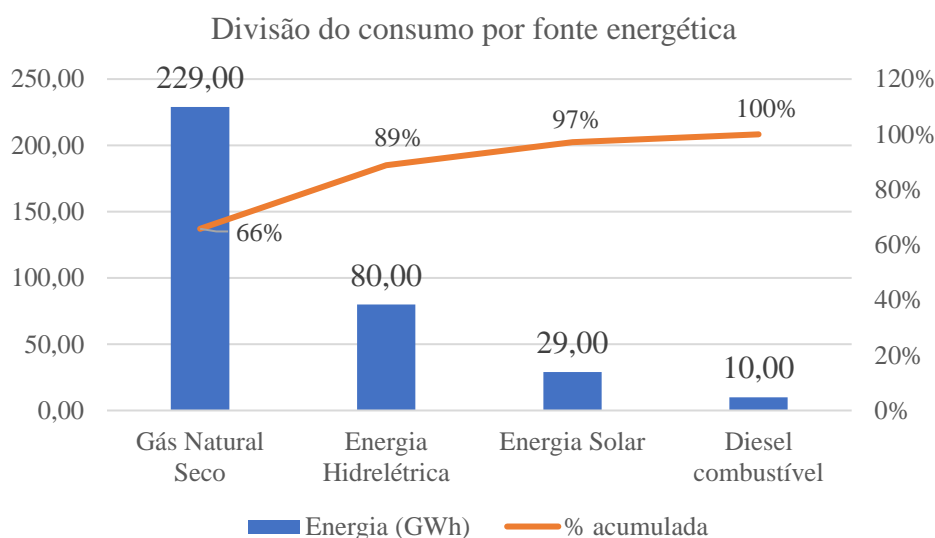
Os tipos de energia utilizados para suprir as necessidades dos diferentes setores da fábrica estão destacados na tabela 4. Percebe-se que a fábrica de Indaiatuba utiliza principalmente três tipos: energia térmica, elétrica e mecânica. Em conjunto com este mapeamento, é preciso entender a natureza das fontes destas energias, pois isto influencia diretamente o perfil de emissões da planta.

A principal fonte de energia térmica para a fábrica é o gás natural, utilizado no processo de *Spray-Drying*, que é altamente intensivo em calor. Esse processo exige grandes quantidades de energia para evaporar a água da mistura, representando uma das maiores fontes de consumo e emissões da planta. Além disso, o diesel é empregado para alimentar os veículos internos utilizados no transporte de materiais e produtos dentro da fábrica, contribuindo para o consumo térmico com uma fonte adicional de emissões diretas.

A energia elétrica consumida pela fábrica provém exclusivamente de fontes renováveis, graças a iniciativas de transição realizadas desde 2014, com um mix de energia solar e hidrelétrica. A escolha por fontes renováveis para a eletricidade reduz significativamente o impacto ambiental desses setores, minimizando as emissões indiretas e reforçando o compromisso da fábrica com a sustentabilidade.

O gráfico a seguir, construído a partir dos relatórios de consumo do time de engenharia, detalha a divisão do consumo por fonte no ano de 2023:

Gráfico 2: Divisão do consumo de energia por fonte energética (2023)



Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa

Essa análise das fontes de energia será essencial para o cálculo das emissões de gases de efeito estufa, utilizando o GHG Protocol. Para a energia térmica baseada em gás natural e diesel, as emissões diretas serão calculadas com base nos fatores de emissão específicos para cada quilograma de combustível consumido, permitindo quantificar com precisão o impacto ambiental desses setores. Já as emissões associadas a eletricidade são estimadas diretamente pela quantidade de GWh consumida. Vale destacar que as fontes de eletricidade, que são

renováveis, possuem fatores de emissão significativamente reduzidos, o que provavelmente resultará em emissões bem menores do que as associadas a energia térmica. Além disso, o detalhamento do consumo por fonte é fundamental para entender o cenário de custos relacionados a energia enfrentado pela fábrica.

Sendo assim, ao dividir o consumo energético conforme as fontes e os setores, é possível descrever o panorama energético atual tanto em relação a custos quanto em relação aos impactos ambientais. Para, posteriormente, identificar onde estão as oportunidades de transição na fábrica de Indaiatuba.

4.2.3 Custo energético atual

Com a análise das fontes energéticas utilizadas nos diversos setores da fábrica concluída, passa-se agora para a análise dos custos associados ao consumo de energia. A divisão por fontes realizada anteriormente nos fornece uma base sólida para calcular o impacto financeiro de cada tipo de energia empregada na operação. O objetivo desta seção é quantificar os custos totais com energia, considerando as características específicas de cada fonte e setor, o que permitirá uma visão mais precisa dos gastos e dos pontos críticos para futuras otimizações.

Para tornar a análise mais detalhada e alinhada às práticas do setor, os custos serão explicados utilizando unidades apropriadas para cada fonte de energia. O consumo de eletricidade será calculado em MWh, já que essa unidade é a mais comum para avaliar o uso elétrico e facilitar a análise do impacto das tarifas de energia renovável. Em contrapartida, os consumos de gás natural e diesel serão avaliados em metros cúbicos (m³), unidades mais específicas para fontes de energia térmica e combustíveis fósseis, refletindo com mais precisão o consumo real dessas fontes em processos industriais.

A metodologia adotada para essa análise envolveu a consolidação de relatórios e informações disponibilizadas pelo time de engenharia da fábrica acerca do consumo de cada fonte e do custo médio da energia adquirida (tanto de fornecedores de combustíveis quanto pelo mercado livre de energia) ao longo do ano de 2023. Dessa forma, é possível identificar os custos totais associados a cada tipo de energia e setor, o que oferece uma visão detalhada do impacto financeiro de cada fonte. Essa abordagem permite uma análise comparativa entre as diferentes fontes, facilitando a identificação de oportunidades para otimizar custos, especialmente nas áreas onde os combustíveis fósseis são predominantes, como na secagem por atomização e no transporte interno. As tabelas abaixo detalham os cálculos realizados e os resultados de custos para o ano de 2023 em Indaiatuba:

Tabela 5: Custo de energia elétrica adquirida pela fábrica (2023)

Fonte de Energia	Consumo Anual (MWh)	Custo Unitário (R\$/MWh)	Custo Total (R\$)
Energia Hidrelétrica	80.000	75,15	6.012.000
Energia Solar	29.000	69,49	2.015.210
Total			8.027.210

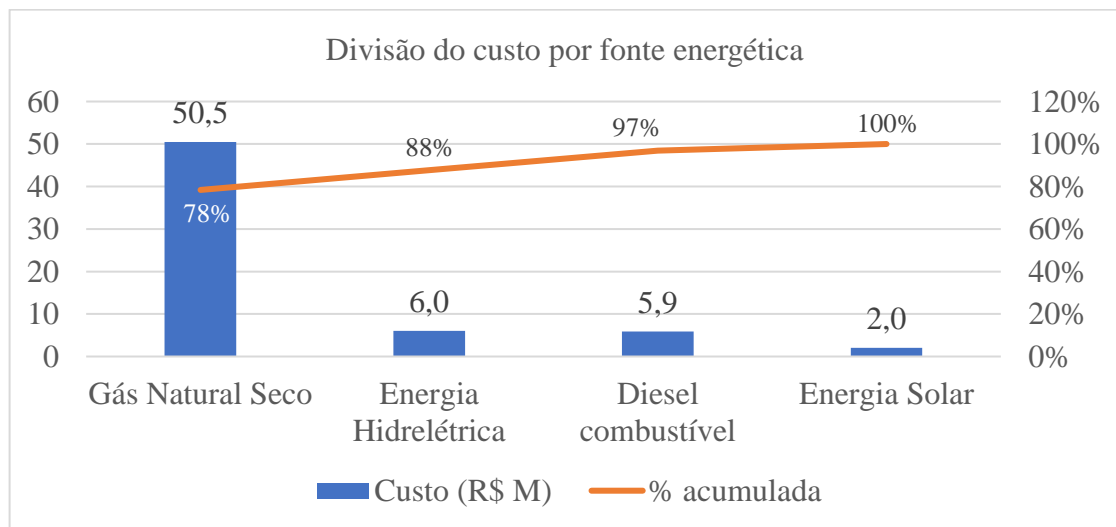
Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa

Tabela 6: Custo de combustíveis adquiridos pela fábrica (2023)

Fonte de Energia	Consumo Anual (MWh)	Densidade energética (MWh/m ³)	Volume consumido (m ³)	Custo do combustível (R\$/m ³)	Custo Total (R\$)
Gás Natural Seco	229.000	0,0109	20.948.809,4	2,41	50.490.459
Diesel combustível	10.000	9,9449	1.005,5	5.861,67	5.894.143
Total					56.384.603

Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa

Gráfico 3: Divisão do custo de energia por fonte energética (2023)



Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa

4.2.4 Análise consolidada da situação energética atual

A estrutura de consumo e custo energético da fábrica destaca o gás natural como a principal fonte de energia, totalizando 229 GWh ou 66% do consumo total. Utilizado majoritariamente no processo de secagem por atomização (spray drying), o gás natural representa também o maior custo energético, somando R\$ 50,5 milhões, ou aproximadamente 78% dos custos totais, indicando esta ser a fonte prioritária para otimização. Esse dado reflete o impacto financeiro significativo desse processo, que é essencial para a produção, mas ao mesmo tempo intensivo em calor.

A energia hidrelétrica é a segunda maior fonte de consumo, com 80 GWh ou 23% do total, e seu custo representa R\$ 6 milhões, ou 9% dos custos energéticos. Essa energia, utilizada principalmente nas etapas de mistura e processamento pré-secagem e refrigeração, possui um custo por unidade inferior ao do gás natural, o que contribui para manter o impacto financeiro sob controle. A escolha da energia hidrelétrica também reforça o compromisso da fábrica com práticas mais sustentáveis e com a redução das emissões indiretas de carbono.

A energia solar, com um consumo de 29 GWh (9% do total), contribui ainda mais para a sustentabilidade da planta. Apesar de sua participação menor no consumo total, seu custo é de apenas R\$ 2 milhões (3% do total), o que demonstra a vantagem de investir em fontes limpas e de baixo custo operacional através do mercado livre de energia. A energia solar oferece potencial de expansão futura, representando uma alternativa viável para reduzir ainda mais a dependência de combustíveis fósseis.

O diesel, utilizado no transporte interno, consome apenas 10 GWh (3% do consumo total de energia), mas seu custo é desproporcionalmente elevado, alcançando R\$ 5,9 milhões ou 8% do custo total de energia. Essa discrepância indica que o diesel possui o maior custo por unidade de energia entre todas as fontes utilizadas. Esse fato torna o diesel um alvo para otimização, pois sua substituição por fontes de menor custo ou alternativas renováveis poderia gerar economias significativas, além de reduzir as emissões de poluentes.

Portanto, a análise revela que as maiores oportunidades para otimização financeira e ambiental estão concentradas na substituição de fontes térmicas, como o gás natural e o diesel, por alternativas mais econômicas e sustentáveis. Otimizações no processo de secagem por atomização e a substituição do diesel por soluções elétricas ou biocombustíveis no transporte interno poderiam reduzir consideravelmente os custos operacionais e a pegada de carbono da fábrica.

Por meio dessa análise de custos e consumo energético, obtém-se uma visão precisa dos pontos críticos que impactam o orçamento da fábrica. Esse diagnóstico fundamentará as

estratégias de transição energética, visando tanto a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, quanto a promoção de uma operação industrial mais econômica e competitiva a longo prazo.

4.3 Cálculo das emissões energéticas de gases do efeito estufa *As-Is*

4.3.1 Emissões pelo método GHG Protocol Brasil

Com a análise detalhada dos custos e do consumo energético finalizada, o próximo passo é quantificar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao perfil energético atual da fábrica. Este cálculo é fundamental para estabelecer uma base de comparação e avaliar o impacto ambiental do cenário *As-Is* em relação às possíveis alternativas de transição energética.

Para realizar esse cálculo, adota-se a metodologia do GHG Protocol, que permite avaliar as emissões de cada tipo de fonte energética com precisão. Serão aplicados fatores de emissão específicos para cada fonte de energia utilizada na fábrica (ANEXO B), considerando:

- Gás Natural: A principal fonte de energia para o processo de secagem por atomização, com fator de emissão estabelecido em termos de CO₂ por m³ consumido.
- Diesel: Fator de emissão em kg CO_{2eq} / L calculado com base na quantidade de combustível consumido, composição química e suas características de combustão em veículos de uso industrial.
- Eletricidade Hidrelétrica e Solar: Fontes renováveis que apresentam um fator de emissão em kg CO_{2eq} / kWh.

A metodologia consiste em multiplicar o consumo de cada fonte pelo respectivo fator de emissão, obtendo as emissões de CO₂ (ou equivalentes de CO₂) de cada setor. No presente estudo, a análise será focada nos Escopos 1 e 2:

- Escopo 1: Refere-se a todas as emissões diretas provenientes das atividades realizadas dentro da unidade industrial. Essas emissões incluem quaisquer fontes que estejam diretamente sob o controle da fábrica, como processos produtivos, queima de combustíveis e emissões de processos químicos. Neste trabalho, no entanto, o foco será apenas nas emissões diretas provenientes de processos de combustão, especificamente o uso de gás natural no processo de secagem por atomização e o diesel consumido no transporte interno. Essa delimitação foi feita para concentrar a análise nas emissões relacionadas ao consumo energético direto.
- Escopo 2: Engloba as emissões indiretas associadas ao consumo de eletricidade adquirida pela fábrica, incluindo fontes renováveis, como eletricidade hidrelétrica e

solar. A inclusão do Escopo 2 nos permite avaliar o impacto indireto das operações de suporte que dependem da rede elétrica.

Embora os Escopos 1 e 2 representem uma parte significativa das emissões associadas ao consumo de energia, existem outros processos e fontes de emissões indiretas que não serão abordados neste trabalho, especificamente aquelas classificadas no Escopo 3. O Escopo 3 abrange todas as emissões indiretas fora das fronteiras da fábrica, como as emissões relacionadas ao transporte de matérias-primas, viagens de funcionários, descarte de resíduos, e outras atividades na cadeia de suprimentos. Essas emissões são mais complexas de rastrear e estão menos sob o controle direto da unidade, mas também exercem um papel importante na pegada de carbono da operação.

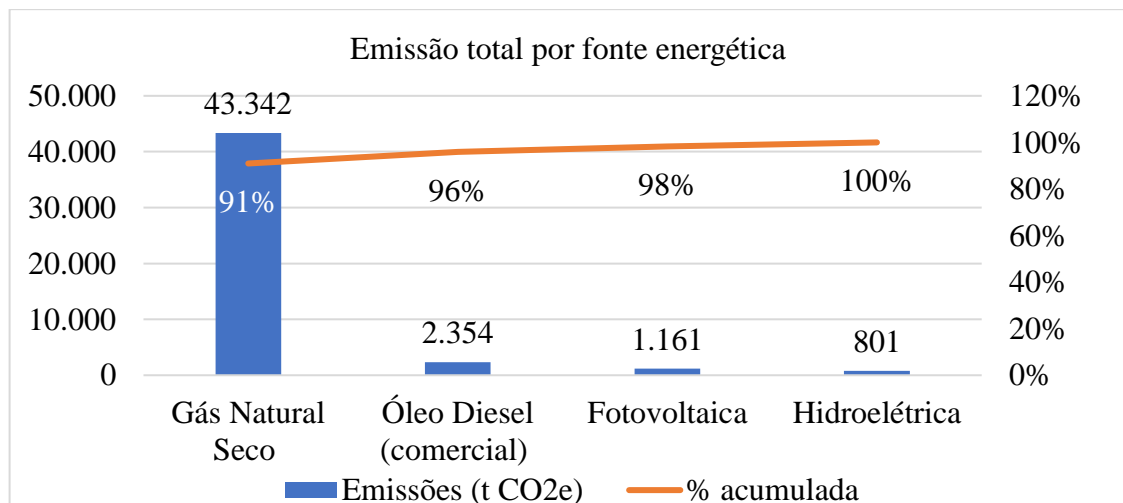
Apesar da relevância do Escopo 3 para uma análise de emissões completa, ele não será o foco deste estudo, uma vez que o objetivo principal é avaliar o impacto do consumo energético direto da fábrica e propor alternativas para uma transição energética mais sustentável. A inclusão dos Escopos 1 e 2 é suficiente para gerar uma visão clara do impacto atual e das oportunidades de redução de emissões dentro dos limites operacionais da unidade industrial. A análise desses escopos permitirá uma avaliação objetiva dos benefícios de uma transição para fontes mais limpas, ao comparar o perfil de emissões do cenário *As-Is* com o cenário otimizado a ser proposto.

Sendo assim, utilizando os dados apresentados nas seções anteriores e a ferramenta de cálculo disponibilizada pelo GHG Protocol Brasil, calcula-se as seguintes emissões atreladas ao consumo energético da fábrica de sabão em pó de Indaiatuba:

Tabela 7: Cálculo das emissões associadas a cada fonte energética (2023)

Descrição da fonte		Sistema de geração de gases quentes	Transporte interno	Consumo de energia elétrica hidrelétrica	Consumo de energia elétrica solar
Fonte de geração de energia		Gás Natural Seco	Óleo Diesel (comercial)	Hidroelétrica	Fotovoltaica
Quantidade consumida		20.948.809,44	1.005.540,53	80.000,00	29.000,00
Unidades		m ³	litros	MWh	MWh
A fonte utilizada é formada por:	Combustível fóssil	Gás Natural Seco	89% Óleo Diesel (puro)	-	-
	Fontes renováveis	-	12% Biodiesel (B100)	Água	Radiação solar
Quantidade consumida por fonte	Combustível fóssil	20.948.809,44	889.903,37	-	-
	Fontes renováveis	-	115.637,16	80.000,00	29.000,00
Fatores de emissão - combustíveis fósseis	CO2 (kg/un)	2,07E+00	2,60E+00	-	-
	CH4 (kg/un)	3,68E-05	1,39E-04	-	-
	N2O (kg/un)	3,68E-06	1,39E-04	-	-
Fatores de emissão - Fontes renováveis	CO2 (kg/un)	-	2,43E+00	1,00E-02	4,00E-02
	CH4 (kg/un)	-	3,32E-04	1,78E-07	7,13E-07
	N2O (kg/un)	-	1,99E-05	1,78E-08	7,13E-08
Combustíveis fósseis	Emissões CO2 (t)	43.299,920	2.316,418	0,000	0,000
	Emissões CH4 (t)	0,772	0,123	0,000	0,000
	Emissões N2O (t)	0,077	0,123	0,000	0,000
Fontes renováveis	Emissões CO2 (t)	0,000	281,114	800,000	1.160,000
	Emissões CH4 (t)	0,000	0,038	0,014	0,021
	Emissões N2O (t)	0,000	0,002	0,001	0,002
Emissões de GEE totais por fonte t CO2e		43.341,99	2.354,22	800,78	1.161,13
Emissões biogênicas por fonte t CO2		0,00	281,11	0,00	0,00
Emissões de GEE totais t CO2e		47.658,11			
Emissões biogênicas totais t CO2		281,11			

Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa e GHG Protocol Brasil

Gráfico 4: Pareto de emissão total por fonte energética (2023)

Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa e GHG Protocol Brasil

Os resultados evidenciam que o gás natural seco é a principal fonte de emissões da fábrica, totalizando 43.342 toneladas de CO₂e, o que corresponde a impressionantes 91% do total de emissões de gases de efeito estufa (GEE) atreladas ao consumo energético. Esse dado reflete a predominância do gás natural como fonte de energia para o processo de secagem por atomização, que é o mais intensivo em consumo energético e, consequentemente, em emissões de combustão. Este fato confirma que o setor de secagem é o principal alvo para estratégias de redução de emissões.

O óleo diesel, utilizado no transporte interno, é a segunda maior fonte de emissões, com 2.354 toneladas de CO₂e, representando cerca de 5% do total de emissões. Apesar de sua participação modesta no consumo energético geral, o diesel apresenta um fator de emissão elevado, tornando-o um importante ponto de atenção para possíveis substituições por alternativas mais limpas, como biocombustíveis ou veículos elétricos.

As emissões associadas à energia solar fotovoltaica somam 1.161 toneladas de CO₂e, enquanto a energia hidrelétrica contribui com 801 toneladas de CO₂e, representando 2% e 1% do total de emissões, respectivamente. Embora sejam fontes renováveis e de baixo impacto ambiental em termos de operação, as emissões de ciclo de vida, como a fabricação de painéis solares e a construção de barragens, não podem ser ignoradas. Esses números reforçam a importância de considerar o ciclo de vida completo das fontes energéticas ao avaliar suas contribuições para o impacto ambiental.

Os gráficos e tabelas também destacam que 96% das emissões totais estão concentradas no gás natural e no diesel, indicando que esforços para reduzir emissões devem se concentrar nesses combustíveis. Portanto, esta análise do cenário atual de emissões evidencia qual setor e fonte podem suportar melhores ações de transição energética. Sendo assim, este diagnóstico será usado como base necessária para a elaboração de propostas de transição energética e otimização operacional, que serão discutidas nas próximas etapas deste estudo.

4.3.2 Contextualização das emissões da fábrica estudada no cenário industrial brasileiro

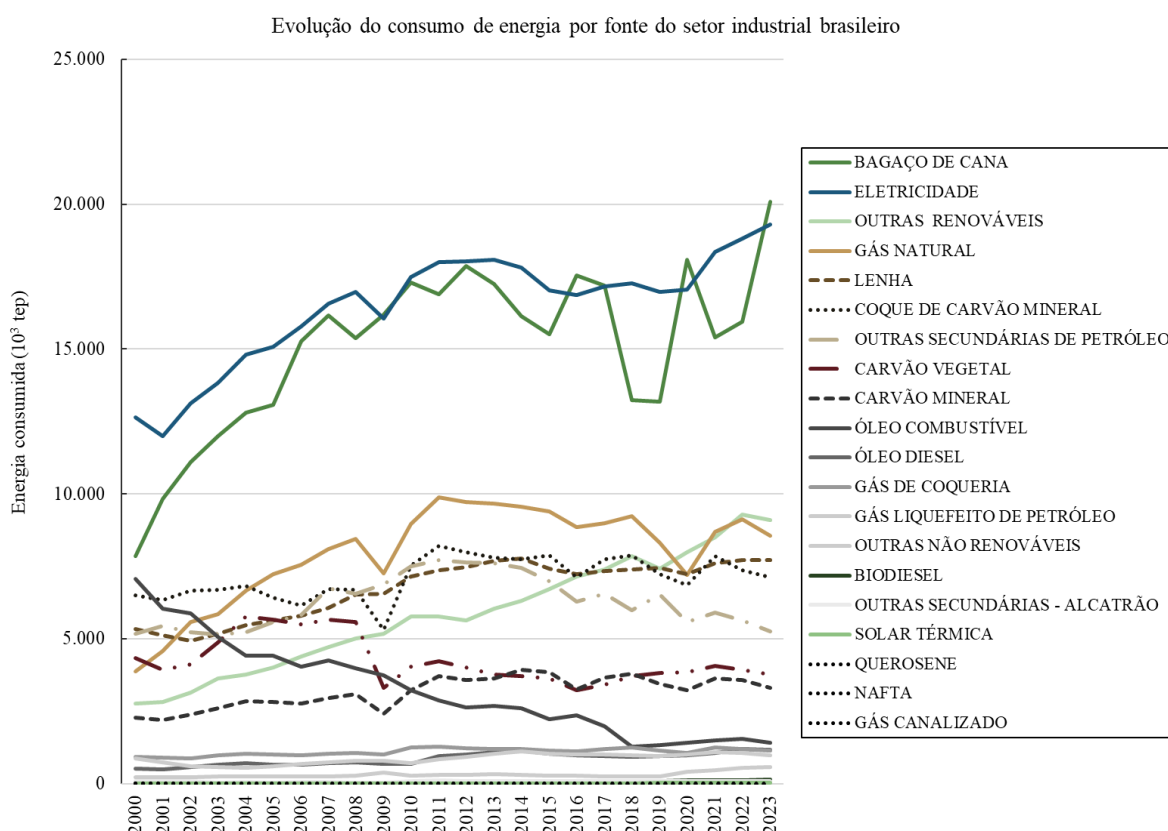
A análise das emissões da fábrica de Indaiatuba oferece um panorama detalhado das emissões diretas e indiretas associadas ao consumo de energia nos Escopos 1 e 2. No entanto, para compreender melhor o cenário atual e o impacto ambiental da unidade, é relevante situar seus resultados no contexto mais amplo de emissões do setor industrial brasileiro.

No Brasil, o setor industrial consome aproximadamente 89,7 milhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo) por ano, representando uma das maiores demandas energéticas do país. Segundo o Balanço Energético Nacional, as principais fontes de energia utilizadas no setor

industrial em 2023 foram o gás natural (8,5 milhões de tep), o bagaço de cana (20 milhões de tep), e a eletricidade (19,3 milhões de tep). Esses dados destacam a relevância do gás natural como um dos combustíveis fósseis preferidos para processos térmicos, bem como o papel crescente das fontes renováveis, como biomassa e eletricidade, especialmente em indústrias de alimentos e produtos químicos.

Quando comparada a esses dados setoriais, a fábrica de Indaiatuba reflete tendências semelhantes. Com 43.342 toneladas de CO₂e emitidas pelo uso de gás natural em 2023, a unidade segue o padrão de forte dependência desse combustível fóssil para aplicações térmicas, como a secagem por atomização. Essa dependência também se observa em outros segmentos industriais, como o setor químico, que utiliza gás natural como matéria-prima e fonte de energia, contribuindo significativamente para as emissões diretas do Escopo 1.

Gráfico 5: Evolução do consumo de energia por fonte do setor industrial brasileiro



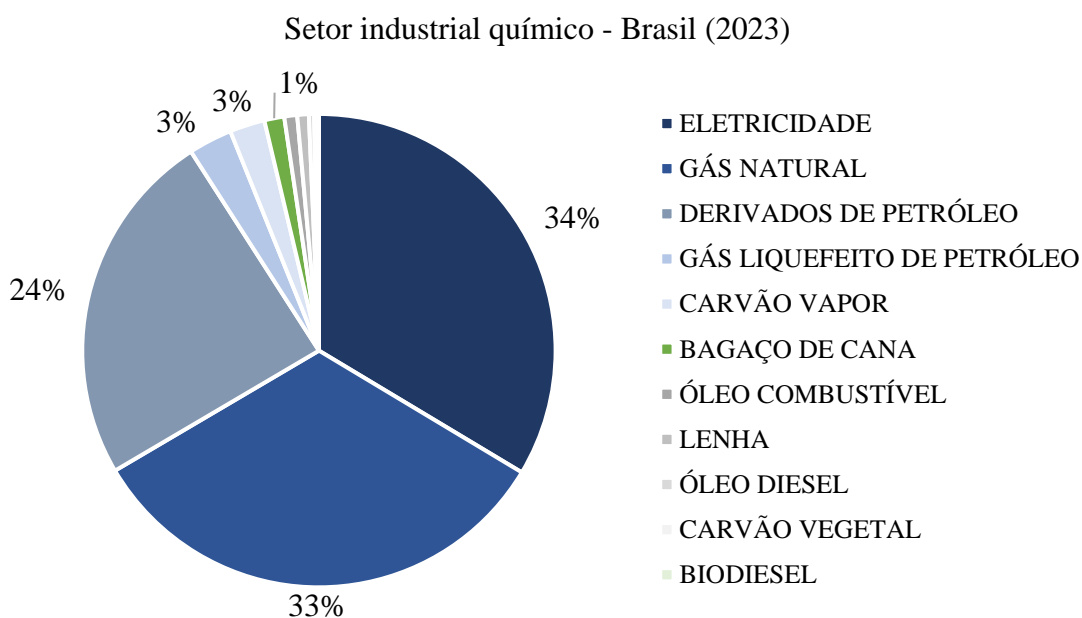
Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética

A fábrica, no entanto, se destaca positivamente pelo uso de energia elétrica renovável, com fontes hidrelétricas e fotovoltaicas que totalizam 109 GWh de consumo em 2023. Esses dados são coerentes com a matriz elétrica nacional, onde mais de 75% da energia é proveniente

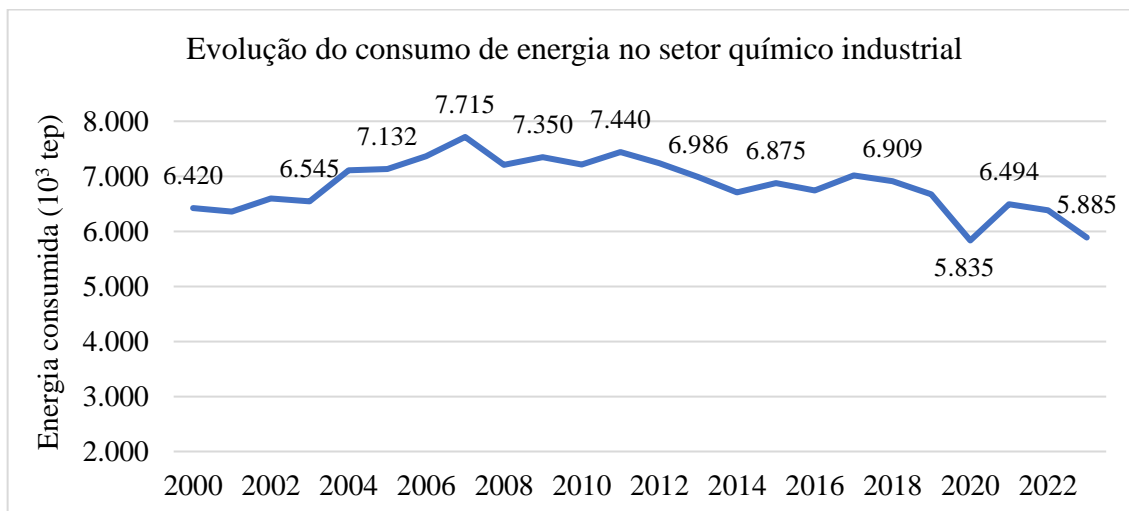
de fontes renováveis, sendo 63% de hidrelétricas, 12% de eólicas e 4,4% de solar. A dependência de eletricidade renovável reduz significativamente as emissões indiretas da fábrica, alinhando-a às melhores práticas energéticas no setor industrial.

Além disso, o uso de diesel na fábrica, que resulta em 2.354 toneladas de CO₂e anuais, é um reflexo do perfil geral do setor, onde combustíveis fósseis líquidos (óleo diesel, biodiesel e óleo combustível) ainda somam mais de 2,7 milhões de tep em 2023. Apesar disso, a contribuição do diesel para as emissões totais da fábrica (5%) é proporcionalmente menor do que em setores como transporte e mineração, indicando que o transporte interno, embora emissivo, não é o principal responsável pela pegada de carbono da unidade.

Gráfico 6: Divisão do consumo de energia por fonte no setor industrial químico



Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética

Gráfico 7: Evolução do consumo de energia no setor industrial químico brasileiro

Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética

Quando comparada à média de intensidade energética e emissões de indústrias brasileiras, a fábrica de Indaiatuba se posiciona em um patamar intermediário. O setor químico, ao qual a fábrica pertence, apresentou um consumo energético total de 5.885 mil tep (toneladas equivalentes de petróleo) em 2023, de acordo com os dados mais recentes da EPE, o que equivale a 68.441,7 GWh. Esse valor reflete uma redução em relação aos anos anteriores, como evidenciado pela tendência de queda no gráfico de evolução do consumo energético no setor, que atingiu seu pico em 2008 com 7.440 mil tep. A redução pode ser atribuída a avanços tecnológicos, melhorias na eficiência energética e uma gradual transição para fontes renováveis. Portanto, a unidade de Indaiatuba, com seu consumo anual de 348 GWh, representa 0,5% de todo consumo do setor químico brasileiro, destacando sua relevância como uma das maiores fábrica de sabão em pó do Brasil.

A distribuição das fontes de energia no setor químico revela uma forte dependência de eletricidade (34%) e gás natural (33%), seguidos por derivados de petróleo (24%). Outras fontes, como bagaço de cana, biodiesel e lenha, possuem participações menores, mas refletem o início de um movimento em direção à diversificação da matriz energética. Essa distribuição é comparável à da fábrica de Indaiatuba, que também utiliza gás natural como sua principal fonte de energia térmica, enquanto a eletricidade, majoritariamente renovável, é responsável por grande parte de suas operações de mistura, administrativas e de suporte.

Na fábrica de Indaiatuba, o gás natural responde por 66% do consumo energético total, valor superior à média do setor químico (33%), evidenciando a importância desse combustível

nos processos térmicos específicos do sabão em pó, como a secagem por atomização. Por outro lado, a eletricidade da fábrica, que compõe 31% do consumo energético total, está alinhada à participação média do setor químico (34%). Isso demonstra que, enquanto a fábrica está alinhada em relação ao uso de eletricidade, ela ainda apresenta uma dependência mais significativa de fontes fósseis térmicas quando comparada à média do setor.

Os derivados de petróleo, que correspondem a 24% do consumo energético do setor químico, também desempenham um papel importante na fábrica de Indaiatuba, mas de forma mais restrita, representando apenas 3% do consumo total na forma de diesel. Essa diferença é um reflexo da natureza específica das operações da unidade, que utiliza diesel principalmente para transporte interno, enquanto outras indústrias químicas o empregam em maior escala para processos industriais.

Em termos absolutos, a fábrica de Indaiatuba contribui com uma fração pequena das emissões e do consumo energético total do setor químico brasileiro. No entanto, sua dependência de gás natural apresenta um grande potencial de redução de emissões. A substituição parcial ou total desse combustível poderia alinhar ainda mais a fábrica às tendências do setor químico, que já vem adotando fontes como bagaço de cana e biodiesel em sua matriz energética.

Por fim, a análise comparativa entre a fábrica de Indaiatuba e o setor químico brasileiro reforça tanto as semelhanças quanto as oportunidades de melhoria. Enquanto a unidade já está alinhada ao setor em aspectos como o uso de eletricidade renovável, sua dependência elevada de gás natural destaca a necessidade de intervenções estratégicas para reduzir emissões e custos. Com uma estratégia de transição para fontes renováveis, a fábrica poderia se posicionar como uma referência em sustentabilidade dentro de seu setor.

4.4 Discussão Consolidada do Cenário *As-Is*

A análise do cenário atual apresentou uma visão abrangente das operações da fábrica de sabão em pó em Indaiatuba, destacando suas características operacionais, perfil energético, emissões associadas, custos e oportunidades de melhoria. Esta seção sintetiza a realidade atual da fábrica, oferecendo uma base sólida para o desenvolvimento do cenário *To-Be*, com foco na transição energética e redução de impactos ambientais.

A fábrica de Indaiatuba, uma das maiores produtoras de sabão em pó no Brasil, é caracterizada por um alto nível de automação e integração em suas linhas de produção. Operando com cinco marcas diferentes em uma linha compartilhada, a unidade possui processos contínuos que geram 700 mil toneladas de produtos anualmente. No âmbito de gestão

ambiental, o tratamento completo de água e resíduos destaca-se como uma prática consolidada. A fábrica reutiliza 100% da água tratada, tanto para processos industriais quanto para sistemas de refrigeração, e realiza compostagem de resíduos orgânicos e reciclagem de materiais recicláveis.

A estrutura produtiva é composta por etapas como mistura, preparo de matérias-primas, secagem por atomização (*Spray-Drying*) e envase. Entre essas, o processo de secagem é o mais intensivo em energia, sendo o principal responsável pela alta dependência de gás natural. A unidade também utiliza transporte interno baseado em veículos a diesel, que contribuem marginalmente para o consumo energético, mas possuem um custo operacional elevado.

Do ponto de vista energético, a fábrica é sustentada por uma matriz que combina combustíveis fósseis e fontes renováveis. O gás natural representa 66% do consumo energético total, sendo a principal fonte de energia térmica para o processo de secagem. Essa dependência resulta em emissões significativas, que somam mais de 43.342 toneladas de CO₂e anuais, ou 91% das emissões totais. Essa fonte também representa o maior custo energético, com despesas anuais de R\$ 50,5 milhões.

A energia elétrica, proveniente de fontes renováveis (hidrelétrica e solar), representa 31% do consumo energético da fábrica e é um ponto de destaque positivo no perfil ambiental da unidade. Apesar de sua operação ser considerada de baixo impacto, há emissões indiretas associadas ao ciclo de vida dessas fontes. No caso da energia hidrelétrica, as emissões totais somam aproximadamente 801 toneladas de CO₂e anuais, enquanto a energia solar fotovoltaica gera 1.161 toneladas de CO₂e anuais, provenientes principalmente da fabricação e instalação dos painéis solares, conforme indicam os cálculos baseados no GHG Protocol. Essas emissões são pequenas em comparação às do gás natural, mas demonstram que mesmo fontes renováveis possuem algum impacto ambiental. O custo da eletricidade é competitivo, totalizando R\$ 6 milhões para energia hidrelétrica e R\$ 2 milhões para energia solar, os menores valores por MWh, o que reforça a importância de manter e expandir o uso dessas fontes como parte da estratégia de sustentabilidade da fábrica.

Outro componente relevante é o diesel, utilizado no transporte interno, que responde por 3% do consumo energético, mas tem um custo desproporcional a energia gerada, de R\$ 5,9 milhões anuais, emitindo 2.354 toneladas de CO₂e (5% das emissões). Esse custo desproporcional em relação ao consumo destaca a necessidade de intervenções para maior eficiência e substituição por alternativas mais sustentáveis, como biocombustíveis ou eletrificação.

Ao posicionar a fábrica no contexto do setor químico brasileiro, observou-se uma forte dependência de gás natural e eletricidade, características comuns ao setor. O setor químico, em 2023, consumiu 5.885 mil tep, com uma divisão equilibrada entre gás natural (33%) e eletricidade (34%). No entanto, a fábrica de Indaiatuba apresenta uma dependência mais acentuada de gás natural, enquanto utiliza menos derivados de petróleo em comparação com a média do setor (24%).

Vale ressaltar que a análise foi restrita aos Escopos 1 e 2, excluindo emissões associadas ao Escopo 3, como transporte de matérias-primas, fabricação de insumos e descarte de produtos. Esses fatores poderiam adicionar uma visão mais ampla sobre o impacto ambiental da unidade, complementando o diagnóstico atual.

Embora a fábrica já esteja alinhada às tendências nacionais de maior uso de fontes renováveis, como a energia solar, a análise destacou que a dependência de gás natural ainda é um desafio significativo. A substituição parcial ou total por fontes como biomassa ou eletrificação térmica poderia trazer benefícios ambientais e econômicos substanciais, alinhando a unidade às práticas mais avançadas do setor.

Em síntese, o cenário *As-Is* revelou que, embora a fábrica apresente características positivas, como alto nível de automação, eficiência operacional e uso de eletricidade renovável, há oportunidades importantes para otimização. O gás natural, sendo o maior responsável por emissões e consumo energético, é o principal alvo para melhorias, enquanto o diesel no transporte interno oferece potencial para eletrificação ou substituição por biocombustíveis. Juntas, essas duas fontes representam 78% dos custos totais de energia da fábrica.

Com base na análise do cenário atual, o próximo passo do trabalho vai explorar as oportunidades de transição para o cenário *To-Be*/otimizado. Essa etapa se concentrará em estratégias de transição energética. O objetivo é propor soluções que reduzam as emissões de GEE, e promovam eficiência operacional e competitividade econômica no longo prazo.

Essa transição será proposta e fundamentada nos dados analisados e buscará integrar as melhores práticas de sustentabilidade, alinhando a operação da fábrica às metas globais de descarbonização e ao compromisso com um futuro industrial mais sustentável.

5. ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE CENÁRIO OTIMIZADO

Com base na análise detalhada do cenário *As-Is*, esta seção tem como objetivo propor um cenário otimizado para a fábrica de sabão em pó em Indaiatuba, buscando reduzir as emissões de gases de efeito estufa, reduzir custos com energia e melhorar a sustentabilidade operacional da unidade. A otimização será guiada por critérios que equilibram os aspectos ambientais e econômicos, garantindo que as mudanças não comprometam a competitividade da fábrica no mercado.

5.1 Objetivos da otimização

A definição clara de objetivos é fundamental para direcionar os esforços de melhoria de maneira estruturada, garantindo que cada proposta esteja alinhada com as prioridades estratégicas da fábrica. Além disso, estabelecer metas específicas possibilita a mensuração dos resultados e facilita a comparação entre o cenário atual e o cenário otimizado. Portanto, os objetivos específicos desta otimização incluem:

A. Redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE):

- Diminuir as emissões associadas ao consumo de energia térmica, especialmente relacionadas ao gás natural, responsável por mais de 91% das emissões no cenário atual.
- Substituir ou complementar combustíveis fósseis por fontes renováveis, sem comprometer a eficiência dos processos produtivos.

B. Redução de custos operacionais com energia:

- Analisar soluções que diminuam os custos com energia, principalmente relacionados ao gás natural e diesel, que atualmente representam 78% dos custos totais de energia da fábrica.
- Identificar oportunidades para aumentar a eficiência energética em processos críticos, como a secagem por atomização e o transporte interno.

C. Alinhamento com metas globais de sustentabilidade:

- Tornar a operação da fábrica mais sustentável e alinhada às metas de descarbonização, como aquelas propostas pela ONU em seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), 9 (Inovação e Infraestrutura) e 13 (Ação Climática).

D. Preparação para o futuro:

- Garantir que as mudanças propostas sejam escaláveis e flexíveis, permitindo a adaptação a futuros cenários regulatórios e de mercado.
- Incorporar práticas e tecnologias que posicionem a fábrica como referência em sustentabilidade no setor químico.

Ao atingir esses objetivos, espera-se que a fábrica de Indaiatuba possa reduzir sua pegada de carbono de forma significativa, melhorar sua eficiência operacional e se alinhar às melhores práticas globais de sustentabilidade industrial. A análise e proposição das mudanças serão baseadas em dados quantitativos e qualitativos, utilizando as informações obtidas no cenário *As-Is* como base comparativa.

5.2 Priorização de escopo

Para alcançar os objetivos definidos no cenário otimizado, é necessário priorizar as fontes de energia e processos com maior potencial de impacto na redução de emissões e custos operacionais. Com base na análise detalhada do cenário *As-Is*, identificaram-se quatro fontes de consumo energético na fábrica: gás natural, eletricidade (hidrelétrica e solar) e diesel. **A análise comparativa dessas fontes aponta que o gás natural deve ser o foco principal das propostas de otimização.**

5.2.1. Análise Comparativa das Fontes Energéticas

- **Gás Natural (66% do consumo energético total, 91% das emissões):**
 - O gás natural é a principal fonte de energia térmica utilizada no processo de secagem por atomização (spray drying), que, sozinho, consome cerca de 229 GWh por ano.
 - Este combustível representa **78% do custo total de energia** da fábrica, com despesas anuais de **R\$ 50,5 milhões**, e é responsável por **43.342 toneladas de CO₂e**, tornando-se o maior emissor de gases de efeito estufa no cenário atual.
 - A substituição parcial ou total do gás natural por outras fontes oferece um potencial significativo de redução de emissões e custos.
- **Eletricidade (31% do consumo energético total, 4% das emissões):**
 - A eletricidade utilizada pela fábrica é predominantemente renovável, composta por fontes hidrelétricas e solares, o que resulta em emissões totais de apenas **1.962 toneladas de CO₂e**.

- Apesar de ser responsável por um custo de **R\$ 8 milhões anuais**, o impacto ambiental dessas fontes é extremamente reduzido, tornando desnecessária uma intervenção prioritária nesse segmento.
- A expansão do uso de energia hidrelétrica, que emite menos do que a solar, pode ser considerada futuramente, mas o impacto incremental em termos de emissões seria marginal.
- **Diesel (3% do consumo energético total, 5% das emissões):**
 - O diesel utilizado no transporte interno é responsável por **2.354 toneladas de CO₂e anuais** e apresenta um custo desproporcionalmente elevado de **R\$ 5,9 milhões anuais**, devido ao alto preço por unidade de energia.
 - Embora a substituição de caminhões a diesel por veículos elétricos ou movidos a biocombustíveis seja uma alternativa válida, essa solução exige um investimento significativo em novos veículos e infraestrutura de recarga, além de oferecer um impacto relativamente pequeno na redução total das emissões da fábrica.
 - Essa alternativa poderia ser analisada como uma segundo estudo de otimização, dado seu impacto mais restrito em relação ao gás natural.

5.2.2. Conclusão da Priorização

Com base nos dados apresentados, **fica evidente que o gás natural deve ser o foco principal das iniciativas de transição energética**. Essa priorização é justificada por sua contribuição para as emissões de CO₂e (91%) e os custos energéticos (78%). Além disso, a substituição parcial ou total do gás natural pode apresentar benefícios tanto ambientais quanto econômicos, com potencial para reduzir significativamente a pegada de carbono da fábrica.

Essa priorização permite concentrar os esforços na área de maior impacto, garantindo que os recursos sejam alocados de forma eficiente e que os objetivos de sustentabilidade da fábrica sejam atingidos no menor tempo possível.

5.3 Levantamento de alternativas ao gás natural

O gás natural, responsável por 66% do consumo energético e 91% das emissões de CO₂e da fábrica, é utilizado principalmente no processo de secagem por atomização (spray drying). Considerando a importância dessa etapa no processo produtivo e os objetivos de otimização, é essencial explorar alternativas ao gás natural que possam atender às necessidades térmicas da

operação, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e, potencialmente, os custos associados.

Primeiramente, vale destacar que ainda não existe um processo que transforme sabão líquido em pó sem a utilização de energia térmica no processo de *Spray-Drying*. Considerando a relevância deste processo no cenário analisado, a energia térmica desempenha um papel insubstituível na operação eficiente e na obtenção de produtos de alta qualidade. Embora avanços tecnológicos, como o uso de vapor superaquecido e sistemas de recuperação de calor, possam melhorar a eficiência energética, o fornecimento de calor é essencial para garantir a evaporação uniforme e rápida necessária neste processo. Este fato é corroborado pela literatura, como visto na revisão recentemente publicada “*Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application*” (Adriana Dantas et al, 2023) que demonstra que as demandas energéticas médias do processo, somando todas as tecnologias disponíveis, giram em torno de 4500 kJ/kg de água evaporada, um consumo significativo que reflete a natureza intensiva em energia desta tecnologia. Assim, qualquer tentativa de otimização deve focar na substituição de fontes de calor por alternativas mais sustentáveis, em vez de buscar a eliminação completa do uso de energia térmica.

No contexto de substituição do gás natural no processo de secagem por atomização, é essencial explorar um conjunto diversificado de alternativas energéticas. Cada uma delas apresenta vantagens e desafios específicos, os quais precisam ser avaliados para identificar a melhor opção, considerando os objetivos de redução de emissões, custo-efetividade e viabilidade técnica.

Uma das opções mais promissoras é a biomassa, que abrange materiais como cavacos de madeira, pellets, bagaço de cana e outros resíduos agrícolas. A biomassa tem se destacado como uma fonte renovável de energia, amplamente disponível no Brasil, e que oferece um ciclo de carbono com emissões reduzidas. Durante a combustão, o CO₂ liberado é reabsorvido pelas plantas durante o crescimento, resultando em emissões líquidas do seu ciclo de vida até 90% inferiores aos do gás natural, como visto em “*Life Cycle Assessment of Biomass Pyrolysis*” (Dipali Gahane et al, 2022) e “*Análise exergética e ambiental da substituição de carvão mineral por biomassa em centrais termelétricas no Brasil*” (Bassi, L., 2024) e em demais estudos citados na seção de referências. Além disso, os custos da biomassa são, em média, 50% mais baixos em comparação com o gás natural, quando consumida a mesma quantia de energia, como visto em pesquisas de médias setoriais da Empresa de Pesquisa Energética. Estes fatos a tornam uma alternativa atrativa tanto ambiental quanto economicamente. No entanto, a

implementação exige adaptações no sistema de combustão da fábrica e logística eficiente para o abastecimento regular.

Outra alternativa a ser considerada é a **eletricidade**. No Brasil, com uma matriz elétrica predominantemente renovável, a eletricidade é uma opção de baixo impacto ambiental. Sistemas de aquecimento baseados em resistências elétricas ou bombas de calor poderiam fornecer o calor necessário para o spray drying, eliminando emissões diretas de combustão. No entanto, esta abordagem apresenta duas dificuldades: ausência de tecnologias de *Spray-Drying* por eletricidade de larga escala e alto custo operacional. Como mostrado no artigo de DANTAS et Al, as tecnologias recentes de *Spray-Drying* eletrostático conseguem suportar pequenas escalas de produção, não sendo adequadas a realidade da fábrica estudada. Além disso, a eletricidade é significativamente menos eficiente do que o gás natural ou a biomassa em termos de calor gerado por unidade de energia consumida, o que aumentaria o custo energético. Também, pela demanda energética do spray drying ser elevada, a adaptação exigiria uma ampliação de quase 100% da capacidade elétrica instalada, com CAPEX muito elevado.

O hidrogênio verde surge como uma solução de longo prazo para a descarbonização industrial. Produzido a partir de fontes renováveis por meio de eletrólise da água, o hidrogênio é uma fonte térmica limpa, com zero emissões diretas de CO₂. Apesar de ser tecnicamente viável, a aplicação do hidrogênio enfrenta barreiras significativas, como custos elevados de produção, infraestrutura insuficiente para transporte e armazenamento, escala de produção nacional pequena e a necessidade de adaptações complexas nos equipamentos de combustão (EPE, 2021). No cenário atual, sua viabilidade está limitada, mas ele representa uma opção estratégica para o futuro.

O biogás representa uma alternativa renovável ao gás natural, com potencial para reduzir significativamente as emissões de CO₂ associadas ao processo de spray drying. No entanto, sua adoção enfrenta desafios logísticos significativos. Diferentemente do gás natural, que é distribuído por gasodutos para a fábrica, o biogás exigiria transporte por caminhões-tanque devido à ausência de infraestrutura adequada. Considerando que a fábrica consome aproximadamente 55.000 m³ de gás natural por dia, e que cada caminhão-tanque tem capacidade média de 50 m³, seriam necessárias mais de 1.100 viagens diárias para suprir a demanda, o que inviabiliza logisticamente a operação (atualmente, o fluxo de caminhões na fábrica é de 206 por dia). Essa limitação torna o biogás impraticável em larga escala para esta aplicação, mesmo com suas vantagens ambientais, colocando-o em desvantagem em relação a outras opções mais viáveis.

A seguir, a Tabela 8 sintetiza as viabilidades técnico-operacionais, econômicas e ambientais analisadas:

Tabela 8: Quadro comparativo de alternativas ao gás natural

Fontes alternativas	Biomassa	Eletricidade	Hidrogênio	Biogás
Viabilidade Técnica e Operacional	Viável	Não viável	Viável	Não viável
Viabilidade Econômica	Viável	Não viável	Não viável	Viável
Viabilidade Ambiental	Viável	Viável	Viável	Viável

Fonte: Elaboração do autor

O quadro comparativo apresentado sintetiza os resultados da análise de viabilidade das principais alternativas ao gás natural, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. A biomassa destaca-se como a única alternativa plenamente viável em todas as dimensões avaliadas. Ela alia viabilidade técnica e operacional, devido à possibilidade de adaptação dos sistemas de combustão existentes, com viabilidade econômica, graças ao custo competitivo e à abundância de matérias-primas no Brasil. Além disso, a biomassa apresenta uma vantagem ambiental clara, devido ao seu ciclo de carbono de baixa emissão.

Por outro lado, opções como eletricidade e hidrogênio verde, embora ambientalmente viáveis, enfrentam desafios econômicos e técnicos que limitam sua aplicação no curto prazo. Já o biogás, apesar de apresentar custos e impactos ambientais favoráveis, enfrenta limitações logísticas severas que inviabilizam sua adoção em larga escala. Assim, **a análise conclui que a biomassa é a melhor alternativa para substituir o gás natural no processo de secagem por atomização, oferecendo um equilíbrio ideal entre sustentabilidade, custo e viabilidade operacional.** Nas próximas seções, serão detalhadas as etapas necessárias para avaliar a eficácia e eficiência da implementação dessa estratégia de transição energética nas três frentes de avaliação: técnica, econômica e ambiental.

5.4 Estruturação de cenário otimizado com biomassa

Com base na análise detalhada das alternativas ao gás natural, concluiu-se que a biomassa apresenta o melhor equilíbrio entre viabilidade técnica, econômica e ambiental para substituir o gás natural no processo de secagem por atomização. Nesta seção, será proposta uma estruturação detalhada do cenário otimizado, considerando os aspectos necessários para garantir a implementação bem-sucedida dessa transição energética. A proposta abordará os requisitos técnicos, os custos estimados, a logística de abastecimento e os benefícios esperados, com foco em atender às demandas operacionais da fábrica enquanto reduz significativamente sua pegada de carbono e custos operacionais.

Essa estruturação busca não apenas viabilizar a substituição do gás natural, mas também consolidar a fábrica como uma referência em práticas industriais sustentáveis e alinhadas às metas globais de descarbonização.

5.4.1. Viabilidade Técnica

5.4.1.1. Sistema de geração de gases quentes com biomassa

A viabilidade técnica de implementar a biomassa como substituto ao gás natural no processo de secagem por atomização envolve a análise de diversos fatores operacionais. Primeiramente, é necessário avaliar se os sistemas de combustão atualmente instalados na fábrica podem ser adaptados para operar com biomassa, ou se será necessária a instalação de novos equipamentos dedicados. Essa avaliação deve levar em consideração a compatibilidade do sistema com diferentes tipos de biomassa, como cavacos de eucalipto, pellets ou bagaço de cana, bem como a comparação entre a eficiência desses materiais.

A substituição do gás natural por biomassa no sistema de geração de gases quentes exigiu uma análise aprofundada da capacidade dos equipamentos atuais de operar com esse novo combustível. Após entrevistas realizadas com especialistas da **ICAVI**, empresa reconhecida pela fabricação de sistemas de geração de gases quentes para aplicações industriais, concluiu-se que o sistema atual da fábrica não é compatível com a queima de biomassa, pois tanto o sistema de movimentação de combustível quanto a fornalha estão adaptados para combustíveis gasosos, como o gás natural, e não sólidos, como a biomassa. Por isso, os especialistas apontaram que os fornos de combustão instalados, projetados exclusivamente para gás natural, não possuem a flexibilidade necessária para processar combustíveis sólidos como bagaço de cana ou cavacos de eucalipto.

Com base nessa análise, foi recomendada a substituição do sistema atual por um novo modelo desenvolvido especificamente para operar com biomassa. A solução proposta pela

ICAVI é um sistema modular que permite a combustão eficiente de diferentes tipos de biomassa, garantindo alta flexibilidade no abastecimento e reduzindo os riscos associados a possíveis variações na disponibilidade de matérias-primas. Esse sistema é equipado com câmaras de combustão adaptáveis, que suportam combustíveis com diferentes tamanhos de partículas e teores de umidade, além de apresentar mecanismos automatizados para alimentação contínua do combustível.

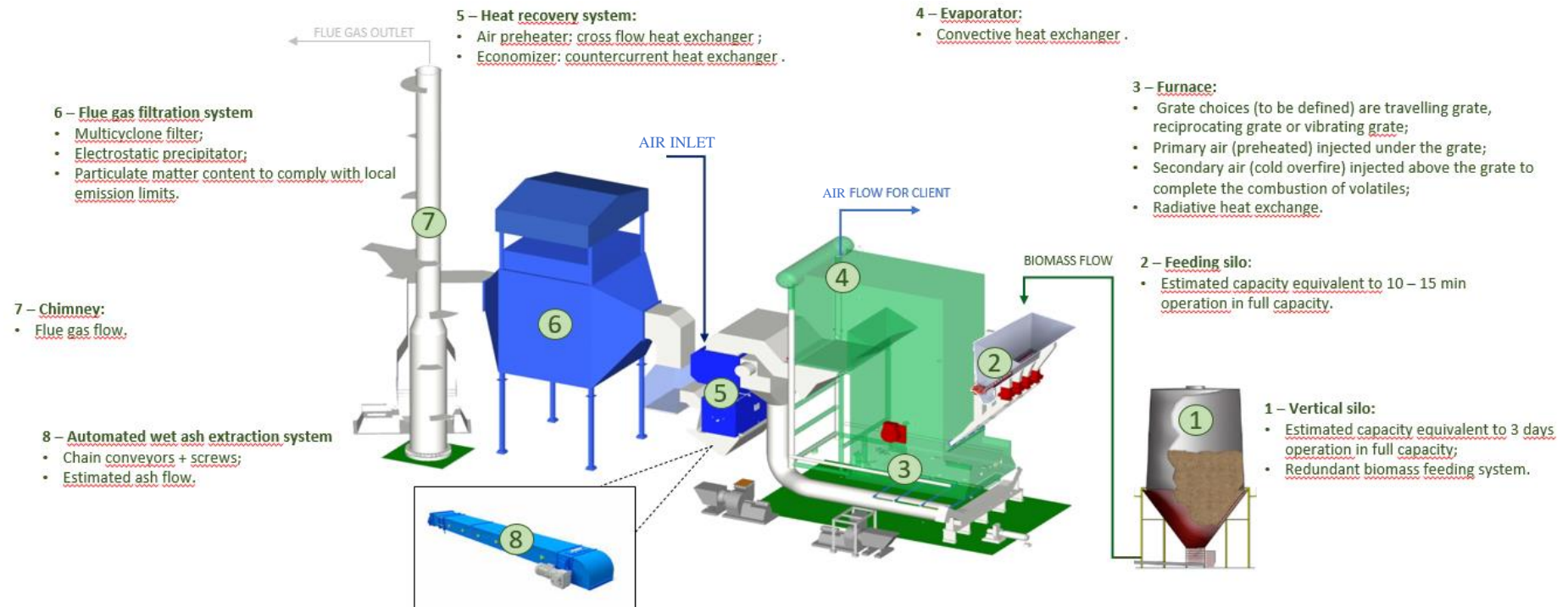
A implementação do sistema proposto pela ICAVI garante alta eficiência térmica e flexibilidade operacional, atendendo às exigências específicas do processo de spray drying. O equipamento sugerido é capaz de fornecer até 60 MW térmicos (51,6 Gcal/h), com capacidade de operar a temperaturas de até 500 °C, características essenciais para manter a eficiência e qualidade do processo de secagem. O sistema utiliza uma tecnologia de combustão baseada em grelha reciprocante, o que permite a queima de diferentes tipos de biomassa, como cavacos de madeira e bagaço de cana, além de combustíveis complementares como gás ou óleo, caso necessário. Essa flexibilidade técnica assegura a continuidade da operação mesmo em cenários de variação na disponibilidade de biomassa. Além disso, o sistema é projetado para fornecer um fluxo de ar aquecido limpo, um requisito essencial para aplicações industriais de secagem onde a pureza do ambiente é indispensável, como no caso da fabricação de sabão em pó. Dessa forma, a tecnologia proposta atende às demandas térmicas da fábrica, sem deixar de se alinhar às normas ambientais e de qualidade do setor. As figuras abaixo detalham visualmente como é o sistema e seu funcionamento:

Figura 9: Esboço do sistema de geração de gases quentes a biomassa



Fonte: ICAVI, fabricante de sistemas de geração de gases quentes

Figura 10: Esquemático do funcionamento do sistema de geração de gases quentes a biomassa



Fonte: ICAVI, fabricante de sistemas de geração de gases quentes consultada pelo autor

O custo estimado para a implementação do novo sistema de geração de gases quentes compatível com biomassa pode variar entre R\$ 35 milhões e R\$ 55 milhões, dependendo de fatores como a capacidade térmica necessária, o tipo de biomassa a ser utilizado, a complexidade das adaptações na infraestrutura da fábrica e a inclusão de tecnologias complementares, como sistemas avançados de controle de emissões e recuperação de calor. No caso específico da fábrica estudada, os especialistas da ICAVI, após análise preliminar dos requisitos operacionais e do layout existente, estimaram um orçamento de R\$ 46 milhões para o sistema proposto. Esse valor inclui a instalação de equipamentos, adaptações na infraestrutura de armazenamento e logística interna de biomassa, bem como serviços de engenharia e integração com os processos existentes. Apesar do alto investimento inicial, o sistema pode apresentar potencial para significativa redução nos custos operacionais e ambientais a longo prazo, tópico que será analisado na seção de viabilidade econômica dentro do escopo deste estudo.

Para aprofundar a análise e garantir a viabilidade técnica e operacional do sistema proposto, o autor deste estudo realizou uma visita técnica a instalações industriais que já utilizam sistemas de geração de gases quentes fabricados pela ICAVI. Durante a visita, foi possível observar, em funcionamento, um equipamento similar ao que está sendo recomendado para a fábrica de Indaiatuba, utilizado em um processo industrial com demandas térmicas e operacionais comparáveis. A visita permitiu avaliar diretamente a eficiência do sistema, a flexibilidade no uso de diferentes tipos de biomassa e o nível de automação, além de discutir com os operadores as rotinas de manutenção e abastecimento. Esses insights foram fundamentais para validar a aderência do sistema à realidade operacional da fábrica estudada, reforçando a confiança na capacidade da solução de atender às demandas específicas do processo de spray drying, com segurança e eficiência. Veja fotos da visita abaixo:

Figura 11: Fotos de visita realizada pelo autor em fábrica com sistema ICAVI





Fonte: Fotografias tiradas pelo autor

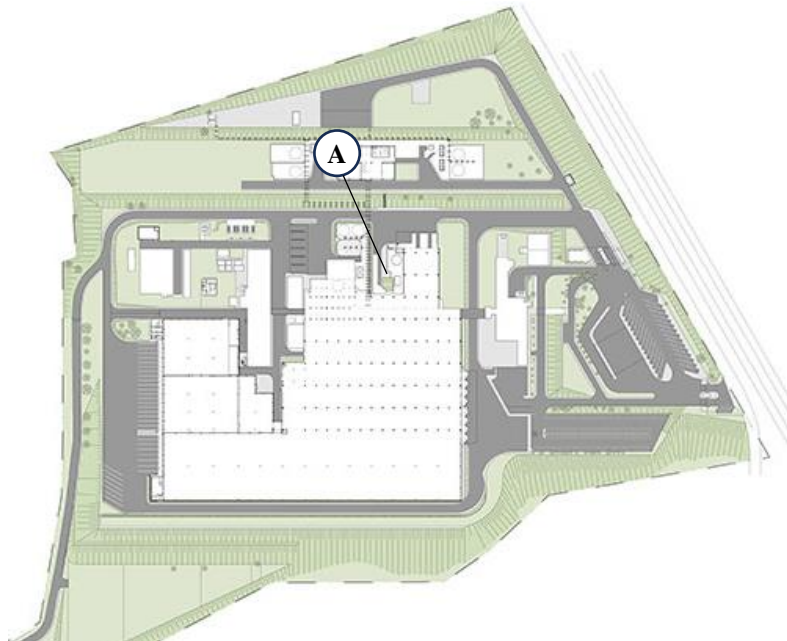
Portanto, embora a troca do sistema de geração de gases quentes implique um investimento inicial significativo, ela é indispensável para viabilizar a substituição do gás natural por biomassa. O sistema proposto pela ICAVI, com capacidade térmica até superior ao consumido atualmente (37 Gcal/h), foi validado por meio de uma visita técnica realizada pelo autor a instalações industriais similares. Essa visita permitiu verificar a eficiência do sistema em operação, sua flexibilidade para diferentes tipos de biomassa e o nível de automação dos processos, além de identificar como a gestão de resíduos e a logística de abastecimento são integradas de forma eficiente. Com um custo estimado em **R\$ 46 milhões**, baseado em um orçamento preliminar da ICAVI, o investimento abrange tanto a aquisição do equipamento, quanto as adaptações na infraestrutura de armazenamento e transporte interno da biomassa. Esses fatores garantem que a transição de equipamento seja tecnicamente viável, garantindo uma das partes da análise de viabilidade.

5.4.1.2. Logística e infraestrutura de abastecimento de biomassa

Outro aspecto crucial é a análise da infraestrutura de abastecimento e armazenamento da biomassa. Diferentemente do gás natural, que é fornecido por gasodutos, a biomassa exige transporte por caminhões e armazenamento em grandes silos ou armazéns. Esses sistemas precisam ser projetados para garantir o abastecimento contínuo e eficiente, atendendo à alta demanda térmica do processo de spray drying. Além disso, o espaço disponível na planta deve ser suficiente para a instalação dos silos/armazéns de biomassa, considerando também as normas de segurança.

No caso específico da fábrica de Indaiatuba, foi identificado junto ao time de engenharia um armazém de matérias-primas atualmente subutilizado, localizado a leste do sistema de gases quentes atuais, logo acima do setor 8 (depósito de matérias-primas) do mapa detalhado na seção 4.1.2. Este armazém apresenta 4000 m² de área retangular, com 15 metros de altura, sendo adequado para ser convertido em um depósito de biomassa. Esse local, estrategicamente posicionado, permitirá a implantação direta de um sistema de esteiras que transportará a biomassa até o sistema de geração de gases quentes, minimizando a necessidade de transporte interno por empilhadeiras e otimizando a eficiência operacional. O espaço está indicado com a letra A na planta apresentada abaixo, destacando sua proximidade com as áreas críticas do processo produtivo.

Figura 12: Indicação do armazém disponível para funcionar como depósito de biomassa



Fonte: Elaborado pelo autor

A estimativa de investimento feita pelo time de engenharia em conjunto com a equipe da ICAVI para adaptar esse armazém à nova função é de **R\$ 2 milhões**, valor que inclui as obras de adequação estrutural, instalação de sistemas de contenção para evitar o espalhamento de partículas e poeira, e a implementação de esteiras automatizadas para o transporte contínuo de biomassa até o sistema de combustão. Esse custo também contempla a aquisição de equipamentos de segurança, como sistemas de supressão de fogo, e as licenças ambientais necessárias para garantir o cumprimento das normas aplicáveis.

Já no quesito logístico de recebimento da biomassa, a estimativa aponta para a necessidade de aproximadamente **8 caminhões por dia** para suprir a demanda energética do sistema de geração de gases quentes. Esse número foi calculado com base na energia necessária para o processo de secagem por atomização (229.000 MWh/ano), na densidade energética média da biomassa de cavaco de eucalipto e bagaço de cana (veja a seção 5.4.1.4. que detalha a escolha do tipo de biomassa) e na eficiência do sistema proposto pela ICAVI (85%). Cada caminhão possui uma capacidade média de carga de **30 toneladas**, o que torna possível atender à demanda diária de 229 toneladas com um fluxo logístico consistente. Veja a tabela abaixo com o racional de cálculo:

Tabela 9: Estimativa de suprimento diário de biomassa necessário

Fonte de Energia	Energia necessária (MWh)	Densidade energética média da biomassa (MWh/ton)	Eficiência do sistema de geração de gases ICAVI	Quantia anual necessária de biomassa (ton)	Quantia diária necessária (ton)
	Fonte dos dados				
	Fábrica	GHG Protocol/FGV	ICAVI	Calculado	Calculado
Biomassa	229.000,00	3,22	85,00%	83.610,55	229,07
			Capacidade de carga média de um caminhão (ton) [CONTRAN]		30,00
			Caminhões necessários por dia		8,00

Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa

Esse volume de recebimento está bem dentro dos limites operacionais da fábrica, que atualmente gerencia um fluxo de cerca de 200 caminhões diários, distribuídos entre recebimento de matérias-primas e expedição de produtos acabados. Portanto, a adição de 8 caminhões ao fluxo existente representa um incremento de apenas 4%, considerado totalmente viável dentro da infraestrutura e capacidade logística já estabelecidas.

Além disso, a localização estratégica do armazém de biomassa, próxima a entrada dos caminhões (setor 3 do mapa da seção 4.1.2), facilitará a recepção e descarga dos caminhões, minimizando o impacto no trânsito interno e agilizando o processo de abastecimento. Esse planejamento logístico eficiente garante que o fornecimento de biomassa não será um gargalo para a operação, alinhando-se aos objetivos de manter a produtividade da planta enquanto se implementa a nova matriz energética.

Com essa solução, o armazenamento e recebimento de biomassa será integrado de maneira eficiente à operação da fábrica, minimizando custos com transporte interno. Além disso, a utilização de um espaço já existente contribui para a redução de investimentos em novas estruturas, fortalecendo a viabilidade econômica da transição para a biomassa. Essa abordagem reforça a capacidade da planta de se adaptar à nova matriz energética sem comprometer sua produtividade ou segurança.

5.4.1.3. Gestão dos resíduos da combustão de biomassa

A manutenção e o manuseio da biomassa também são fatores técnicos relevantes, especialmente no que diz respeito à gestão dos resíduos gerados durante a combustão. A queima de biomassa, como cavacos de madeira ou bagaço de cana, gera uma quantidade significativa de cinzas em comparação ao gás natural. Estudos indicam que, em média, são produzidos cerca de 24 gramas de cinzas por quilograma de biomassa total queimada (Cacuro, T.A, 2015), representando aproximadamente 2,4% do peso do material processado. No caso da fábrica de Indaiatuba, que consumirá cerca de 83.610 toneladas de biomassa por ano, a geração de cinzas pode atingir aproximadamente 2.000 toneladas anuais, ou cerca de 5,5 toneladas por dia.

Apesar desse volume, a fábrica já dispõe de uma infraestrutura robusta para gestão sustentável de resíduos, tratando 100% dos rejeitos gerados por seus processos produtivos que resultam em 700 mil toneladas anuais de produtos. Essa abordagem será estendida ao tratamento das cinzas da biomassa, garantindo que sejam reutilizadas ou descartadas de forma ambientalmente responsável. As cinzas geradas apresentam alta heterogeneidade, compostas principalmente por sílica (60%) e óxidos metálicos (32%), como K_2O e MgO , o que abre possibilidades de reaproveitamento em setores como fertilização agrícola e produção de materiais de construção. Essa estratégia, além de reduzir custos com descarte, contribui para o fortalecimento de uma economia circular.

Para garantir o cumprimento das normas ambientais, o sistema da ICAMI precisa contar com sistemas eficientes de filtragem e controle de emissões nos equipamentos de combustão. Tecnologias como filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos serão empregadas para capturar as partículas finas (veja figura 9, componente 6), conhecidas como cinzas volantes, antes de sua liberação na atmosfera. Essas partículas, além de serem neutralizadas ambientalmente, podem ser aproveitadas devido à sua alta capacidade de adsorção, gerando valor adicional ao processo.

A adoção dessas práticas reforça o compromisso da fábrica com a sustentabilidade, consolidando sua posição como referência em gestão ambiental. A integração de soluções inovadoras para o reaproveitamento de cinzas e a mitigação de emissões particuladas serve para alinhar o projeto às metas globais de descarbonização, além de fortalecer o impacto positivo da transição energética no contexto industrial.

5.4.1.4. Escolha de tipo e disponibilidade de fornecimento de biomassa na região

A escolha do tipo de biomassa a ser utilizado no processo de geração de gases quentes é uma etapa crucial para garantir a viabilidade técnica, econômica e ambiental da transição

energética. O processo de spray drying demanda energia térmica constante e de alta intensidade, exigindo uma biomassa com características específicas, como composição uniforme, alto poder calorífico e baixo teor de umidade. Além disso, a biomassa deve ser entregue no tempo adequado, com um fornecimento estável e confiável, minimizando impactos no desempenho operacional da fábrica.

Três tipos de biomassa foram inicialmente considerados para atender à demanda energética, incluindo bagaço de cana, resíduos urbanos e cavacos de eucalipto. No entanto, ao longo da análise e da revisão bibliográfica, foi possível observar que a proximidade entre a fonte de biomassa e a planta produtiva é um fator determinante para a viabilidade logística e econômica (Pereira, A., 2019), especialmente devido aos custos de transporte, que representam uma parcela significativa do custo final da biomassa entregue. Segundo Pereira, a biomassa não pode estar a mais de 250 km da planta produtiva para ser viável técnica e economicamente.

Para auxiliar na escolha do tipo de biomassa, o autor entrou em contato com a ComBio, empresa certificada pelo Sistema B especializada no manejo e fornecimento de biomassa. O autor realizou entrevistas com membros do time da ComBio, que ajudaram a elucidar os aspectos importantes a serem considerados para a escolha do tipo de biomassa adequado, como distância da fonte e qualidade do material. A partir desse contato, foram analisados três tipos potenciais de biomassa para a fábrica de Indaiatuba: resíduos urbanos sólidos (RSU), bagaço de cana e cavaco de eucalipto.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) foram considerados devido à sua alta disponibilidade no município de Indaiatuba e ao potencial de utilização como combustível em sistemas de combustão adaptados. A cidade gera uma quantidade significativa de resíduos urbanos, e parte desse material poderia ser processado para a obtenção de um combustível derivado, como o Combustível Derivado de Resíduos (CDR). Apesar do potencial, essa alternativa foi descartada devido à sua complexidade operacional e maior emissão de gases do efeito estufa em comparação com as alternativas (IEA, 2003), uma vez que o uso de RSU exige processos adicionais de triagem, secagem e preparação antes da queima, o que aumentaria os custos e a complexidade da operação. Além disso, a composição heterogênea dos resíduos poderia comprometer a eficiência do sistema de combustão, segundo a ICAVI.

O bagaço de cana e o cavaco de eucalipto se apresentaram como opções viáveis para atender às necessidades energéticas da fábrica de Indaiatuba, considerando as exigências técnicas e logísticas do sistema de geração de gases quentes. O bagaço de cana, amplamente disponível no estado de São Paulo, é um subproduto da indústria sucroalcooleira com bom poder calorífico e custo competitivo. As usinas mais próximas estão localizadas a cerca de 36,2

km da fábrica (veja o mapa na figura 12), o que viabiliza seu transporte com um custo logístico moderado. Entretanto, o bagaço de cana possui alta demanda por parte das próprias usinas para geração de energia, o que pode influenciar sua disponibilidade e preço, especialmente durante períodos de safra.

Figura 13: Indicação das plantações de cana mais próximas da fábrica

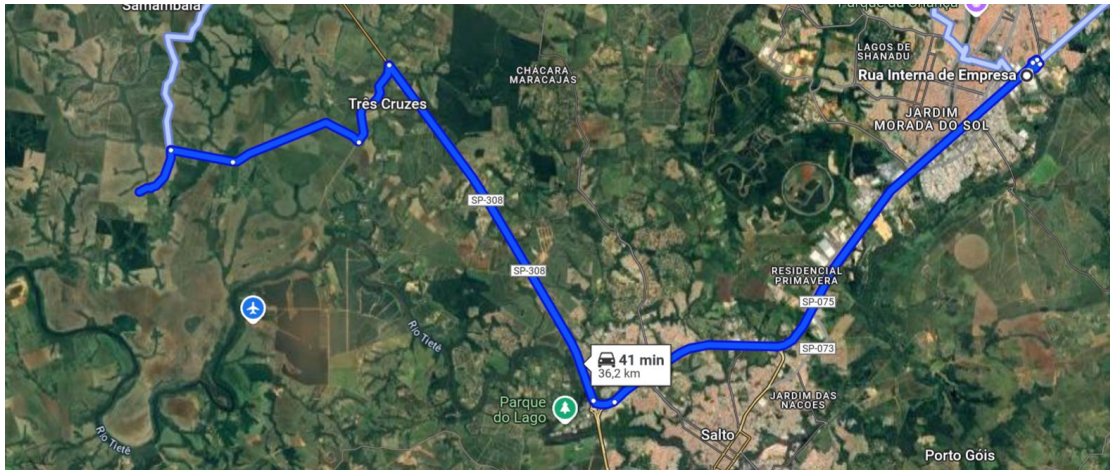
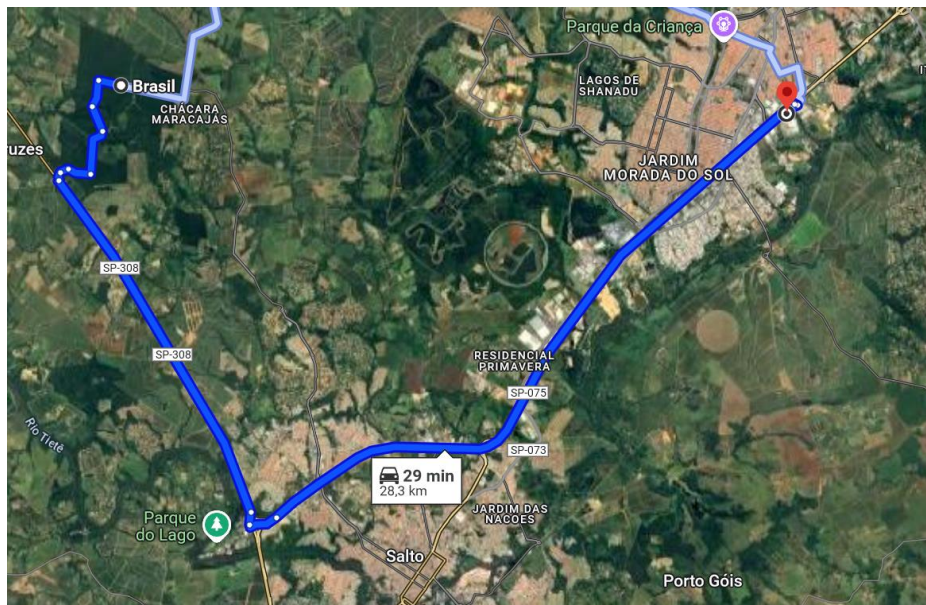


Figura 14: Indicação das plantações de eucalipto mais próximas da fábrica



Fonte: Google Earth

O **cavaco de eucalipto** também foi avaliado como uma alternativa viável, destacando-se pela proximidade de sua fonte em relação à planta produtiva. Plantios foram identificados a **28 km da fábrica** (veja o mapa na figura 13), representando uma vantagem logística significativa em relação ao limite de 250 km estipulado em Pereira, 2019. Além disso, o cavaco

de eucalipto apresenta características técnicas ideais, como alto poder calorífico (aproximadamente 3,2 MWh/ton) e baixo teor de umidade (inferior a 20%), o que garante uma combustão eficiente e estável no sistema.

Em relação aos custos, tanto o bagaço de cana quanto o cavaco de eucalipto apresentam valores competitivos em comparação ao custo atual do gás natural, estimado em R\$ 220/MWh. O custo médio do bagaço de cana varia entre R\$ 85/MWh e R\$ 150/MWh (EPE, 2023), enquanto o cavaco de eucalipto possui um custo estimado entre R\$ 80/MWh e R\$ 200/MWh (EPE, 2023), dependendo do fornecedor e da logística envolvida. Essa competitividade econômica reforça a viabilidade de ambas as opções como alternativas ao gás natural, com a escolha final sendo influenciada por fatores logísticos e disponibilidade local.

Portanto, ambas as alternativas são consideradas viáveis e podem ser utilizadas conforme as demandas específicas da fábrica e a disponibilidade sazonal de cada tipo de biomassa. A flexibilidade do sistema de geração de gases quentes proposto permite a integração das duas fontes, garantindo maior segurança no abastecimento energético e permitindo uma estratégia resiliente para mitigar riscos operacionais e variações de custo. Essa abordagem oferece uma solução robusta, alinhada aos objetivos de eficiência energética e redução de emissões e custos.

5.4.1.5. Conclusão sobre viabilidade técnica/operacional

A análise detalhada da viabilidade técnica e operacional confirma que a transição para o uso de biomassa como fonte energética na fábrica de Indaiatuba é viável. A substituição do sistema atual de geração de gases quentes por uma tecnologia moderna e eficiente, fornecida pela ICAVI, garantirá a compatibilidade técnica para operar com biomassa, seja utilizando cavaco de eucalipto ou bagaço de cana. Além disso, os ajustes na infraestrutura, incluindo a adaptação de um armazém para o armazenamento de biomassa e a implementação de esteiras automatizadas para transporte interno, foram avaliados como tecnicamente viáveis, com investimentos alinhados às necessidades do projeto.

A escolha de fontes de biomassa próximas à fábrica reforça a viabilidade operacional, minimizando custos logísticos e emissões associadas ao transporte. A localização estratégica das plantações de eucalipto a 28 km da fábrica e das usinas de cana a 36,2 km oferece flexibilidade no abastecimento e resiliência contra possíveis variações sazonais ou de mercado. Adicionalmente, o sistema de geração proposto foi projetado para ser compatível com diferentes tipos de biomassa, o que permite uma operação mais robusta e adaptável a diferentes cenários.

Os desafios associados ao aumento na geração de resíduos sólidos (cinzas) também foram endereçados, com soluções práticas e ambientalmente sustentáveis que aproveitam a infraestrutura existente da fábrica. A gestão eficiente das cinzas, aliada à possibilidade de reaproveitamento em setores como fertilização e construção civil, demonstra um compromisso com a sustentabilidade e com a economia circular.

Com base nessas análises, conclui-se que a transição para o uso de biomassa apresenta viabilidade técnica e operacional robusta. Esses fatores consolidam a biomassa como uma alternativa confiável e estratégica para a fábrica, garantindo a continuidade das operações de forma eficiente e alinhada aos objetivos de descarbonização.

5.4.2. Viabilidade Econômica

A análise de viabilidade econômica é essencial para avaliar se a transição para biomassa é financeiramente sustentável e vantajosa em relação ao cenário atual. Nesta etapa, será considerado o impacto do investimento inicial necessário para a implementação do sistema de biomassa, incluindo a substituição do sistema de geração de gases quentes, as adaptações logísticas e o armazenamento, bem como os custos operacionais associados ao uso de biomassa ao longo do tempo.

Adicionalmente, será realizada uma comparação direta entre os custos do cenário atual, baseado no gás natural, e os custos estimados para a operação com biomassa, considerando variáveis como preço por unidade energética, transporte, manutenção e gestão de resíduos. Essa análise busca identificar o prazo de retorno do investimento (payback) e os benefícios econômicos de longo prazo, incluindo a redução dos custos operacionais e a mitigação de riscos financeiros relacionados à volatilidade do mercado de combustíveis fósseis. **Vale destacar que todos os resultados serão avaliados com uma análise de sensibilidade no capítulo 6**, a fim de aferir a robustez da solução proposta em diversos cenários de preços.

5.4.2.1 Investimentos necessários

A implementação do sistema de biomassa na fábrica de Indaiatuba requer um investimento inicial de aproximadamente R\$48 milhões de reais, abrangendo adaptações na infraestrutura e no maquinário da fábrica. Com base nas recomendações da ICAVI, especialista em sistemas de geração de gases quentes, foi possível orçar preliminarmente os principais itens necessários para a substituição do sistema atual. É importante destacar que, caso a empresa prossiga com a transição, um orçamento detalhado pode contar com mudanças em relação ao disposto aqui. Os custos incluem a aquisição de novos equipamentos, adequação logística,

melhorias na gestão de resíduos e licenças regulatórias. Os principais componentes do investimento são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 10: Estimativa de custos CAPEX necessários para a transição do sistema

Item	Descrição	Custo (R\$ milhões)
Sistema de geração de gases quentes	Substituição completa do sistema atual para um compatível com biomassa	40,0
Sistema de filtragem e controle de emissões	Instalação de filtros para captura de partículas e controle ambiental	2,5
Adaptação do armazém para biomassa	Reformas estruturais e instalação de esteiras automáticas	2,0
Licenças e autorizações ambientais	Custos relacionados à obtenção de permissões necessárias	1,5
Contingências e ajustes operacionais	Reserva para ajustes durante a implementação	1,5
Treinamento e capacitação de equipe	Capacitação de operadores e técnicos para a nova tecnologia	0,5
Total		48,0

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em consulta com fabricante ICAVI e time da fábrica

A ICAVI e o time da fábrica auxiliaram diretamente na construção desse orçamento preliminar, com base em sua experiência na implementação de sistemas similares em indústrias químicas. O maior componente do investimento está relacionado ao novo sistema de geração de gases quentes, que inclui tecnologia de ponta para operar com diferentes tipos de biomassa e assegurar alta eficiência térmica e controle ambiental.

Esse valor, embora significativo, reflete um planejamento abrangente e realista, com margem para contingências e ajustes operacionais. A viabilidade desse investimento será testada na seção de análise econômica do projeto.

5.4.3.2 Custos variáveis de operação

A análise dos custos variáveis de operação pretende entender qual será o gasto com a biomassa e com o transporte dela até a fábrica. Portanto, são considerados custos associados ao fornecimento de biomassa, transporte e gestão de resíduos, enquanto os custos de manutenção são estimados como equivalentes ao cenário *As-Is*. As premissas adotadas para essa análise são:

- **Custos estimados para biomassa:**
 - Cavaco de eucalipto: R\$ 300/ton (EPE, 2023)
 - Bagaço de cana: R\$280/ton (EPE, 2023)
- **Logística de transporte:**
 - Cavaco de eucalipto: Plantação a 28 km da fábrica.
 - Bagaço de cana: Usinas a 36,2 km da fábrica.
 - Custo do frete: R\$ 6,36 / km (setembro/2024)
 - Inclui combustível e honorários do motorista. Este valor é providenciado pelo Índice de Frete Edenred Repom, índice do preço médio do frete mais usado no Brasil, levantado com base nas 8 milhões de transações anuais de frete e vale-pedágio administradas pela Edenred Repom.
- **Manutenção:** Os custos são estimados como equivalentes ao cenário atual, sem aumento de frequência ou necessidade de novos serviços especializados (ICAVI).
- **Mão de obra:** Não haverá contratação adicional, pois o time da fábrica dispõe de recursos humanos suficientes para operar o sistema de biomassa.
- **Gestão de resíduos:** A gestão das cinzas da biomassa será integrada às práticas existentes da fábrica, com potencial de reaproveitamento/revenda das cinzas. Não é estimado impacto econômico significativo, como premissa conservadora

Abaixo, os cálculos realizados estão destacados em dois cenários, um com 100% de biomassa e um com 100% de cavaco de eucalipto, destacando que cenários mistos são possíveis e teriam resultados entre os dois apresentados.

Tabela 11: Estimativa de custos variáveis de biomassa necessários para a transição do sistema

Tipo de Biomassa	Fontes dos dados	Cavaco de eucalipto	Bagaço de cana
Energia necessária (MWh)	<i>Dados da fábrica</i>	229.000,00	229.000,00
Densidade energética média da biomassa (MWh/ton)	<i>GHG Protocol (ver anexo B)</i>	3,22	2,48
Eficiência do sistema de geração de gases ICAVI	<i>ICAVI</i>	0,85	0,85
Quantia anual necessária de biomassa (ton)	<i>Calculado</i>	83.610,55	108.757,00
Preço da Biomassa (R\$/Ton)	<i>EPE</i>	300,00	280,00

Custo anual (R\$)	<i>Calculado</i>	25.083.164,30	30.451.961,34
Redução em comparação com gás natural		-50,3%	-39,7%

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em dados de mercado e operacionais

Tabela 12: Estimativa de custos logísticos variáveis necessários para a transição do sistema

Tipo de Biomassa	Fontes dos dados	Cavaco de eucalipto	Bagaço de cana
Quantia anual (ton)	<i>Calculado</i>	83.610,55	108.757,00
Quantia diária (ton)	<i>Calculado</i>	229,07	297,96
Capacidade caminhão (ton)	<i>ANTT</i>	30,00	30,00
Número de viagens necessárias por dia	<i>Calculado</i>	8,00	10,00
Distância até fábrica (km)	<i>Google Earth</i>	28,00	36,20
Custo do frete (R\$/km)	<i>IRF</i>	6,36	6,36
Custo frete diário (R\$)		1.424,64	2.302,32
Custo anual logístico (R\$)	<i>Calculado</i>	519.993,60	840.346,80

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em dados de mercado e operacionais

Tabela 13: Resultado consolidado dos custos estimados

Tipo de Biomassa	Custo matéria prima (R\$)	Custo logístico (R\$)	Custo total (R\$)	Redução em comparação com gás natural
Cavaco de eucalipto	25.083.164,30	519.993,60	25.603.157,90	49,3%
Bagaço de cana	30.451.961,34	840.346,80	31.292.308,14	38,0%

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em dados de mercado e operacionais

Com essas premissas, o uso da biomassa apresenta um custo variável significativamente inferior ao do gás natural. O **cavaco de eucalipto**, com um custo total anual estimado em **R\$ 25.603.157,90**, representa uma redução de **49,3%** em relação ao custo atual do gás natural. Já o **bagaço de cana**, com custo anual de **R\$ 31.292.308,14**, ainda assim proporciona uma economia de **38,0%**. Esses resultados destacam a competitividade econômica da biomassa como alternativa ao gás natural, especialmente quando se considera o impacto do custo

logístico, que é reduzido no caso do cavaco devido à sua maior proximidade da fábrica e maior densidade energética, que exige menos viagens por dia para suprir a demanda por combustível.

Além disso, a flexibilidade do sistema permite alternar entre cavaco e bagaço de cana, dependendo da sazonalidade e das condições de mercado, otimizando os custos conforme a oferta mais vantajosa. Essa abordagem reduz riscos relacionados à variabilidade de preços e garante maior estabilidade financeira para a operação da fábrica.

Essa redução de custos operacionais, combinada com a manutenção dos níveis de eficiência e sustentabilidade ambiental, reforça a viabilidade econômica da transição energética. Na próxima seção, uma análise econômica detalhada consolidará os benefícios financeiros dessa mudança, considerando indicadores como **VPL**, **payback** e **TIR**.

5.4.3.3 Análise econômica do projeto (VPL, Payback, TIR)

A análise econômica é uma etapa fundamental para avaliar a viabilidade financeira da substituição do gás natural por biomassa. Essa análise será baseada no cálculo do fluxo de caixa projetado para o cenário otimizado, considerando tanto os investimentos iniciais quanto os custos operacionais ao longo do tempo. Os principais indicadores financeiros a serem utilizados incluem o **Valor Presente Líquido (VPL)**, o **Payback** e a **Taxa Interna de Retorno (TIR)**.

Um ponto relevante nesta análise é a premissa de que a empresa já dispõe de recursos financeiros suficientes em caixa para realizar o investimento inicial de **R\$ 48 milhões**, sem necessidade de recorrer a financiamentos ou empréstimos. Isso elimina custos financeiros relacionados a juros e impacta positivamente os resultados da análise, permitindo que os benefícios do projeto sejam avaliados de forma mais direta.

O cálculo será realizado com base em um horizonte temporal de **10 anos**, considerando:

- **Investimentos iniciais:** R\$ 48 milhões, detalhados na seção anterior. Com 6 meses de tempo de construção
- **Custos operacionais anuais:** Valores apresentados para cavaco de eucalipto e bagaço de cana.
- **Redução de custos em relação ao gás natural:** Percentuais já determinados nas análises anteriores.
- **Taxa de desconto:** Adotada conforme o custo médio ponderado de capital (WACC) para o setor industrial no Brasil, estimado em linha a SELIC de **11,25% ao ano** (novembro/2024) (BANCO CENTRAL, 2024)

A metodologia para cálculo será estruturada da seguinte forma:

- A. **Fluxo de Caixa:** Construção de uma projeção mensal com base nos investimentos iniciais, custos variáveis e economias geradas pela substituição do gás natural.
- B. **VPL (Valor Presente Líquido):** Cálculo do valor atual dos fluxos de caixa descontados, para avaliar se o projeto gera valor ao longo do tempo.
- C. **Payback:** Determinação do tempo necessário para recuperar o investimento inicial, comparando receitas e economias acumuladas.
- D. **TIR (Taxa Interna de Retorno):** Cálculo da taxa que iguala o VPL a zero, indicando a rentabilidade percentual do projeto.

Essa análise permitirá consolidar os benefícios econômicos da transição, oferecendo uma visão clara do retorno financeiro e dos impactos de longo prazo no custo operacional da fábrica. Além disso, cenários conservadores e otimistas serão considerados na próxima seção (análise de sensibilidade), avaliando possíveis variações nos custos da biomassa e demais variáveis. Veja abaixo os resultados:

Tabela 14: Resultado da análise econômica

Tipo de Biomassa	WACC	VPL	TIR	Payback
Cavaco de eucalipto	11,25%	R\$ 91.497.541,20	50,25%	30 meses
Bagaço de Cana	11,25%	R\$ 59.705.941,10	37,74%	37 meses

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em dados de mercado e operacionais

Tabela 15: Fluxo de caixa resumido

Tipo de Biomassa	Mês 0	Mês 1	Mês 2	...	Mês 119	Mês 120
Cavaco de eucalipto	-R\$ 48.000.000	R\$ -	R\$ -	...	R\$ 2.073.941,80	R\$ 2.073.941,80
Bagaço de Cana	-R\$ 48.000.000	R\$ -	R\$ -	..	R\$ 1.599.845,95	R\$ 1.599.845,95

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em dados de mercado e operacionais

Os resultados da análise econômica demonstram a viabilidade financeira da transição para o uso de biomassa, tanto com cavaco de eucalipto quanto com bagaço de cana, embora o cavaco de eucalipto apresente uma vantagem significativa. Com um **VPL de R\$ 91.497.541,20**, uma **TIR de 50,25%** e um **payback de apenas 30 meses**, a alternativa do cavaco de eucalipto destaca-se como a opção mais atraente financeiramente. Esse desempenho superior deve-se ao custo operacional mais baixo e à proximidade da fonte de biomassa, o que reduz significativamente os custos logísticos.

Por outro lado, o bagaço de cana, apesar de apresentar números robustos com um **VPL de R\$ 59.705.941,10**, **TIR de 37,74%** e um **payback de 37 meses**, possui um custo total superior, principalmente devido ao maior custo logístico associado à sua distância em relação à fábrica e a menor densidade energética, que exige maior volume de material. Ainda assim, é uma alternativa viável e pode ser utilizada como opção complementar ou em cenários específicos de variação de mercado e oferta.

Os cálculos de fluxo de caixa corroboram a atratividade do investimento em ambos os casos. A geração de economias anuais significativas com a substituição do gás natural por biomassa, aliada à ausência de custos financeiros com empréstimos, assegura que o retorno do investimento seja rápido e sustentável. Além disso, os altos índices de TIR em ambos os cenários superam amplamente o WACC considerado (11,25%), confirmando a rentabilidade do projeto.

Dessa forma, a análise econômica consolida os argumentos a favor da transição energética para biomassa, especialmente com o cavaco de eucalipto, que combina uma redução expressiva de custos operacionais com um impacto ambiental positivo. Na próxima seção, será realizada a avaliação final, de viabilidade ambiental, que busca avaliar se estes cenários realmente reduzem as emissões da fábrica, a fim de consolidar a recomendação final deste estudo.

5.4.3. Viabilidade Ambiental

A viabilidade ambiental é um dos pilares fundamentais para justificar a substituição do gás natural por biomassa na fábrica analisada. Nesta seção, será avaliado o impacto das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao cenário otimizado, com base nos resultados do GHG Protocol. O objetivo principal é verificar se a transição energética realmente contribui para uma redução significativa das emissões, alinhando-se aos compromissos de sustentabilidade e às metas globais de descarbonização.

A análise será conduzida para resultar em conclusões acerca de:

- **Estimativa de emissões no cenário otimizado:** Cálculo das emissões de GEE associadas ao uso de biomassa (cavaco de eucalipto e bagaço de cana), considerando os fatores de emissão disponíveis no GHG Protocol, já incluindo o incremento de emissões via diesel por causa do transporte do combustível.
- **Comparação com o cenário As-Is:** Identificação da redução percentual de emissões obtida pela substituição do gás natural, analisando a eficiência do sistema em termos de impacto ambiental.
- **Impactos adicionais:** Avaliação qualitativa de outros impactos ambientais, como a geração de material particulado e a pegada de transporte da biomassa, para averiguar segurança do cenário otimizado.

A análise levará em conta a natureza renovável da biomassa, destacando que o carbono emitido durante sua combustão é reabsorvido pelas plantas durante o crescimento, estabelecendo um ciclo fechado de carbono. No entanto, emissões residuais relacionadas ao transporte e à produção da biomassa serão consideradas para garantir uma visão completa e realista do impacto ambiental.

Ao final desta seção, espera-se confirmar que a transição para biomassa não apenas reduz as emissões de GEE, mas também fortalece o compromisso ambiental da fábrica com uma operação mais limpa e sustentável.

5.4.3.1. Cálculo das emissões dos cenários otimizados e comparação com As-Is

Nesta subseção, será realizado o cálculo das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas aos cenários otimizados com biomassa, considerando tanto o cavaco de eucalipto quanto o bagaço de cana como fontes energéticas. A metodologia adotada seguirá os princípios do **GHG Protocol**, mesmo método usado no cenário *As-Is*, que estabelece diretrizes para mensuração e reporte de emissões de GEE, garantindo uma análise robusta e comparável.

O cálculo será estruturado considerando que a **absorção de carbono pela biomassa como emissão biogênica (GHG PROTOCOL, 2023)**. Como a biomassa é uma fonte renovável, o carbono emitido durante sua combustão será compensado pelo carbono capturado pelas plantas durante o seu crescimento, resultando em emissões líquidas reduzidas. Além disso, os cálculos incluirão as seguintes premissas:

- Os fatores de emissão da biomassa serão baseados em dados científicos divulgados e alinhados às recomendações do GHG Protocol (Ver ANEXO B)

- As emissões associadas ao transporte da biomassa considerarão o consumo de diesel dos caminhões, conforme calculado na análise logística.
- Para uma comparação direta, os resultados das emissões dos cenários otimizados serão confrontados com as emissões do cenário *As-Is*

Com estas premissas estabelecidas, segue o resultado dos cálculos realizados nas tabelas abaixo:

Tabela 16: Estimativa da quantidade adicional de diesel consumida

Tipo de Biomassa	Viagens de caminhão por dia	Distância até fábrica (km)	Eficiência caminhão (km/l)	Litros por viagem	Litros por dia	m ³ por ano
	<i>Fonte dos dados</i>					
	<i>Calculado</i>	<i>Google Earth</i>	<i>ANTT</i>	<i>Calculado</i>		
Cavaco de Eucalipto	8,00	28,00	3,00	9,33	74,67	27,25
Bagaço de Cana	10,00	36,20	3,00	12,07	120,67	44,04

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em dados de mercado e operacionais

Tabela 17: Cálculo das emissões associadas a cada cenário

Descrição da fonte		Cavaco de Eucalipto		Bagaço de Cana	
Fonte de geração de energia		Biomassa	Óleo Diesel (comercial)	Biomassa	Óleo Diesel (comercial)
Quantidade consumida		83.610,55	27.253,33	108.757,00	44.043,33
Unidades		ton	litros	ton	litros
A fonte utilizada é formada por:	Combustível fóssil	-	89% Óleo Diesel (puro)	-	89% Óleo Diesel (puro)
	Fontes renováveis	Cavaco de Eucalipto	12% Biodiesel (B100)	Bagaço de Cana	12% Biodiesel (B100)
Quantidade consumida por fonte	Combustível fóssil	-	24.119,20	-	38.978,35
	Fontes renováveis	83.610,55	3.134,13	108.757,00	5.064,98
Fatores de emissão - combustíveis fósseis	CO2 (kg/un)	-	2,60E+00	-	2,60E+00
	CH4 (kg/un)	-	1,39E-04	-	1,39E-04
	N2O (kg/un)	-	1,39E-04	-	1,39E-04
Fatores de emissão - Fontes renováveis	CO2 (kg/un)	1,45E+03	2,43E+00	8,93E+02	2,43E+00
	CH4 (kg/un)	3,89E-01	3,32E-04	2,68E-01	3,32E-04
	N2O (kg/un)	5,19E-02	1,99E-05	3,57E-02	1,99E-05
Combustíveis fósseis	Emissões CO2 (t)	0,00	62,78	0,00	101,46
	Emissões CH4 (t)	0,00	0,00	0,00	0,01
	Emissões N2O (t)	0,00	0,00	0,00	0,01
Fontes renováveis	Emissões CO2 (t)	121.360,19	7,62	97.085,22	12,31
	Emissões CH4 (t)	32,56	0,00	29,10	0,00
	Emissões N2O (t)	4,34	0,00	3,88	0,00
Emissões de GEE totais por fonte t CO2e		2.061,86	63,81	1.842,78	103,12
Emissões biogênicas por fonte t CO2		121.360,19	7,62	97.085,22	12,31
Emissões de GEE totais t CO2e		2.125,66		1.945,89	
Emissões biogênicas totais t CO2		121.367,81		97.097,54	

Fonte: Elaboração do autor, com base em dados disponibilizados pela empresa e GHG Protocol Brasil

Tabela 18: Resultado consolidado comparativo dos cenários analisados

Cenário	Emissões de GEE totais ton CO ₂ e	Emissões biogênicas totais ton CO ₂	Variação	
			Totais	Biogênicas
As-Is	47.658,11	281,11		
Otimizado – Cavaco de Eucalipto	2.125,66	121.367,81	-95,5%	+43073,9%
Otimizado – Bagaço de Cana	1.945,89	97.097,54	-95,9%	+34440,3%

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em dados de mercado e operacionais

Os cálculos realizados para os cenários otimizados, utilizando **cavaco de eucalipto** e **bagaço de cana**, demonstraram uma redução significativa nas emissões de gases de efeito

estufa (GEE) em comparação com o cenário atual baseado no uso de gás natural. O cenário *As-Is* apresenta emissões totais de **47.658,11 toneladas de CO₂e**, enquanto os cenários otimizados registram valores de **2.125,66 toneladas de CO₂e** para o cavaco de eucalipto e **1.945,89 toneladas de CO₂e** para o bagaço de cana, representando uma redução de aproximadamente **96%** em ambos os casos.

No que diz respeito às emissões biogênicas, que são inerentes à combustão da biomassa, o cenário otimizado com cavaco de eucalipto apresenta **121.367,81 toneladas de CO₂**, enquanto o bagaço de cana gera **97.097,54 toneladas de CO₂**. Essas emissões, no entanto, são compensadas pelo ciclo fechado de carbono da biomassa, no qual o carbono emitido durante a combustão é reabsorvido pelas plantas durante o seu crescimento, garantindo a sustentabilidade do processo.

Os principais fatores que contribuem para a redução drástica das emissões totais incluem:

- A substituição do gás natural, uma fonte fóssil, por biomassa, uma fonte renovável.
- O baixo impacto das emissões associadas ao transporte da biomassa, que permanece dentro de limites aceitáveis em termos de logística.
- A eficiência operacional do sistema de gases quentes projetado, que maximiza o aproveitamento energético da biomassa.

Apesar de ambos os cenários otimizados apresentarem resultados positivos, o **bagaço de cana** registra emissões ligeiramente menores, devido aos seus menores fatores de emissão. No entanto, a diferença é marginal e não compromete a viabilidade do uso do cavaco de eucalipto, que se destaca pela proximidade logística e ampla vantagem econômica nos KPIs de VPL, Payback e TIR.

5.4.3.2. Conclusões sobre viabilidade ambiental

A análise ambiental consolidada dos cenários otimizados confirmou que a transição do gás natural para biomassa na fábrica é altamente viável sob a perspectiva de sustentabilidade. O uso de biomassa, seja cavaco de eucalipto ou bagaço de cana, resulta em uma redução expressiva das emissões de gases de efeito estufa (GEE), alcançando um percentual de **96%** em relação ao cenário atual. Essa mudança posiciona a fábrica em um patamar de alta eficiência ambiental, alinhando-se às diretrizes globais de mitigação das mudanças climáticas.

As emissões biogênicas associadas ao uso de biomassa, embora significativas, não comprometem a viabilidade ambiental do projeto, já que o carbono emitido durante a combustão é naturalmente compensado pelo ciclo de crescimento das plantas. Esse ciclo

fechado de carbono garante que a biomassa seja uma solução sustentável, reduzindo drasticamente o impacto ambiental sem comprometer a eficiência operacional.

No entanto, além das emissões de GEE, é necessário considerar a geração de material particulado durante a combustão da biomassa. Este é um fator relevante que pode ter implicações para a qualidade do ar local e deve ser analisado em estudos futuros. Ainda assim, as evidências indicam que essas emissões não inviabilizarão a sustentabilidade do projeto, por dois motivos principais:

- O material particulado gerado será mitigado por sistemas de filtragem nos novos equipamentos, projetados especificamente para reduzir o impacto ambiental.
- O material que eventualmente não for filtrado tende a se depositar no solo nas proximidades da fábrica, onde pode ser absorvido e até utilizado como condicionador orgânico para o solo, dependendo de sua composição e gestão.

Essas medidas preventivas garantem que o aumento de material particulado seja administrado adequadamente. Também, a análise demonstrou que ambos os tipos de biomassa apresentam vantagens ambientais complementares:

- O **cavaco de eucalipto**, com maior disponibilidade logística e proximidade da fábrica, minimiza as emissões associadas ao transporte.
- O **bagago de cana**, por sua vez, apresenta uma menor pegada biogênica por tonelada, devido à sua composição energética e fatores de emissão menores.

Ambos os cenários atendem aos critérios de viabilidade ambiental e representam soluções viáveis para a transição energética da fábrica. No entanto, a flexibilidade no uso dessas fontes permite que a fábrica opte pelo melhor recurso conforme a sazonalidade, preços de mercado e condições logísticas, garantindo estabilidade no abastecimento e minimizando impactos ambientais ao longo do tempo.

Por fim, os resultados obtidos consolidam o projeto destacando a viabilidade ambiental, demonstrando que a transição para biomassa é uma solução sustentável. Essa mudança contribuirá para a redução das emissões de GEE, e para fortalecer a imagem sustentável da operação industrial, agregando valor social, ambiental e estratégico à sua cadeia produtiva.

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise realizada consolidou que a transição para biomassa apresenta benefícios robustos em termos técnicos, econômicos e ambientais. A viabilidade técnica foi confirmada pela compatibilidade do sistema de geração de gases quentes adaptado à biomassa, validado por estudos realizados em parceria com a ICAVI e por visitas a instalações similares. Além disso, a infraestrutura logística disponível na fábrica, com espaço para armazenamento e um fluxo gerenciável de caminhões diários, reforça a operacionalidade do projeto.

No campo econômico, a substituição do gás natural por biomassa mostrou-se vantajosa, com redução de até **50% no custo operacional anual**, dependendo da biomassa escolhida. Os cálculos indicaram um **VPL positivo**, com payback de **30 meses para o cavaco de eucalipto** e **37 meses para o bagaço de cana**, ambos valores atrativos para projetos industriais. Essa viabilidade é reforçada pela proximidade das fontes de biomassa, que mantém os custos logísticos em patamares aceitáveis.

Do ponto de vista ambiental, os cenários otimizados indicaram uma redução de emissões de gases de efeito estufa de mais de **95%** em comparação ao cenário atual. Embora haja aumento nas emissões de material particulado, a instalação de filtros no sistema de gases quentes e a capacidade da biomassa de retornar seus resíduos ao ciclo natural, como fertilizantes, garantem que o impacto seja mitigado de maneira sustentável.

6.1 Limitações do Estudo

Apesar dos resultados promissores, o estudo apresenta algumas limitações que devem ser abordadas em trabalhos futuros:

- **Escopo limitado das emissões:** O estudo focou nos escopos 1 (combustão) e 2 (energia elétrica adquirida), excluindo o **escopo 3**, que considera emissões relacionadas a todos os terceiros envolvidos na fábrica. Assim, os resultados refletem apenas parte do impacto total da fábrica no seu ciclo de vida.
- **Material particulado:** Embora não inviabilize o projeto, o aumento nas emissões de material particulado requer atenção. Estudos complementares devem avaliar os impactos locais e regionais desse poluente, considerando a instalação de filtros mais eficientes e medidas compensatórias.
- **Frota logística:** A eletrificação da frota, discutida como possível próximo passo, foi apenas mencionada e não avaliada em detalhes. Estudos adicionais sobre custo-

benefício e maturidade tecnológica são necessários para incorporar essa estratégia ao plano de transição energética.

6.2 Análise de Sensibilidade

Para complementar a discussão, a análise de sensibilidade é crucial para avaliar a robustez dos cenários analisados frente a variações nos parâmetros mais influentes: **preço da biomassa, do gás e distância dos fornecedores**. Abaixo estão os resultados das simulações:

6.2.1 Variação no preço da biomassa

Considerou-se uma variação no preço da biomassa de **-20% a +20%** em relação ao custo médio de R\$ 300/ton para cavaco de eucalipto e R\$ 280/ton para bagaço de cana.

Tabela 19: Análise de sensibilidade ao preço da biomassa - TIR

Preço da Biomassa (R\$/ton)	Cavaco de Eucalipto	Bagaço de Cana
-20%	61%	51%
Custo Base	50%	38%
20%	39%	23%

Fonte: Elaborado pelo autor

Resultado: Mesmo com o aumento de 20% no preço da biomassa, os cenários otimizados permanecem economicamente vantajosos, embora com redução na TIR.

6.2.2 Variação no preço do gás

Considerou-se uma variação no preço do gás de **-20%, -30% e -40%** em relação ao custo médio de R\$2,41/m³, cujos resultados estão na tabela abaixo:

Tabela 20: Análise de sensibilidade ao preço do gás - TIR

Preço do gás natural (R\$/m ³)	Cavaco de Eucalipto	Bagaço de Cana
Custo Base	50%	38%
-20%	28%	13%
-30%	15%	Negativa
-40%	Negativa	Negativa

Fonte: Elaborado pelo autor

Resultado: Os resultados da análise de sensibilidade ao preço do gás natural mostram que, mesmo com reduções significativas no custo por metro cúbico, as alternativas baseadas em biomassa continuam competitivas e economicamente viáveis, principalmente o cavaco de eucalipto. No cenário base, com o preço médio do gás natural em R\$ 2,41/m³, a TIR associada ao cavaco de eucalipto é de 50%, enquanto a do bagaço de cana é de 38%. Com uma redução de 20% no preço do gás, a TIR do cavaco de eucalipto permanece robusta em 28%, enquanto a do bagaço de cana cai para 13%, ainda acima da WACC de 11,25%. Já com uma redução de 30%, o cavaco de eucalipto ainda mantém uma TIR positiva de 15%, enquanto o bagaço de cana apresenta valores negativos, indicando inviabilidade. Em um cenário extremo, com uma redução de 40%, ambas as alternativas se tornam economicamente inviáveis em comparação ao gás natural.

Esses resultados reforçam que o gás natural precisaria ter uma queda expressiva de custo para competir com as alternativas de biomassa. No entanto, tal cenário é improvável devido às tendências de mercado e geopolíticas. Primeiramente, a Bolívia, um dos principais fornecedores de gás para o Brasil, enfrenta dificuldades para manter os níveis de exportação e deve priorizar o mercado interno (Brasil de Fato, 2024), o que pode reduzir o volume disponível para importação. Outro ponto importante é que o gás fornecido pela Bolívia é amplamente subsidiado, o que mascara seus custos reais. Com a redução das exportações bolivianas, o Brasil dependerá mais de gás importado via GNL (Gás Natural Liquefeito), que é significativamente mais caro devido aos custos de liquefação e transporte marítimo.

Estas e outras tendências levaram a Empresa de Pesquisas Energéticas a estimar, no PDE 2030, que o cenário de referência indica aumento de US\$ 10,7/MMBtu em 2021 para US\$ 12,3/MMBtu em 2030, enquanto o cenário de alta chega a US\$ 20,4/MMBtu. A tendência de elevação reflete fatores como maior dependência de GNL e redução da oferta boliviana. Já o cenário de baixa, com US\$ 9,5/MMBtu, considera maior produção doméstica. Ou seja, nem no cenário mais otimista da EPE o preço do gás chegaria aos 40% de redução necessários para manter o gás como alternativa melhor a biomassa. Esses dados reforçam a viabilidade de alternativas renováveis, como a biomassa, para mitigar custos crescentes e aumentar a sustentabilidade energética.

Além disso, os avanços tecnológicos e a sustentabilidade do setor energético brasileiro apontam para a priorização de fontes renováveis, o que reduz a atratividade de investimentos em gás natural como solução de longo prazo. Portanto, a tendência de aumento no custo do gás natural reforça a robustez econômica das alternativas baseadas em biomassa, especialmente o

cavaco de eucalipto, cuja proximidade à fábrica de Indaiatuba minimiza os custos logísticos e garante estabilidade operacional e financeira.

Dessa forma, os resultados da análise de sensibilidade corroboram a viabilidade econômica da substituição do gás natural por biomassa no sistema de geração de gases quentes da fábrica.

6.2.3 Variação na distância dos fornecedores de biomassa

Para testar a sensibilidade à distância, considerou-se uma variação no deslocamento médio dos caminhões, aumentando 50% e 100% na distância base (28 km para cavaco de eucalipto e 36 km para bagaço de cana).

Tabela 21: Análise de sensibilidade a distância da biomassa – Redução de emissões

Distância da Biomassa (km)	Cavaco de Eucalipto	Bagaço de Cana
Distância Base	-95,6%	-95,9%
50%	-95,4%	-95,8%
100%	-95,2%	-95,5%

Fonte: Elaborado pelo autor

Resultado: A proximidade das fontes reforça a vantagem logística da fábrica, que mantém seus resultados de diminuição de impacto ambiental mesmo se a distância média dobrar.

Os resultados da análise de sensibilidade confirmam que o cenário otimizado permanece robusto mesmo diante de variações significativas nos custos de biomassa e logística. O cavaco de eucalipto se destaca como a alternativa mais resiliente devido à proximidade com a fábrica, enquanto o bagaço de cana, embora competitivo, depende de maior estabilidade nos custos de transporte para manter sua viabilidade econômica.

A análise reforça que a transição para biomassa oferece ganhos imediatos em custos e emissões, além de uma estrutura sustentável e adaptável para o futuro energético da fábrica. Essa abordagem servirá como modelo para outras operações industriais em busca de soluções sustentáveis e economicamente viáveis.

6.3 Próximos Passos e Estudos possíveis

Para consolidar os benefícios da transição e explorar oportunidades adicionais, os próximos passos e estudos que o autor indicaria a empresa incluem:

- **Realização de testes operacionais com diferentes tipos de biomassa:** Simular condições reais de operação para confirmar os resultados teóricos, garantindo estabilidade de abastecimento e desempenho do sistema.
- **Plano de eletrificação da frota interna:** Analisar o custo-benefício e viabilidade técnica da substituição das empilhadeiras e caminhões atuais por veículos elétricos, avaliando a infraestrutura necessária e impacto no custo operacional.
- **Estudo de sazonalidade das biomassas:** Avaliar a possibilidade de diversificação do uso de cavaco de eucalipto e bagaço de cana, otimizando custos e garantindo estabilidade de abastecimento.
- **Expansão da análise para Escopo 3:** Integrar impactos de fornecedores e transporte de insumos no cálculo de emissões, ampliando a visão sistêmica da pegada de carbono da fábrica.

Esses passos permitirão consolidar a transição para biomassa e explorar novas estratégias para reduzir ainda mais as emissões, aumentando a competitividade e sustentabilidade do negócio

7. CONCLUSÃO

Este estudo abordou a análise e proposição de cenários de transição energética em uma das maiores fábricas de sabão em pó do Brasil, situada em Indaiatuba-SP, analisando a viabilidade da substituição do gás natural por biomassa como fonte de energia renovável. Desde a introdução, destacou-se a relevância do tema no contexto das mudanças climáticas, das crescentes demandas por sustentabilidade no setor industrial e do papel central do engenheiro de produção na integração de soluções eficientes e ambientalmente responsáveis.

Ao longo do trabalho, foram realizados estudos detalhados que envolveram análises técnica, econômica e ambiental, utilizando metodologias rigorosas baseadas em benchmarks da literatura e dados específicos da fábrica estudada. O processo incluiu visitas in loco, consultas a especialistas e cálculos precisos, como os realizados com base no GHG Protocol e na modelagem de fluxos de caixa, que fundamentaram as decisões e conclusões apresentadas.

Os principais resultados demonstraram que a biomassa, especialmente o cavaco de eucalipto e o bagaço de cana, é uma alternativa viável para substituir o uso de gás natural na planta industrial, tanto do ponto de vista operacional quanto econômico. Ela mantém o processo crucial de *Spray-Drying* efetivo, enquanto diminui os custos e impactos ambientais. A análise técnica comprovou que a substituição é factível dentro da infraestrutura existente, com baixos impactos nas operações. Na vertente econômica, evidenciou-se um potencial significativo de redução de custos variáveis, com VPLs de R\$ 91 milhões e R\$ 59 milhões para os dois cenários analisados. Do ponto de vista ambiental, a redução de emissões totais de GEE ultrapassou 95%, reforçando o alinhamento da proposta com os objetivos de sustentabilidade corporativa e global.

Apesar dos avanços significativos, reconheceu-se a existência de limitações. A análise não abarcou emissões de escopos adicionais, como o escopo 3, e apontou desafios futuros, como o gerenciamento de material particulado e a possibilidade de eletrificação da frota logística. Essas questões abrem caminhos para novos estudos, complementando a base robusta já desenvolvida.

A relevância desta pesquisa vai além da aplicação específica na fábrica estudada, contribuindo para o avanço da Engenharia de Produção no Brasil ao demonstrar como metodologias integradas podem viabilizar soluções energéticas mais sustentáveis. Este trabalho reafirma a importância de práticas inovadoras para unir competitividade industrial com compromisso ambiental, indicando que o futuro da produção deve estar intrinsecamente ligado à sustentabilidade.

Com isso, encerra-se este estudo, confiando que ele servirá como referência para futuros projetos e como inspiração para engenheiros que buscam integrar eficiência, responsabilidade e inovação em suas práticas profissionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADRIANA DANTAS, MARC PIELLA-RIFÀ, DIOGO PONTES COSTA, XAVIER FELIPE, PERE GOU. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application, *Applied Food Research*, Volume 4, Issue 1, 2024, 100382, ISSN 2772-5022, <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>.
2. BANCO CENTRAL. Eleva Selic a 11,25% e defende ‘apresentação e execução’ de medidas fiscais” – O Globo. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/financas/noticia/2024/11/06/banco-central-pisa-no-acelerador-e-eleva-taxa-selic-em-050-ponto-para-1125percent.ghtml>
3. BASSI, L. A. F. Análise exergética e ambiental da substituição de carvão mineral por biomassa em centrais termelétricas no Brasil. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica: Ênfase em Energia e Fluidos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.
4. BENJAMIN K. SOVACOO, JINSOO KIM, MINYOUNG YANG. The hidden costs of energy and mobility: A global meta-analysis and research synthesis of electricity and transport externalities. *Energy Research & Social Science*, Volume 72, 2021, 101885, ISSN 2214-6296, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101885>.
5. CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Fly-Ash from Biomass Burning: Applications and Potentialities. *Revista Virtual de Química*, v. 7, n. 6, p. 2154–2165, 2015. DOI: 10.5935/1984-6835.20150127.
6. CADERNO DE CUSTOS GERAÇÃO E TRANSMISSÃO_PDE2034_2024.09.06. Empresa de Pesquisas Energéticas. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/Caderno%20de%20Custos%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20e%20Transmiss%C3%A3o_PDE2034_2024.09.06.pdf
7. CAÑAMERO, F.J.; DORAISINGAM, A.R.; ÁLVAREZ-LEAL, M. Mixing Performance Prediction of Detergent Mixing Process Based on the Discrete Element Method and Machine Learning. *Appl. Sci.* 2023, 13, 6094. <https://doi.org/10.3390/app13106094>.
8. CHERUBINI, F., ET AL. Energy- and Greenhouse Gas-Based LCA of Biofuel and Bioenergy Systems: Key Issues, Ranges and Recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(8), 434-447. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.03.013.
9. CHUM, H. L., ET AL. Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.

10. COMBIO. Empresa especializada em fornecimento de biomassa e operação de caldeiras.
Site: https://combio.com.br/pt_br/.
11. DEMIRBAS, A. Biomass and Carbon Capture and Storage Technology. *Energy Conversion and Management*, 50(10), 2717-2722.
12. DRIELLI PEYERL; RELVA, S.; VINÍCIUS DA SILVA. *Energy Transition in Brazil*. [s.l.] Springer Nature, 2023.
13. EFICIÊNCIA DE CAMINHÃO. *Revista Transporta Brasil*. Disponível em:
https://www.transportabrasil.com.br/2023/07/testamos-o-mercedes-benz-atego-3033-8x2-euro-6-bitruck-na-rodovia/?utm_source=chatgpt.com.
14. FERRAMENTA DE CÁLCULO DE EMISSÕES DE GEE. Disponível em:
<https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>.
15. FLEURY, AFONSO. O que é Engenharia de Produção? In: *Introdução à Engenharia de Produção*. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2007. p. 1-5.
16. GAHANE, D., BISWAL, D. & MANDAVGANE, S.A. Life Cycle Assessment of Biomass Pyrolysis. *Bioenerg. Res.* 15, 1387–1406 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10390-9>.
17. GAVRILESCU, M. Biomass Power for Energy and Sustainable Development. *Environmental Engineering and Management Journal*, 7(5), 617-640. DOI: 10.30638/eemj.2008.073.
18. GOH, C. S., ET AL. Biomass energy in Malaysia: Current state and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 371-376. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.046.
19. HAMELINCK, C. N., ET AL. Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass. *Journal of Power Sources*, 152, 36-47. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.070.
20. ICAVI. Fabricante de sistemas de geração de gases quentes. Site: <https://icavi.ind.br/pt>.
21. IEA. *Municipal Solid Waste and its Role in Sustainability*, 2003. Disponível em:
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/40_IEAPositionPaperMSW.pdf.
22. ÍNDICE DE FRETE EDENRED REPOM (IFR). Disponível em:
<https://economia.uol.com.br/noticias/estadao-conteudo/2024/09/13/preco-do-frete-por-quilometro-rodado-sobe-047-em-agosto-ante-julho-aponta-ifr.htm>.
23. INÍCIO. Coluna | O gás boliviano continua relevante para o Brasil, apesar do seu declínio e das incertezas políticas. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2024/07/08/o->

- gas-boliviano-continua-relevante-para-o-brasil-apesar-do-seu-declinio-e-das-incertezas-politicas. Acesso em: 25 nov. 2024.
24. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Municipal Solid Waste and its Role in Sustainability, 2020.
 25. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2020.
 26. KARELLAS, S., ET AL. Solar thermal plants for electricity generation: A comparative overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 2865-2873.
 27. MONLAU, F., ET AL. Anaerobic digestion of waste biomass for bioenergy production: A review. *Bioresource Technology*, 150, 123-132.
 28. PEREIRA, A. S. Uso de Pellets de madeira para fins energéticos: pesquisa de mercado. V Prêmio SFB em Estudos de Economia e Mercado Florestal, 2019.
 29. PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2031. Capítulo 12 – Empresa de Pesquisas Energéticas. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf.
 30. SAWATDEENARUNAT, C., ET AL. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 178, 178-186. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.09.103.
 31. SCULLY, M. J., NORRIS, G. A., ALARCON FALCONI, T. M., AND MACINTOSH, D. L. Carbon intensity of corn ethanol in the United States: state of the science. *Environmental Research Letters*, 16, 043001.
 32. SEARCHINGER, T., ET AL. Fixing a Critical Climate Accounting Error. *Science*, 326(5952), 527-528. DOI: 10.1126/science.1178797.
 33. SLADE, R., ET AL. Global Bioenergy: Supply and Demand Projections. *Biomass and Bioenergy*, 68, 494-503. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.06.012.

ANEXOS

ANEXO A – Fotos adicionais da visita à fábrica realizada pelo autor (Indaiatuba – SP)



ANEXO B – Tabela de fatores de emissão do GHG Protocol Brasil 2023

Tabela 22: Fatores de emissão para combustão de fontes estacionárias (2023)

			Fatores de emissão do setor:		
Nº ref.	Tipo de combustível	Unidade	CO2 (kg/un)	CH4 (kg/un)	N2O (kg/un)
Combustíveis fósseis					
2	Acetileno	kg	3	-	-
3	Alcatrão	m³	2.888	0,35797	0,05370
4	Asfaltos	m³	3.389	0,12604	0,02521
5	Carvão Metalúrgico Importado	Toneladas	2.931	0,30982	0,04647
6	Carvão Metalúrgico Nacional	Toneladas	2.543	0,26879	0,04032
7	Carvão Vapor 3100 kcal / kg	Toneladas	1.250	0,12351	0,01853
8	Carvão Vapor 3300 kcal / kg	Toneladas	1.313	0,12979	0,01947
9	Carvão Vapor 3700 kcal / kg	Toneladas	1.483	0,14654	0,02198
10	Carvão Vapor 4200 kcal / kg	Toneladas	1.609	0,16747	0,02512
11	Carvão Vapor 4500 kcal / kg	Toneladas	1.709	0,17794	0,02669
12	Carvão Vapor 4700 kcal / kg	Toneladas	1.763	0,18631	0,02795
13	Carvão Vapor 5200 kcal / kg	Toneladas	1.971	0,20515	0,03077
14	Carvão Vapor 5900 kcal / kg	Toneladas	2.218	0,23446	0,03517
15	Carvão Vapor 6000 kcal / kg	Toneladas	2.258	0,23865	0,03580
16	Carvão Vapor sem Especificação	Toneladas	1.208	0,11932	0,01790
17	Coque de Carvão Mineral	Toneladas	3.093	0,28889	0,04333
18	Coque de Petróleo	m³	3.563	0,10960	0,02192
19	Etano	Toneladas	2.858	0,04640	0,00464
20	Gás de Coqueria	Toneladas	1.717	0,03870	0,00387
21	Gás de Refinaria	Toneladas	2.850	0,04950	0,00495
22	Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	Toneladas	2.931	0,04647	0,00465
23	Gás Natural Seco	m³	2,07	0,00004	0,00000
24	Gás Natural Úmido	m³	2,33	0,00004	0,00000
25	Gasolina Automotiva (pura)	Litros	2,24	0,00010	0,00002
26	Gasolina de Aviação	Litros	2,26	0,00010	0,00002
27	Líquidos de Gás Natural (LGN)	Toneladas	2.836	0,13260	0,02652
28	Lubrificantes	Litros	2,72	0,00011	0,00002
29	Nafta	m³	2.291	0,09373	0,01875
30	Óleo Combustível	Litros	3,11	0,00012	0,00002
31	Óleo de Xisto	Toneladas	2.793	0,11430	0,02286
32	Óleo Diesel (puro)	Litros	2,63	0,00011	0,00002
33	Óleos Residuais	Toneladas	2.947	1,20600	0,16080
34	Outros Produtos de Petróleo	Toneladas	3.132	0,12812	0,02562
35	Parafina	Toneladas	2.947	0,12060	0,02412
36	Petróleo Bruto	m³	2.931	0,11992	0,02398

37	Querosene de Aviação	Toneladas	3.113	0,13063	0,02613
38	Querosene Iluminante	Toneladas	3.129	0,13063	0,02613
39	Resíduos Industriais	TJ	143.000	30,00000	4,00000
40	Resíduos Municipais (fração não-biomassa)	Toneladas	917	0,30000	0,04000
41	Solventes	Litros	2,40	0,00010	0,00002
42	Turfa	Toneladas	1.035	0,01952	0,01464
43	Xisto Betuminoso e Areias Betuminosas	Toneladas	952	0,08900	0,01335
Biocombustíveis					
49	Etanol Anidro	Litros	1,58	0,00007	0,00001
50	Etanol Hidratado	Litros	1,51	0,00006	0,00001
51	Bagaço de Cana	Toneladas	893	0,26754	0,03567
52	Biodiesel (B100)	Litros	2,46	0,00010	0,00002
53	Biogás (outros)	Toneladas	1.705	0,02000	0,00200
54	Biogás de aterro	Toneladas	1.467	0,01230	0,00123
55	Biometano	Toneladas	2.749	0,04900	0,00490
56	Caldo de Cana	Toneladas	207	0,00779	0,00156
57	Carvão Vegetal	Toneladas	2.886	5,40935	0,10819
58	Lenha Comercial	Toneladas	1.451	0,38937	0,05192
59	Licor Negro (Lixívia)	Toneladas	1.142	0,03592	0,02395
60	Melaço	Toneladas	616	0,02324	0,00465
61	Resíduos Municipais (fração biomassa)	Toneladas	1.160	0,34800	0,04640
62	Resíduos Vegetais	Toneladas	1.161	0,34800	0,04640

Fonte: GHG Protocol Brasil – FGV e Ministério do Meio Ambiente

Tabela 23: Potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa

Gás	GWP (CO ₂ e)	Referência
Dióxido de carbono (CO ₂)	1	IPCC 2013
Metano (CH ₄)	28	
Óxido nitroso (N ₂ O)	265	

Fonte: GHG Protocol Brasil – FGV e Ministério do Meio Ambiente