

ENZO CORREIA CAPRONI

PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE RESINA PET RECICLADA: UMA ANÁLISE
TÉCNICO-FINANCEIRA DE EXPANSÃO DA CAPACIDADE PRODUTIVA

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Diploma de Engenheiro de
Produção

SÃO PAULO

2025

ENZO CORREIA CAPRONI

PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE RESINA PET RECICLADA: UMA ANÁLISE
TÉCNICO-FINANCEIRA DE EXPANSÃO DA CAPACIDADE PRODUTIVA

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Diploma de Engenheiro de
Produção

Orientador: Prof. Dr. Leandro Alves da Silva

SÃO PAULO

2025

AGRADECIMENTOS

À minha mãe pelo tempo e carinho dispensado durante toda a minha criação para que eu pudesse ter a melhor educação possível.

Ao meu pai, engenheiro, por todo o carinho e pelo exemplo e apoio profissional dados desde o momento de escolha do curso de graduação.

A todos meus amigos de Goiânia e São Paulo pelo apoio e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Dario Ikuo Miyake e ao Prof. Dr. Leandro Alves da Silva por todo o ensinamento, tempo dispensado e paciência durante a execução da primeira e segunda etapa deste trabalho.

Ao time de *Investment Banking* do Banco BR Partners pela oportunidade de estágio e pelo aprendizado durante este ano de 2025.

A todos os professores da Escola Politécnica da USP, que contribuíram para minha formação pessoal e profissional e cuja lembrança levarei comigo com muito carinho.

Resumo

O presente trabalho tem como tema a avaliação de alternativas de expansão de capacidade em uma planta industrial do setor de reciclagem, com ênfase na integração entre mercado, operações e finanças. O objetivo central é estimar a necessidade de capacidade adicional e comparar arranjos de expansão, oferecendo suporte à decisão por meio de indicadores de capacidade produtiva e econômico-financeiros. Para isso, inicialmente é apresentada uma revisão dos fundamentos de previsão de demanda e de engenharia de processos. Em seguida, são discutidos conceitos de eficiência produtiva que permitem distinguir capacidade nominal e efetiva, bem como princípios de foco em gargalos para orientar a programação e o controle de produção.

A etapa empírica inicia-se com a coleta e tratamento de dados de mercado e operacionais, a fim de projetar a demanda e traduzir qual a capacidade produtiva futura necessária. Para refletir incertezas relevantes, são construídos diferentes cenários (base, otimista e pessimista). Com base nesse diagnóstico, mapeiam-se restrições, estimam-se perdas típicas e determinam-se os pontos de estrangulamento do sistema. As alternativas de expansão são então estruturadas de forma comparável, considerando opções de duplicação de etapas, aumento de turnos e expansão por inteiro da linha de produção.

Por fim, as alternativas são avaliadas por indicadores financeiros utilizados em decisões de investimento, sob o perfil de risco atrelado ao tipo de projeto analisado.

Ao aplicar os conceitos técnicos consagrados na literatura, conclui-se que expansão da fábrica de reciclagem é justificável tanto sob o ponto de vista de demanda, quanto de capacidade, contudo a garantia de retornos econômicos do projeto está sujeita ao atendimento de premissas adotadas nos cenários base e otimista de demanda.

Palavras-chave: capacidade produtiva; demanda; eficiência operacional; engenharia de processos; indicadores financeiros; decisão de investimento.

Sumário

1. Introdução	12
1.1. Problema de Pesquisa e Objetivos do Trabalho	12
1.2. Estrutura do Trabalho	13
1.3. Relevância Acadêmica e Setorial do Trabalho	14
1.4. Justificativa da Escolha do Setor e da Empresa Estudada.....	14
2. Mercado de PET no Brasil	15
2.1. Estrutura da Cadeia Produtiva de PET Reciclado	15
2.2. Participação e Distribuição Regional da Reciclagem no Brasil	18
2.3. Perfil Tecnológico e Barreiras Técnicas.....	19
2.4. Aspectos Econômicos e de Precificação	21
2.5. Políticas Públicas e Regulação	22
2.6. Tendências de Sustentabilidade e Metas Corporativas.....	23
2.7. Benchmark Internacional e Gap de Reciclagem	25
3. Descrição da Empresa: Tepx	27
3.1. Histórico e Escopo	27
3.2. Capacidade Produtiva Atual e Quantidade de Plástico Reciclado Vendido por Ano	28
3.3. Cadeia de Valor	29
3.3.1. Estocagem de Fardos de PET	29
3.3.2. Moagem.....	30
3.3.3. Lavagem a Frio.....	31
3.3.4. Lavagem a Quente.....	31
3.3.5. Secagem dos Flakes	32
3.3.6. Extrusão.....	32
3.3.7. Policondensação em Estado Sólido (SSP).....	33
3.4. Fornecedores e Clientes	33
3.5. Modelo Logístico e Frete	34
3.6. Concorrentes	35
4. Revisão Bibliográfica.....	37
4.1. Projeção de Demanda.....	37
4.1.1. Construção de Cenários de Demanda (Base, Otimista e Pessimista)	40
4.2. Determinação da Atual Capacidade Produtiva da Fábrica	41
4.2.1. Teoria das Restrições - <i>Theory of Constraints</i> (TOC).....	41
4.2.2. Eficiência Global do Equipamento - Overall Equipment Effectiveness (OEE)	42
4.3. Indicadores para Avaliação Econômico-financeira	45
4.3.1. Cost of Equity (Ke)	45

4.3.2. Conversão do <i>cost of equity</i> de USD para BRL	49
4.3.4. Valor Presente Líquido (VPL)	50
4.3.5. Taxa Interna de Retorno (TIR)	51
5. Metodologia	52
5.1. Delineamento Metodológico e Planejamento do Estudo de Caso	53
5.2. Procedimentos para Projeção da Demanda Futura	54
5.2.1. Coleta e Organização dos Dados de Demanda	54
5.2.2. Tratamento Estatístico e Modelagem da Demanda	55
5.2.3. Projeção da Demanda e Construção de Cenários	59
5.3. Procedimentos para Planejamento da Capacidade Produtiva	63
5.3.1. Coleta e Organização dos Dados Operacionais e de Capacidade	63
5.3.2. Análise da Capacidade Atual e Identificação de Gargalos	68
5.3.3. Síntese das Alternativas de Expansão de Capacidade	71
5.4. Procedimentos para Avaliação Econômico-financeira da Expansão	74
5.4.1 Coleta e Organização das Premissas Econômico-financeiras do Projeto	74
5.4.2 Construção dos Fluxos de Caixa e Indicadores de Viabilidade	81
5.4.3 Avaliação da atratividade pelo cálculo da TIR	86
6. Análise dos Resultados Obtidos	88
6.1. Análise dos Resultados de Projeção de Demanda	88
6.2. Análise dos Resultados de Capacidade Produtiva	89
6.3. Análise dos Resultados Econômico-Financeiros	89
7. Conclusão do Estudo de Caso	90
8. Anexo	92
9. Bibliografia	94

Lista de Figuras

Figura 1 - Origem de Aquisição de Matéria-prima pelos Recicladores (ABIPLAST, 2023).....	16
Figura 2 - Principais Destinos do PET reciclado no Brasil (ABIPLAST,2023).....	17
Figura 3 - Distribuição dos Polos Industriais de Reciclagem de Plástico no Brasil (ÍNCICIO DE COBERTURA DA ORIZON, 2023)	18
Figura 4 - Produção de Resina Pós-Consumo, por região (ABIPLAST, 2023)	19
Figura 5 - Representação Esquemática da Perda de Material Durante o Processo de Reciclagem	21
Figura 6 - Market Share da produção de rPET no Brasil (%) (INÍCIO DE COBERTURA DA ORIZON, 2023)	24
Figura 7 - Produção Global de Plástico Reciclado (ABIPLAST,2023)	26
Figura 8 - Vista Aérea da Fábrica da Texp	27
Figura 9 - Demanda Histórica e Projeções Feitas pela Própria Empresa (t/ano)	28
Figura 10 - Imagem dos Fardos de PET Utilizados	30
Figura 11 - Máquina de Moagem	30
Figura 12 - Máquina de Lavagem a Quente	31
Figura 13 - Máquina Extrusora	32
Figura 14 - Pallets de rPET	33
Figura 15 - Diagrama SIPOC da Texp	36
Figura 16 - Componentes do OEE	43
Figura 17 - Dados Históricos de Demanda Fornecidos pela Texp (t/ano).....	54
Figura 18 - Demanda Observada vs. Previsão um Passo a Frente (Método de Holt) (t/ano).....	58
Figura 19 - Evolução do Nível e Tendência ao Longo dos Anos (t/ano).....	59
Figura 20 - Resíduos (Demanda – Previsão) (t/ano)	59
Figura 21 - Demanda de rPET: Histórico (2012-2014) e projeção (2025-2035) (t/ano)	60
Figura 22 - Crescimento Percentual Previsto YoY (2025 – 2035)	60
Figura 23 - Demanda de rPET Histórico e Projeções (t/ano)	62
Figura 24 - Etapas de Reciclagem.....	64
Figura 25 - Throughput Anual Simulado por Monte Carlo	71
Figura 26 - Variação do CDS nos últimos 3 anos.....	79
Figura 27 - Código para Simulação de Monte Carlo.....	92

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Fluxo de Caixa Livre para a Empresa	50
Tabela 2 - Fluxo de Caixa Livre para o Acionista.....	51
Tabela 3 - Demanda Observada, Nível, Tendência e Previsão um passo a frente	58
Tabela 4 - Capacidade Nomianl por Etapa.....	65
Tabela 9 - Índices de Dispersão e Parâmetros da Qualidade.....	69
Tabela 10 - Medições do US-Treasury.....	75
Tabela 14 - Cost of equity para a Tepx.....	80
Tabela 15 - Transformação para Índices em BRL.....	81
Tabela 16 - Investimentos Necessários para Nova Linha.....	82
Tabela 17 - Demanda de rPET em Diferentes Cenários.....	83
Tabela 18 - Demanda Produtiva Absorvida pela Linha 2 (t/ano)	83
Tabela 19 - Receita Proveniente da Linha 2 (R\$ '000).....	84
Tabela 20 - Índices para Construção do Valor na Perpetuidade	85
Tabela 21 - Fluxos de Caixa Gerados de Linha 2 (R\$ '000).....	85
Tabela 22 - Valor Presente Líquido dos Diferentes Cenários.....	85
Tabela 23 - Taxa Interna de Retorno dos Diferentes Cenários	87

Lista de Equações

Equação 1 – Valor Previsto para Suavização Exponencial Simples.....	37
Equação 2 – Componente de Nível do Método de Holt.....	38
Equação 3 – Componente de Tendência do Método de Holt	38
Equação 4 – Previsão h passos à frente para o Método de Holt.....	38
Equação 5 - Componente de Nível do Método de Holt Winters	39
Equação 6 - Componente de Tendência do Método de Holt Winters.....	39
Equação 7 - Componente de Sazonalidade do Método de Holt Winters.....	39
Equação 8 - Previsão h passos à frente para o Método de Holt Winters	39
Equação 9 - Disponibilidade do OEE	44
Equação 10 - Performance do OEE.....	44
Equação 11 - Qualidade do OEE.....	44
Equação 12 - Overall Equipment Effectiveness	45
Equação 13 - Cost of Equity	45
Equação 14 - Beta Alavancado.....	47
Equação 15 - Conversão do cost of equity para BRL	49
Equação 16 - Valor Presente Líquido	50
Equação 17 - Taxa Interna de Retorno	51
Equação 18 - Minimização do Erro Quadrático.....	57
Equação 19 - Equação de cálculo do parâmetro de precisão.....	69
Equação 20 - cálculo do parâmetro de forma alfa.....	69
Equação 21 - cálculo do parâmetro de forma Beta	69
Equação 22 - Fórmula de Gordon	84

1. Introdução

Segundo o 13º Censo da Reciclagem de PET no Brasil, publicado pela Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2025), o avanço de políticas públicas, o crescimento da economia circular e a pressão de consumidores e marcas globais impulsionaram a expansão da reciclagem de PET no Brasil, que saiu de 250 kt em 2015 para 410 kt em 2024. Esse aumento evidencia o crescimento da demanda de recicladoras e, consequentemente, de possíveis projetos de expansão de capacidade produtiva voltados para esse segmento, como o analisado neste Trabalho de Formatura.

1.1. Problema de Pesquisa e Objetivos do Trabalho

O crescimento do mercado de resina PET reciclada (rPET) no Brasil, impulsionado pela ampliação da demanda de setores consumidores e pelo avanço das práticas de economia circular, tem elevado a pressão sobre a capacidade produtiva das recicladoras (ABIPET, 2025). Nesse contexto, a decisão de expandir uma planta industrial exige compreender simultaneamente a evolução esperada do mercado atendido, os limites operacionais do processo existente e a atratividade econômico-financeira associada ao investimento. O problema central deste estudo consiste em avaliar em que medida a planta analisada necessita ampliar sua capacidade produtiva e se tal ampliação se configura como uma alternativa tecnicamente justificável e economicamente viável.

A partir dessa formulação, o trabalho se orienta pela seguinte diretriz: determinar se a expansão da capacidade produtiva representa uma necessidade operacional e uma solução sustentada por viabilidade econômico-financeira para a planta estudada.

Com base nisso, são definidos três objetivos específicos. O primeiro é estimar a demanda futura atendível pela empresa, estabelecendo o nível de produção requerido no horizonte analisado. O segundo é avaliar a capacidade produtiva atual, identificando gargalos. O terceiro é examinar a viabilidade econômico-financeira das alternativas de ampliação, verificando se a capacidade adicional projetada se sustenta sob diferentes premissas de retorno e de risco.

1.2. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. O Capítulo 1 consiste na apresentação dos objetivos, estrutura, importância e justificativa do trabalho. O Capítulo 2 apresenta a introdução ao tema, contextualizando o mercado brasileiro de PET e de resina PET reciclada.

O Capítulo 3 caracteriza a empresa de reciclagem Texp e o sistema produtivo em estudo, descrevendo o histórico e o escopo da organização, a capacidade produtiva atual, a cadeia de valor e as etapas do processo de reciclagem de PET, além de apresentar fornecedores, clientes, modelo logístico e principais concorrentes.

O Capítulo 4 reúne a revisão bibliográfica que fundamenta o trabalho, abordando os métodos de previsão de demanda, os conceitos de capacidade produtiva, eficiência operacional e análise de gargalos em sistemas industriais, bem como os referenciais de avaliação econômico-financeira de projetos de investimento utilizados na etapa aplicada.

O Capítulo 5 detalha a metodologia adotada e o planejamento do estudo de caso, descrevendo os procedimentos de coleta e tratamento dos dados de demanda, a construção dos cenários prospectivos, o levantamento e a análise da capacidade atual com identificação de restrições, a síntese das alternativas de expansão de capacidade e a estruturação dos fluxos de caixa e indicadores de viabilidade econômico-financeira.

O Capítulo 6 apresenta e discute os resultados obtidos nas três frentes de análise — projeção de demanda, capacidade produtiva e avaliação econômico-financeira — confrontando-os com a literatura revisada e com as premissas adotadas para o caso da Texp.

Por fim, o Capítulo 7 reúne as conclusões do estudo de caso, retomando o problema de pesquisa, sintetizando as principais contribuições para a empresa e para a Engenharia de Produção, apontando as limitações do trabalho e sugerindo desdobramentos para pesquisas futuras, seguido das referências bibliográficas utilizadas.

1.3. Relevância Acadêmica e Setorial do Trabalho

A relevância deste trabalho está diretamente associada a três dimensões complementares: industrial, ambiental e socioeconômica.

No campo industrial, a expansão da capacidade de produção de resina reciclada (rPET) representa uma necessidade para empresas brasileiras que buscam atender à crescente demanda por embalagens sustentáveis. Segundo a ABIPET (2023), a taxa de reciclagem de garrafas PET no Brasil gira em torno de 55%, patamar ainda limitado frente ao volume consumido e às metas de incorporação de conteúdo reciclado em embalagens. O planejamento de capacidade torna-se, assim, requisito para assegurar que o crescimento projetado da demanda seja acompanhado pela adequação dos recursos produtivos, evitando gargalos operacionais e assegurando competitividade em um setor de margens pressionadas.

Do ponto de vista ambiental, o aumento da participação do rPET na cadeia produtiva contribui para a mitigação de impactos associados ao descarte inadequado de resíduos plásticos, reduzindo a pressão sobre aterros sanitários e lixões, além de diminuir a emissão de gases de efeito estufa ao substituir parcialmente a resina virgem de origem fóssil. Estudos de análise de ciclo de vida (ACV) comprovam que a reciclagem de PET possibilita significativa redução no consumo energético e no uso de recursos naturais, reforçando sua importância estratégica no combate às mudanças climáticas.

Sob a perspectiva socioeconômica e regulatória, o trabalho dialoga diretamente com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), a Lei nº 14.260/2021 e o Decreto nº 12.106/2024, que criaram mecanismos de incentivo fiscal e fundos de investimento voltados à cadeia de reciclagem. Além disso, a atividade de reciclagem envolve atores sociais relevantes, como catadores e cooperativas, cuja inclusão produtiva é fundamental para a consolidação da economia circular no país.

1.4. Justificativa da Escolha do Setor e da Empresa Estudada

A escolha do setor de reciclagem de PET como objeto de estudo fundamenta-se em sua relevância econômica, ambiental e tecnológica no contexto da indústria brasileira

e da economia circular. O PET combina alta reciclabilidade, valor de mercado e ampla aplicação em bebidas, alimentos e cosméticos. Segundo a ABIPET (2024), o Brasil reciclou aproximadamente 370 mil toneladas de PET pós-consumo em 2023, o que corresponde a cerca de 45% de reaproveitamento, patamar ainda aquém do potencial técnico e das metas de incorporação de conteúdo reciclado em embalagens. Esse descompasso entre consumo e reciclagem evidencia a necessidade de ampliação planejada da capacidade produtiva, especialmente em rPET de grau alimentício, e configura um campo fértil para a aplicação de ferramentas de Planejamento e Controle da Produção e de análise de investimentos em engenharia de produção.

A empresa Tepx foi selecionada como estudo de caso por operar uma planta de rPET voltada a transformação de garrafas descartadas em novas garrafas (*bottle-to-bottle*), com etapas de moagem, lavagem, extrusão e polimerização em estado sólido (SSP), localizada próxima a grandes demandantes de resina reciclada e em momento estratégico de expansão. A companhia enfrenta restrições de capacidade que limitam o atendimento à demanda crescente, o que a torna um objeto adequado para investigar decisões de médio e longo prazo relacionadas a dimensionamento de capacidade, gestão de gargalos e avaliação de alternativas de investimento em *Capital Expenditure* (CAPEX) e *Operational Expenditure* (OPEX), com potencial de extrapolação dos resultados para outras empresas do setor.

2. Mercado de PET no Brasil

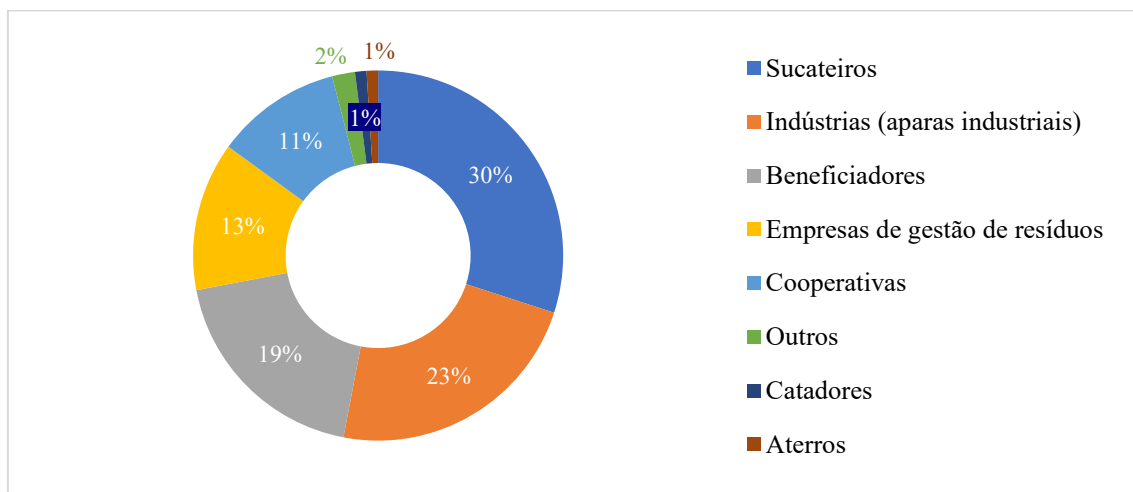
2.1. Estrutura da Cadeia Produtiva de PET Reciclado

Para compreender a organização do mercado de PET no Brasil, é útil começar pelos agentes que dão forma ao fluxo do material ao longo da cadeia produtiva, conforme os principais *stakeholders* definidos pela Associação Brasileira de Plástico (ABIPLAT) no relatório “Perfil das Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico 2023” (ABIPLAST, 2023).

O elo de originação é formado por catadores e cooperativas, que realizam a coleta do material logo após o consumo. Esses agentes garantem a capilaridade do processo, pois recolhem os materiais diretamente em casas, restaurantes e aterros. Além disso, influenciam o rendimento industrial por meio da qualidade do fardo entregue aos

próximos elos. Nos dados da ABIPLAST presentes na Figura 1 – “Origem de Aquisição de Matéria-prima pelos Recicladores”, as cooperativas aparecem como uma das fontes relevantes de alimentação do sistema, o que evidencia seu papel estrutural na formação de oferta regular de garrafas e outros artigos em PET para reciclagem (ABIPLAST, 2023).

Figura 1 - Origem de Aquisição de Matéria-prima pelos Recicladores (ABIPLAST, 2023)



Fonte: Autoria Própria

Em paralelo às cooperativas, os comerciantes de resíduos (sucateiros) operam como intermediários especializados em compra, classificação e revenda. Esses agentes reúnem o material de múltiplas origens e, por isso, tem peso no abastecimento das recicladoras. Os dados de 2023 indicam que os “sucateiros” foram a principal origem individual do resíduo plástico consumido pelas plantas de reciclagem mecânica (ABIPLAST, 2023).

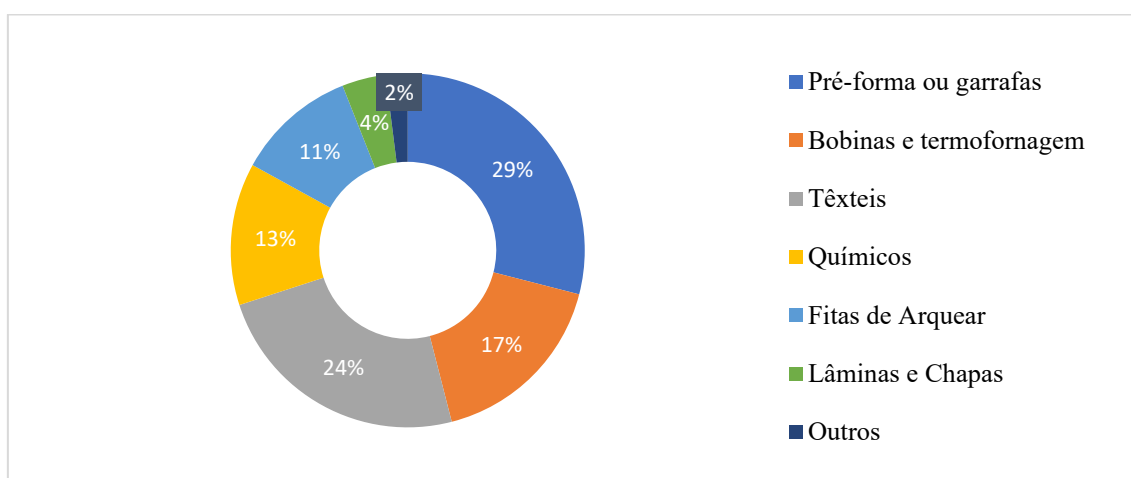
Entre a originação e o processamento industrial, atuam as centrais de triagem e recicladores menores, conhecidos como pré-processadores e beneficiadores. Eles cumprem uma função de “refino” da matéria-prima, pois a reclassificam por tipo e cor de resina e reduzem contaminantes como sujeira e lacres antes de entregar o material aos próximos agentes da cadeia. Na estatística setorial, esses beneficiadores aparecem com participação própria no fornecimento de resíduo às recicladoras, o que mostra que, na prática, parte do ganho de rendimento do sistema é produzido nesse elo intermediário (ABIPLAST, 2023).

O núcleo industrial da cadeia reúne as recicladoras mecânicas. Algumas estão focadas na produção de fragmentos moídos de PET (*flakes*) e outras integram etapas

térmicas e convertem *flakes* em grânulos cilíndricos de resina PET (*pellets*) de rPET por extrusão e filtração. Esse bloco transforma um material heterogêneo em um insumo padronizado para a conversão em outros produtos (ABIPLAST, 2023).

Na etapa seguinte estão os transformadores, responsáveis por converter o rPET em novos artefatos, em especial pré-formas e garrafas. Trata-se da “terceira geração” da indústria de plásticos, na qual processos de extrusão, injeção e sopro materializam o material plástico em produtos finais (ABIPLAST, 2023).

Figura 2 - Principais Destinos do PET reciclado no Brasil (ABIPLAST,2023)



Fonte: Autoria Própria

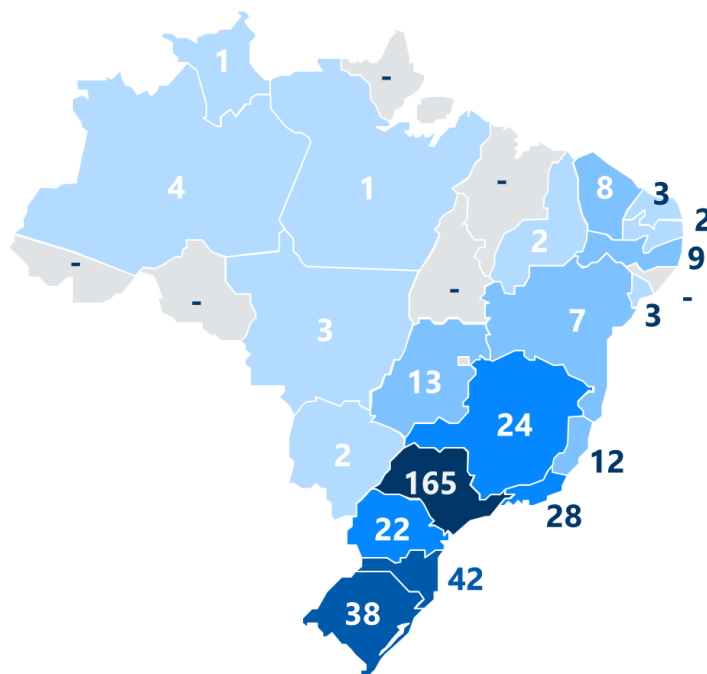
Fechando o circuito, os envasadores são responsáveis por definir especificações de desempenho e sensoriais, além de modular o perfil de contratos (*spot*, leilões e acordos de médio prazo) com recicladores e transformadores. Como consequência, decisões desses compradores finais retroalimentam requisitos de qualidade e condicionam investimentos em todos os elos anteriores da cadeia (ABIPLAST, 2023).

De forma transversal a todos os elos, operadores logísticos e empresas de gestão de resíduos organizam a coleta seletiva, coordenam a logística reversa e consolidam cargas em *hubs* regionais próximos aos polos industriais. A presença dessas empresas aparece na estatística de proveniência do resíduo consumido (categoria “empresa de gestão de resíduos, inclui logística reversa”), evidenciando seu papel na redução de *lead times* e na melhoria da previsibilidade de suprimento.

2.2. Participação e Distribuição Regional da Reciclagem no Brasil

A reciclagem de plásticos pós-consumo no Brasil apresenta significativa concentração regional, refletindo as diferenças na geração de resíduos, o grau de urbanização e a infraestrutura industrial de cada região, conforme documento de *Initiation of Coverage* da empresa de reciclagem Orizon divulgada pelo Itaú BBA em 2023 (INÍCIO DE COBERTURA DA ORIZON, 2023). Os maiores volumes processados concentram-se nas regiões Sudeste e Sul, onde se localizam os principais polos consumidores e recicladores do país, enquanto as regiões Norte e Nordeste ainda apresentam participação reduzida. A Figura 3 – “Distribuição dos Polos Industriais de Reciclagem de Plástico no Brasil”, ilustra com dados a concentração dos polos de processamento para reciclagem de plástico em todas as regiões do Brasil.

Figura 3 - Distribuição dos Polos Industriais de Reciclagem de Plástico no Brasil (ÍNÍCIO DE COBERTURA DA ORIZON, 2023)



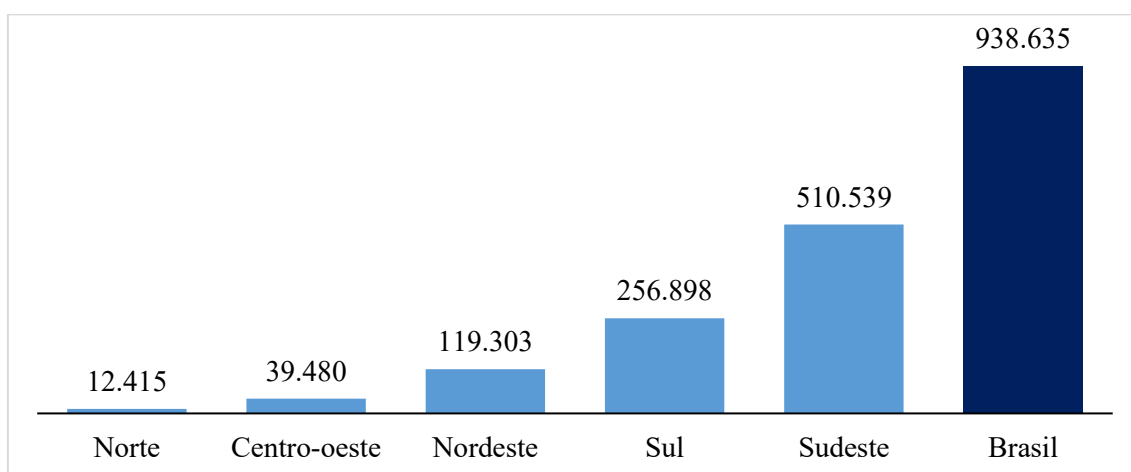
Fonte: Autoria Própria

Há, porém, razões estruturais para essa concentração. Em primeiro lugar, a densidade industrial e a proximidade com grandes polos de transformação plástica e de

consumo final no Sudeste e no Sul criam economias de aglomeração que reduzem custos logísticos e *lead times* entre originação, reciclagem e conversão (BNDES, 2018). Na prática, a maior massa de transformadores e setores clientes está justamente onde a produção de PET é mais elevada.

O padrão de distribuição também se reflete na produção de resina pós-consumo. Conforme dados disponibilizados pela ABIPLAST (2023) e ilustrados na Figura 4 – “Produção de Resina Pós-Consumo, por região”, a maior parte da resina pós-consumo (PCR) comercializada nacionalmente é originada no Sudeste e no Sul, reforçando o papel dessas regiões como núcleos de suprimento e transformação. Já as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, ainda possuem uma indústria de reciclagem de PET mais incipiente, com menores volumes de plástico reciclado.

Figura 4 - Produção de Resina Pós-Consumo, por região (ABIPLAST, 2023)



Fonte: Autoria Própria

2.3. Perfil Tecnológico e Barreiras Técnicas

Embora o setor de reciclagem de resíduos plásticos tenha passado por expressivo crescimento nos últimos anos, alguns elos da cadeia produtiva ainda possuem baixos recursos técnicos disponíveis, o que aumenta as perdas durante o processo. Em 2023, a Ciclossoft levantou dados em 1.356 municípios e realizou 16.056 consultas a cooperativas, catadores e empresas de reciclagem para a elaboração do “Panorama da Coleta Seletiva no Brasil” (CICLOSOFT, 2023). Nesse levantamento, ficou constatado que em apenas

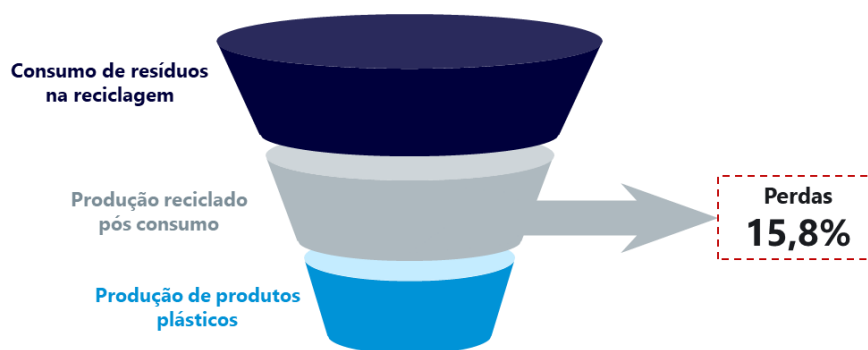
43,1% das unidades de reciclagem consultadas existia uma esteira de triagem e 71,5% das unidades não contavam com qualquer equipamento de beneficiamento de materiais como fragmentadores, triturados ou compressores.

Por outro lado, a pesquisa mostra que as etapas de preparação do material (moagem e lavagem) têm avançado, com um aumento de máquinas disponíveis, mas ainda herdam a variabilidade que chega da coleta e da triagem. Quando o fardo vem heterogêneo — por cor, por presença de tampas e rótulos, ou por sujidades — o ganho tecnológico obtido em lavadoras e separações densimétricas é reduzido devido a produção de produtos não conformes as especificações técnicas estabelecidas.

Na fase térmica (extrusão) e, quando aplicável, na pós-condensação em estado sólido (SSP), o parque já é mais intensivo em capital e menos manual. Ainda assim, o desempenho dessas etapas depende diretamente da qualidade do material que chega da triagem e da lavagem: quanto mais regular o floco, menor a necessidade de paradas, trocas de tela e ajustes, e maior a previsibilidade do pellet produzido. Ou seja, o salto tecnológico verificado na extrusão e no SSP só se traduz em produtividade quando a base manual de coleta e triagem entrega, de forma consistente, um material dentro do padrão (ABIPET, 2024).

As barreiras técnicas decorrem justamente desse ponto de encontro entre tecnologia e realidade operacional. A variabilidade do fardo limita produtividade e eleva perdas; a capilaridade da coleta, ainda muito apoiada em trabalho manual, dificulta cumprir prazos e volumes; e a concentração de fornecimento em intermediários e beneficiadores adiciona etapas de manuseio e de transporte. Um levantamento realizado pela consultoria industrial *Maxiquim Chemical Business & Intelligence* realizado em 2024 (MAXIQUIM, 2024) indica que aproximadamente 16,0% da quantidade de resíduos plásticos que entram na linha de reciclagem são perdidos devido às ineficiências do processo.

Figura 5 - Representação Esquemática da Perda de Material Durante o Processo de Reciclagem



Fonte: Autoria Própria

2.4. Aspectos Econômicos e de Precificação

Segundo a MAXIQUIM (2024), o preço médio da resina PET virgem no Brasil oscilou entre US\$ 1.150 e US\$ 1.350 por tonelada ao longo de 2023, enquanto o rPET grau alimentício foi negociado entre US\$ 1.000 e US\$ 1.250 por tonelada, dependendo da qualidade e do volume contratado. Essa proximidade entre os preços reforça que a vantagem competitiva do rPET não se sustenta apenas pelo custo direto, mas também pelo seu valor intangível associado à sustentabilidade, ao atendimento de metas ESG e às exigências de conteúdo reciclado em embalagens, conforme enfatizado em relatórios recentes de sustentabilidade de grandes marcas e em levantamentos setoriais como ABIPET (2024). Assim, o diferencial de preço é frequentemente compensado pela demanda crescente de grandes marcas comprometidas com políticas de economia circular.

A dinâmica econômica do setor de reciclagem de PET é fortemente influenciada por 3 fatores principais: o preço do petróleo, fatores logísticos e a sazonalidade (MAXIQUIM, 2024).

Fatores externos, como o preço do petróleo, a cotação cambial e as condições macroeconômicas globais, que afetam diretamente a competitividade entre a resina virgem (PET) e a reciclada (rPET) (MAXIQUIM, 2024). Como o PET virgem é derivado do petróleo e do gás natural, as oscilações internacionais dessas *commodities* impactam

de forma imediata o custo de produção da resina, alterando o diferencial de preço entre o material virgem e o reciclado. Em períodos de queda acentuada do barril de petróleo, por exemplo, o PET virgem tende a se tornar mais competitivo, reduzindo a atratividade econômica do rPET.

Além da influência dos preços internacionais, a estrutura de custos do rPET é condicionada por fatores logísticos. O frete e o custo de aquisição da sucata pós-consumo representam juntos uma das parcelas mais significativas do custo total de produção em muitas recicladoras (ABRELPE, 2022). Essa dependência logística somada às concentrações geográficas discutidas no capítulo 2.2. acentua as disparidades regionais e limita as margens de operação, especialmente em empresas de pequeno e médio porte localizadas fora dos grandes centros urbanos.

Por fim, a precificação da resina reciclada também está sujeita a variações sazonais relacionadas à disponibilidade de matéria-prima e à demanda das indústrias usuárias. No verão, o consumo de bebidas e, portanto, de garrafas PET aumenta significativamente, elevando a demanda por insumos. Já nos períodos de menor consumo, a diminuição da demanda tende a forçar os preços para baixo, aumentando a volatilidade do mercado e a necessidade de planejamento de estoques pelas recicladoras, dinâmica corroborada pelos censos de reciclagem de PET da ABIPET (2024).

2.5. Políticas Públicas e Regulação

O marco regulatório da reciclagem de plásticos no Brasil consolidou-se nas últimas décadas a partir da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 12.106/2024. Esse arcabouço estabeleceu diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos, introduziu o conceito de responsabilidade compartilhada entre todos os agentes da cadeia e tornou obrigatória a logística reversa para determinados produtos e embalagens, incluindo as de plástico. Nesse contexto, a PNRS representou um divisor de águas para a cadeia de reciclagem de PET, ao reconhecer juridicamente o papel das cooperativas de catadores e estimular a formalização das atividades de coleta e triagem, historicamente marcadas pela informalidade.

Em complemento, o avanço regulatório passou a incorporar instrumentos econômicos e requisitos técnicos. A Lei nº 14.260/2021 criou o Programa Crédito de Reciclagem (Recicla+), que viabiliza a geração e comercialização de créditos por empresas que comprovem a destinação adequada de resíduos, canalizando recursos para recicladoras, cooperativas e indústrias investidoras em rastreabilidade. No campo técnico e sanitário, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) regulamenta a produção e o uso de rPET de grau alimentício, por meio da RDC nº 20/2008 e normas complementares, definindo critérios de segurança e rastreabilidade para o contato direto com alimentos e bebidas e alinhando o país a referências internacionais, como FDA e EFSA.

2.6. Tendências de Sustentabilidade e Metas Corporativas

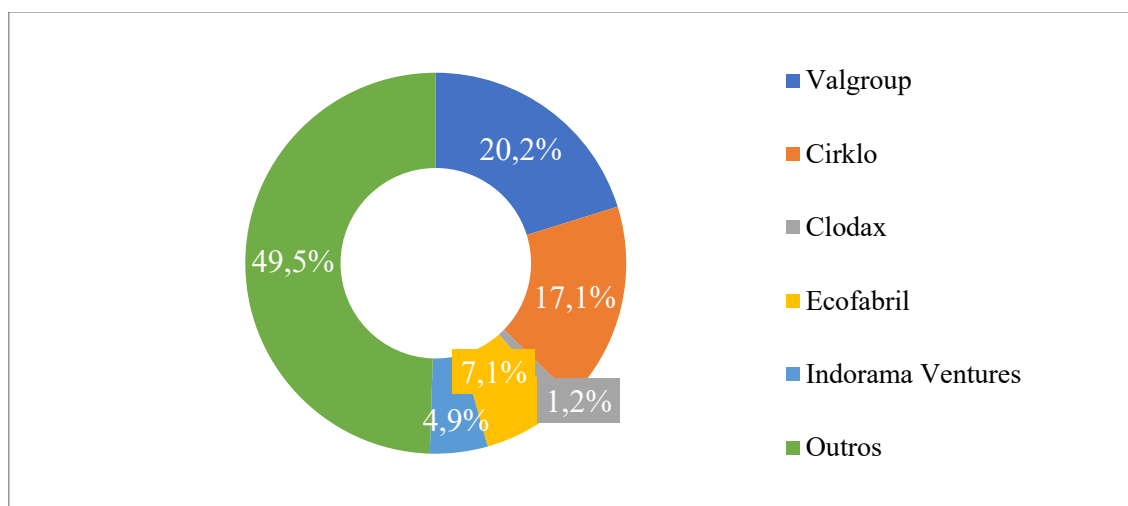
A transição para a economia circular, sustentada por princípios de redução, reutilização e reaproveitamento de materiais, tem se consolidado como diretriz central para empresas e governos, redefinindo o modo como o PET e o rPET são produzidos, utilizados e reintegrados ao ciclo produtivo. Nesse contexto, a complementariedade entre as exigências governamentais e as metas corporativas de sustentabilidade determinam a expansão da demanda por resina reciclada e, consequentemente, a necessidade de ampliação da capacidade produtiva do setor (ABIPET, 2025).

A Organização das Nações Unidas (ONU), por meio da Agenda 2030 e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), tem orientado políticas públicas e estratégias empresariais voltadas à gestão eficiente de recursos e à mitigação de impactos ambientais (ONU, 2015). Entre os ODS, destacam-se o ODS 12, que trata de “Consumo e Produção Responsáveis”, e o ODS 13, que aborda “Ação contra a Mudança Global do Clima”. Ambos têm impulsionado governos e empresas a repensarem a estrutura linear de produção, substituindo-a por modelos circulares baseados na valorização de resíduos e no uso de insumos reciclados.

No âmbito corporativo, as grandes companhias de bens de consumo, especialmente dos setores de bebidas, alimentos e cosméticos, assumiram compromissos públicos de redução de emissões e incorporação de conteúdo reciclado em suas embalagens. A Coca-Cola Company, por exemplo, estabeleceu a meta global de utilizar

50% de material reciclado em todas as suas embalagens até 2030, no âmbito do programa *World Without Waste* (COCA-COLA COMPANY, 2018). De forma semelhante, a Ambev comprometeu-se a empregar 100% de embalagens recicláveis ou reutilizáveis até 2025 (AB INBEV, 2018), enquanto a Nestlé e a PepsiCo anunciaram objetivos de atingir embalagens totalmente recicláveis e reutilizáveis até 2025 (NESTLÉ, 2018; PEPSICO, 2020). Essas metas corporativas têm repercussão direta sobre a estrutura de demanda do mercado de rPET, criando um ambiente de previsibilidade e estímulo a investimentos industriais.

Figura 6 - Market Share da produção de rPET no Brasil (%) (INÍCIO DE COBERTURA DA ORIZON, 2023)



Fonte: Autoria Própria

Além das metas individuais das empresas, o setor industrial tem se articulado por meio de iniciativas coletivas de autorregulação, como o Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), a Coalizão Embalagens e a *Plastics Pact Network*. Essas iniciativas definem diretrizes e indicadores de desempenho ambiental que orientam o investimento em novas tecnologias e a adoção de modelos de logística reversa mais eficientes. No Brasil, o Pacto Global dos Plásticos, lançado em 2022 com apoio do WWF Brasil e da ABIPLAST, estabelece como meta que 100% das embalagens plásticas sejam reutilizáveis, recicláveis ou compostáveis até 2025, e que pelo menos 30% do conteúdo das embalagens provenha de material reciclado.

2.7. Benchmark Internacional e Gap de Reciclagem

Segundo dados da *Plastics Europe* (2024), o índice médio de reciclagem de PET pós-consumo na União Europeia ultrapassa 60%, com destaque para países como Alemanha e França, que superam 70% de reaproveitamento. Esse desempenho é resultado de investimentos em infraestrutura de coleta seletiva universalizada e forte integração entre produtores, recicladores e governos locais. O ambiente europeu é caracterizado por cadeias produtivas integradas, altos padrões tecnológicos e rastreabilidade completa do fluxo de materiais, condições que asseguram a produção contínua de rPET de grau alimentício em larga escala.

Nos Estados Unidos, embora o modelo de gestão de resíduos seja mais descentralizado, os avanços recentes também têm sido relevantes. De acordo com a *Environmental Protection Agency* (EPA, 2023), o índice médio de reciclagem de garrafas PET atingiu aproximadamente 30% em 2022, impulsionado pela expansão de programas estaduais de depósito e pela entrada de novos investidores privados em plantas de reciclagem química. Grandes fabricantes, como Coca-Cola e PepsiCo, têm financiado diretamente a construção de unidades de transformação de garrafas descartadas em novas garrafas (*bottle-to-bottle*) no país, sinalizando a importância das metas corporativas como motor do investimento industrial.

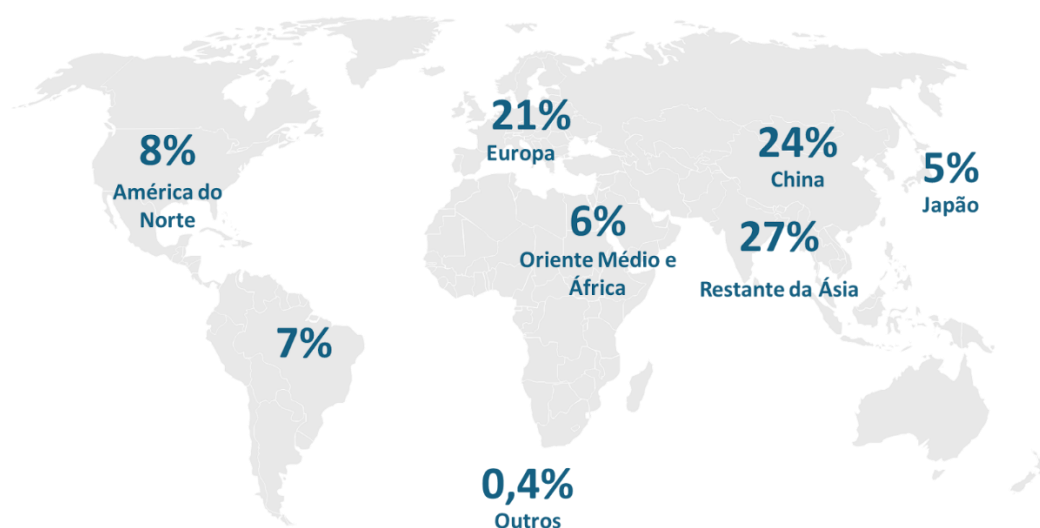
Na Ásia, o desempenho é heterogêneo. Países como o Japão e a Coreia do Sul atingem taxas superiores a 80% de reaproveitamento do PET, sustentadas por sistemas de coleta extremamente eficientes e por legislações rígidas de responsabilidade pós-consumo. Já outras economias emergentes, como Índia e Indonésia, apresentam níveis de reciclagem mais próximos aos do Brasil, em torno de 25% a 30%, com desafios similares em infraestrutura, informalidade e padronização de qualidade do material reciclado (*Plastics Europe*, 2024).

No caso brasileiro, conforme relatório da ABIPET (2024), a taxa de reciclagem do PET pós-consumo encontra-se em torno de 45%, o que coloca o país em posição intermediária no cenário global: acima da média mundial, estimada em 35% pela OECD (2023), mas ainda distante dos padrões europeus e asiáticos, como pode ser verificado na Figura 7 – “Produção Global de Plástico Reciclado”. Essa posição reflete a coexistência de ilhas de excelência industrial, representadas por grupos integrados e tecnologicamente

avançados, e de gargalos estruturais, relacionados à coleta seletiva, à informalidade e à ausência de incentivos financeiros de longo prazo.

O gap de reciclagem entre o Brasil e os países líderes não se resume a diferenças quantitativas, mas também qualitativas. Enquanto mercados desenvolvidos operam com elevada proporção de rPET de grau alimentício certificado, apto a aplicações bottle-to-bottle, grande parte do volume reciclado no Brasil ainda é destinada a usos de baixo valor agregado, como fibras têxteis e embalagens não alimentícias. Essa limitação decorre de barreiras tecnológicas, regulatórias e econômicas, já discutidas anteriormente, e reforça a necessidade de investimentos em modernização industrial e aumento da capacidade produtiva de rPET de alta qualidade.

Figura 7 - Produção Global de Plástico Reciclado (ABIPLAST,2023)



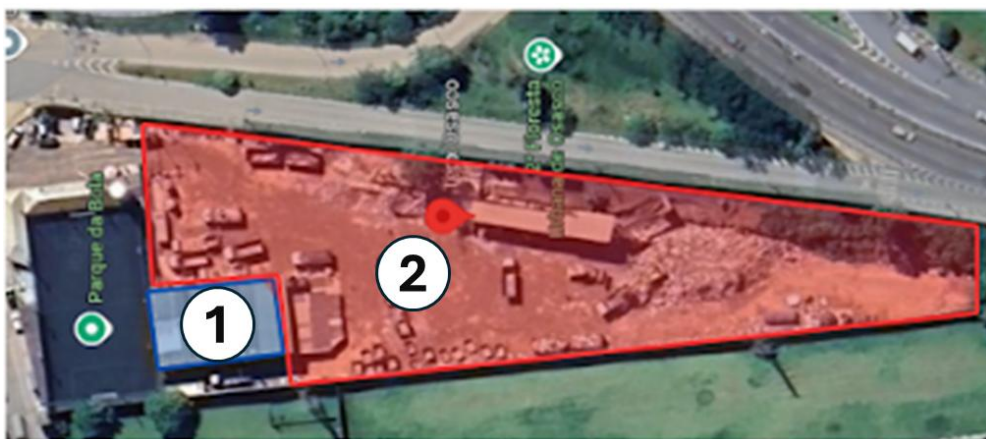
Fonte: Autoria Própria

3. Descrição da Empresa: Tepx

3.1. Histórico e Escopo

Fundada em 2012, a Tepx opera uma linha de reciclagem *bottle-to-bottle* totalmente automatizada e com matéria-prima que provém de cooperativas de cidades de São Paulo e região metropolitana.

Figura 8 - Vista Aérea da Fábrica da Tepx



Fonte: Autoria Própria

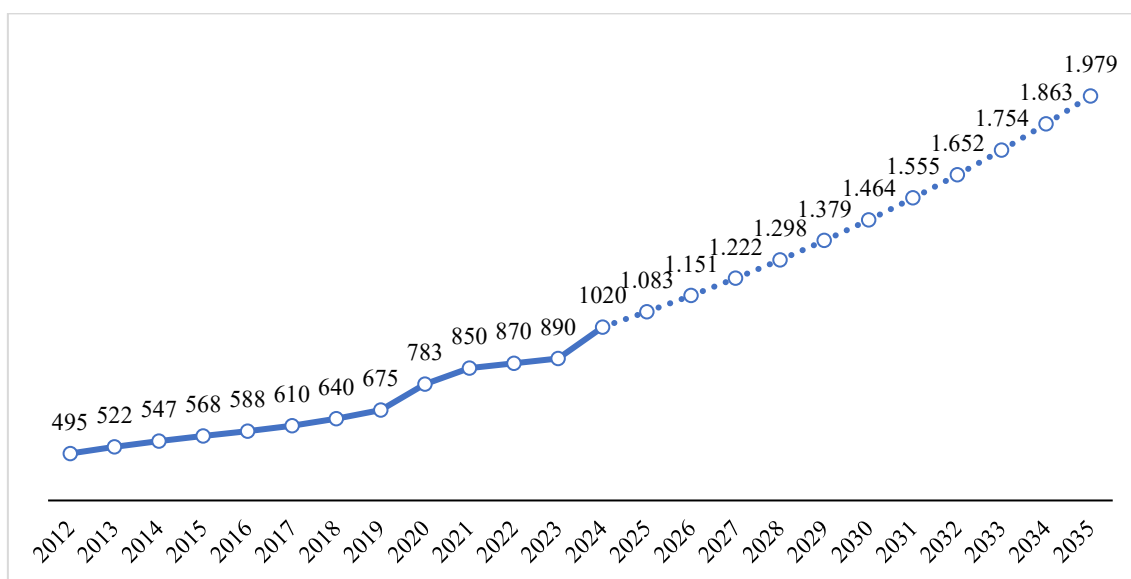
A Figura 8 – “Vista Aérea da Fábrica da Tepx” apresenta uma visão aérea da planta da Tepx em Osasco. A área destacada com o número 1 corresponde ao núcleo fabril atualmente ocupado pelas principais máquinas do processo. Já a região sinalizada pelo número 2 evidencia o espaço livre disponível dentro do terreno da empresa. Esse espaço excedente permite que a Tepx planeje futuras ampliações da linha de reciclagem ou a implantação de módulos adicionais, sem restrições físicas. Assim, o potencial de crescimento da fábrica está garantido do ponto de vista da área, facilitando a instalação de novos equipamentos e viabilizando uma expansão conforme as necessidades de mercado.

3.2. Capacidade Produtiva Atual e Quantidade de Plástico Reciclado Vendido por Ano

A capacidade produtiva total divulgada pela Tepx é de 1.503 t/ano. A metodologia para chegar a esse valor foi compartilhada e parte da etapa de extrusão que, atualmente, possui a menor capacidade nominal, de 578 kg/h. Foi considerado, também, uma operação de 10h por dia, durante 5 dias por semana, totalizando um calendário produtivo de 2.600h por ano ($10 \times 5 \times 52$). Com isso, ao multiplicar a capacidade nominal de 578 kg/h com o total de horas disponíveis por ano a companhia obteve o número de 1.503 t/ano.

Além desse valor, foram disponibilizadas informações históricas da quantidade de rPET vendido pela companhia, e uma projeção interna, que faz parte do plano de negócios desenvolvido pela Tepx em 2024.

Figura 9 - Demanda Histórica e Projeções Feitas pela Própria Empresa (t/ano)



Fonte: Autoria Própria

A Figura 9 “Demanda Histórica e Projeções Feitas pela Própria Empresa (t/ano)” mostra a evolução histórica e a projeção de produção anual da empresa para 2025 e 2035. Entre 2012 e 2024, observa-se um crescimento do volume processado, partindo de 495 para 1.020 t/ano, com uma taxa média composta de crescimento (CAGR) de 6,2%.

A partir de 2025, a companhia adotou essa mesma taxa composta para a realização das projeções, chegando a uma demanda de 1.979 t/ano em 2035. A aplicação dessa metodologia, por mais que utilize como base dados históricos, mostra-se limitada, tendo em vista que fatores como aumentos recentes da demanda e fatores sazonais estão sendo desconsiderados (WINTERS, 1960). Caso esse ritmo de expansão histórica se mantenha, a capacidade produtiva projetada da Texp ultrapassa o patamar-alvo de 1.800 t/ano estabelecido no planejamento estratégico da empresa de 2024.

Com base no 13º Censo da Reciclagem de PET (ABIPET, 2025), o volume reciclado no Brasil cresceu a um CAGR de 7,96% entre 2022 e 2024, atingindo 410 mil toneladas em 2024 (ABIPET, 2025). Apesar de esse percentual referir-se ao biênio, ele representa um crescimento consideravelmente acima do valor de 6,2% adotado como crescimento pela Texp para a próxima década.

Essa constatação, demonstra que as premissas adotadas pela empresa podem estar sendo conservadoras, e, portanto, as metodologias de projeção de demanda, que serão detalhadas no capítulo 5.1. do presente trabalho são necessárias para a readequação do plano de negócios da companhia.

3.3. Cadeia de Valor

A caracterização das etapas da cadeia de valor oferece uma visão geral do funcionamento do sistema produtivo como um todo, permitindo compreender como cada fase se conecta e onde podem surgir restrições operacionais (POTER, 1985). Esse entendimento é essencial para, nas etapas seguintes desse trabalho, identificar corretamente a etapa gargalo e, a partir disso, orientar as análises de capacidade e as decisões de expansão discutidas.

3.3.1. Estocagem de Fardos de PET

Na etapa de estocagem de fardos de PET, os materiais provenientes dos fornecedores são recebidos, pesados e submetidos a inspeção visual para identificação de

contaminações evidentes, sendo então organizados em área coberta, protegida da incidência direta de sol e chuva. A área de armazenagem dispõe de piso drenado e de boa ventilação, o que contribui para minimizar o acúmulo de umidade e preservar as condições do material até sua alimentação nas etapas subsequentes do processo.

Figura 10 - Imagem dos Fardos de PET Utilizados



Fonte: Tepx

3.3.2. Moagem

Na etapa de moagem, após a abertura dos fardos e a retirada dos anéis metálicos, o material segue para o granulador, onde as garrafas são cortadas em pequenos pedaços, os chamados *flakes*. Esse processo permite uma separação inicial, pois tampas e partes mais leves, como rótulos, tendem a se desprender antes da lavagem, enquanto o PET se fragmenta de forma mais uniforme. O material moído é então conduzido por um alimentador para as lavadoras.

Figura 11 - Máquina de Moagem



Fonte: Tepx

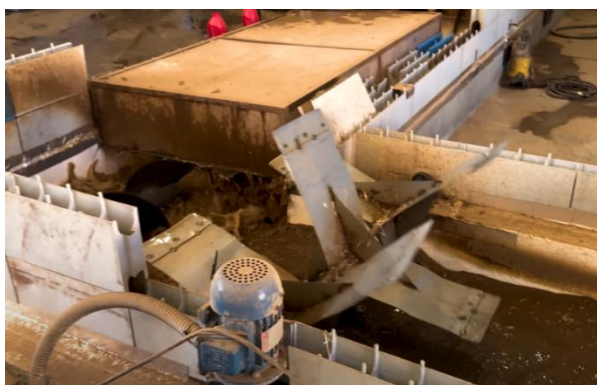
3.3.3. Lavagem a Frio

Nesta etapa, os *flakes* seguem por um tambor perfurado e depois por uma lavadora por atrito, onde o movimento mecânico ajuda a retirar terra, resíduos finos e cola dos rótulos. Todo o processo ocorre em temperatura ambiente para evitar qualquer dano ao polímero. O controle da limpeza é feito por sensores que indicam quando é necessário ajustar a quantidade de detergente neutro ou renovar a água. O desempenho da etapa é verificado pela quantidade de partículas presentes na água que saem do equipamento.

3.3.4. Lavagem a Quente

Nesta etapa, os *flakes* são submetidos a um banho alcalino quente, que remove rótulos de papel, resíduos de açúcar e gordura e desfaz a cola aderida às embalagens. Em seguida, o material atravessa um tanque de retenção e passa por sucessivos enxágues em sentido oposto ao fluxo de entrada, até que a água de saída atinja o padrão de limpeza exigido para uso do PET em aplicações alimentícias. A solução cáustica é reaproveitada no próprio sistema, com descargas parciais controladas para evitar acúmulo de impurezas.

Figura 12 - Máquina de Lavagem a Quente



Fonte: Tepx

3.3.5. Secagem dos Flakes

Após a lavagem, o material passa por uma centrífuga horizontal, que remove a maior parte da água, e em seguida recebe ar quente para reduzir a umidade a níveis menores que 5%. Na sequência, um separador óptico identifica diferenças de cor e possíveis contaminantes, sobretudo PVC, que pode comprometer o desempenho do PET durante a fusão.

3.3.6. Extrusão

Na etapa de extrusão, os *flakes* secos são alimentados em uma extrusora, onde o material é fundido e a umidade residual, bem como compostos voláteis, são removidos por zonas de vácuo ao longo do equipamento. Antes do corte, a massa fundida passa por um sistema de filtragem e, em seguida, é transformada em pequenos grânulos, resfriados em água e desaguados. Trata-se da fase de maior consumo de energia do processo e também aquela em que a viscosidade intrínseca do PET mais se reduz se temperatura e vácuo não forem bem controlados.

Figura 13 - Máquina Extrusora



Fonte: Tepx

3.3.7. Policondensação em Estado Sólido (SSP)

Após a extrusora, o PET derretido é empurrado por uma placa cheia de pequenos furos. Conforme sai dessa placa, o material encontra água fria e se fragmenta imediatamente em pequenos grãos cilíndricos, os chamados *pellets*. Esses grãos ainda quentes e úmidos passam por uma secagem com ar quente, para tirar a umidade e evitar que grudem uns nos outros. Depois desse processo, eles são levados para o reator onde, sob temperatura controlada e atmosfera de nitrogênio, passam por um aquecimento lento que aumenta a resistência do material.

Figura 14 - Pellets de rPET



Fonte: Texp

3.4. Fornecedores e Clientes

A cadeia de suprimentos do rPET envolve a articulação entre coleta, triagem e processamento, seguindo princípios básicos de circularidade (KIRCHHERR, 2017). No caso da Texp, durante as visitas realizadas para a elaboração deste trabalho, foi informado que os fornecedores de fardos de PET têm papel central na operação, já que a qualidade do material recebido impacta diretamente a qualidade final dos *pellets* de rPET produzidos.

De acordo com dados disponibilizadas pela empresa, os fornecedores de matéria-prima estão divididos em duas fontes principais, cooperativas e fornecedores industriais. Por ser uma informação sensível, informações de quais seriam os fornecedores e qual a participação de cada um dos grupos para a cadeia de suprimento não pôde ser fornecida.

Para o primeiro grupo, as cooperativas, foi informado que os fardos apresentam maior variabilidade em termos de composição, grau de contaminação e limpeza. Ainda assim, esses fornecedores seguem sendo importantes para a Tepx porque, em geral praticam preços mais baixos.

Para o segundo grupo, os fornecedores industriais, foi informado que a matéria-prima tende a ser mais homogênea e com menor nível de contaminação, muitas vezes já tendo passado por etapas prévias de lavagem e moagem. Em contrapartida, o preço por tonelada costuma ser mais elevado do que o praticado pelas cooperativas, o que aumenta o custo do insumo, ainda que traga maior previsibilidade operacional.

No quesito dos clientes, foi informado que em sua maioria são compostos por indústrias de bebidas, indústrias de alimentos e setores não alimentícios, que utilizam o *pellet* de rPET em fibras têxteis e filamentos industriais. Da mesma forma que para os fornecedores, pelo fato de os dados serem sensíveis, não foi informado quais seriam os clientes e qual a participação de cada um no total das vendas.

Para cada um destes clientes, foi informado que as principais diferenciações estão tanto na sazonalidade quanto no nível de exigência de qualidade do *pellet*. A indústria de bebidas apresenta variações mais marcadas ao longo do ano e demanda rPET com especificações mais rigorosas, sobretudo em cor e pureza. A indústria de alimentos e embalagens rígidas mantém demanda mais estável, porém com padrões igualmente elevados de qualidade. Já os setores não alimentícios têm menor sensibilidade sazonal e aceitam pellets com requisitos menos restritivos, embora ainda precisem de regularidade no desempenho do material.

3.5. Modelo Logístico e Frete

A cadeia de suprimentos da Tepx apresenta elevada sensibilidade aos custos de transporte, já que tanto a coleta quanto a distribuição dependem predominantemente do modal rodoviário, em linha com o papel central desse modal em cadeias de suprimento de produtos de baixo valor específico (BOWERSOX et al., 2014). No suprimento de matéria-prima, a maior parte dos fardos de PET é obtida junto a cooperativas e sucateiros instalados em centros urbanos, onde a geração de resíduos é mais concentrada. Dada a

natureza fragmentada desses fornecedores, o frete rodoviário se torna praticamente a única alternativa. Nessa etapa, a negociação costuma ocorrer sob o regime *Free on Board* (FOB), em que o fornecedor se responsabiliza por disponibilizar a carga no ponto de coleta, enquanto o transporte até a planta é assumido pela Tepx.

No fluxo de saída, o produto acabado é entregue em *big bags*, também por transporte rodoviário. Nessa fase, a prática usual é o regime *Cost, Insurance and Freight* (CIF), pelo qual a Tepx assume o frete e entrega o material diretamente nas instalações do cliente, já com custos de transporte e seguro incorporados ao preço de venda. Esse arranjo logístico, conforme discutido por Ballou (2006), reforça a necessidade de gestão cuidadosa dos custos de transporte para preservar a competitividade da operação.

Dado que a planta trabalha com um insumo volumoso e de baixa densidade, e que a Tepx é responsável pelos custos atrelados tanto na coleta quanto na distribuição, o transporte influencia diretamente margens, prazos e previsibilidade de abastecimento.

3.6. Concorrentes

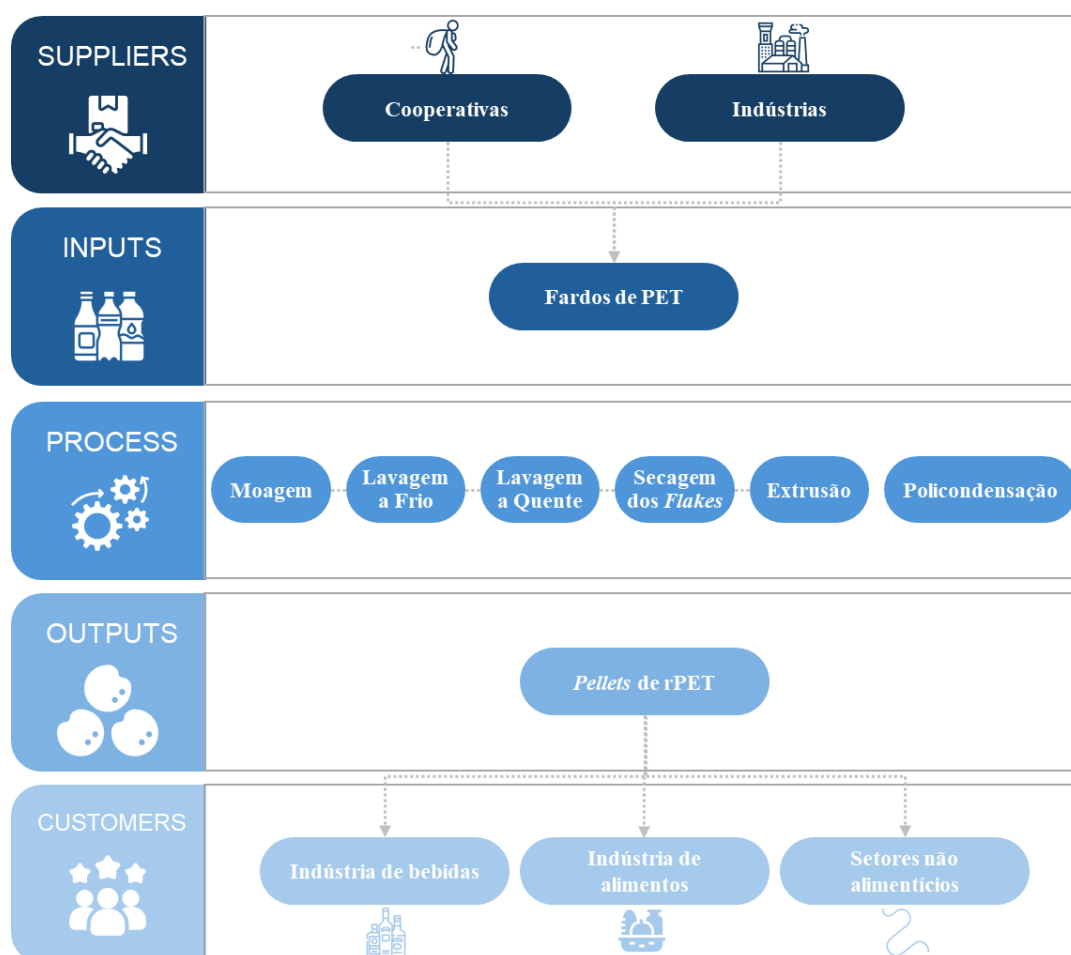
A Tepx opera com um processo de produção de rPET automatizado, com poucas intervenções manuais ao longo da linha, o que contribui para maior repetibilidade operacional e estabilidade de qualidade. Além disso, a empresa possui autorização da ANVISA para produzir resina pós-consumo de grau alimentício, em conformidade com a regulamentação específica para PET-PCR destinado ao contato com alimentos (BRASIL, 2008), o que lhe permite atender indústrias de bebidas e alimentos no mercado interno. Sua localização no maior centro urbano do país também é um diferencial competitivo, pois aproxima a planta das principais fontes de sucata e de parte relevante da base de clientes, reduzindo percursos médios de transporte e simplificando a logística de entrada e saída.

Por outro lado, a empresa ainda enfrenta duas limitações importantes frente a concorrentes de maior porte. A primeira diz respeito à escala: a capacidade instalada atual não é suficiente para atender, de forma contínua, grandes envasadoras ou grupos multinacionais com elevados volumes contratados. A segunda refere-se à ausência, até o momento, de aprovação de grau alimentício pela *Food and Drug Administration*, que em

diversos mercados é utilizada como referência para qualificar processos de reciclagem destinados a embalagens de contato direto com alimentos (FDA, 2021). Essa combinação de menor escala e ausência de certificação internacional restringe o acesso da Tepx a determinados contratos e nichos de maior valor agregado, ainda que crie espaço para uma trajetória de crescimento associada à expansão de capacidade e à obtenção de novas homologações.

Para facilitar a visualização dos itens discutidos no Capítulo 2, foi desenvolvido um diagrama SIPOC, ilustrado na Figura 15, ferramenta associada ao desenvolvimento do *Six Sigma* nos anos 1980, utilizada para proporcionar um entendimento visual entre os agentes envolvidos na análise de uma empresa (PYZDEK; KELLER, 2014).

Figura 15 - Diagrama SIPOC da Tepx



Fonte: Autoria Própria

4. Revisão Bibliográfica

4.1. Projeção de Demanda

Entre as técnicas utilizadas para previsão de séries temporais, os métodos de suavização exponencial destacam-se pela simplicidade, adaptabilidade, condição ideal dado o contexto deste trabalho de análise de uma empresa de pequeno porte e com poucos dados disponíveis. Segundo Makridakis, Wheelwright e Hyndman (1998), esses métodos partem do princípio de que as observações mais recentes devem receber maior peso na estimativa do valor futuro, uma vez que contêm informação mais atual sobre a dinâmica da série. Tal característica é implementada pela aplicação de um fator de suavização, que ajusta progressivamente o nível, a tendência e, quando necessário, a sazonalidade dos dados.

O modelo mais elementar dessa família é a Suavização Exponencial Simples (SES), indicada para séries que não apresentam tendência nem sazonalidade marcantes. Nesse método, o valor previsto é calculado a partir de uma média ponderada entre o valor observado mais recente e a previsão anterior, conforme a expressão:

Equação 1 – Valor Previsto para Suavização Exponencial Simples

$$\widehat{Y}_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) \widehat{Y}_t$$

Em que:

\widehat{Y}_{t+1} é a previsão da demanda para o próximo período

Y_t é o valor real observado no período atual

\widehat{Y}_t é a previsão feita para o período atual

α é o parâmetro de suavização, que varia entre 0 e 1

Quando a série apresenta comportamento crescente ou decrescente ao longo do tempo, a suavização simples torna-se limitada, pois não considera a existência de uma tendência sistemática (MAKRIDAKIS, WHEELWRIGHT e HYNDMAN, 1998). Para essas situações, Holt (1957) propôs uma extensão do método, conhecida como Dupla Suavização Exponencial ou Método de Holt, que introduz explicitamente um componente de tendência linear. O modelo passa a ser descrito por duas equações de atualização, uma para o nível e outra para a tendência e uma terceira equação de previsão:

Equação 2 – Componente de Nível do Método de Holt

$$L_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1})$$

Equação 3 – Componente de Tendência do Método de Holt

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}$$

Equação 4 – Previsão h passos à frente para o Método de Holt

$$\widehat{Y_{t+h}} = L_t + hT_t$$

Em que:

Y_t é o valor observado da série no período t ;

$\widehat{Y_{t+h}}$ representa a previsão para h períodos à frente;

L_t é o nível suavizado da série no instante t ;

T_t corresponde à tendência estimada;

α e β são, respectivamente, os parâmetros de suavização do nível e da tendência ($0 < \alpha$, $\beta \leq 1$);

h indica o horizonte de previsão.

Esse modelo permite representar séries com crescimento contínuo, evitando os atrasos de resposta típicos da suavização simples e ajustando a trajetória prevista à inclinação observada na série histórica.

Posteriormente, Winters (1960) estendeu o método de Holt ao incorporar um terceiro componente responsável por captar a sazonalidade, originando o chamado Método de Holt-Winters ou Tripla Suavização Exponencial. Essa formulação é particularmente adequada para séries que apresentam padrões periódicos regulares, como as variações mensais ou trimestrais de vendas, produção ou demanda.

Equação 5 - Componente de Nível do Método de Holt Winters

$$L_t = \alpha (Y_t - S_{t-s}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1})$$

Equação 6 - Componente de Tendência do Método de Holt Winters

$$T_t = \beta (L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}$$

Equação 7 - Componente de Sazonalidade do Método de Holt Winters

$$S_t = \gamma(Y_t - L_t) + (1 - \gamma)S_{t-s}$$

Equação 8 - Previsão h passos à frente para o Método de Holt Winters

$$\widehat{Y_{t+h}} = L_t + hT_t + S_{t-s+h}$$

Em que:

Y_t é o valor observado da série no período t ;

$\widehat{Y_{t+h}}$ é a previsão para h períodos à frente;

\widehat{L}_t é o nível estimado da série no período t

T_t é a tendência estimada

S_t é o componente de sazonalidade

α é o parâmetro de suavização do nível ($0 < \alpha \leq 1$)

β é o parâmetro de suavização da tendência ($0 < \beta \leq 1$)

γ é o parâmetro de suavização da sazonalidade ($0 < \gamma \leq 1$)

h é o horizonte de previsão (quantos períodos à frente se deseja estimar)

t é o índice temporal da série

Hyndman e Athanasopoulos (2021) destacam que os três modelos constituem uma sequência evolutiva que aumenta progressivamente o número de componentes considerados — do nível ao acréscimo de tendência e sazonalidade — permitindo que o analista selecione o método mais adequado ao padrão empírico da série observada.

4.1.1. Construção de Cenários de Demanda (Base, Otimista e Pessimista)

A literatura de previsão recomenda a apresentação de um conjunto conciso de trajetórias alternativas, tipicamente três: pior caso, intermediário e melhor caso, com o objetivo de explicitar a faixa plausível de resultados dado a possível variação dos resultados (MAKRIDAKIS; WHEELWRIGHT; HYNDMAN, 1998). Essa prática é destacada também por Hyndman ao tratar de *scenario forecasting*, justamente como complemento às previsões pontuais produzidas por um modelo estatístico de base, de modo a traduzir a incerteza do processo em caminhos distintos.

Adota-se como trajetória central (ou cenário base) a previsão pontual fornecida pelo método de projeção escolhido. A partir desse referencial, constroem-se cenários alternativos mediante ajustes sobre a trajetória base, frequentemente definidos por variações percentuais positivas e negativas em cada horizonte projetado. Segundo Armstrong (2001), a utilização de ajustes percentuais fixos configura uma forma parcimoniosa e operacional de comunicar cenários contrastantes, preservando simultaneamente a comparabilidade entre eles e a aderência às premissas implícitas no modelo estatístico utilizado como base.

4.2. Determinação da Atual Capacidade Produtiva da Fábrica

4.2.1. Teoria das Restrições - *Theory of Constraints* (TOC)

A Teoria das Restrições foi proposta por Eliyahu Goldratt na década de 1980, inicialmente difundida no romance empresarial *The Goal*, de Goldratt e Cox (1984). A partir do caso ficcional de uma fábrica em crise, Goldratt apresentou um método para elevar o desempenho global de sistemas produtivos ao focar na restrição — o recurso ou política que mais limita o alcance da meta (tipicamente, gerar lucro de forma consistente). Nos anos seguintes, a TOC se expandiu para áreas como logística (método *Drum–Buffer–Rope*), finanças gerenciais (*Throughput Accounting*), gestão de projetos (*Critical Chain Project Management* — CCPM) e raciocínio lógico (*Thinking Processes*). Hoje, a TOC é vista como uma abordagem de melhoria contínua que complementa práticas como *Lean* e *Seis Sigma*.

Na Teoria das Restrições, parte-se do princípio de que o desempenho do sistema é limitado por sua restrição; por isso, o esforço de melhoria deve concentrar-se nesse ponto. A gestão privilegia o aumento do fluxo do sistema como um todo, evitando otimizações locais que elevem o *lead time* ou que sobrecarreguem o gargalo. Segundo Noreen, Smith e Mackey (1995), o alinhamento com o resultado econômico ocorre por meio de três medidas simples — *throughput* (T), investimento/estoque (I) e despesa operacional (OE) — que orientam a tomada de decisão operacional e a priorização de recursos.

A TOC possui 5 etapas principais que compõe o processo de melhoria contínua:

1. **Identificar** a restrição do sistema (ex.: um equipamento, uma etapa)
2. **Explorar** a restrição ao máximo, com baixo investimentos (eliminar paradas, reduzir setups, padronizar a operação, priorizar o mix que maximize fluxo pela restrição, garantir material e qualidade)
3. **Subordinar** todo o restante à restrição (programação, estoques pulmão, manutenção, qualidade, logística interna)
4. **Elevar** a restrição (investimentos, automação, turnos extras, duplicação de linha, aumento de capacidade)

5. Voltar ao passo 1, quando uma restrição é elevada, outra se torna limitante

A Teoria das Restrições adota uma lógica própria de programação e controle de fluxo chamada *Drum-Buffer-Rope*. A ideia central é organizar a fábrica a partir da etapa restritiva, que define o ritmo viável do sistema. O “*Drum*” funciona como o tambor que marca esse compasso, pois traduz a capacidade efetiva do gargalo em um plano estável e em uma sequência de produção coerente com trocas de produtos. Em vez de empurrar ordens para todos os recursos, o sistema passa a ser puxado pela sua limitação real.

Para proteger esse compasso contra a variabilidade do dia a dia, utiliza-se o “*Buffer*”. Trata-se de uma proteção temporal, e quando necessário também de material, posicionada antes do recurso restritivo e em pontos críticos de expedição. Segundo Schragenheim e Dettmer (2000), o tamanho do *buffer* é definido em unidades de tempo, a partir da variabilidade observada em chegadas, setups, microparadas e inspeções. Um *buffer* bem dimensionado evita que o gargalo pare por falta de alimentação, reduz a propagação de atrasos e estabiliza o fluxo.

Fechando o esquema, a “*Rope*” sincroniza a liberação de ordens no início do processo com o ritmo do *Drum*. Em termos práticos, só se libera o que o gargalo conseguirá processar dentro da proteção definida, o que impede a inflação de WIP e o alongamento desnecessário do *lead time*. O acompanhamento do consumo do *buffer*, conhecido como *Buffer Management*, orienta a prioridade operacional. À medida que a penetração no pulmão aumenta, cresce a urgência de ações corretivas como reordenar a sequência, executar manutenção rápida, reforçar a qualidade ou realocar recursos. Dessa forma, a programação e o controle do fluxo segundo o DBR reduzem variabilidade percebida pelo gargalo, estabilizam a produção no ponto certo e elevam o *throughput* sem recorrer a excesso de estoques em processo (DETTMER, 1997).

4.2.2. Eficiência Global do Equipamento - Overall Equipment Effectiveness (OEE)

O *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) surgiu no contexto do *Total Productive Maintenance* (TPM) desenvolvido no Japão a partir dos anos 1960–1970, tendo Seiichi Nakajima como principal formulador e difusor (NAKAJIMA, 1988). No arcabouço do

TPM, Nakajima propôs o OEE como métrica síntese para quantificar as chamadas “seis grandes perdas” de equipamentos (quebras, setups, microparadas, redução de velocidade, defeitos de processo e refugos na partida), conectando manutenção, operação e qualidade a um indicador único de efetividade.

Figura 16 - Componentes do OEE

A	Tempo Total		
B	Horas Planejadas		Paradas Planejadas
C	Horas Trabalhadas (Produção Teórica)	Paradas Não Planejadas	
D	Horas Produtivas (Produção Real)	Variação de Velocidade	
E	Peças Boas	Rejeitos	

Fonte: Autoria Própria

Conceitualmente, o OEE mede quanto do tempo programado se transforma em produção conforme especificação à taxa padrão, por meio do produto de três componentes independentes: disponibilidade, performance e qualidade. Ao decompor perdas nessas três dimensões, o OEE fornece uma leitura operacional objetiva do *gap* entre o potencial nominal do recurso e o que de fato é entregue, servindo de base para priorização de melhorias, comparação temporal de resultados e tomada de decisão sobre capacidade, manutenção e qualidade.

Segundo Nakajima (1988), a disponibilidade é entendida como a proporção do tempo programado em que o equipamento permaneceu efetivamente operando. Para medi-la de forma consistente, definem-se calendário e janela de apuração (turno, dia ou mês) e registram-se, com início e fim, todos os eventos que impedem a operação (quebras, setups e trocas, ajustes e limpezas, esperas por material, manutenção ou qualidade) usando categorias mutuamente exclusivas. O cálculo resulta da razão entre o tempo operando e o tempo programado, deixando explícitos os critérios para classificar paradas curtas e eventos planejados.

Equação 9 - Disponibilidade do OEE

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Tempo de Carga} - \text{Tempo de Parada}}{\text{Tempo de Carga}}$$

A performance compara o ritmo real com a taxa padrão ou nominal quando a máquina está operando. Nessa componente ficam as perdas por microparadas e por operação em velocidade abaixo do padrão, bem como instabilidades de alimentação que reduzem a saída. A referência de taxa padrão deve ser definida por produto ou família e revisada quando houver mudanças de processo, evitando padrões inatingíveis que distorçam o indicador. Em termos formais, a performance é a razão entre a produção efetiva e o produto do tempo operando pela taxa padrão, o que a torna sensível a flutuações de ritmo e a microinterrupções frequentemente negligenciadas.

Equação 10 - Performance do OEE

$$\text{Performance} = \frac{\text{Tempo de Ciclo Teórico} \times \text{Quantidade Produzida}}{\text{Tempo de Operação}}$$

A qualidade expressa a fração do output que atende às especificações na primeira passagem, sem necessidade de retrabalho ou reclassificação. A mensuração requer critérios objetivos de conformidade e a distinção entre perdas de partida ou ajuste e perdas em regime, sob pena de confundir efeitos transitórios com problemas estruturais. O cálculo é a razão entre peças boas — ou massa/volume conforme o processo — e a produção efetiva no período. Em processos contínuos, a base deve ser mássica ou volumétrica; em batelada, o dimensionamento considera o tamanho do lote e o tempo de ciclo padrão.

Equação 11 - Qualidade do OEE

$$\text{Qualidade} = \frac{\text{Quantidade Produzida} - \text{Defeituosos}}{\text{Quantidade Produzida}}$$

A síntese do OEE decorre do produto das três componentes (disponibilidade, performance e qualidade), quando aplicada ao recurso restritivo, ajusta a capacidade nominal para a capacidade efetiva utilizada no planejamento. Com isso, o indicador orienta a priorização das perdas com maior impacto sobre o *throughput* e fornece a base quantitativa para fechar o gap entre o potencial de catálogo e o desempenho realizado.

Equação 12 - Overall Equipment Effectiveness

$$OEE = \text{Disponibilidade} \times \text{Performance} \times \text{Qualidade}$$

4.3. Indicadores para Avaliação Econômico-financeira

4.3.1. Cost of Equity (Ke)

Segundo Brealey, Myers e Allen (2020), o *cost of equity* é a taxa mínima de retorno exigida pelos acionistas para investir no projeto ou na empresa, dado o risco percebido do negócio. Em termos financeiros, é o retorno esperado que compensa o investidor pela alternativa de aplicar em ativos sem risco e pelos prêmios de risco assumidos (setorial, de mercado, operacional, regulatório, cambial etc.). Na prática, essa taxa é estimada por modelos de precificação de risco-retorno (DAMODARAN, 2012).

De acordo com Assaf Neto (2014), o *cost of equity* é a taxa de desconto diretamente aplicável quando os fluxos e o financiamento do projeto são integralmente dos acionistas (sem dívida ou com irrelevância econômica do endividamento). Se subestimado, inflará o VPL e mascarará riscos que deveriam ser mitigados; se superestimado, descartará oportunidades viáveis e pode induzir decisões excessivamente conservadoras. A estruturação do *cost of equity* pode ser visualizada pela Equação 13:

Equação 13 - *Cost of Equity*

$$K_e = R_f + \beta_e ERP_{\text{global}} + CRP_{\text{país}}$$

Em que:

R_f é a taxa livre de risco

β_e é o beta alavancado

ERP_{global} é o prêmio de risco de mercado

$CRP_{\text{país}}$ é o risco país

4.3.1.1. Taxa Livre de Risco (R_f)

Segundo Damoradan (2012), a taxa livre de risco é o ponto de partida do *cost of equity*. Em teoria, deve vir de um ativo sem risco de *default*, com alta liquidez, e horizonte compatível com o dos fluxos do projeto. Na prática, escolhe-se um título público de referência que minimize prêmios indesejados (crédito, liquidez, impostos específicos) e seja amplamente negociado para refletir o “preço do dinheiro no tempo” de forma estável.

Segundo Koller, Goedhart e Wessels (2020), em finanças corporativas, o UST-10y é frequentemente adotado como *risk-free* nominal em USD porque tem risco de crédito soberano próximo de zero, é um dos mercados mais profundos e líquidos do mundo, possui prazo intermediário-longo que se aproxima do horizonte econômico de muitos projetos/empresas, e serve como marco de referência global para curvas a termo e precificação de risco. Em outras palavras, o UST-10y fornece uma âncora estável e comparável para análises de longo prazo em moeda forte.

4.3.1.2. Equity Risk Premium (ERP)

Segundo Brealey, Myers e Allen (2020), o *equity risk premium* é a remuneração adicional exigida pelos investidores para aplicar em ações em vez de um ativo livre de risco na mesma moeda e base. Em termos conceituais, corresponde à diferença entre o retorno esperado do mercado acionário e a taxa livre de risco na mesma unidade de conta e horizonte. O ERP é, portanto, o componente que traduz a aversão ao risco dos investidores para dentro do custo do capital próprio.

Para estimação do ERP calcula-se a média dos retornos excedentes do índice de mercado sobre a taxa livre de risco ao longo de uma janela suficientemente longa para atravessar ciclos econômicos. É crucial documentar a janela, o tratamento de outliers, eventuais quebras estruturais (mudanças de regime) e evitar viés de sobrevivência (ex.: excluir empresas que deixaram o índice inflar o ERP) (DAMODARAN, 2012).

De acordo com Fama e French (2002), adota-se o S&P 500 como referência para o prêmio de risco de mercado em USD porque ele é amplo (cobre grande parte da capitalização dos EUA), tem alta liquidez, longa série histórica confiável e é o principal benchmark usado na precificação global de ativos. Isso facilita a comparação entre avaliações e mantém consistência com a taxa livre de risco em dólares (*Treasuries*). Quando necessário, soma-se um prêmio de risco-país ao ERP global para refletir riscos locais específicos.

4.3.1.3. *Beta* (β)

O beta é o coeficiente que mede a sensibilidade do retorno de um ativo em relação às variações do retorno do mercado de referência (SHARPE, 1964). Por ser adimensional, indica quanto o ativo tende a oscilar frente ao índice escolhido: valores próximos de 1 sugerem variação semelhante à do mercado; acima de 1 indicam maior exposição sistemática; abaixo de 1, menor exposição. Essa sensibilidade decorre de fatores estruturais, como o setor de atuação, a alavancagem operacional (proporção de custos fixos) e a alavancagem financeira.

Diferenciam-se o beta desalavancado, que reflete apenas o risco operacional do ativo, e o beta alavancado, que incorpora efeitos da estrutura de capital. A relação usual pode ser escrita como:

Equação 14 - Beta Alavancado

$$\beta_e = \beta_u \left[1 + (1 - T_c) \frac{D}{E} \right]$$

Em que:

β_e é o beta alavancado

β_u é o beta desalavancado

T_c é a taxa de imposto vigente no país

$\frac{D}{E}$ é a proporção entre a dívida e o patrimônio líquido da empresa

A estimação do beta costuma seguir dois caminhos. No histórico (*top-down*), ajusta-se uma regressão entre os retornos do ativo e de um índice amplo de mercado, mantendo coerência de moeda e base (real ou nominal), escolhendo uma frequência (diária, semanal ou mensal) e uma janela que atravessasse ciclos (em geral, 2 a 5 anos).

No setorial (*bottom-up*), selecionam-se empresas comparáveis, coletam-se seus betas alavancados, desalavancam-se para obter o beta desalavancado de cada uma, agregam-se por mediana ou média ponderada por valor de mercado e, por fim, relavançam-se na proporção de dívida e patrimônio líquido da empresa que está sendo analisada. Essa abordagem é útil quando a série histórica do ativo é curta ou pouco representativa (DAMODARAN, 2012).

4.3.1.4. Risco País

O risco-país corresponde ao retorno adicional exigido pelos investidores para compensar incertezas soberanas — como risco de default, instabilidade macroeconômica, mudanças regulatórias e conversibilidade cambial — que afetam empresas que operam em determinada jurisdição (DAMODARAN, 2012).

Historicamente, utilizou-se o EMBI como aproximação do risco-país, pois ele é um índice que calcula o “spread”, dos títulos soberanos de um país em relação aos títulos do governo norte-americano. Com a evolução dos mercados, consolidou-se o uso do CDS (*Credit Default Swap*) soberano de 5 anos como referência, pois o CDS precifica o “prêmio de seguro” contra o default de um país. (DAMODARAN, 2012).

Para incorporar o risco-país ao custo do capital próprio, basta somar o CDS ao prêmio de risco de mercado (ERP) (DAMODARAN, 2012).

4.3.2. Conversão do *cost of equity* de USD para BRL

Em muitas avaliações, o K_e é inicialmente estimado em USD nominal porque os insumos de risco estão mais disponíveis e estáveis nessa moeda: a taxa livre de risco costuma ser o UST-10y, o ERP é amplamente reportado para mercados globais, os CDS são cotados em USD e bases de betas setoriais internacionais são consolidadas nessa referência. (DAMODARAN, 2012)

No entanto, se os fluxos de caixa do projeto estão em BRL, é obrigatório converter a taxa para a mesma moeda. Em termos econômicos, a passagem de USD para BRL ajusta a taxa pelo diferencial de inflação entre as moedas, mantendo inalterado o componente real do retorno.

A conversão pode ser feita de acordo com a Equação 15:

Equação 15 - Conversão do *cost of equity* para BRL

$$K_e^{USD} = ((1 + K_e^{BRL}) / (1 + \pi_{BRL})) (1 + \pi_{USD}) - 1$$

Em que:

K_e^{USD} é o *cost of equity* indexado ao dólar

K_e^{BRL} é o *cost of equity* indexado ao real

π_{BRL} é a inflação do Brasil de longo prazo

π_{USD} é a inflação norte-americana de longo prazo

4.3.4. Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido é a forma de trazer para hoje tudo o que o projeto gera e consome de caixa ao longo do tempo, usando uma taxa que represente o risco desses fluxos, a moeda adotada e a base (real ou nominal). Em termos formais, calcula-se por:

Equação 16 - Valor Presente Líquido

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1+k)^t}$$

Em que:

I_0 é o investimento inicial

t é o período do fluxo de caixa

FC_t são os fluxos de caixa no período t

k é a taxa de desconto

Para a construção dos fluxos de caixa, há duas lógicas consistentes que podem ser aplicadas no projeto. A primeira é o Fluxo de Caixa Livre para a Empresa (FCLE), que é o fluxo disponível para todos os provedores de capital para a empresa (acionistas e credores). Em termos práticos, o FCLE pode ser descrito pela formulação da Tabela 1:

Tabela 1 - Fluxo de Caixa Livre para a Empresa

Lucro Antes dos Impostos e Resultado Financiero
(-) Taxa de Imposto
(+) Depreciação e Amortização
(-) Capex
(-) Variação dos Ativos Circulantes
(+) Variação dos Passivos Circulantes
(=) Fluxo de Caixa Livre para a Empresa

Fonte: Autoria Própria

Pode-se também considerar o Fluxo de Caixa Livre para o Acionista (FCLA), que é o caixa disponível apenas aos acionistas, após considerar também os fluxos de dívida (juros, amortizações e emissões). O FCLA pode ser descrito pela formulação da Tabela 2:

Tabela 2 - Fluxo de Caixa Livre para o Acionista

Lucro Líquido
(-) Taxa de Imposto
(+) Depreciação e Amortização
(-) Capex
(-) Variação dos Ativos Circulantes
(+) Variação dos Passivos Circulantes
(-) Juros(1-T)
(+) Emissões de novas dívidas
(-) Amortização de dívidas
(=) Fluxo de Caixa Livre para a Empresa

Fonte: Autoria Própria

4.3.5. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno é a taxa que faz o Valor Presente Líquido ser igual a zero. Em notação direta, é a solução da Equação 17:

Equação 17 - Taxa Interna de Retorno

$$TIR = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1+r^*)^t} = 0$$

Em que:

I_0 é o investimento inicial;

t é o período do fluxo de caixa;

FC_t são os fluxos de caixa no período t ;

r é a taxa de desconto que faz os fluxos de entrada serem iguais aos fluxos de saída, em módulo

Em termos práticos, a TIR representa a rentabilidade percentual do projeto, representando o retorno que iguala, o valor das entradas e o das saídas de caixa.

O uso como critério de decisão consiste em comparar a TIR com a taxa mínima de atratividade do projeto. Quando a análise está sendo feita sobre o Fluxo de Caixa Livre para os Acionistas, devemos comparar a TIR com o *cost of equity* (K_e). Caso a relação $TIR \geq K_e$ seja satisfeita, o projeto atende ao retorno requerido.

5. Metodologia

O estudo de caso é uma estratégia de pesquisa em que se examina um fenômeno em uma unidade de análise delimitada, como uma organização, processo ou projeto, tomando-o em seu contexto real. A partir de dados obtidos por diferentes fontes, descrevem-se a situação estudada e as relações entre variáveis, em articulação com o referencial teórico definido (CAUCHICK, 2007).

Para melhor entendimento dessa metodologia, foi consultada a literatura consagrada elaborada por Mattar (2018), Cauchick (2007) e Eisenhardt (1989) com o objetivo de verificar qual delas seria mais aderente às situações deste trabalho.

Mattar (2018) apresenta o estudo de caso como um procedimento empírico voltado à compreensão aprofundada de um fenômeno, ressaltando a importância de alinhar problema, escolha do caso e técnicas de coleta de dados. Cauchick (2007) descreve o estudo de caso como etapas sucessivas (formulação do problema, delineamento, protocolo, coleta e análise) oferecendo recomendações práticas para aumentar o rigor e a validade dos resultados em Engenharia de Produção. Eisenhardt (1989) trata o estudo de caso como um caminho para construção de teoria, enfatizando o uso de múltiplos casos, a comparação sistemática de evidências e o diálogo constante com a literatura para gerar proposições teóricas sólidas.

Entre esses referenciais, optou-se por adotar a estrutura de estudo de caso proposta por Cauchick (2007), por se tratar de um modelo formulado especificamente para pesquisas em Engenharia de Produção, voltado à análise de organizações industriais.

Segundo Cauchick (2007), primeiro, define-se claramente o problema de pesquisa e os objetivos do estudo. Em seguida, faz-se o delineamento do estudo, o que inclui escolher a unidade de análise, decidir se será um estudo de caso único ou múltiplo e indicar se o estudo terá caráter exploratório, descritivo ou explicativo.

Na etapa seguinte, elabora-se um protocolo de estudo de caso, no qual são descritos os procedimentos de coleta de dado. Com o protocolo definido, passa-se à coleta sistemática de dados junto à unidade e realiza-se a análise desses dados por meio da aplicação de diferentes técnicas. Por fim, realiza-se a interpretação dos resultados obtidos, buscando primeiro compreender em profundidade o caso estudado.

5.1. Delineamento Metodológico e Planejamento do Estudo de Caso

Com o objetivo do trabalho sendo “determinar se a expansão da capacidade produtiva representa uma necessidade operacional e uma solução sustentada por viabilidade econômico-financeira para a planta estudada”, já definido no capítulo 1.1., e seguindo a metodologia de Cauchick (2007), partiu-se para a etapa seguinte: o delineamento metodológico do estudo de caso.

Este trabalho adota um estudo de caso único, de natureza aplicada e finalidade descritivo-explicativa, em que a unidade de análise corresponde à planta industrial da Tepx e ao processo de expansão de capacidade em avaliação, permitindo observar o fenômeno diretamente em seu contexto real.

Para conduzir o estudo, foi estruturado um protocolo baseado na coleta de dois grupos principais de informações: dados operacionais da fábrica (registros de produção, perdas e capacidades nominais) e documentos internos (relatórios, especificações técnicas e histórico de operação). Como o trabalho aborda três frentes diferentes (projeção de demanda futura, planejamento da capacidade produtiva e avaliação econômico-financeira

da expansão), os procedimentos de coleta e análise dos dados foram realizados de forma separada para cada uma das frentes.

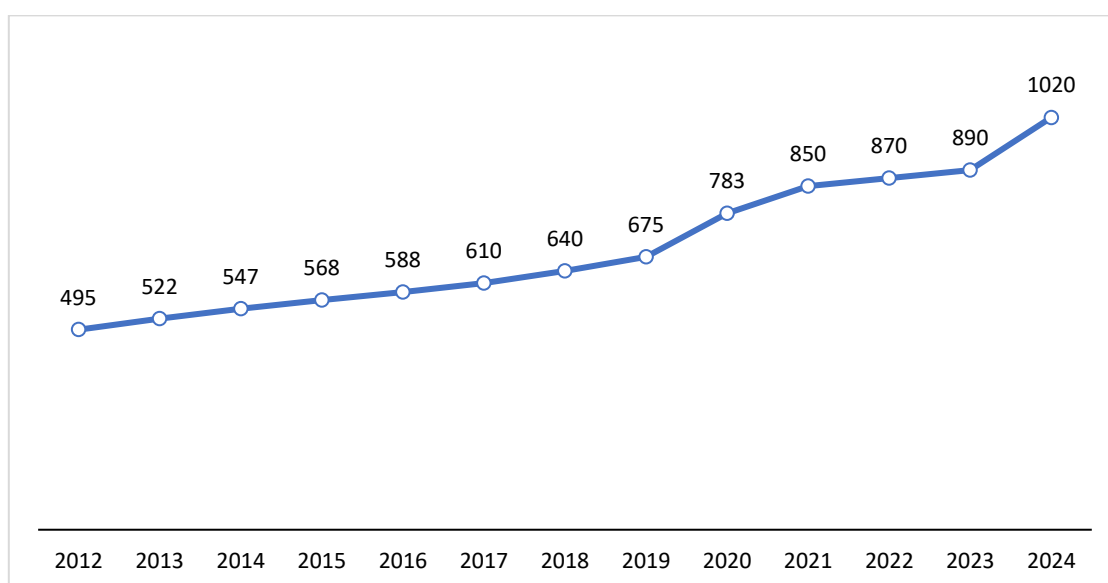
5.2. Procedimentos para Projeção da Demanda Futura

5.2.1. Coleta e Organização dos Dados de Demanda

A projeção de demanda é o elo que conecta mercado e operação. Dela derivam as decisões de capacidade, investimento e programação de produção que sustentam o plano de expansão. Sem estimativas confiáveis do volume futuro, o dimensionamento de equipamentos, utilidades e mão de obra tende a incorrer em erros de sub ou supercapacidade, com impactos diretos em custo, nível de serviço e retorno do projeto.

À luz das etapas de estudo de caso propostas por Cauchick (2007), esta subseção descreve especificamente a fase de coleta e análise dos dados de demanda da unidade estudada. Para isso, utilizou-se a série anual de vendas de rPET da Tepx entre 2012 e 2024, fornecida pela própria empresa. Conforme pode ser visualizado na Figura 17 – “Dados Históricos de Demanda Fornecidos pela Tepx”.

Figura 17 - Dados Históricos de Demanda Fornecidos pela Tepx (t/ano)



Fonte: Autoria Própria

Esses dados foram organizados em forma de série temporal e tratados estatisticamente, de modo a gerar uma trajetória projetada de consumo de rPET para o horizonte 2025–2035, posteriormente utilizada como insumo no planejamento da capacidade produtiva e na avaliação econômico-financeira.

5.2.2. Tratamento Estatístico e Modelagem da Demanda

5.2.2.1. Escolha da metodologia de previsão

Em consonância com o protocolo metodológico adotado, para a projeção de demanda tornou-se necessária a escolha da técnica de previsão mais adequada ao comportamento observado na série. Conforme descrito por Makridakis, Wheelwright e Hyndman (1998), a seleção do método deve partir das propriedades empíricas da série e do uso pretendido da previsão. Nesse sentido, optou-se pelo método de Holt porque as características da série de demanda de rPET e o uso pretendido da previsão no planejamento de capacidade ajustavam-se melhor a um modelo com nível e tendência, sem componente sazonal explícito. Como enfatizam Hyndman e Athanasopoulos (2018), o método de Holt é apropriado para séries com tendência definida, nas quais não há evidência consistente de sazonalidade. No histórico disponível, não se identificaram padrões sazonais ao longo dos anos. O método de Holt, concebido para esse tipo de comportamento, atualiza continuamente um nível e uma inclinação estimados a partir das observações mais recentes, gerando projeções coerentes com o ritmo de crescimento.

A suavização exponencial simples foi descartada porque, por construção, supunha série sem tendência. Conforme argumenta Makridakis (1998), esse método tende a produzir previsões defasadas quando a série apresenta movimentos sistemáticos de crescimento ou queda. Na prática, isso implicaria em um dimensionamento aquém da necessidade em trajetórias de crescimento ou sobredimensionamento em trajetórias de queda.

O Holt-Winters, por sua vez, agregaria valor apenas na presença de sazonalidade. Como reforçam Hyndman e Athanasopoulos (2018), a inclusão de um componente sazonal só é recomendada quando há periodicidade ao longo do tempo. Inserir um

componente sazonal nessas condições aumentaria a complexidade, exigiria mais dados por ciclo para estimar índices com precisão e criaria risco de capturar ruído como padrão.

5.2.2.2 Calibração dos Parâmetros do Método de Holt (α e β)

A calibração dos parâmetros de suavização determinou o peso conferido às novas observações na atualização dos componentes de nível e tendência da série, tendo sido regida pelo critério de minimização da soma dos erros quadráticos (SSE), conforme recomendado por Makridakis, Wheelwright e Hyndman (1998) para ajuste de modelos de suavização exponencial. No método de Holt, a dinâmica seguiu as equações clássicas para séries com crescimento sem sazonalidade, tal como apresentadas nesses autores, em que o nível e a tendência são atualizados recursivamente a partir das observações mais recentes.

$$L_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \text{ (Equação 2)}$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \text{ (Equação 3)}$$

Em que:

Y_t é a demanda observada;

L_t é o nível suavizado;

T_t é a tendência suavizada;

α é o índice de responsividade do nível ($\in (0,1)$);

β é o índice de responsividade da inclinação ($\in (0,1)$).

A projeção de Holt utilizou duas equações para gerar as previsões. A previsão um passo à frente no final do período t foi dada por $\hat{Y}_{t+1} = L_t + T_t$, isto é, a soma do nível estimado no período t com a inclinação (tendência) estimada no mesmo instante. Para horizontes maiores, manteve-se a linearidade: $\hat{Y}_{t+m} = L_t + mT_t$. Em termos práticos, o

modelo atualizou continuamente um o nível e a tendência a cada nova observação, produzindo trajetórias futuras como extensões lineares da informação mais recente.

Para começar os cálculos em uma série anual, usou-se uma forma de inicialização recomendada na literatura de Makridakis, Wheelwright e Hyndman (1998): $L_1 = Y_1$ e $T_1 = Y_2 - Y_1$. A calibração utilizou a série histórica anual de demanda de 2012 a 2024 fornecida pela empresa.

Definiu-se como objetivo minimizar:

Equação 18 - Minimização do Erro Quadrático

$$\min \sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2$$

isto é, a soma dos quadrados dos resíduos das previsões um passo à frente ao longo de todo o intervalo de estimação. Esse critério penalizou de forma crescente os grandes desvios, priorizando combinações (α, β) que reproduzissem a trajetória da série de forma a gerar a menor soma dos erros quadráticos.

A busca pelos parâmetros (α, β) levou a $\alpha = 0,66$ e $\beta = 0,12$. Em termos práticos, o α mais alto deixou o nível mais sensível aos dados mais recentes, o que condiz com o aumento de patamar visto no fim da amostra, enquanto o β moderado manteve a tendência mais estável, sem amplificar oscilações pontuais de contratos, logística ou oferta de sucata. Esse equilíbrio gerou previsões um passo à frente ajustadas e resíduos sem padrões claros, em linha com o objetivo de minimizar a SSE. A checagem de sensibilidade indicou que pequenas mudanças em torno de $(0,66; 0,12)$ não reduziram a SSE de modo relevante, mostrando que a solução foi estável e pouco dependente de ajustes numéricos finos.

A Tabela 3 apresenta, ano a ano, a demanda observada Y_t , o nível L_t , a tendência T_t , a previsão um passo à frente \hat{Y}_t e o resíduo $e_t = Y_t - \hat{Y}_t$, além de erros absolutos:

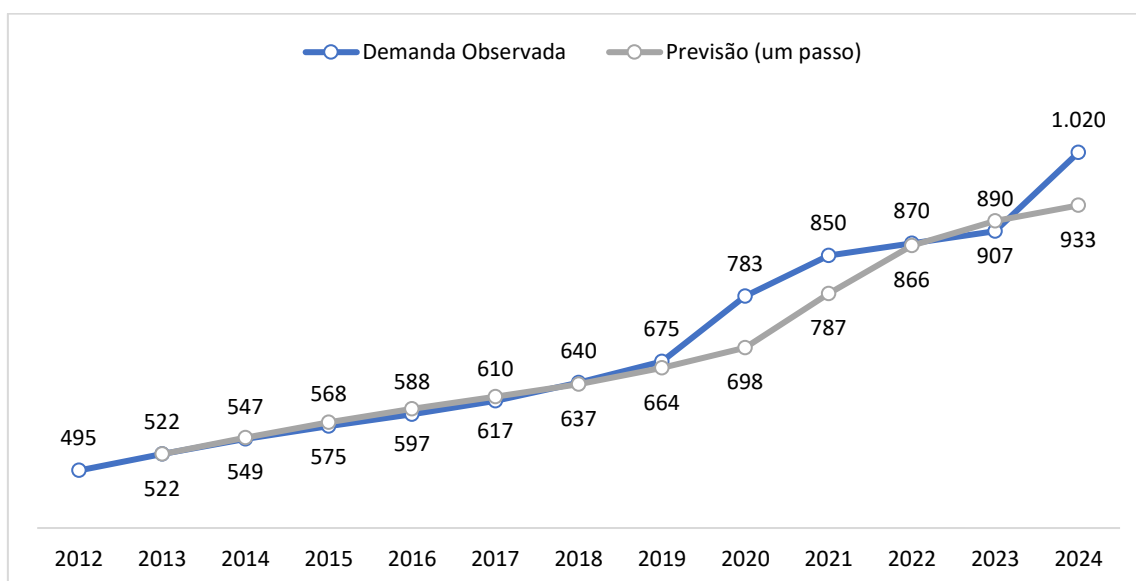
Tabela 3 - Demanda Observada, Nível, Tendência e Previsão um passo a frente

Ano	Demanda	Nível (L)	Tendência (T)	Previsão	Erro
2012	495	495	27	n.a.	n.a.
2013	522	522	27	522	-
2014	547	548	27	549	(2)
2015	568	570	263	575	(6)
2016	588	591	26	597	(9)
2017	610	612	25	617	(7)
2018	640	639	25	637	3
2019	675	671	26	664	11
2020	783	754	33	698	85
2021	850	829	38	787	63
2022	870	869	38	867	4
2023	890	896	37	907	(17)
2024	1.020	990	44	933	87

Fonte: Autoria Própria

Três figuras acompanham esta subseção e documentam a qualidade do ajuste. A Figura 18 – “Demanda Observada vs. Previsão um Passo a Frente” compara demanda observada e previsão um passo à frente, permitindo avaliar aderência e possíveis defasagens locais:

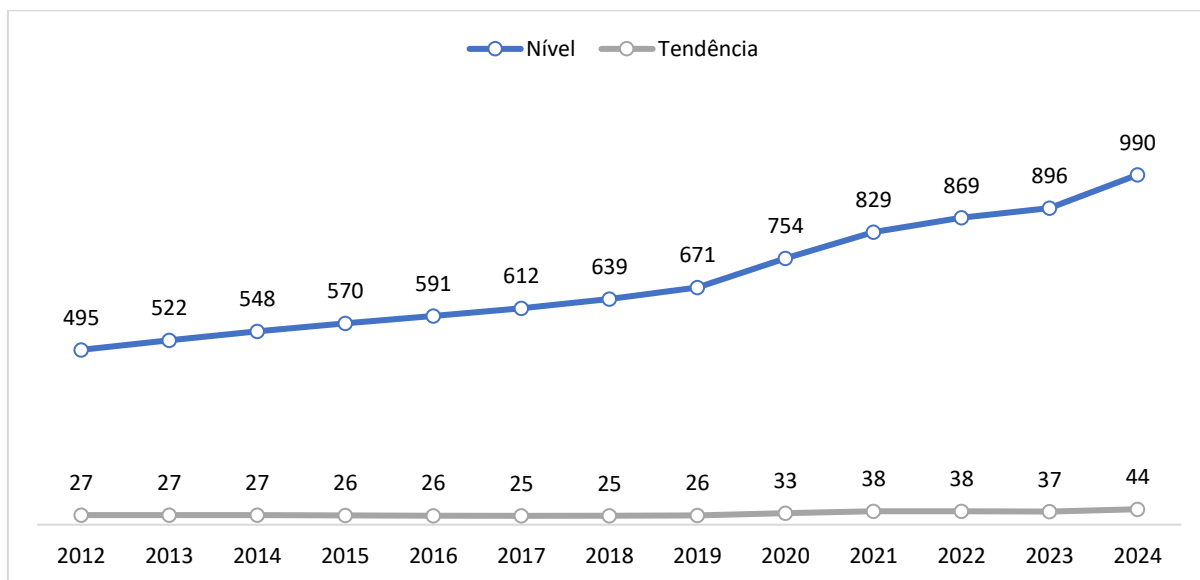
Figura 18 - Demanda Observada vs. Previsão um Passo a Frente (Método de Holt) (t/ano)



Fonte: Autoria Própria

A Figura 19 – “Evolução do Nível e Tendência ao Longo dos Anos” mostra as trajetórias dos componentes L_t e T_t , evidenciando a atualização do patamar e da inclinação ao longo do tempo:

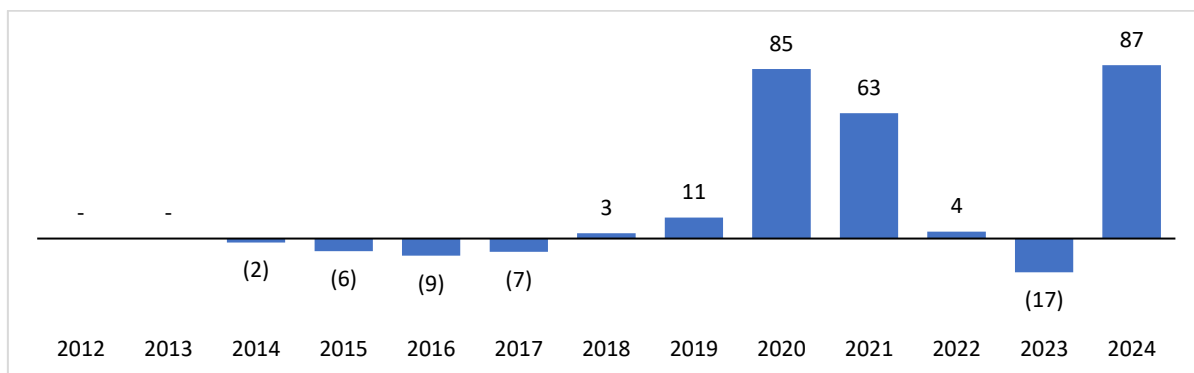
Figura 19 - Evolução do Nível e Tendência ao Longo dos Anos (t/ano)



Fonte: Autoria Própria

A Figura 20 – “Resíduos (Demanda – Previsão)” exibe os resíduos por ano, útil para inspeção visual de viés e identificação de pontos atípicos:

Figura 20 - Resíduos (Demanda – Previsão) (t/ano)



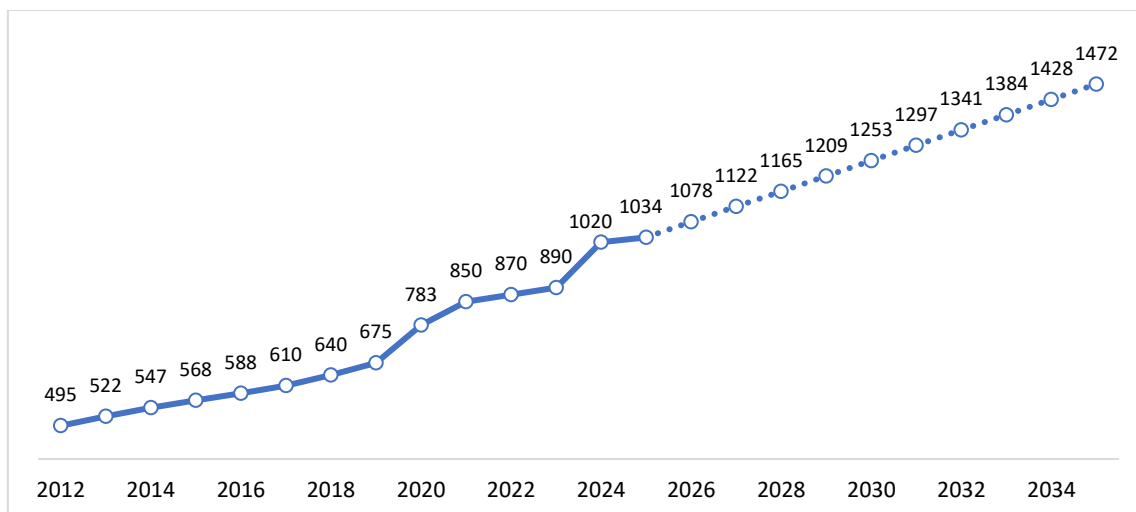
Fonte: Autoria Própria

5.2.3. Projeção da Demanda e Construção de Cenários

5.2.3.1. Aplicação do modelo e projeção da demanda 2025–2035

Com os parâmetros calibrados pela minimização da soma dos erros quadráticos, aplicou-se o método de Holt para projetar a demanda de 2025 a 2035. A partir dos últimos componentes estimados, cada ponto futuro foi calculado por $\widehat{Y}_{t+h} = L_t + hT_t$. Dessa forma, a projeção reproduziu o padrão observado no fim da amostra, com um patamar mais alto após 2019 e tendência de crescimento.

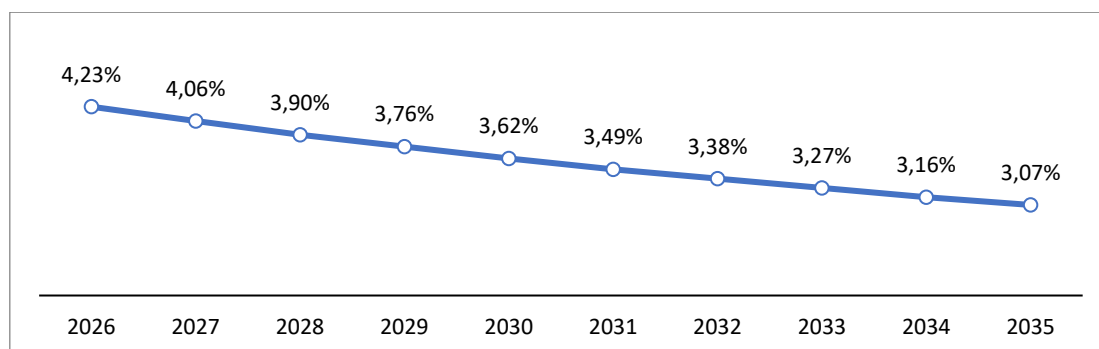
Figura 21 - Demanda de rPET: Histórico (2012-2014) e projeção (2025-2035) (t/ano)



Fonte: Autoria Própria

Em termos substantivos, os valores previstos apresentaram acréscimos anuais absolutos praticamente constantes, compatíveis com a lógica do Holt quando não há sazonalidade estruturada. A Figura 22 – “Crescimento Percentual Previsto YoY” mostra que o crescimento apresentou declínio suave ao longo do horizonte, efeito matemático esperado quando a trajetória é aproximadamente linear em níveis, pois a base anual aumenta e a taxa percentual tende a se reduzir.

Figura 22 - Crescimento Percentual Previsto YoY (2025 – 2035)



Fonte: Autoria Própria

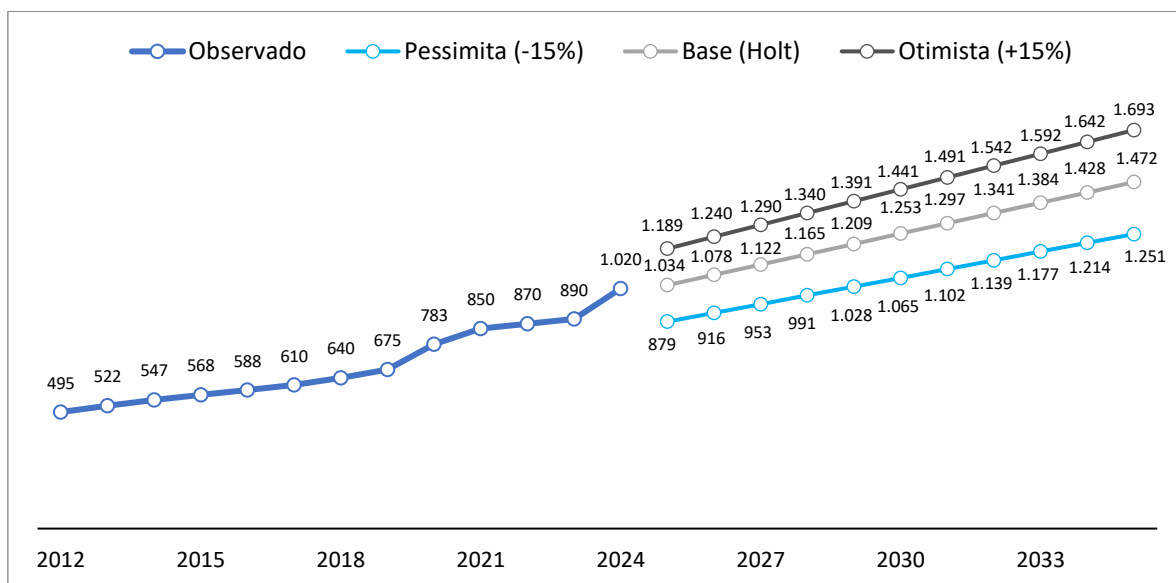
A consistência dos resultados foi compatível com o que se esperava do método. O Holt evitou a “atraso” típico da suavização simples em séries que crescem e também não exagerou a sensibilidade que surgiria se fosse incluída uma sazonalidade inexistente. Cada ponto projetado pôde ser lido de forma correta como $\widehat{Y_{t+h}} = L_t + hT_t$, o que facilitou conferir e auditar os cálculos.

Por fim, a aplicação permaneceu restrita ao escopo do modelo de séries temporais. Não foram incluídos limites operacionais, mudanças de *mix* de clientes, choques de preço ou regras de repartição de carteira devido à imprevisibilidade desses fatores.

5.2.3.2 Construção dos Cenários de Demanda

A construção dos cenários manteve coerência com o modelo de previsão adotado. Partiu-se da série Base (Holt) calibrada por SSE mínima ($\alpha=0,66$; $\beta=0,12$), cuja forma em níveis refletiu ausência de sazonalidade e presença de tendência positiva. Seguindo as recomendações de Armstrong (2001), sobre essa trajetória, aplicaram-se ajustes percentuais fixos para compor os cenários Pessimista e Otimista, definidos, respectivamente, por -15% e $+15\%$ em cada ponto previsto. Essa escolha preservou a proporcionalidade ao tamanho do mercado em cada ano e manteve a comparabilidade entre alternativas, sem criar comportamentos diferentes da estimativa proposta pela metodologia Holt (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018). O resultado pode ser melhor visualizado na Figura 23 – “Demanda de rPET Histórico e Projeções” com conjunto de trajetórias com a mesma inclinação da base, deslocadas para baixo ou para cima em magnitude condizente com cenários possíveis de mercado.

Figura 23 - Demanda de rPET Histórico e Projeções (t/ano)



Fonte: Autoria Própria

O intervalo de $\pm 15\%$ atendeu a três critérios objetivos. Primeiro, alinhou-se à prática aplicada em séries anuais com amostras curtas, evitando cenários mais voláteis do que a própria incerteza estatística do modelo (ARMSTRONG, 2001). Segundo, refletiu riscos e oportunidades do setor referentes a atrasos na coleta de PET pós-consumo, renegociações e variações do preço do PET virgem para a banda inferior e metas corporativas mais rígidas de conteúdo reciclado, maior capilaridade logística e estabilidade regulatória sustentaram para a banda superior. Terceiro, manteve leitura gerencial simples, pois um ajuste percentual constante por ano facilita transformar a curva de demanda em decisões de capacidade, compras de sucata e planejamento de turnos, sem reestimar o modelo a cada hipótese (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018).

O cenário Pessimista representou um avanço mais lento da economia circular, com pressão de custos e fricções logísticas. A demanda projetada continuou a crescer em níveis, mas partiu de um patamar menor, reduzindo a carga anual sobre a planta e postergando a saturação dos gargalos. O cenário Otimista capturou aceleração de adoção do rPET e cadeias de suprimento mais estáveis, elevando o patamar de toda a janela e antecipando a necessidade de reforço de capacidade. Em ambos os casos, como as três trajetórias herdaram a linearidade da base, os acréscimos anuais em valores absolutos permaneceram aproximadamente constantes dentro de cada cenário (ARMSTRONG, 2001).

A trajetória Base (Holt) serviu como referência para comparação e para o balanço de riscos. Para cada ano, ficaram registrados os níveis previstos em cada cenário e as variações absoluta e percentual (Δ YoY e YoY%). Esses indicadores orientam o *ramp-up* de produção, o ajuste de estoques de segurança e o planejamento de contratos de suprimento e utilidades, de forma consistente com cada trajetória (ARMSTRONG, 2001).

5.3. Procedimentos para Planejamento da Capacidade Produtiva

5.3.1. Coleta e Organização dos Dados Operacionais e de Capacidade

Em conformidade com as etapas metodológicas de estudo de caso propostas por Cauchick (2007), esta subseção corresponde à fase de coleta e organização dos dados operacionais referentes ao planejamento da capacidade produtiva, abrangendo a identificação das etapas, dos equipamentos instalados e dos parâmetros necessários para o cálculo da capacidade efetiva. Esses dados foram obtidos a partir de informações fornecidas pela equipe técnica da Tepx, compondo a base empírica utilizada nas análises subsequentes.

Antes de entrar de forma específica na coleta de dados, é útil retomar, de forma sintética, as principais etapas do processo.

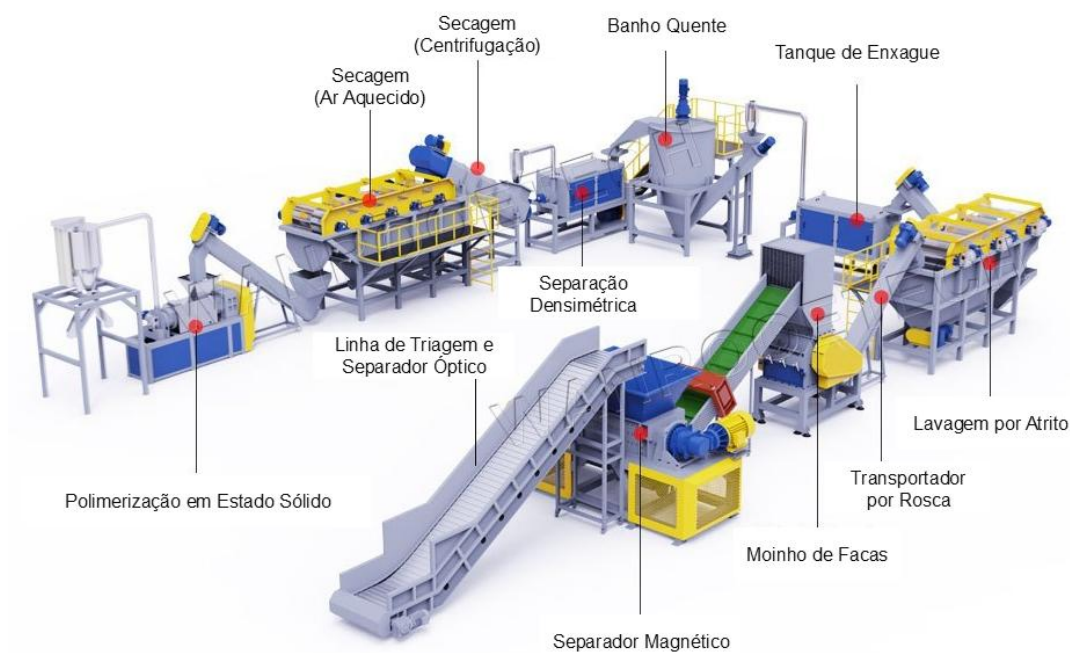
O processo tem início no recebimento e triagem dos fardos de PET pós-consumo, quando o material é descarregado, inspecionado e passa por uma separação inicial de contaminantes. Em seguida, as garrafas são moídas e convertidas em *flakes* com granulometria controlada, que alimentam o circuito de lavagem úmida responsável pela remoção de rótulos, tampas, cola e sujidades. Na sequência, ocorrem a separação densimétrica e a classificação final, retirando remanescentes não PET e finos e estabilizando a especificação do material que seguirá para a etapa térmica.

Concluídas as operações úmidas, os *flakes* são secos até níveis de umidade compatíveis com a extrusão com filtração, na qual o polímero é fundido, homogeneizado e convertido em *pellets*. Esses *pellets* passam então por cristalização e secagem e,

posteriormente, pela polimerização em estado sólido. Ao final, o produto passa por acabamento e controle de qualidade, é armazenado em silos e expedido em *big bags*.

A representação esquemática do processo, o que facilita a visualização, pode ser vista na Figura 24 – “Etapas de Reciclagem” disponibilizada abaixo:

Figura 24 - Etapas de Reciclagem



Fonte: Autoria Própria

Cada etapa do processo tem sua capacidade nominal definida pelos equipamentos que a compõem. Com base na documentação fornecida pela empresa e nas especificações teóricas informadas pelos respectivos fabricantes, foi consolidado as capacidades nominais de referência para cada equipamento. Essas capacidades serviram de base para o cálculo da capacidade efetiva (via OEE) e para a identificação do gargalo.

Tabela 4 - Capacidade Nominal por Etapa

Etapa	Capacidade Nominal (kg/h)
Triagem	754
Moagem	691
Lavagem	628
Separação Densimetria	628
Secagem	628
Extrusão	578

Fonte: Autoria Própria

Considerando a operação em 10 horas por dia, 5 dias por semana, o calendário produtivo totaliza aproximadamente 2.600 horas por ano ($10 \times 5 \times 52$). Com as capacidades nominais definidas por etapa e a extrusão como recurso restritivo em 578 kg/h, a capacidade teórica anual da linha é de cerca de 1.503 t/ano, em linha com a informação reportada pela companhia.

Na prática, a produção realizada é inferior à nominal devido a três grupos de perdas ao longo do processo. Primeiro, perdas de disponibilidade, associadas a paradas programadas (manutenção preventiva, limpezas, trocas de telas/facas), paradas não programadas (falhas mecânicas/elétricas) e indisponibilidades externas (falta de água, energia ou insumo). Segundo, perdas de performance, quando os equipamentos operam abaixo de sua taxa nominal por microparadas, rampas de partida, restrições (acúmulos ou falta de alimentação), entupimentos em lavadores e trocadores, além de limitações operacionais impostas por qualidade do insumo. Terceiro, perdas de qualidade, que abrangem refugo e retrabalho, além de perdas de massa inerentes ao processo como remoção de rótulos e tampas, purgas e descartes de filtração (NAKAJIMA, 1988; SLACK et al., 2013; MARTINS, 2021).

Para estimar a capacidade produtiva efetiva, realizou-se um acompanhamento das seis etapas do processo com o objetivo de mensurar, para cada uma delas, os fatores de disponibilidade (A), desempenho (P) e qualidade (Q). A opção por medir A, P e Q por etapa, em lotes de dias distintos, buscou capturar a variabilidade operacional típica, assegurando que os indicadores refletissem condições cotidianas e não apenas situações excepcionais, conforme indicado por Nakajima (1988).

A campanha de medições abrangeu cinco lotes de produção processados em datas diferentes, distribuídos ao longo de duas semanas. Em cada lote, estabeleceu-se um percurso de observação que acompanhou o material desde o recebimento até a saída em *pellets*, registrando tempos, taxas e conformidades por etapa. Para garantir comparabilidade utilizou-se uma recomendação de Martins (2021), em que padronizou-se o início de cada lote como o momento em que o material correspondente cruzava a primeira fronteira de processo e o término como a conformidade do respectivo pellet pós-extrusão.

O conceito de disponibilidade (A) adotado foi a razão entre o tempo efetivamente operando no lote e o tempo planejado para processá-lo naquela etapa. Assim, para cada um dos cinco lotes, registrou-se, etapa a etapa, o tempo líquido de operação (excluídas paradas programadas e *set-ups* previstos) e o tempo de parada não planejada, calculando-se $A = \text{tempo operando} / \text{tempo planejado}$ (NAKAJIMA, 1988). Esse registro foi realizado principalmente por anotações manuais durante o período de visita, tendo em vista que a Tepx não possui algum dispositivo para essa mediação do tempo.

No que se refere ao desempenho (P), a métrica definida foi a taxa efetiva atingida no lote em relação à taxa nominal especificada para a etapa. Em termos operacionais, $P = \text{taxa efetiva do lote} / \text{taxa nominal da etapa}$, computado aos cinco lotes, com conferência entre balanças de massa de plataforma e leituras de vazão quando disponíveis (NAKAJIMA, 1988).

A qualidade (Q) foi mensurada como a proporção do output do lote que atendeu às especificações mínimas de aceitação da etapa seguinte. Em todos os casos, as amostras foram coletadas seguindo o procedimento vigente, com volume suficiente para representar o lote (NAKAJIMA, 1988).

Para padronizar as medições e reduzir possíveis vieses, cada lote foi identificado com um carimbo de data e hora, o que facilitou o rastreamento ao longo do fluxo. Em cada etapa, as medições foram conduzidas por um integrante da equipe de processo junto com o observador do estudo, o que assegurou que qualquer ocorrência relevante fosse anotada na própria ficha do lote. Sempre que ocorreu algum evento fora do normal, registraram-se o tipo de ocorrência e a duração, e o dado foi mantido na série, sendo classificado como parada não planejada no cálculo da disponibilidade ou como impacto pontual na taxa de produção (SLACK et al., 2013). Apenas situações excepcionais, que

eram pouco representativas na rotina da Tepx, como testes de validação logo após uma manutenção maior, foram marcadas para análise e, quando necessário, foram segregadas na consolidação dos indicadores (NAKAJIMA, 1988).

Com as cinco observações por etapa coletadas, procedeu-se à consolidação dos indicadores. Para isso, calcularam-se, para cada etapa, a média e o desvio padrão das cinco medições de A, P e Q, o que resultou em um retrato estatístico da operação. Essa síntese forneceu os parâmetros que foram usados na simulação de Monte Carlo feita no capítulo “5.3.2. Análise da Capacidade Atual e Identificação de Gargalos”, as médias serviram como centro das distribuições de sorteio e os desvios padrões como medida da variabilidade (MONTGOMERY; RUNGER, 2012). Os valores observados durante as medições, bem como as médias e desvios das amostras, podem ser observados na Tabela 5 – “Medições da Disponibilidade”, Tabela 6 – “Medições do Desempenho” e na Tabela 7 – “Medições de Qualidade”:

Tabela 5 - Medições da Disponibilidade

Disponibilidade	M1	M2	M3	M4	M5	Média	Desv. Pad
Triagem	93,9%	92,2%	94,3%	93,5%	90,5%	92,9%	1,4%
Moagem	95,9%	95,0%	95,1%	92,5%	93,8%	94,5%	1,2%
Lavagem	90,2%	93,6%	91,9%	92,9%	90,7%	91,8%	1,3%
Separação Densimetria	91,1%	92,8%	90,3%	94,1%	93,2%	92,3%	1,4%
Secagem	94,8%	92,8%	95,9%	95,5%	94,9%	94,8%	1,1%
Extrusão	88,2%	89,8%	87,3%	87,9%	91,1%	88,9%	1,4%

Fonte: Autoria Própria

Tabela 6 - Medições do Desempenho

Desempenho	M1	M2	M3	M4	M5	Média	Desv. Pad
Triagem	94,7%	96,3%	95,8%	94,2%	96,3%	95,5%	0,8%
Moagem	95,2%	93,5%	93,2%	94,7%	92,6%	93,8%	1,0%
Lavagem	91,0%	90,0%	93,9%	93,3%	93,5%	92,4%	1,6%
Separação Densimetria	94,5%	93,9%	91,9%	92,0%	94,9%	93,4%	1,4%
Secagem	94,7%	93,9%	94,3%	95,1%	94,5%	94,5%	0,4%
Extrusão	90,8%	90,8%	89,5%	88,2%	90,2%	89,9%	1,0%

Fonte: Autoria Própria

Tabela 7 - Medições de Qualidade

Qualidade	M1	M2	M3	M4	M5	Média	Desv. Pad
Triagem	99,2%	98,9%	99,3%	98,7%	98,5%	98,9%	0,3%
Moagem	99,1%	99,6%	99,4%	99,1%	99,4%	99,3%	0,2%
Lavagem	99,3%	99,6%	99,5%	99,4%	99,4%	99,4%	0,1%
Separação Densimetria	99,7%	99,5%	99,4%	99,4%	99,9%	99,6%	0,2%
Secagem	99,9%	99,8%	99,5%	99,9%	99,8%	99,8%	0,1%
Extrusão	99,8%	99,7%	99,6%	99,5%	99,9%	99,7%	0,1%

Fonte: Autoria Própria

5.3.2. Análise da Capacidade Atual e Identificação de Gargalos

Dado que as medições de disponibilidade, desempenho e qualidade apresentaram variação entre lotes e entre etapas, é adequado empregar a simulação de Monte Carlo. Em vez de resumir o processo a um único valor médio, o Monte Carlo incorpora essa variabilidade observada, sorteando valores possíveis em cada repetição e estimando, assim, uma distribuição de capacidade da linha. Com isso, obtêm-se métricas mais que podem representar o processo de forma mais assertiva (como P50, P90 e probabilidade de atendimento), alinhadas ao comportamento real do processo (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Diante da variabilidade observada nas medições, é necessário a parametrização de distribuições para viabilizar os sorteios do Monte Carlo. Para as variáveis expressas como proporções entre 0 e 1 (disponibilidade (A) e qualidade (Q)) serão ajustadas distribuições *Beta*, centradas nas médias amostrais e ajustadas pelos respectivos desvios-padrão. Para o desempenho (P), expresso como proporção, será utilizada uma distribuição Normal truncada no intervalo [0,1], com média e desvio-padrão iguais aos estimados nas medições (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Para disponibilidade (A) e qualidade (Q), utilizou-se uma recomendação de MONTGOMERY e RUNGER (2012) em que os parâmetros da distribuição Beta serão obtidos pelo método dos momentos a partir da média amostral μ e do desvio-padrão amostral s . Define-se k e, então, calculam-se α e β conforme:

Equação 19 - Equação de cálculo do parâmetro de precisão

$$k = \frac{mu * (1 - mu)}{s^2} - 1$$

Equação 20 - cálculo do parâmetro de forma alfa

$$\alpha = mu * k$$

Equação 21 - cálculo do parâmetro de forma Beta

$$\beta = (1 - mu) * k$$

Com isso, obtêm-se os valores abaixo:

Tabela 8 – Índices de Dispersão e Parâmetros da Disponibilidades

Desempenho	M1	M2	M3	M4	M5	Média	Desv. Pad
Triagem	94,7%	96,3%	95,8%	94,2%	96,3%	95,5%	0,8%
Moagem	95,2%	93,5%	93,2%	94,7%	92,6%	93,8%	1,0%
Lavagem	91,0%	90,0%	93,9%	93,3%	93,5%	92,4%	1,6%
Separação Densimetria	94,5%	93,9%	91,9%	92,0%	94,9%	93,4%	1,4%
Secagem	94,7%	93,9%	94,3%	95,1%	94,5%	94,5%	0,4%
Extrusão	90,8%	90,8%	89,5%	88,2%	90,2%	89,9%	1,0%

Fonte: Autoria Própria

Tabela 95 - Índices de Dispersão e Parâmetros da Qualidade

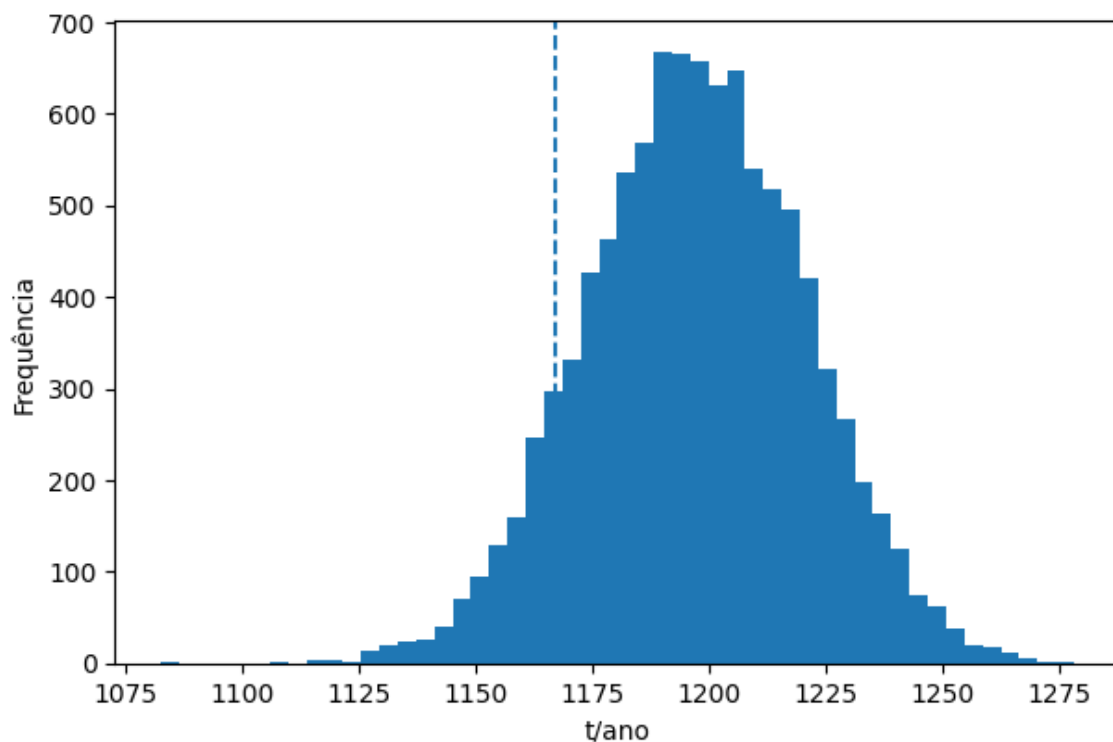
Qualidade	μ (média)	s (desvio)	α	β
Triagem	98,9%	0,3%	1.183,9	13,1
Moagem	99,3%	0,2%	1.884,1	13,1
Lavagem	99,4%	0,1%	4.575,4	25,8
Separação Densimetria	99,6%	0,2%	1.089,4	4,8
Secagem	99,8%	0,1%	1.657,7	4,0
Extrusão	99,7%	0,1%	2.138,5	6,7

Fonte: Autoria Própria

Com os parâmetros definidos, a simulação de Monte Carlo foi implementada no Google Colab (Python) sob o código que pode ser verificado na Figura 27 – “Código para Simulação de Monte Carlo”, presente no capítulo “8. Anexo”.

Seguindo o protocolo de análise descrito por Cauchick (2007), a etapa seguinte constitui no tratamento dos dados coletados, por meio de técnicas quantitativas que permitissem estimar a capacidade efetiva tendo como parâmetro diversas observações. Para isso, utilizou-se uma simulação Monte Carlo estruturada a partir das distribuições de disponibilidade, desempenho e qualidade observadas na planta. Em vez de um único valor fixo, geraram-se diversas vezes “anos possíveis” de operação, sorteando valores plausíveis para disponibilidade (A), desempenho (P) e qualidade (Q) em cada repetição, de acordo com as distribuições embasadas a partir das medições. Em cada repetição, calculou-se a capacidade efetiva de cada estágio como a capacidade nominal multiplicada por A, P e Q; em seguida, tomou-se a capacidade da linha como o menor desses valores, pois o sistema operou na velocidade do gargalo. Repetindo-se o procedimento 10.000 vezes, obteve-se a distribuição de capacidades anuais (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

A partir dessa distribuição, definiu-se como capacidade da linha o P90, entendido como a produção anual superada em 90% dos casos simulados para garantir maior confiabilidade ao processo. Com base nos resultados do *notebook*, a capacidade garantida (P90) foi de 1.166,9 t/ano. O gráfico de distribuições do *throughput* anual gerado pelo Colab pode ser visualizado na Figura 25 – “*Throughput* Anual Simulado por Monte Carlo”:

Figura 25 - *Throughput* Anual Simulado por Monte Carlo

Fonte: Autoria Própria

Com a capacidade garantida fixada em 1.166,9 t/ano (P90), estabeleceram-se as referências operacionais necessárias para avaliar as alternativas de expansão. Com esse dado, foi possível analisar se o aumento dos turnos, a duplicação de linhas ou a expansão modular era a alternativa mais viável para o aumento da capacidade da fábrica.

5.3.3. Síntese das Alternativas de Expansão de Capacidade

Na sequência, em alinhamento com a etapa metodológica de levantamento e análise de alternativas, conforme orientado por Cauchick (2007), foram mapeados os possíveis caminhos de expansão da capacidade produtiva da Tepx.

Embora a Teoria das Restrições recomende, em primeiro lugar, a exploração de ganhos de produtividade no gargalo antes de decisões de investimento em capacidade adicional (GOLDRATT, 1990), os índices relacionados aos OEEs para todas as etapas apresentaram patamares elevados, de modo que melhorias incrementais tenderiam a gerar apenas ganho marginal de volume. Em contrapartida, a demanda projetada cresce de

1.020 t/ano em 2024 para 1.472 t/ano em 2025, ampliando de forma significativa o descolamento entre capacidade efetiva e necessidade de atendimento mesmo em cenários com aumento de OEE. Diante desse desbalanceamento estrutural, o trabalho concentrou-se na avaliação de alternativas de expansão de capacidade, tomando eventuais ganhos operacionais como complemento, e não como soluções totais do problema.

Para atender às demandas futuras e, sobretudo, diferentes caminhos de expansão podem ser adotados. Assim, o objetivo desta seção é apresentar três alternativas:

1. Aumento de turnos
2. Duplicação de linhas
3. Expansão modular no gargalo

Em primeiro lugar, o aumento para mais turnos amplia as horas produtivas da mesma linha, sem alterar o arranjo físico. Nesse caso, a empresa passa de um para dois turnos, ou até três, ajustando escala de pessoal, janelas de manutenção e suprimento de insumos. A vantagem é o ganho rápido de capacidade efetiva com baixo CAPEX. A desvantagem é o maior OPEX com mão de obra adicional e adicional noturno (SLACK et al., 2013).

Já a duplicação de linhas consiste em instalar uma segunda linha completa, paralela à atual, replicando as etapas de triagem, moagem, lavagem, separação, secagem e extrusão. A vantagem é o salto relevante de volume e a maior resiliência, pois se uma linha para, a outra segue produzindo. A desvantagem é o CAPEX elevado, a necessidade de espaço e a maior complexidade de operação e manutenção (SLACK et al., 2013).

Por fim, a adição de uma máquina na etapa gargalo (a chamada expansão modular) foca diretamente no recurso restritivo identificado. Em termos práticos, instala-se um equipamento paralelo na etapa limitante, mantendo o restante do fluxo praticamente inalterado. A vantagem é a eficiência do investimento, com menor CAPEX e prazo de implantação geralmente mais curtos do que uma nova linha completa. A desvantagem é a necessidade de checar a capacidade de suporte a montante e a jusante (alimentação, secagem, cristalização/pré-SSP, logística) e de gerenciar o balanceamento entre duas máquinas na mesma etapa (GOLDRATT; 1990).

5.3.3.1. Critérios para escolha da alternativa de expansão

Finalmente, seguindo a etapa de análise e comparação das alternativas, proposta na metodologia de estudo de caso, procedeu-se à avaliação técnica das opções levantadas. No caso da Tepx, para atender às demandas futuras e, sobretudo, respeitar a lógica da Teoria das Restrições (TOC), a solução mais adequada é duplicar a linha completa. Em termos simples, a TOC diz que o sistema produz na velocidade do seu recurso mais restritivo (GOLDRATT; 1990); e, no caso analisado, a demanda do cenário otimista (651 kg/h) ultrapassa o teto efetivo de todas as etapas da linha atual. Mesmo a etapa com maior folga, a triagem, em torno de 565 kg/h, não atinge a taxa necessária. Assim, elevar apenas um ponto (por exemplo, a extrusão) deslocaria o gargalo sucessivamente para as demais etapas, exigindo uma sequência de upgrades e paradas (GOLDRATT; 1990).

Em sequência, vale posicionar a decisão com números simples. Hoje, a capacidade efetiva global é de cerca de 1.166,9 t/ano. Com uma segunda linha dimensionada em patamar semelhante, o site passaria a operar em 2.333,8 kt/ano, cobrindo o cenário otimista de 1.693 t/ano com margem operacional. Dentro de cada linha, a extrusão continua sendo o gargalo provável, porém, no nível de fábrica, o *throughput* passa a ser a soma das duas linhas; na prática, ganha-se robustez, pois uma linha pode parar para manutenção enquanto a outra segue produzindo (SLACK et al., 2013).

Por comparação, as alternativas remanescentes ficam menos eficientes. Por um lado, aumentar turnos eleva horas produtivas sem comprar máquinas, mas cresce o OPEX, encurta janelas de manutenção. Por outro lado, expansão modular no gargalo é ótima quando a restrição é um ponto único; aqui, porém, ao reforçar a extrusão, o gargalo migra para triagem, moagem, lavagem, separação e secagem, exigindo múltiplos projetos em cascata, mais paradas e maior risco de subutilização (SLACK et al., 2013).

5.4. Procedimentos para Avaliação Econômico-financeira da Expansão

5.4.1 Coleta e Organização das Premissas Econômico-financeiras do Projeto

Seguindo a metodologia de estudo de caso proposta por Cauchick (2007), a definição da taxa de desconto corresponde à etapa de coleta de dados da avaliação econômico-financeira do projeto. A avaliação de investimentos exigiu a definição de uma taxa mínima de atratividade compatível com o risco assumido: projetos com maior incerteza requerem retornos mais elevados, enquanto iniciativas menos arriscadas aceitam taxas menores (ASSAF NETO, 2014). Por isso, a taxa de desconto foi construída para representar o valor do dinheiro no tempo de modo coerente com o perfil de risco do empreendimento, de forma que os indicadores econômico-financeiros refletissem adequadamente a realidade do projeto.

No caso analisado, foi considerado que a expansão seria integralmente financiada com capital próprio dos sócios; portanto, adotou-se o custo do capital próprio como taxa de desconto do projeto. A mensuração desse custo, com as premissas e o método utilizados, é apresentada a seguir.

$$K_e = R_f + \beta_e ERP_{\text{global}} + CRP_{\text{país}} \text{ (Equação 13)}$$

Na fórmula do custo de capital próprio, o primeiro componente foi o (R_f) (taxa livre de risco), entendido como a remuneração associada a um investimento sem risco de crédito (ASSAF NETO, 2014). Em termos conceituais, esse parâmetro captou apenas o valor do dinheiro no tempo; contudo, a literatura discutiu amplamente a inexistência de um ativo verdadeiramente isento de risco. Por convenção recomendada na literatura de DAMODARAN (2012) e por diversos outros autores, adotou-se o retorno dos títulos do

Tesouro dos Estados Unidos (*US Treasuries*) como melhor aproximação prática, dado o baixo risco de crédito soberano e a elevada liquidez desses papéis.

Dessa forma, o R_f serviu como piso para a taxa exigida pelos investidores, ao qual se somaram os demais prêmios de risco discutidos nas seções a seguir. Dados para esse retorno podem ser obtidos no site do Banco Central Americano e os valores encontrados em consulta no dia 14/10/2025 estão demonstrados na Tabela 10 – “Medições do US-Treasury”:

Tabela 6 - Medições do US-Treasury

	US-Treasury Bonds 10 Anos (%)
Média 30 Dias	4,1
Mediana 30 Dias	4,1
Média 60 Dias	4,2
Mediana 60 Dias	4,2
Média 6M	4,3
Mediana 6M	4,3
Média 12M	4,3

Fonte: Autoria Própria

Observou-se que a trajetória descendente das taxas indicou redução dos riscos percebidos pelo mercado ao longo do período analisado. Como essa tendência se manteve de forma consistente, adotou-se a recomendação de Damodaran (2012) de assumir o valor médio dos últimos trinta dias como uma aproximação adequada e estável para compor o parâmetro livre de risco do projeto. Assim, esse valor médio recente foi utilizado como base do R_f .

Outro componente relevante do custo do capital próprio foi o prêmio de risco de mercado global (ERP global), entendido como a diferença entre o retorno esperado do mercado acionário e a taxa livre de risco (ASSAF NETO, 2014). Em termos práticos, esse prêmio mediu a premiação adicional exigida pelos investidores para alocar recursos em ações, em comparação a um ativo considerado livre de risco. Por convenção discutida por Damodaran (2012), empregou-se o *S&P 500* como referência para o retorno de mercado, dada sua liquidez, profundidade e longo histórico.

Para a estimação do ERP global, recorreu-se ao arcabouço de dados da plataforma Kroll que considera o retorno anualizado do S&P500 e a taxa livre de risco. Considerando

a série histórica e excluindo períodos de guerra, apurou-se um prêmio médio de 7,31% para o mercado norte-americano. Como esse resultado se mostrou consistente com a prática de avaliação e com o perfil de risco assumido no estudo, adotou-se 7,31% como ERP global do projeto, ao qual se somaram, nas etapas seguintes, os ajustes específicos necessários.

Dando sequência, o β foi empregado como medida da sensibilidade do retorno do ativo em relação ao retorno do mercado, isto é, o quanto o projeto, em média, variou quando o mercado variou. Valores próximos de 1 indicaram comportamento alinhado ao mercado; superiores a 1 sinalizaram maior volatilidade relativa; inferiores a 1 sugeriram menor sensibilidade; e valores negativos apontaram movimentos em direção oposta. Essa interpretação permitiu traduzir o risco sistemático do projeto em um único parâmetro, coerente com a lógica do modelo de precificação por risco de mercado (ASSAF NETO, 2014).

Para a estimação aplicada ao estudo de caso, analisou-se o comportamento de betas de empresas listadas cuja principal fonte de receita estava associada à economia circular, de modo a garantir comparabilidade setorial (ALLEN, 2019). Inicialmente, os betas observados foram ajustados para remover efeitos de alavancagem financeira (betas desalavancados), reduzindo a influência de estruturas de capital específicas. Em seguida, esses betas foram realinhados à estrutura-alvo do projeto. A metodologia de estimação do β , com os passos e a fórmula utilizada, é apresentada na Tabela 11 – “Medições do Beta de Empresas Comparáveis”.

Tabela 11 - Medições do Beta de Empresas Comparáveis

Empresa	Beta Alavancado	Taxa de Imposto (%)	Dívida Bruta (D) (Local mm)	Mkt. Cap (E) (Local mm)	D / (D + E)	R ²	Beta Desalavancado
Indorama Ventures	1,41	20,0%	7.666	3.449	69,0%	35,7%	0,51
Alpek	0,67	30,0%	2.210	1.104	66,7%	5,0%	0,28
Orbia	0,92	30,0%	5.562	1.327	80,7%	18,6%	0,23
Veolia	1,05	25,8%	32.515	26.322	55,3%	53,8%	0,55
FCC	0,85	25,0%	5.930	5.592	51,5%	24,6%	0,47
Orizon	1,00	34,0%	355	693	33,9%	22,3%	0,75
Média	0,98				59,5%	26,7%	0,47
Mediana	0,96				61,0%	23,5%	0,49

Fonte: Autoria Própria

A sensibilidade do retorno de um ativo em relação ao mercado está diretamente vinculada à sua estrutura de capital, isto é, à proporção de recursos próprios e de dívida utilizada pela empresa (ALLEN, 2014). Quando esse efeito de alavancagem financeira foi incorporado, obteve-se o chamado beta alavancado, que refletiu tanto o risco operacional quanto o risco adicional decorrente do endividamento. Para que a proporção de dívida e de capital próprio das companhias consideradas não seja levado em consideração nesse trabalho, adotou-se o processo de desalavancagem do beta, recomendado por Allen (2014), para obtenção de um coeficiente que represente a variabilidade apenas vinculada ao setor analisado:

$$\beta_e = \beta_u \left[1 + (1 - T_c) \frac{D}{E} \right] \text{ (Equação 14)}$$

Em que:

β_e é o beta alavancado

β_u é o beta desalavancado

T_c é a taxa de imposto vigente no país

$\frac{D}{E}$ é a proporção entre a dívida e o patrimônio líquido da empresa

Com base no conjunto de companhias selecionadas, todas atuantes em reciclagem, estimou-se um beta desalavancado médio de 0,47, refletindo o risco operacional típico do setor, independentemente das estruturas de capital individuais. Para trazer esse parâmetro à realidade de financiamento observada no mercado, procedeu-se à “realavancagem” do beta com a estrutura média de capital do setor, incorporando a razão dívida-sobre-patrimônio e o efeito fiscal associado aos juros. Dessa forma, obteve-se o beta alavancado de referência para o projeto, compatível com a prática setorial e adequado ao cálculo do custo do capital próprio (ALLEN, 2014). Com isso, tem-se:

Tabela 12 - Realavancagem do Beta

Beta Desalavancado	0,47
(x) $D / (D + E)$	59,5%
(-) Taxa de Imposto – Brasil	34,0%
(=) Beta Realavancado	0,92

Fonte: Autoria Própria

Nos cálculos apresentados na Tabela 12 – “Realavancagem do Beta”, considerou-se a recomendação de adotar estrutura média de capital das empresas do setor, partindo do pressuposto de que, no longo prazo, as companhias atuantes nesse segmento tenderiam a convergir para um perfil financeiro semelhante (ALLEN, 2014). A partir dessa premissa, obteve-se um beta realavancado de 0,92, valor que passou a representar adequadamente o risco combinado de operação e de capitalização para o projeto em estudo.

Outro componente essencial da estrutura do custo de capital foi o prêmio de risco país. Investir em economias distintas implica assumir riscos específicos relacionados a fatores econômicos, políticos, jurídicos e fiscais, que variaram conforme o ambiente institucional de cada nação (ALLEN, 2014). Assim, investir no Brasil apresentou um nível de risco diferente daquele associado a economias desenvolvidas, como o Japão ou os Estados Unidos, exigindo uma taxa de retorno adicional que compensasse essa diferença de exposição.

Para captar esse efeito, aplicou-se o chamado prêmio de risco país, obtido a partir do *Credit Default Swap* (CDS) de cinco anos do Brasil. O CDS representou, de forma simplificada, o custo de um seguro contra o eventual calote da dívida soberana do país, funcionando como uma medida da percepção de risco pelos investidores internacionais. Dessa forma, quanto maior o CDS, maior foi o prêmio exigido para investir no mercado nacional (ALLEN, 2014). A variação das taxas de CDS brasileiras nos últimos três anos pode ser observada no gráfico apresentado na Figura 26 – “Variação do CDS nos últimos 3 anos”:

Figura 26 - Variação do CDS nos últimos 3 anos



Fonte: Autoria Própria

Nos últimos trinta dias, observou-se uma média de 2,30% para o CDS brasileiro, valor que foi adotado como referência para o cálculo do prêmio de risco país.

Com todos os parâmetros devidamente definidos, tornou-se possível determinar o custo do capital próprio correspondente à expansão proposta. Esse indicador sintetizou a taxa mínima de retorno exigida pelos investidores para compensar o risco assumido no projeto e serviu como base para o cálculo dos demais indicadores de viabilidade. A formulação final do custo de capital próprio é apresentada na Tabela 14 – “*Cost of equity* para a Tepx”:

Tabela 7 - Cost of equity para a Tepx

Taxa Livre de Risco	
US-Treasury (10yr)	4,12%
(+) Prêmio de Risco País	2,30%
(=) Taxa Livre de Risco Aj.	6,51%
Beta Alavancado	
Beta Desalavancado	0,47
(x) D / (D + E) (Meta)	59,5%
(-) Taxa de Imposto (BRA)	34,0%
(=) Beta Realavancado	0,92
Cost of Equity (Ke)	
Prêmio de Risco de Mercado	7,31%
(x) Beta Realavancado	0,92
(=) Prêmio de Risco de Mercado Aj.	6,7%
(+) Taxa Livre de Risco Aj.	6,5%
(=) Cost of Equity (US\$ Nominal Terms)	13,2%

Fonte: Autoria Própria

O valor do custo de capital próprio obtido inicialmente foi expresso em dólar, uma vez que todos os parâmetros utilizados estavam indexados à moeda norte-americana. Para que o resultado pudesse ser aplicado de forma coerente às projeções financeiras da empresa, que são denominadas em reais, foi necessário realizar a conversão da taxa para a moeda nacional (DAMODARAN, 2012).

Essa conversão considerou as diferenças de inflação entre os dois países, de modo a refletir o poder de compra esperado em cada economia no longo prazo. Foram utilizados, portanto, a inflação projetada dos Estados Unidos e a inflação projetada do Brasil para o mesmo horizonte de análise (DAMODARAN, 2012). A fórmula correspondente à conversão é apresentada pela Equação 15.

$$K_e^{USD} = ((1 + K_e^{BRL}) / (1 + \pi_{BRL})) * (1 + \pi_{USD}) - 1 \text{ (Equação 15)}$$

Em que:

K_e^{USD} é o *cost of equity* indexado ao dólar

K_e^{BRL} é o *cost of equity* indexado ao real

π_{BRL} é a inflação do Brasil de longo prazo

π_{USD} é a inflação norte-americana de longo prazo

Tabela 8 - Transformação para Índices em BRL

Custo de Capital Próprio (US\$ Nominal)	13,2%
Inflação EUA	2,5%
Inflação Brasil	3,5%
Custo de Capital Próprio (R\$ Nominal)	14,3%

Fonte: Autoria Própria

Com os cálculos presentes na Tabela 15 – “Transformação para Índices em BRL”, determina-se um *cost of equity* para o projeto, em reais e em termos nominais, de 14,3%.

5.4.2 Construção dos Fluxos de Caixa e Indicadores de Viabilidade

A viabilidade econômica da expansão foi avaliada por meio da metodologia do Valor Presente Líquido (VPL). Nessa abordagem, todos os fluxos de caixa associados ao projeto, ao longo do horizonte de análise, são trazidos a valor presente por uma taxa de desconto coerente com o risco, de modo a comparar, o investimento inicial e os benefícios futuros. Do ponto de vista metodológico, a aplicação do VPL permite verificar se o valor gerado pelo projeto supera o custo de oportunidade do capital (ASSAF NETO, 2014).

No contexto da expansão da linha produtiva como um todo, consideraram-se integralmente os investimentos em capital fixo (CAPEX) vinculados ao projeto. Esses desembolsos compuseram o investimento inicial e foram registrados no ano zero como saída de caixa. Além do CAPEX, incorporaram-se às projeções os efeitos operacionais esperados (receitas, custos, despesas), as necessidades de capital de giro e um valor residual ao término do horizonte de avaliação, de modo a refletir a geração de caixa do empreendimento (ASSAF NETO, 2014).

Para a determinação do montante de investimento, procedeu-se à cotação do maquinário e dos equipamentos necessários para a expansão da linha de produção da Tepx. Com esses insumos, estruturou-se o fluxo de caixa do projeto e aplicou-se o critério do VPL para análise da decisão de investimento. A cotação dos valores dos maquinários

necessários para o projeto de expansão está demonstrada na Tabela 16 – Investimentos necessários para a nova linha”:

Tabela 9 - Investimentos Necessários para Nova Linha

Equipamento	Quantidade	Valor total estimado (R\$)
Esteira de triagem	1	21.000
Separador óptico	1	42.000
Separador magnético	1	14.000
Moinho de facas com peneira interna	1	31.500
Arruela (pré-lavagem)	1	17.500
Lavadora por atrito	1	28.000
Lavador quente	1	24.500
Tanques de flotação	2	31.500
Tanques de enxágue	2	21.000
Tanques de separação densimétrica	2	56.000
Peneira vibratória	1	12.500
Centrífuga/secadora	1	42.000
Silo secador	1	26.500
Extrusora com vácuo	1	70.000
Trocador de telas/filtro	1	17.500
Peletizador	1	52.500
Cristalizador	1	38.500
Secador desumidificador	1	31.500
Reator SSP com circuito de gás inerte	1	87.500
Despoeirador/peneira classificadora	1	15.750
Conjunto de instrumentos de laboratório	1	21.000
Silos pulmão	2	84.000
Ensacadeira	1	24.500
Sistema de carregamento a granel	1	38.500
Total		848.750

Fonte: Autoria Própria

Considerando os valores acima, o fluxo de caixa de investimento foi estimado em R\$ 848.750,00 no ano zero, refletindo os desembolsos necessários para aquisição e instalação do maquinário. A partir da entrada em operação, a geração de caixa passou a decorrer do volume adicional de rPET produzido pela nova linha, uma vez que essa capacidade incremental atendeu a parcela de demanda que não pôde ser suprida pela linha de produção 1.

Para cada ano do horizonte de análise, a quantidade atribuída à nova linha correspondeu à diferença entre a demanda projetada e a capacidade efetiva máxima da

linha 1, respeitados os limites operacionais da expansão. Esse procedimento permitiu isolar o efeito da nova linha na receita, bem como capturar a evolução do aproveitamento ao longo do tempo sob os diferentes cenários de demanda.

Com base nessa lógica, elaborou-se a distribuição anual das quantidades de rPET, em toneladas, de acordo com os cenários prospectivos definidos na etapa de previsão de demanda. Essa distribuição, que fundamentou as projeções de entradas de caixa operacionais do projeto, pode ser analisada na Tabela 17 – “Demanda de rPET em diferentes cenários” e na Tabela 18 – “Demanda Produtiva Absorvida pela linha 2”:

Tabela 10 - Demanda de rPET em Diferentes Cenários

Cenário	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Base	1.034	1.078	1.122	1.165	1.209	1.253	1.297	1.341	1.384	1.428	1.472
Otimista	1.189	1.240	1.290	1.340	1.391	1.441	1.491	1.542	1.592	1.642	1.693
Pessimista	879	916	953	991	1.028	1.065	1.102	1.139	1.177	1.214	1.251

Fonte: Autoria Própria

Tabela 11 - Demanda Produtiva Absorvida pela Linha 2 (t/ano)

Cenário	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Base	0	0	0	0	42	86	130	174	217	261	305
Otimista	22	73	123	173	224	274	324	375	425	475	526
Pessimista	0	0	0	0	0	0	0	0	10	47	84

Fonte: Autoria Própria

Segundo dados históricos disponibilizados pela IMAR Group que fornece valores da resina reciclada de PET em diversos países do mundo, o valor médio da resina rPET no Brasil em 2024 foi de R\$ 6.244 por tonelada. Com base nesses valores, consegue-se projetar a receita estimada para cada cenário do projeto analisado no trabalho, em milhares de reais, e que pode ser visualizada na Tabela 19 – “Receita Proveniente da Linha 2”:

Tabela 12 - Receita Proveniente da Linha 2 (R\$ '000)

Cenário	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Base	-	-	-	-	263	538	812	1.087	1.356	1.630	1.905
Otimista	138	456	769	1.081	1.399	1.711	2.024	2.342	2.654	2.967	3.285
Pessimista	-	-	-	-	-	-	-	-	63	294	525

Fonte: Autoria Própria

Para mensurar o quanto dessa receita se converte em caixa ao acionista, adotou-se a metodologia de Fluxo de Caixa Livre do Acionista (FCFE). A Tepx não se sentiu confortável em fornecer valores referentes ao CAPEX, capital de giro, depreciação e amortização e variação de dívida, contudo, indicou que, nas condições atuais de operação, a geração de caixa aproximada pelo FCFE situa-se próxima de 11% da receita. Assim, preservando a confidencialidade das premissas, e considerando a precificação observada e a métrica de geração de caixa reportada pela companhia foi possível mensurar os fluxos de caixa livre do acionista referentes ao projeto do trabalho. Para assegurar a aplicação metodológica correta, além de calcular os fluxos de caixa correspondentes para cada ano, é fundamental fazer a projeção do valor terminal do projeto, isto é, os valores dos fluxos calculados para a perpetuidade, tendo em vista que o projeto não terá fim definido em 2035. A metodologia consagrada por ASSAF NETO (2014), indica a aplicação da Fórmula de Gordon para o cálculo do valor da perpetuidade:

Equação 22 - Fórmula de Gordon

$$Perpetuidade = \frac{FCFE_{2035}(1 + g)}{(r - g)}$$

Em que:

 $FCFE_{2035}$ é o valor do fluxo de caixa para 2035; g é a taxa de crescimento dos fluxos na perpetuidade;

r é a taxa de desconto já calculada.

Ainda seguindo a metodologia indicada por ASSAF NETO (2014), para a taxa de crescimento g assume-se uma perspectiva conversadora ao adotar a taxa de inflação IPCA de longo prazo (2029) que pode ser consultada no site do Banco Central do Brasil. Com isso, são obtidos indicadores presentes na Tabela 20 – “Índices para Construção do Valor na Perpetuidade” para aplicação da fórmula de Gordon para cada um dos cenários:

Tabela 13 - Índices para Construção do Valor na Perpetuidade

Cenário	FCFE (2035)	G	r
Base	276	3,5%	14,3%
Otimista	476	3,5%	14,3%
Pessimista	76	3,5%	14,3%

Fonte: Autoria Própria

Com todos esses parâmetros definidos, é possível mensurar a geração de caixa livre do acionista para todos os fluxos projetados e para a perpetuidade do projeto:

Tabela 14 - Fluxos de Caixa Gerados de Linha 2 (R\$ ‘000)

FCFE Proveniente da Quantidade de rPET Produzida pela Linha 2 (R\$ ‘000)												
Cenário	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	Perpetuidade
Base	-	-	-	-	38	78	118	158	197	236	276	2.647
Otimista	20	66	111	157	203	248	293	340	385	430	476	4.565
Pessimista	-	-	-	-	-	-	-	-	9	43	76	730

Fonte: Autoria Própria

Com os fluxos presentes na Tabela 21– “Fluxos de Caixa Gerados pela Linha 2”, consegue-se determinar a viabilidade do projeto a partir da metodologia do VPL:

Tabela 15 - Valor Presente Líquido dos Diferentes Cenários

Cenário	VPL (R\$ ‘000)
Base	99
Otimista	1.220
Pessimista	(650)

Fonte: Autoria Própria

Os resultados demonstrados na Tabela 22 – “Valor Presente Líquido dos Diferentes Cenários” indicam que, tanto no cenário base quanto no otimista, o projeto apresenta viabilidade financeira satisfatória. Entretanto, caso prevaleçam as premissas do cenário pessimista, a iniciativa deixa de atender aos critérios mínimos de retorno e não se sustenta do ponto de vista econômico-financeiro.

5.4.3 Avaliação da atratividade pelo cálculo da TIR

A Taxa Interna de Retorno (TIR) foi utilizada como indicador complementar para analisar a atratividade da expansão da linha produtiva. Esse indicador representa a taxa de retorno que zera o valor presente líquido dos fluxos de caixa futuros do projeto, permitindo expressar em termos percentuais o ganho econômico esperado diante do capital investido e possibilitando a comparação direta com a taxa mínima de atratividade definida na subseção 4.4.1.1 (ASSAF NETO, 2014).

No estudo realizado, registrou-se no ano zero o desembolso correspondente ao investimento inicial em capital fixo e instalações. Em seguida, projetaram-se as entradas e saídas de caixa ao longo da vida útil estimada do empreendimento, contemplando a evolução do volume produzido, as receitas associadas, os custos operacionais e, quando aplicável, o valor residual ao término do horizonte de análise.

Com os fluxos definidos, buscou-se a taxa implícita que igualou o valor presente das entradas ao valor do investimento, refletindo a capacidade do projeto de remunerar o capital a um patamar compatível com o risco assumido. Sob esse critério, quando a TIR superou a taxa mínima de atratividade, o projeto foi considerado financeiramente atrativo; quando ficou aquém, indicou-se a revisão das premissas ou do escopo (ASSAF NETO, 2014).

Dessa forma, a TIR permitiu sintetizar a decisão de investimento em um único parâmetro, diretamente comparável ao custo de capital adotado. A formulação empregada para o cálculo da TIR, baseada nos fluxos de caixa projetados e no investimento inicial, é apresentada pela Equação 16:

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \text{ (Equação 16)}$$

Em que:

I_0 é o investimento inicial;

FC_t é o fluxo de caixa de cada período;

TIR é a taxa de desconto que zera o Valor Presente Líquido;

t é o período

Para a interpretação dos resultados, estabeleceu-se que a Taxa Interna de Retorno estimada deveria ser comparada diretamente à taxa mínima de atratividade (TMA) também conhecida como *cost of equity* e calculada no capítulo 4.4.1 deste trabalho (ASSAF NETO, 2014). Quando a TIR superou esse valor de referência, concluiu-se que o investimento apresentava viabilidade econômica, uma vez que o retorno esperado ultrapassava o custo de capital e, portanto, gerava valor para os investidores. Por outro lado, quando a TIR ficou abaixo da taxa mínima de atratividade, interpretou-se que o retorno projetado não compensava o risco assumido, recomendando-se a revisão das premissas financeiras ou a reformulação do projeto.

Tabela 16 - Taxa Interna de Retorno dos Diferentes Cenários

Cenário	TIR (%)
Base	15,6%
Otimista	26,9%
Pessimista	0,1%

Fonte: Autoria Própria

Com base nos cálculos realizados, constatou-se que os cenários base e otimista superaram a taxa mínima de atratividade do projeto, definida como o custo do capital próprio e estimada em 14,2%. No cenário pessimista, a TIR permaneceu abaixo desse patamar, indicando que o retorno esperado não compensaria o risco assumido e, portanto, não justificaria a alocação de recursos.

No âmbito da expansão da linha, a TIR traduziu em termos percentuais o retorno esperado sobre o investimento. Considerado o desembolso inicial e projetados os benefícios operacionais e financeiros decorrentes do aumento de capacidade, obteve-se que a viabilidade econômica do projeto ficou condicionada ao atendimento das premissas dos cenários base ou otimista; caso contrário, a recomendação seria reavaliar escopo, cronograma ou premissas de preço, volume e custos.

6. Análise dos Resultados Obtidos

6.1. Análise dos Resultados de Projeção de Demanda

O modelo selecionado para a previsão de demanda foi o método de Holt de suavização exponencial para séries com tendência, calibrado de acordo com o procedimento de seleção de métodos sugerido por Makridakis, Wheelwright e Hyndman (1998). Os parâmetros estimados ($\alpha=0,66$ e $\beta=0,12$), obtidos pela minimização do erro quadrático, indicam predominância de variações de nível mais rápidas que os ajustes de tendência, o que é coerente com séries não sazonais e com tendência moderada e em linha com o que Hyndman (1998) recomenda como diagnóstico prévio para métodos de suavização. O comportamento da trajetória projetada apresenta crescimento linear, com um aumento fixo de 44 t/ano referente à tendência, sem oscilações no período de projeção, e os resíduos apresentados na Figura 20 têm valor reduzido e não exibem tendência de crescimento, o que reforça a adequação da técnica ao problema estudado (MAKRIDAKIS et al., 1998; ARMSTRONG, 2001).

A construção de cenários alternativos (pessimista -15%, otimista +15%) segue a orientação bibliográfica sobre cenários complementares à previsão pontual proposta por ARMSTRONG (2001), em que ajustes proporcionais simples são apropriados quando a incerteza está mais associada à magnitude de crescimento do que a mudanças estruturais na tendência. No caso da Texp, não há evidência de mudanças estruturais no setor de reciclagem que justificasse cenários mais complexos, e os valores absolutos obtidos nos três cenários mostram coerência com as estatísticas do 13º Censo da Reciclagem de PET (ABIPET, 2025), que apontaram um crescimento de 14,2% da resina reciclada no país entre 2022 e 2024.

6.2. Análise dos Resultados de Capacidade Produtiva

Na avaliação da capacidade da planta, o método adotado seguiu a distinção clássica entre capacidade nominal e efetiva presente na bibliografia de engenharia de produção, e no modelo de perdas utilizado em estudos de eficiência (OEE), notadamente em Slack et al. (2007). Assim, o cálculo partiu das capacidades nominais dos equipamentos críticos e foi ajustado por perdas operacionais típicas, conforme discutido no referencial teórico. Os resultados obtidos de OEE próximas a faixas de 85% e 90% estão dentro daquilo recomendado por esta literatura para uma operação saudável.

A relação entre capacidade das etapas e o fluxo global obtido na simulação Monte Carlo também se alinha ao esperado. Segundo a abordagem probabilística de simulação recomendada por autores como Banks et al. (2010), distribuições estatísticas em parâmetros operacionais tendem a acentuar a diferença entre a capacidade nominal e a capacidade realizável. No caso da Tepx, a simulação resultou em capacidade anual média inferior à calculada deterministicamente, o que é coerente com o efeito combinado das incertezas de processo.

Por fim, a diferença entre a demanda prevista e a capacidade anual simulada confirma a necessidade de expansão. Essa conclusão também é consistente com a literatura que relaciona decisões de capacidade ao comportamento de demanda futura (Slack et al., 2007), que indica que estratégias reativas de expansão devem ser adotadas quando a projeção de demanda sistematicamente ultrapassa a capacidade efetiva.

6.3. Análise dos Resultados Econômico-Financeiros

A avaliação financeira do projeto utilizou indicadores clássicos de análise de investimentos como Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) e o uso do FCFE para decisões tomadas pela perspectiva do acionista, caso da Tepx.

Os resultados obtidos mostram que, nos cenários base e otimista, o VPL é positivo e a TIR supera o custo de capital, o que está alinhado com o que a literatura define como

critérios de aceitação de projetos: segundo Brealey e Myers (2020), um projeto deve ser aceito se gerar valor econômico acima do custo de oportunidade. A coerência entre os indicadores, que apontaram para o investimento nos cenários base e otimista, corrobora aquilo que é esperado pela literatura, já que em projetos convencionais ambos os critérios tendem a apontar para a mesma direção.

Além disso, a relação entre receita projetada e geração de caixa está alinhada ao que a literatura de FCFE proposta por ASSEF NETO (2014) de apenas uma fração pequena da receita ser transformada em caixa e também está de acordo com as informações financeiras divulgada pelo o 13º Censo da Reciclagem PET no Brasil, realizado pela ABIPET (2025).

7. Conclusão do Estudo de Caso

Os resultados obtidos ao longo da análise permitiram avaliar a necessidade e a pertinência de uma expansão da capacidade produtiva da planta fabril estudada.

A partir das projeções de demanda pelo método de Holt (1957), verificou-se que o mercado atendido pela empresa apresenta trajetória de crescimento no horizonte analisado, com CAGR de 3,59% do volume requerido no cenário base de demanda proposto. Esse resultado está alinhado às evidências setoriais de maior utilização de rPET por envasadores e transformadores demonstradas pelos relatórios anuais disponibilizados pela ABIPLAST (2025), onde o mercado de reciclagem PET cresce a um CAGR de 7,96%. Sob essa necessidade mercadológica de maior quantidade de rPET, foi constatado, por meio da aplicação da literatura consagrada, que a demanda futura supera a capacidade de produção atual da recicladora.

Com essa primeira premissa validada, partiu-se para o diagnóstico da capacidade efetiva de produção da fábrica. Houve a aplicação de uma simulação de Monte Carlo, tendo como alicerce os dados de capacidade nominal dos equipamentos e as medições dos parâmetros de disponibilidade, performance e qualidade do *Overall Equipment Effectiveness*, conforme proposto por Nakajima (1988). O resultado indicou que a capacidade efetiva de todos os equipamentos estava abaixo da demanda de 1.251 t/ano

do cenário pessimista em 2035. Ao aplicar esse resultado a luz da Teoria das Restrições proposta por Eliyahu Goldratt em 1984, verificou-se que a ampliação da unidade fabril apenas na etapa gargalo causaria mudança sucessivas da restrição, sendo a ampliação total da linha produtiva a única alternativa que atendia todos os cenários de demanda.

Sob a ótica econômico-financeira, a avaliação da alternativa de expansão por meio de indicadores como Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno, conforme orienta Damodaran (2012), indicou um TIR de 26,9% e 15,6% para os cenários otimista e base, respectivamente, ambos acima do *cost of equity* de 14,3% e um VPL de R\$ 1.220.000 e 99.000 para o cenário otimista e base, respectivamente. Dessa maneira a expansão seria lógica, do ponto de vista financeiro, apenas se as premissas vinculadas a esses dois cenários se concretizassem.

Dessa forma, é possível afirmar que o trabalho atingiu seu objetivo e que a expansão da fábrica de reciclagem da Texp é justificável tanto sob o ponto de vista de demanda, quanto de capacidade, contudo a garantia de retornos econômicos do projeto está sujeita ao atendimento de premissas adotadas nos cenários base e otimista de demanda.

O trabalho, entretanto, apresenta limitações que devem ser reconhecidas. Embora tenha sido possível estimar a capacidade efetiva por meio de indicadores de OEE e simulação de Monte Carlo, o estudo não quantificou os ganhos de capacidade que poderiam ser obtidos com melhorias de disponibilidade, performance e qualidade nos gargalos. Segundo a Teoria das Restrições, antes de investir em expansão física, recomenda-se explorar sistematicamente o aumento de desempenho do recurso restritivo por meio de ações operacionais (GOLDRATT, 1984). No presente trabalho, esses efeitos foram reconhecidos conceitualmente, mas não foram modelados em cenários específicos nem incorporados aos cálculos de capacidade efetiva. Adicionalmente, a análise econômico-financeira baseou-se em um conjunto de premissas de preço de venda, custo de matéria-prima e estrutura de capital que, embora fundamentadas em referências de mercado, não consideram variações no preço da resina.

Essas limitações abrem espaço para indicações de trabalhos futuros. Uma primeira linha de aprofundamento consiste em desenvolver análises complementares que estimem o impacto de programas de melhoria de OEE nos recursos restritivos, por meio de cenários que combinem investimentos em expansão física com ganhos de eficiência

operacional. Além disso, estudos futuros devem incorporar uma modelagem mais detalhada da incerteza em preços de rPET e custos de frete, de forma a complementar os resultados econômico-financeiros.

8. Anexo

Figura 27 - Código para Simulação de Monte Carlo

```
# Núcleo mínimo - Monte Carlo de Capacidade (rPET)
import numpy as np, pandas as pd, matplotlib.pyplot as plt

# Configurações
np.random.seed(2025)
R = 10_000
HORAS = 2600 # horas líquidas/ano
etapas = ["Triagem/recebimento","Moagem","Lavagem/Flotação/Enxágues",
          "Classificação densimétrica","Secagem de flakes","Extrusão/Filtração/Peletização"]

# Capacidades nominais (kg/h)
Cnom = np.array([757, 691, 628, 628, 628, 578], dtype=float)

# Parâmetros das distribuições (A e Q ~ Beta; P ~ Normal truncada [0,1])
A_alpha = np.array([311.70, 340.14, 407.98, 333.76, 385.27, 446.69])
A_beta = np.array([ 23.82,  19.80,  36.44,  27.84,  21.13,  55.77])

P_mu = np.array([0.955, 0.938, 0.924, 0.934, 0.945, 0.899])
P_sigma = np.array([0.008, 0.010, 0.016, 0.014, 0.004, 0.010])

Q_alpha = np.array([1183.86, 1884.08, 4575.42, 1089.35, 1657.68, 2138.45])
Q_beta = np.array([ 13.05,  13.09,  25.77,   4.81,   3.99,   6.65])

# Sorteios
A = np.random.beta(A_alpha, A_beta, size=(R, len(etapas)))
Q = np.random.beta(Q_alpha, Q_beta, size=(R, len(etapas)))
P = np.clip(np.random.normal(P_mu, P_sigma, size=(R, len(etapas))), 0.0, 1.0)
```

```
# Núcleo mínimo - Monte Carlo de Capacidade (rPET)
import numpy as np, pandas as pd, matplotlib.pyplot as plt

# Configurações
np.random.seed(2025)
R = 10_000
HORAS = 2600 # horas líquidas/ano
etapas = ["Triagem/recebimento","Moagem","Lavagem/Flotação/Enxágues",
          "Classificação densimétrica","Secagem de flakes","Extrusão/Filtração/Peletização"]

# Capacidades nominais (kg/h)
Cnom = np.array([757, 691, 628, 628, 628, 578], dtype=float)

# Parâmetros das distribuições (A e Q ~ Beta; P ~ Normal truncada [0,1])
A_alpha = np.array([311.70, 340.14, 407.98, 333.76, 385.27, 446.69])
A_beta = np.array([ 23.82,  19.80,  36.44,  27.84,  21.13,  55.77])

P_mu = np.array([0.955, 0.938, 0.924, 0.934, 0.945, 0.899])
P_sigma = np.array([0.008, 0.010, 0.016, 0.014, 0.004, 0.010])

Q_alpha = np.array([1183.86, 1884.08, 4575.42, 1089.35, 1657.68, 2138.45])
Q_beta = np.array([ 13.05,  13.09,  25.77,   4.81,   3.99,   6.65])

# Sorteios
A = np.random.beta(A_alpha, A_beta, size=(R, len(etapas)))
Q = np.random.beta(Q_alpha, Q_beta, size=(R, len(etapas)))
P = np.clip(np.random.normal(P_mu, P_sigma, size=(R, len(etapas))), 0.0, 1.0)
```

```

# Capacidades por etapa e gargalo (t/ano)
cap_etapas_tano = (Cnom * A * P * Q) * HORAS / 1000.0 # broadcasting
cap_linha = cap_etapas_tano.min(axis=1)

# Trava de sanidade (teto físico anual)
teto = Cnom.min() * HORAS / 1000.0
cap_linha = np.minimum(cap_linha, teto + 1e-9)

# Métricas
P90 = np.quantile(cap_linha, 0.10) # "capacidade garantida"
P50 = np.quantile(cap_linha, 0.50) # referência (opcional)
argmin_idx = cap_etapas_tano.argmin(axis=1)
freq = pd.Series(argmin_idx).value_counts(normalize=True).reindex(range(len(etapas)), fill_value=0)

# Saídas principais para o TCC
print(f"Teto físico anual: {teto:,.1f} t/ano")
print(f"Capacidade P90: {P90:,.1f} t/ano")
print(f"Capacidade P50: {P50:,.1f} t/ano (referência)")
print("\nFrequência de gargalo (%):")
for i, e in enumerate(etapas): print(f" - {e}: {100*freq[i]:.1f}%")

```

Fonte: Autoria Própria

9. Bibliografia

AB INBEV. Circular packaging and recycled content commitments. Leuven: AB InBev, 2018.

ABIPET – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. 13º Censo da Reciclagem de PET no Brasil – Ano-base 2024. São Paulo: ABIPET, 2025.

ABIPLAST – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. Reciclagem Mecânica de Plásticos no Brasil – 2023. São Paulo: ABIPLAST, 2024.

ABIPLAST – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. Perfil 2024: indústria brasileira de transformação e reciclagem de material plástico. São Paulo: ABIPLAST, 2024.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022. São Paulo: ABRELPE, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução RDC nº 20, de 26 de março de 2008. Dispõe sobre regulamento técnico para embalagens plásticas reutilizáveis destinadas ao contato com alimentos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 27 mar. 2008.

ARMSTRONG, J. S. Principles of forecasting: a handbook for researchers and practitioners. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ATHANASOPOULOS, G.; HYNDMAN, R. J. Forecasting: principles and practice. 3. ed. Melbourne: OTexts, 2018.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Logística reversa e reciclagem no Brasil: oportunidades para a cadeia do plástico. Rio de Janeiro: BNDES, 2018.

BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. Discrete-event system simulation. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010.

BERTOLUCCI, M. Modelagem financeira de projetos de investimento. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C.; LJUNG, G. M. Time series analysis: forecasting and control. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

BREALEY, R. A.; MYERS, S. C.; ALLEN, F. Princípios de finanças corporativas. 12. ed. Porto Alegre: AMGH, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 14.260, de 8 de dezembro de 2021. Estabelece incentivos à indústria da reciclagem e cria os fundos Favorecicle e ProRecicle. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 9 dez. 2021.

BRASIL. Decreto nº 12.106, de 10 de julho de 2024. Regulamenta o incentivo fiscal à cadeia produtiva da reciclagem estabelecido na Lei nº 14.260, de 8 de dezembro de 2021. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 11 jul. 2024.

CAUCHICK, P. A. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. Panorama da reciclagem no Brasil 2020. São Paulo: CEMPRE, 2020.

COCA-COLA COMPANY. World Without Waste: global packaging vision and strategy. Atlanta: The Coca-Cola Company, 2018.

CORBETT, T. Throughput accounting: a guide to constraint management. 2. ed. Great Barrington: North River Press, 2004.

COSTA, H. G.; ALMEIDA, A. T. de. Análise multicritério em decisões de investimento. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

DAMODARAN, A. Investment valuation: tools and techniques for determining the value of any asset. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2012.

DETTMER, H. W. Goldratt's theory of constraints: a systems approach to continuous improvement. Milwaukee: ASQ Quality Press, 1997.

EISENHARDT, K. M. Building theories from case study research. *Academy of Management Review*, v. 14, n. 4, p. 532–550, 1989.

EUROMONITOR INTERNATIONAL. Global PET Packaging Outlook 2024. London: Euromonitor International, 2024.

FAMA, E. F.; FRENCH, K. R. The equity premium. *Journal of Finance*, v. 57, n. 2, p. 637–659, 2002.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. A meta: um processo de aprimoramento contínuo. 3. ed. São Paulo: Nobel, 2014.

GOVONI, C. S.; SILVA, A. N. R. da. Avaliação de investimentos em infraestrutura de transporte. São Carlos: EdUFSCar, 2018.

GRAEDEL, T. E.; ALLENBY, B. R. Industrial ecology and sustainable engineering. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.

HARRIS, F.; WILSON, J. N. The theory of the single mind. *Journal of Applied Probability*, v. 3, n. 1, p. 14–27, 1966.

HENDRICKS, K. B.; SINGHAL, V. R. The effect of supply chain glitches on shareholder wealth. *Journal of Operations Management*, v. 21, n. 5, p. 501–522, 2003.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. Introduction to operations research. 10. ed. New York: McGraw-Hill, 2017.

HOSAFI, A.; FATHI, M. R.; RAHMANI, J.; RAZMI, J. Evaluation of global energy supply chain risks: an interpretive structural modeling analysis. *Energy*, v. 121, p. 592–607, 2017.

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. Forecasting: principles and practice. 2. ed. Melbourne: OTexts, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The future of petrochemicals: towards more efficient and sustainable plastics and fertilisers. Paris: IEA, 2018.

ITAÚ BBA. Orizon Valorização de Resíduos – Initiation of Coverage. São Paulo: Itaú BBA, 2023.

JACOBS, F. R.; CHASE, R. B. Administração da produção e operações. 14. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2018.

JACOBS, M. Changing perceptions of packaging. In: EUROPEAN PLASTICS CONVERTERS. Plastics packaging: the facts 2019. Brussels: EuPC, 2019.

JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. Juran's quality handbook. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

KAHNEMAN, D. Rápido e devagar: duas formas de pensar. Rio de Janeiro: Objetiva, 2012.

KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. The balanced scorecard: measures that drive performance. Harvard Business Review, v. 70, n. 1, p. 71–79, 1992.

KLETTE, T. J.; GRILICHES, Z. The inconsistency of common scale estimators when output prices are unobserved and endogenous. Journal of Applied Econometrics, v. 11, n. 4, p. 343–361, 1996.

KPMG. Global manufacturing outlook: reset needed? London: KPMG International, 2016.

KUMAR, R. Research methodology: a step-by-step guide for beginners. 4. ed. London: Sage, 2014.

KUSIAK, A. Modern manufacturing: programming, planning and control. New York: Wiley, 1990.

LACERDA, D. P.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Gestão da produção: estratégias, sistemas, métodos e ferramentas. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S. C.; HYNDMAN, R. J. Forecasting: methods and applications. 3. ed. New York: Wiley, 1998.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. Administração da produção. 5. ed. São Paulo: Saraiva Educação, 2021.

MATTAR, F. N. Metodologia de pesquisa em administração. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

MAXIQUIM CONSULTORIA. Relatório de mercado de PET e rPET no Brasil – 2024. São Paulo: MaxiQuim, 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). Programa Recicla+: orientações gerais para operacionalização dos créditos de reciclagem. Brasília, DF: MMA, 2024.

MUCHIRI, P.; PINTELON, L. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, v. 46, n. 13, p. 3517–3535, 2008.

NAKAJIMA, S. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988.

NESTLÉ. Tackling packaging waste: our commitment to make 100% of packaging recyclable or reusable by 2025. Vevey: Nestlé, 2018.

NOREEN, E.; SMITH, D.; MACKEY, J. The theory of constraints and its implications for management accounting. Great Barrington: North River Press, 1995.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Global Plastics Outlook. Paris: OECD, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015.

PEPSICO. Sustainable plastics and packaging commitments. New York: PepsiCo, 2020.

PLASTICS EUROPE. Plastics – the facts 2024: an analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels: Plastics Europe, 2024.

PORTER, M. E. Vantagem competitiva: criando e sustentando um desempenho superior. 18. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

RITZMAN, L. P.; KRAJEWSKI, L. J. Administração da produção e operações. 9. ed. São Paulo: Pearson, 2019.

RODRIGUES, M. V. Gestão da produção. São Paulo: Atlas, 2016.

SCHRAGENHEIM, E.; DETTMER, H. W. Manufacturing at warp speed: optimizing supply chains and eliminating bottlenecks. Boca Raton: CRC Press, 2000.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. Administração da produção. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

STOCK, J. R.; LAMBERT, D. M. Strategic logistics management. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

TURTON, R.; BAILIE, R. C.; WHITING, W. B.; SHAEIWITZ, J. A. Analysis, synthesis, and design of chemical processes. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. Facts and figures about materials, waste and recycling. Washington, DC: EPA, 2023.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. A máquina que mudou o mundo. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

WWF BRASIL; ABIPLAST – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. Pacto Global dos Plásticos – Pacto Brasil para o fim da poluição por plásticos. São Paulo: WWF Brasil, 2022.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.