



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
COORDENAÇÃO DE GRADUAÇÃO



Trabalho de Conclusão de Curso

Análise da viabilidade técnico-econômica da produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) a partir dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de Campinas

Guilherme César do Nascimento **RA:** 198280

Thamara Kristina Cardoso **RA:** 206140

Supervisora: Prof. Dr. Telma Teixeira Franco

**Guilherme César do Nascimento
Thamara Kristina Cardoso**

**Análise da viabilidade técnico-econômica da produção de Combustível Derivado de Resíduos
(CDR) a partir dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de Campinas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Supervisora: Prof. Dr. Telma Teixeira Franco

Este trabalho corresponde à versão final do Trabalho de Conclusão de Curso defendido por Guilherme César do Nascimento e Thamara Kristina Cardoso supervisionado pela Prof. Dr. Telma Teixeira Franco.

Campinas – SP

2022

DECLARAÇÃO DE AUTORIA

Nós, Guilherme César do Nascimento e Thamara Kristina Cardoso, declaramos que este trabalho é de autoria própria e que as partes que não o são foram referenciadas ao longo de todo o trabalho.

Campinas, 04 de novembro de 2022.

Este trabalho é dedicado a todos que nos acompanharam nos momentos difíceis e aos que acreditam nas Universidades Públicas.

AGRADECIMENTOS

Eu, Guilherme, agradeço aos meus pais, Vera e César, por todo o incentivo e apoio durante essa longa jornada que começou antes mesmo do início da faculdade, agradeço por tudo que tiveram que abdicar para proporcionar o melhor que podiam para mim. A minha irmã, Lívia, que mesmo muito pequena, aprendeu a compreender que eu precisava me ausentar durante alguns momentos para dedicar meu tempo aos estudos e trabalho. Aos meus avós, Luiz, Nena, Pedro e Suze, que sempre estiveram por perto me dando o suporte que precisava, principalmente durante a infância. Ao meu companheiro, William, que durante os últimos anos foi meu alicerce nos momentos mais difíceis e sempre esteve ao meu lado me dando forças para persistir. As minhas amigas, Ana, Barbara, Gabriela, Leticia, Pâmela e Thamara, que vivenciaram toda essa experiência acadêmica comigo e que estiveram sempre me apoiando e celebrando minhas conquistas. Agradeço novamente a minha amiga e parceira nesse trabalho, Thamara, por toda a compreensão, ajuda e parceria durante a faculdade e principalmente na elaboração desse trabalho. Em especial, agradeço novamente a minha mãe por ter me apresentado esse universo acadêmico fantástico, sendo que a primeira vez que adentrei na Unicamp foi ao assistir uma das aulas de quando ela era estudante da graduação, desde aquele momento eu soube que também me graduaria ali.

Eu, Thamara, agradeço primeiramente a minha família, que esteve do meu lado em todos os momentos da minha vida e comemoraram junto a mim cada pequena conquista. Aos meus pais, Antonio Cardoso e Sueli Zanellato Cardoso, por me incentivarem a sempre buscar o melhor de mim e me deram apoio em cada decisão difícil. Aos meus irmãos, Tatiana Cardoso, Tiago Cardoso e Thays Gallera, que desde minha infância sempre se esforçaram para me fazer feliz. Ao meu cunhado, Diogo Gallera, companheiro nos momentos de brindes em meio as conquistas. À minha sobrinha e afilhada, Antonella Cardoso Gallera, que mesmo pequena, foi a peça fundamental para eu continuar persistindo nos meus sonhos. Agradeço ao Guilherme, meu companheiro de faculdade e amigo, por me fazer persistir mesmo quando parecia impossível. Agradeço também às companhias ao longo da faculdade, Ana, Barbara, Gabriela, Guilherme e Pâmela, que foram pilares fundamentais para o meu desenvolvimento e responsáveis por momentos inesquecíveis ao longo da graduação. Em especial, reconheço e agradeço o esforço da minha família em me proporcionar a experiência da Universidade, irei carregar com orgulho o primeiro diploma de graduação da família.

Agradecemos o corpo docente da FEQ por todo ensinamento ao longo dos anos, em especial à Professora e supervisora Telma Teixeira Franco por toda ajuda. Por fim, agradecemos a Unicamp, por proporcionar um ensino público, gratuito e de excelência.

RESUMO

Com o aumento constante na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), estima-se que são geradas 5,5 milhões de toneladas de RSU por dia mundialmente, sendo que no município de Campinas gera-se 1.177 toneladas por dia. Devido a isso, a gestão dos resíduos sólidos vem se tornando um grande problema para a sociedade. Em Campinas, gasta-se cerca de 48 milhões de reais anualmente para o descarte correto desses resíduos, visto que o último aterro sanitário operante no município foi desativado em 2014 por atingir a capacidade máxima.

Logo, é importante a adoção de medidas para reduzir problemas e gastos relacionados ao descarte, então, esse trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnico-econômica da implementação de uma Unidade de Tratamento Mecânico para a separação de recicláveis e a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR), visando minimizar a quantidade de rejeitos destinados aos aterros sanitários, e, gerar receitas provenientes da venda desses materiais.

Para isso, foram verificados três cenários com distintas capacidades de processamento e/ou diferentes fornecedores. Na avaliação do melhor cenário, foram utilizados métodos de avaliação econômica através de alguns indicadores, como a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Valor Presente Líquido (VPL) e o *Payback*.

A viabilidade econômica do projeto foi dada considerando o preço de venda do CDR em R\$ 236,25/ton. Dessa forma, para o Cenário 1, cuja capacidade de processamento é de 70 ton/h de RSU, o CAPEX foi de R\$ 108.198.641,23 com um *Payback* que seria maior que o tempo de operação da planta, o que tornou o cenário inviável. O Cenário 2, que tem capacidade de processamento de 45 ton/h de RSU, teve um CAPEX de R\$ 52.490.049,88 com um *Payback* de 10 anos e 3 meses. Já no Cenário 3, que possui capacidade de operação de 40 ton/h de RSU, o investimento foi de R\$ 36.030.482,38 com um *Payback* de 6 anos e 9 meses.

Dessa forma, a viabilidade econômica foi verificada apenas nos Cenários 2 e 3 para o preço de venda do CDR, definido em R\$ 236,25/ton, sendo que o Cenário 3 apresentou resultados melhores que o Cenário 2.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos; Combustível Derivado de Resíduos; Análise Econômica; Reciclagem.

ABSTRACT

As a result of the constant increase in the generation of Municipal Solid Waste (MSW), it is estimated that 5.5 million tons of MSW per day are generated worldwide, and in the city of Campinas, 1,177 tons are generated per day. Because of this, solid waste management has become a major problem for society. In Campinas, approximately 48 million reais are spent annually for the correct disposal of these wastes, since the last landfill operating in the city was deactivated in 2014 because it reaches the maximum capacity.

Therefore, it is important to adopt measures to reduce problems and expenses related to disposal, so this work aims to evaluate the technical and economic feasibility of the implementation of a Mechanical Treatment Unit for the separation of recyclables and the production of Refuse Derived Fuel (RDF), aiming to minimize the quantity of tailings destined to landfills, and generate revenue from the sale of these materials.

For this, three scenarios with different processing capacities and/or different suppliers were verified. In the evaluation of the best-case scenario, economic evaluation methods were used through some indicators, such as the Minimum Acceptable Rate of Return (MARR), the Internal Rate of Return (IRR), the Net Present Value (NPV) and the *Payback*.

The economic viability of the project was given considering the sale price of the RDF in R\$ 236.25/ton. Then, for Scenario 1, whose processing capacity is of 70 ton/h of MSW, CAPEX was of R\$ 108,198,641.23 with a *Payback* that would be longer than the plant's operating time, which made the scenario unfeasible. Scenario 2, which has a processing capacity of 45 ton/h of MSW, had a CAPEX of R\$ 52,490,049.88 with a *Payback* of 10 years and 3 months. In Scenario 3, which has an operating capacity of 40 ton/h of MSW, the CAPEX was R\$ 36,030,482.38 with a *Payback* of 6 years and 9 months.

So, the economic viability was verified only in Scenarios 2 and 3 for the selling price of RDF defined at R\$ 236.25/ton, and Scenario 3 presented better results than Scenario 2.

Keywords: Municipal Solid Waste; Refuse Derived Fuel; Economic analysis; Recycling.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Exemplo de planta de processamento de CDR..... | 9 |
| Figura 2. Alimentação, Triagem e Peneira giratória..... | 15 |
| Figura 3. Exemplo de peneira giratória..... | 15 |
| Figura 4. Sistema de armazenamento da fração fina | 16 |
| Figura 5. Interior do separador de materiais leves..... | 16 |
| Figura 6. Fluxo de caixa livre a valor presente do Cenário 1 em milhões de reais quando $VPL = 0$ | 41 |
| Figura 7. Fluxo de caixa livre a valor presente do Cenário 2 em milhões de reais quando $VPL = 0$ | 41 |
| Figura 8. Fluxo de caixa livre a valor presente do Cenário 3 em milhões de reais quando $VPL = 0$ | 42 |
| Figura 9. Fluxo de caixa livre a valor presente em milhões de reais para o Cenário 1, considerando o preço de venda definido R\$ 236,25 por tonelada de CDR..... | 43 |
| Figura 10. Fluxo de caixa livre a valor presente em milhões de reais para o Cenário 2, considerando o preço de venda definido R\$ 236,25 por tonelada de CDR..... | 44 |
| Figura 11. Fluxo de caixa livre a valor presente em milhões de reais para o Cenário 3, considerando o preço de venda definido de R\$ 236,25 por tonelada de CDR..... | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares (RSD), resíduos de limpeza urbana (RLU) e resíduos sólidos urbanos (RSU) em Campinas..... | 5 |
| Tabela 2. Critérios para utilização do CDR como combustível..... | 10 |
| Tabela 3. Fornecedores da tecnologia para produção de CDR | 14 |
| Tabela 4. Capacidade de processamento de RSU para cada cenário. | 17 |
| Tabela 5. Composições típicas para produção de CDR. | 18 |
| Tabela 6. Matéria-prima disponível para a produção de CDR..... | 19 |
| Tabela 7. Eficiência de separação de materiais recicláveis..... | 19 |
| Tabela 8. Matéria-prima disponível para a produção de CDR após separação de recicláveis..... | 20 |
| Tabela 9. Composição do Combustível Derivado de Resíduos. | 20 |
| Tabela 10. Valores típicos de PCI para cada constituinte..... | 22 |
| Tabela 11. Porcentagem em massa do destino de cada constituinte do RSU de Campinas. | 24 |
| Tabela 12. Quantidade em toneladas por dia e fração do destino de cada componente do RSU do município de Campinas..... | 25 |
| Tabela 13. Cenários de produção de CDR por ano de operação..... | 26 |
| Tabela 14. Valores do Poder Calorífico Inferior para cada constituinte do CDR pelo método de média ponderada. | 27 |
| Tabela 15. Valores do Poder Calorífico Inferior para cada constituinte do CDR pelo apresentado por Lin <i>et al.</i> (2013)..... | 28 |
| Tabela 16. Valor da tecnologia para unidade de triagem e tratamento mecânico de RSU. | 29 |
| Tabela 17. Valores dos impostos sobre os equipamentos. | 30 |
| Tabela 18. Investimento (CAPEX) da implementação da unidade de triagem e tratamento mecânico de CDR. | 31 |
| Tabela 19. Mão de obra para linha operando a 40 ton/h de RSU. | 32 |
| Tabela 20. Custos operacionais para cada cenário para os anos 1 a 5. | 33 |
| Tabela 21. Custos operacionais para cada cenário para os anos 6 a 20. | 33 |
| Tabela 22. Valor médio unitário praticado para a venda de recicláveis. | 34 |
| Tabela 23. Quantidade em toneladas por ano de materiais recicláveis separados para venda em cada cenário para os anos 1 a 5. | 35 |
| Tabela 24. Quantidade em toneladas por ano de materiais recicláveis separados para venda em cada cenário para os anos 6 a 20. | 35 |

| | |
|---|----|
| Tabela 25. Receita anual obtida com a venda de materiais recicláveis para os anos 1 a 5. | 36 |
| Tabela 26. Receita anual obtida com a venda de materiais recicláveis para os anos 6 a 20. | 36 |
| Tabela 27. Custos anuais com energia elétrica para os três cenários. | 37 |
| Tabela 28. Quantidade anual de rejeitos e custo anual com aterro sanitário para cada cenário. | 38 |
| Tabela 29. Receitas e débitos do fluxo de caixa. | 39 |
| Tabela 30. Depreciação anualizada em cada cenário. | 39 |
| Tabela 31. Entrada, prestações e juros dos investimentos (CAPEX). | 40 |

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CDR – Combustível Derivado de Resíduos
CIF – Cost, Insurance and Freight
CO₂ – Dióxido de Carbono
COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONRESOL – Consórcio Intermunicipal Para Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos
CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz
ETT – Estação de Transbordo e Transferência
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
II – Imposto de Importação
IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados
NBR – Norma Brasileira
PCI – Poder Calorífico Inferior
PCS – Poder Calorífico Superior
PIS – Programa de Integração Social
RLU – Resíduo de Limpeza Urbana
PMGIRS – Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico
PMV – Preço Mínimo de Venda
RSD – Resíduo Sólido Domiciliares
RSU – Resíduo Sólido Urbano
SIMA – Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente
TIR – Taxa Interna de Retorno
TMA – Taxa Mínima de Atratividade
URE – Usinas de Recuperação de Energia
VPL – Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 2.1. Objetivo Geral..... | 3 |
| 2.2. Objetivos Específicos..... | 3 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3.1. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)..... | 4 |
| 3.2. Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos em Campinas..... | 6 |
| 3.3. Combustível Derivado de Resíduos (CDR)..... | 7 |
| 3.3.1 Produção de CDR..... | 8 |
| 3.3.2 Poder Calorífico Inferior (PCI)..... | 9 |
| 3.4 Avaliação Econômica | 11 |
| 3.4.1 Valor Presente Líquido (VPL)..... | 11 |
| 3.4.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)..... | 12 |
| 3.4.3 <i>Payback</i> | 13 |
| 4. METODOLOGIA | 14 |
| 4.1. Unidade de tratamento de RSU e produção de CDR..... | 14 |
| 4.2. Funcionamento e Operação da Planta..... | 14 |
| 4.3. Composição da matéria-prima do CDR..... | 18 |
| 4.4 Avaliação Econômica | 22 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 24 |
| 5.1 Cenários de Capacidade..... | 24 |
| 5.2 Validação do CDR como combustível: Poder Calorífico Inferior..... | 27 |
| 5.3 Viabilidade Técnico-Econômica..... | 29 |
| 5.3.1 CAPEX..... | 29 |
| 5.3.3 OPEX | 31 |
| 5.3.4 Receita com a venda de recicláveis..... | 33 |
| 5.3.5 Custo com energia elétrica..... | 36 |
| 5.3.6 Custo com Aterro Sanitário..... | 37 |
| 5.3.7 Avaliação Econômica | 38 |
| 6. CONCLUSÃO | 46 |
| 7. REFERÊNCIAS..... | 47 |

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, estima-se que a produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) no mundo seja de 5,5 milhões de toneladas por dia, com projeções de produção de 7,1 milhões de toneladas para 2030 (CONSIMARES 2021). Já no Brasil, foi estimado que a produção média de RSU em 2019 era de 1,038 kg/habitante/dia, o que corresponde a produção de cerca de 218 mil toneladas por dia. Na região sudeste, que possui 90 milhões de habitantes, a geração de resíduos aumenta para 1,232 kg/habitante/dia ou 111 mil toneladas por dia (CONSIMARES 2021). Com relação a realidade no município de Campinas em 2021, eram geradas cerca de 1.177 toneladas de RSU por dia, sendo que a cidade possui cerca de 1,2 milhão de habitantes (IBGE 2022; PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS 2021; RENOVA 2018).

Considerando que o destino destes resíduos é geralmente aterros sanitários ou lixões, torna-se importante a adoção de estratégias para reduzir os problemas relacionados ao descarte, visto que cada vez mais os municípios estão enfrentando dificuldades sobre a disposição final dos resíduos. Por exemplo, o principal aterro sanitário de Campinas está inoperante desde 2014 e, devido a isso, a prefeitura vem gastando entre 33,9 e 48 milhões de reais anualmente para que a empresa Estre (aterro sanitário privado localizado em Paulínia – SP) receba o lixo da cidade (G1: Campinas e Região 2018).

A gestão correta desses resíduos é um desafio para sociedade atual uma vez que os resíduos sólidos são fonte de degradação ambiental, como poluição do ar e das águas. Cada vez mais, os municípios estão buscando formas sustentáveis para erradicar este problema e promover a saúde pública, a qualidade do meio ambiente e a preservação dos recursos naturais. Uma das práticas utilizadas para solucionar este problema é o coprocessamento dos resíduos sólidos urbanos em Combustível Derivado de Resíduos (CDR), que culmina na solução do reaproveitamento de materiais e dá um destino final nobre para os resíduos (PAULA *et al.* 2019; PINTO 2009).

O coprocessamento consiste no uso dos resíduos para produção de CDR e, conseqüentemente, geração de energia através da sua queima em fornos industriais como combustível alternativo. Geralmente, o uso do RSU processado está atrelado a processos industriais na indústria cimenteira, que utiliza na maioria das vezes combustível tradicional proveniente de fonte não renovável no processo de produção de clínquer. A substituição do combustível tradicional pelo alternativo promove a preservação de recursos energéticos não renováveis e a mitigação de passivos ambientais devido ao desvio de resíduos de aterros (PAULA *et al.* 2019).

Além disso, o combustível alternativo (CDR) tem um grande potencial na diminuição da emissão de gás carbônico (CO₂), uma vez que reduz o uso de combustíveis fósseis nos fornos e caldeiras industriais. Um exemplo já aplicado no Brasil é o caso da Votorantim Cimentos que começou a processar

CDR na sua unidade de Salto de Pirapora – SP em 2018. Estima-se que em 2019, a empresa consumiu 75 mil toneladas de CDR na produção de cimentos, isso reduziu a emissão de CO₂ em 14,7 mil toneladas. A utilização desse combustível alternativo tem potencial de reduzir as emissões de gás carbônico em pelo menos 500 mil toneladas por ano (AESBE 2020).

Sendo assim, o CDR representa uma fonte renovável de energia, possibilitando uma gestão sustentável dos resíduos sólidos, além da gestão eficiente de energia, que contribui significativamente para a redução de emissões de gases de efeito estufa e preservação de recursos naturais (PAULA *et al.* 2019). Além disso, esta tecnologia está difundida em países desenvolvidos como Alemanha, Suécia, Dinamarca e Holanda, que possuem métodos de recuperação energética a partir da gestão integrada de resíduos (PAOLO e PAOLA, 2015).

Dessa forma, o principal objetivo deste trabalho é a implementação da produção de um Combustível Derivado de Resíduos (CDR) na região de Campinas, como uma forma de diminuir os impactos ambientais causados pela geração de RSU, além de fornecer uma possibilidade de descarte desse lixo ao município.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é analisar a viabilidade técnico econômica da implementação de uma planta para produção de CDR a partir do RSU gerado em Campinas. Assim, seria possível garantir um destino adequado aos resíduos e ainda fornecer uma alternativa sustentável de combustível para caldeiras e fornos industriais, dentre outras aplicações. Para isso, serão analisados indicadores de rentabilidade, risco, produção e capital para verificar se o investimento em uma indústria de produção CDR é compensatório.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Elaborar cenários para a implementação de uma planta de conversão de RSU em CDR no município de Campinas;
- Estimar custos operacionais e de investimento e avaliar indicadores econômicos para cada cenário;
- Realizar avaliação técnico e econômica dos cenários propostos para se definir o melhor cenário para produção de CDR no município de Campinas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

De acordo com a Lei nº 12.305/2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos, resíduos sólidos são definidos como (BRASIL 2010):

“...material, substância, objeto ou bem descartados resultantes de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido...”

No Art. 13º da Lei nº 12.305/2010, os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são classificados como resíduos domiciliares (RSD – os originários de atividades domésticas em residências urbanas) e resíduos de limpeza urbana (RLU – os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana) (BRASIL 2010).

Segundo a Norma ABNT NBR 10.004, os resíduos podem ser classificados em duas classes quanto à sua toxicidade (ABNT 2004):

- a) Resíduos de classe I – Perigosos: Aqueles que, devido às duas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, apresentam riscos à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada;
- b) Resíduos de classe II – Não perigosos: Aqueles que não apresentam periculosidade, ou seja, que não se enquadram nos resíduos de classe I – perigosos; são divididos em duas subclasses, A e B;
 - a. Resíduos de classe II A – Não inertes: Resíduos não perigosos que são identificados como não inertes, ou seja, que podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
 - b. Resíduos de classe II B – Inertes: Resíduos não perigosos que, quando em contato com a água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, não apresentaram capacidade de solubilidade de seus constituintes.

Ademais, os resíduos que esgotarem todas as possibilidades de tratamento e recuperação são considerados rejeitos e, por sua vez, necessitam que a disposição final seja ambientalmente adequada (BRASIL 2010).

As características dos resíduos sólidos apresentam diversidade e complexidade que variam conforme aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos (ZANTA e FERREIRA 2003). Segundo Chavando *et al.* (2022), a composição dos resíduos sólidos possui variação significativa em países de alta e baixa renda uma vez que há diferentes disponibilidades de produtos e serviços. Por

exemplo, a parcela de conteúdo orgânico nos resíduos sólidos é menor em países mais desenvolvidos. Em contrapartida, a quantidade de papel e papelão gerados nesses países é maior, ou seja, países mais desenvolvidos produzem resíduos com propriedades mais adequadas para produzir CDR com melhor desempenho, que são os materiais com menor teor de umidade (papel, papelão, plásticos, entre outros), o que se traduz em maior poder calorífico do combustível e, conseqüentemente, melhor performance do combustível. Dessa forma, o alto teor de umidade dos resíduos sólidos em países em desenvolvimento dificulta a produção de CDR com boas propriedades caloríficas devido à grande parcela de conteúdo orgânico (CHAVANDO *et al.* 2022). Portanto, torna-se importante avaliar a composição do RSU a ser processado para produção de CDR.

Sabe-se que eram geradas cerca de 1.177 toneladas de resíduos sólidos urbano por dia na cidade de Campinas – SP em 2021, sendo que 868 toneladas por dia desses resíduos são resíduos sólidos domiciliares e comerciais (RSD) e 309 toneladas por dia correspondem a resíduos de limpeza urbana (RLU) (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS 2021). A Tabela 1 apresenta a composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares (RSD), a composição gravimétrica dos resíduos de limpeza urbana (RLU) e a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU), proveniente do RSD e RLU do município de Campinas. É válido lembrar que a composição gravimétrica expressa o percentual em massa de cada componente de uma amostra de resíduos em relação à massa total desta amostra (MONTEIRO *et al.* 2001).

Tabela 1. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares (RSD), resíduos de limpeza urbana (RLU) e resíduos sólidos urbanos (RSU) em Campinas [Continua].

| Material | Composição RSD | Composição RLU | Composição RSU |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Matéria orgânica | 35,19% | 23,33% | 32,07% |
| Papel | 9,95% | 11,80% | 10,43% |
| Papelão | 3,12% | 3,41% | 3,19% |
| Embalagem longa vida | 0,91% | 4,98% | 1,98% |
| PEAD | 4,89% | 11,53% | 6,63% |
| PET | 1,23% | 2,62% | 1,59% |
| Plástico duro | 4,10% | 4,72% | 4,26% |
| Filme | 2,77% | 1,05% | 2,31% |
| Madeira | 4,65% | 0,26% | 3,50% |

Tabela 1. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares (RSD), resíduos de limpeza urbana (RLU) e resíduos sólidos urbanos (RSU) em Campinas [Conclusão].

| Material | Composição RSD | Composição RLU | Composição RSU |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Couro e borracha | 2,03% | 0,00% | 1,50% |
| Têxteis | 7,27% | 3,93% | 6,40% |
| Folha, mato e galhada | 8,12% | 10,75% | 8,81% |
| Metal ferroso | 0,77% | 4,98% | 1,87% |
| Metal não ferroso | 1,24% | 1,05% | 1,19% |
| Vidro | 2,00% | 2,36% | 2,10% |
| Louça, cerâmica e pedra | 1,43% | 0,00% | 1,05% |
| Agregado fino | 0,69% | 2,36% | 1,13% |
| Fraldas | 4,80% | 0,00% | 3,54% |
| Isopor | 2,50% | 6,15% | 3,46% |
| Especiais | 0,78% | 0,52% | 0,71% |
| Perdas | 1,59% | 4,20% | 2,27% |

Fonte: Adaptado de Renova 2018

3.2. Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos em Campinas

Segundo o Art. 10º da Lei Federal nº 12.305/2010, a gestão dos resíduos sólidos é de responsabilidade do Distrito Federal e dos Municípios, o que inclui desde a coleta, transporte, armazenamento, controle da geração, processamento e disposição final dos resíduos gerados no território (BRASIL 2010). Dessa forma, o município de Campinas elaborou o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) em 2012, priorizando a seguinte ordem como eixo central da PMGIRS para gestão dos resíduos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos e disposição final ambientalmente adequada apenas dos rejeitos (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS 2021).

O PMGIRS foi integrado ao Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) em Campinas no ano de 2013 pelo Decreto Municipal nº 18199 de 19 de dezembro de 2013, que foram revistas no ano de 2021 (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS 2021). Atualmente, os resíduos sólidos domiciliares e comerciais (RSD), que compõem a maior parte dos RSU gerados no município, são

coletados e encaminhados para a Estação de Transbordo e Transferência (ETT) localizada no Complexo Delta, onde também está localizado o Aterro Delta A que está inoperante desde março de 2014. Em seguida, os resíduos são transferidos dos caminhões de coleta para carretas que levaram esses até o Aterro Sanitário regional que é de responsabilidade da empresa Estre e fica localizado em Paulínia-SP. Ao todo, são realizadas 54 viagens da ETT até o Aterro ESTRE diariamente (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS 2021). Estima-se que a Prefeitura de Campinas gaste cerca de 48 milhões de reais anualmente para que a empresa Estre receba o lixo da cidade (G1: Campinas e Região 2018).

Além disso, Campinas possui um programa de coleta seletiva que foi implantado em 1992 e abrange cerca de 75% da área urbana do município, porém o programa não vem atingindo valores expressivos, sendo que entre 2010 e 2020, o programa apresentou uma eficiência de coleta média de 1,94% sobre os RSD e de 9,70% sobre a fração que corresponde somente a material reciclado (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS 2021).

3.3. Combustível Derivado de Resíduos (CDR)

O combustível derivado de resíduos (CDR) é definido como um combustível alternativo produzido a partir de resíduos sólidos não perigosos e não inertes (Classe II A), constituído principalmente por papel, borracha, plástico e madeira. O CDR pode ser utilizado em fornos e caldeiras industriais ou em unidades de tratamento térmico como alternativa à combustíveis de origem fóssil para geração de energia térmica (RAHMAN 2013; RAMA 2010; SIMA 2020).

Este combustível alternativo é amplamente utilizado em fornos de cimentarias para produção de clínquer, sendo um substituto ao uso de coque de petróleo – um material fóssil. A substituição do coque de petróleo pelo CDR é uma alternativa para redução dos impactos ambientais associada à produção de cimento. Um estudo realizado por Guedes (2022) comparou a emissão de CO₂ equivalente do ciclo de vida do CDR produzido em Pernambuco e do coque de petróleo. A análise do ciclo de vida do CDR considerou desde o transporte de matéria-prima (RSU) até a queima do produto final (CDR) na indústria de cimento e apresentou uma redução de cerca de 1.781,46 toneladas na emissão de CO₂ equivalente na sua cadeia de suprimentos quando comparado com a cadeia de suprimentos do coque de petróleo (GUEDES 2022; RAHMAN 2013; REZA *et al.* 2013).

Além disso, O CDR é uma solução atrativa de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos por outros dois principais motivos: produz combustíveis mais baratos que os combustíveis fósseis convencionais por requerer apenas custos de processamento para sua produção e permite a utilização de resíduos sólidos urbanos visando a eliminação destes em troca da produção de um combustível limpo (RAHMAN 2013).

Ademais, a recuperação energética do RSU em CDR é instituída pelo Art. 9º da Lei Federal nº 12.305/2010 e pode ser usada como uma alternativa desde que seja comprovada a viabilidade técnica e ambiental desta tecnologia e seja implementado um programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (BRASIL 2010).

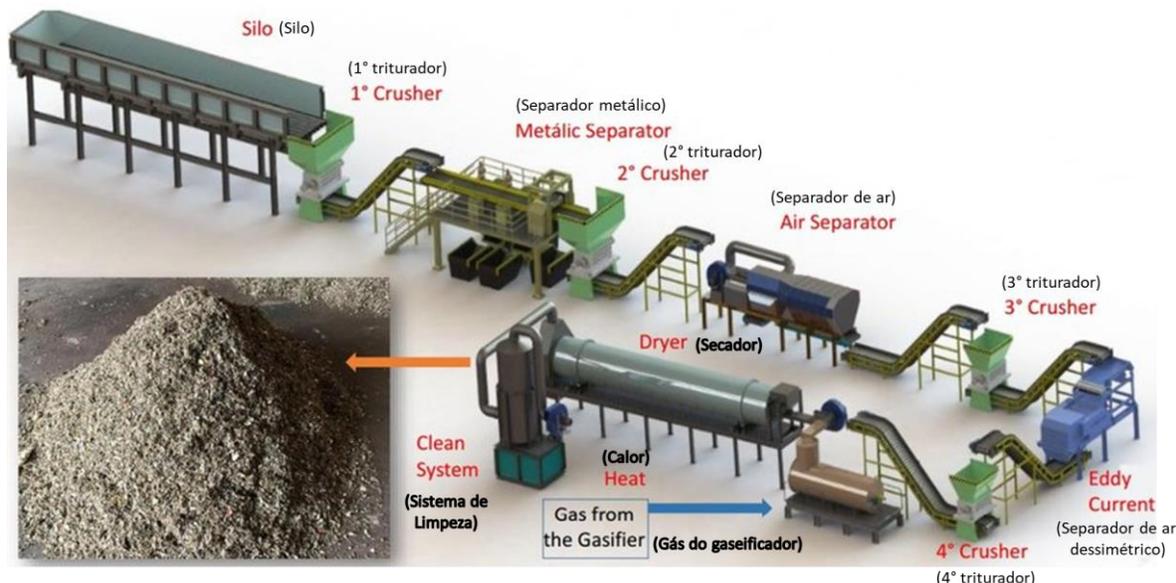
Posto isto, sabe-se que, dentre as novas metas de médio e longo prazo apresentadas no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de Campinas – SP, destaca-se a produção de Combustível Derivado de Combustível (CDR). Dessa forma, torna-se importante o estudo da implementação desta tecnologia no município (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS 2021).

3.3.1 Produção de CDR

De acordo com Gallardo *et al.* (2014), o processamento de RSU para produção de CDR consiste na eliminação da fração não combustível, redução do tamanho e no teor de umidade, homogeneização dos resíduos e, em alguns casos, transformação das partículas em *pellets* ou *briquetes* – aglomeração e compactação das partículas soltas em um formato específico, geralmente cilíndrico, a fim de facilitar o transporte e queima. Dessa forma, os macroprocessos para produção de CDR são a trituração, separação e secagem dos resíduos (GALLARDO *et al.* 2014).

A Figura 1 apresenta uma linha típica de processamento de RSU para produção de CDR estudada por Monteiro *et al.* (2019) *apud* Infiesta (2019). Ao longo da linha, é possível observar quatro trituradores que irão diminuir a granulometria do resíduo a 25 mm, um separador de seleção manual de resíduos recicláveis, um separador magnético para remoção de materiais ferrosos, um separador de metais não ferrosos, um separador de ar dessimétrico para separação de materiais de alta densidade e um secador rotativo. Ao final deste processo, é obtido o CDR homogêneo com umidade 15% em massa que pode ser levado para a armazenagem (FERREIRA 2021; INFUESTA *et al.* 2019).

Figura 1. Exemplo de planta de processamento de CDR.



Fonte: Monteiro *et al.* (2019) *apud* Infiesta 2019.

Segundo Reza *et al.* (2013), a composição e propriedades do CDR podem variar de uma produção para outra, uma vez que cada local geográfico apresenta uma composição gravimétrica de RSU diferente. Dessa forma, a composição ideal do CDR é aquela que irá apresentar resíduos com alto poder calorífico e com baixo teor de umidade e, para isso, é necessário utilizar resíduos que apresentam alta energia interna por unidade de massa, como plástico, papel, papelão, têxteis e madeira (BRÁS *et al.* 2019).

3.3.2 Poder Calorífico Inferior (PCI)

O poder calorífico de um material representa a quantidade de calor que será liberado na combustão por unidade de massa do resíduo. De acordo com Soares (2011), o RSU apresenta teor energético entre 2.500 e 2.620 kcal/kg. Esse valor pode passar para 4.600 kcal/kg quando o RSU é convertido em CDR devido aos processos de trituração, separação e secagem citados anteriormente (CARACOL 2016; SOARES 2011).

Os combustíveis apresentam dois tipos de poder calorífico: o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI). O PCS é compreendido como a quantidade de calor obtido na combustão realizada a volume constante, ou seja, a água formada durante o processo se condensa e o calor latente da água não é perdido do sistema. Já o PCI é compreendido como a quantidade de calor obtido na combustão sem levar em consideração o calor latente do vapor da água, ou seja, a água gerada no

processo da queima do material é perdida do sistema sob forma de vapor (CARACOL 2016; MÜZEL *et al.* 2014).

Dessa forma, pode-se dizer que o PCI retrata melhor o comportamento combustível de um material em comparação com o PCS na maioria dos processos reais, isto porque os gases de combustão carregam consigo uma quantidade de energia que corresponde ao calor latente de vaporização da água (MÜZEL *et al.* 2014).

De acordo com a Resolução SIMA N° 047, de 06 de agosto de 2020, para um CDR ser considerado um combustível, é necessário atender os requisitos dispostos na Tabela 2. Além disso, de acordo com a Norma ABNT NBR 16.849:2020, para o CDR ser considerado combustível, ele deve ser classificado como resíduo de Classe II – Não Perigosos conforme a Norma ABNT NBR 10.004:2004, possuir PCI maior ou igual a 2.750 kcal/kg em base seca e apresentar concentração de cloro menor ou igual a 3% e de mercúrio menor ou igual a 1 mg/kg (ABNT 2004; ABNT 2020; SIMA 2020).

Tabela 2. Critérios para utilização do CDR como combustível.

| Tipologia de fontes | Poder calorífico inferior – PCI (kcal/kg, base seca) * | Cloro (% base seca) | Temperatura (°C) |
|---|---|----------------------------|-------------------------|
| Caldeiras industriais a biomassa entre 50 e 100 t/h de vapor | ≥ 2300 | ≤ 0,3 | ≥ 500 *** |
| Caldeiras industriais a biomassa > 100 t/h de vapor | ≥ 2300 | ≤ 0,6 | ≥ 550 *** |
| Fornos de produção de clínquer | ≥ 2775 | ≤ 1,0 | NA |
| Pirólise | ≥ 2300 | NA | ≥ 400 *** |
| Gaseificação | ≥ 2300 | NA | ≥ 750 *** |
| URE – Usinas de Recuperação de Energia | NA | NA | ≥ 850 *** |
| Fornos industriais com uso de biomassa e sem contato com a matéria-prima. | ** | ≤ 0,6 | ≥ 500 *** |

Fonte: SIMA 2020.

(NA) não aplicável

(*) PCI avaliado caso a caso, devendo ser superior ao PCI da biomassa utilizada como combustível convencional.

(**) PCI do CDR deverá ser igual ou superior ao combustível convencional normalmente utilizado, devendo comprovar que há redução de consumo do combustível convencional.

(***) temperatura medida no interior da câmara de combustão ou outro ponto equivalente.

3.4 Avaliação Econômica

Quando se trata da implementação de novas tecnologias, como é o caso do processamento de RSU em CDR, é necessário avaliar diferentes alternativas que atendam as especificações técnicas da tecnologia para investimento de capital nesta tecnologia. Para definir a melhor alternativa, utiliza-se de indicadores econômicos que são capazes de identificar e mensurar custos e benefícios do investimento. Dessa forma, os indicadores econômicos irão auxiliar no processo decisório do investimento do capital (BERTICELLI 2016; GOLDMAN 2015).

Dentre os indicadores, pode-se citar o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Tempo de *Payback*, que serão discutidos a seguir.

3.4.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL) em um projeto tem como finalidade calcular o impacto das entradas e saídas de caixa no futuro e trazê-las a valor presente, ou seja, o VPL irá calcular o valor presente dos fluxos de caixa gerados ao longo da vida útil de um projeto. Para o cálculo do valor presente, utiliza-se a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) como taxa de desconto, que pode ser definida de acordo com a política de cada empresa (BERTICELLI 2016).

O método Valor Presente Líquido irá apresentar a viabilidade de um projeto, sendo (BARRAK 2018):

- $VPL < 0$: O valor presente das entradas no fluxo de caixa do projeto é menor que o valor presente das saídas, o que não torna o investimento economicamente atrativo;
- $VPL = 0$: O valor presente das entradas no fluxo de caixa se iguala ao valor presente das saídas, não havendo ganhos ou perdas no projeto e tornando-o economicamente atrativo;
- $VPL > 0$: O valor presente das entradas no fluxo de caixa é maior que o valor presente das saídas, o que torna o investimento economicamente viável.

O VPL pode ser calculado segundo a Equação (1):

$$VPL = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{FC_t}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Sendo:

VPL = Valor Presente Líquido

FC_t = Fluxo de caixa

N = Período de vida útil;

n = período do fluxo de caixa;

i = Taxa de desconto.

Ademais, a determinação do VPL é extremamente importante para a definição do Preço Mínimo de Venda (PMV). O valor desse parâmetro é encontrado quando o VPL é igual a zero e ele indica o menor preço a ser adotado na venda da matéria-prima de interesse para que o projeto seja economicamente atrativo. Normalmente, o preço de venda a ser praticado tende a ser maior que o PMV para que o investimento traga lucros.

3.4.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa que iguala o valor de um investimento com os retornos futuros, ou seja, a TIR iguala o VPL a zero. Sendo assim, a TIR é utilizada como método de análise de investimentos, na qual o investimento será economicamente atraente se a TIR for maior que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) (BERTICELLI 2016).

Em termos matemáticos, a TIR é obtida igualando a equação do VPL a zero e mantendo a taxa como variável. Dessa forma, a TIR pode ser obtida pela Equação (2) (BERTICELLI 2016):

$$0 = VPL = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{FC_t}{(1 + TIR)^n} \quad (2)$$

Sendo:

VPL = Valor Presente Líquido

FC_t = Fluxo de caixa

N = Período de vida útil;

n = período do fluxo de caixa;

TIR = Taxa Interna de Retorno.

3.4.3 Payback

O *Payback* é compreendido como o tempo necessário para que os fluxos de caixa acumulados se igualem ao valor de investimento. De maneira geral, trata-se de uma estimativa do tempo necessário para que se obtenha retorno sobre um investimento. O *payback* pode ser simples ou descontado, sendo que o último considera o valor do dinheiro no tempo (BARRAK 2018; BERTICELLI 2016).

No geral, para se definir o *payback*, utiliza-se os valores do fluxo de caixa, sendo utilizado como uma informação adicional para tomada de decisão em um projeto (SILVA *et al.* 2014).

4. METODOLOGIA

4.1. Unidade de tratamento de RSU e produção de CDR

O tratamento de resíduos sólidos urbanos para produção de CDR apresenta variadas rotas tecnológicas, que podem ou não utilizar equipamentos de secagem, por exemplo. A maioria das soluções utilizadas no Brasil prevê o tratamento mecânico de RSU. Dessa forma, para a obtenção das especificações, custos, requisitos e demais informações sobre os equipamentos componentes de planta produtiva de CDR no município de Campinas, foram contatados três fornecedores dessa tecnologia. A Tabela 3 traz as informações sobre cada um desses fornecedores.

Tabela 3. Fornecedores da tecnologia para produção de CDR

| Fornecedor | Contato | E-mail | Local |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------|
| Stadler do Brasil | (11) 3237-4385 (11) 99806-4418 | info@stadlerdobrasil.com.br | São Paulo – SP |
| Sutco | (31) 97319-0077 | info@sutco.com.br | Santos – SP |
| RECIMAC | (48) 3065-1618 | NA | Palhoça - SC |

Fonte: Elaboração própria

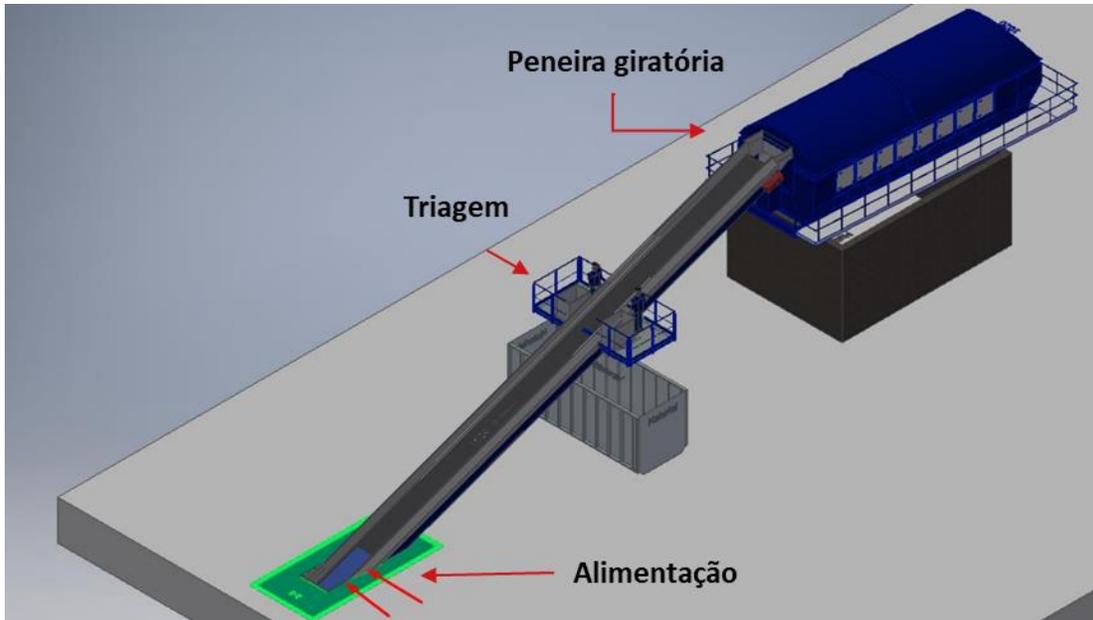
Vale ressaltar que, dos fornecedores contatados, apenas a Stadler do Brasil retornou o contato com todas as informações necessárias. Portanto, os cenários da planta produtiva a ser apresentada no presente trabalho foram baseados principalmente em informações fornecidas pela Stadler e pelas informações dispostas no Estudo de Viabilidade Técnica e Econômico-Financeira do Consórcio Intermunicipal Para Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (CONRESOL) da Região Metropolitana de Curitiba, que também tem a produção de CDR como uma alternativa para gestão de RSU.

4.2. Funcionamento e Operação da Planta

Vale ressaltar que as informações a serem apresentadas nessa seção foram obtidas pelo fornecedor Stadler do Brasil (2022), porém o projeto de planta proposta pela CONRESOL (2022) segue o mesmo processo.

O processo produtivo do CDR é iniciado na etapa de alimentação de RSU. Isso é feito com o auxílio de uma pá carregadeira, visando descarregar o material na esteira de alimentação da planta. Em seguida, a esteira seguirá através de uma plataforma de triagem primária, onde materiais não desejados no processo serão retirados por operadores. Por fim, o material será descarregado em uma peneira giratória. A Figura 2 apresenta o esquema dessa etapa do processo (STADLER DO BRASIL 2022).

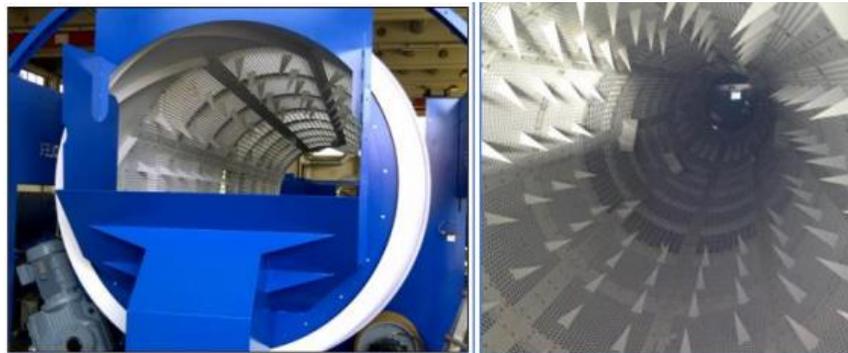
Figura 2. Alimentação, Triagem e Peneira giratória



Fonte: Adaptado de Stadler do Brasil 2022.

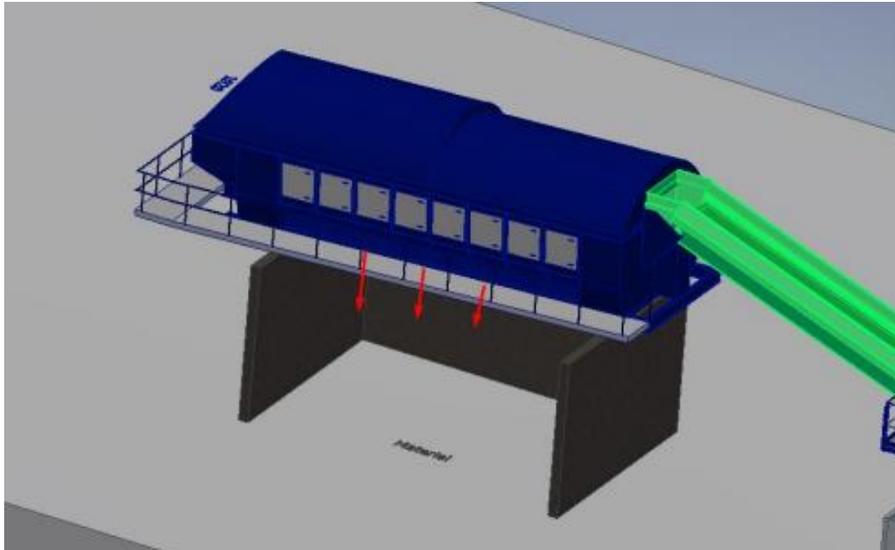
A peneira giratória tem uma malha útil de 8 m que peneira a 80 mm e conta com lâminas fixas no interior para abertura de sacos. Sua função no processo é retirar a fração fina, composta majoritariamente por matéria orgânica, terra, areia, entre outros materiais pequenos. Essa fração fina cairá em um espaço de armazenamento e será levada ao seu destino final posteriormente. A Figura 3 traz um exemplo de peneira giratória e a Figura 4 apresenta o sistema de armazenamento da fração fina (STADLER DO BRASIL 2022).

Figura 3. Exemplo de peneira giratória



Fonte: Stadler do Brasil 2022.

Figura 4. Sistema de armazenamento da fração fina



Fonte: Stadler do Brasil 2022.

Os materiais maiores continuam pelo processo através do transbordo da peneira seguindo pela esteira de triagem e controle final, onde operários dispostos em uma plataforma ao longo da esteira farão a seleção manual dos materiais recicláveis de interesse, os quais serão depositados em calhas para o armazenamento de cada produto. Em seguida, uma correia alimentará o separador de materiais leves que fará a separação dos materiais em três fluxos através de aspiração de ar e de um tambor dispostos no equipamento, a Figura 5 apresenta um exemplo de imagem do interior desse separador (STADLER DO BRASIL 2022).

Figura 5. Interior do separador de materiais leves.



Fonte: Stadler do Brasil, 2022.

Dessa forma, os materiais serão separados em três partes ao passarem pelo separador. O primeiro fluxo irá separar materiais pesados como pedra, vidro, inertes, entre outros, que caíram para outra esteira que juntará esses resíduos ao fluxo de rejeitos da planta. O segundo fluxo será composto pelos materiais leves aspirados, sendo considerados adequados para a produção de CDR, tais quais plásticos leves, papéis, papelão e embalagens leves no geral. Esses materiais serão descarregados através de uma válvula de descarga com destino a uma esteira ligada ao processo de produção do CDR. Já o terceiro e último fluxo será de massa intermediária, sendo considerado adequado para o processo também, assim, esses materiais serão coletados pela esteira ligado ao processo produtivo (STADLER DO BRASIL 2022).

Em seguida, os materiais adequados para produção de CDR serão encaminhados a um separador de materiais ferrosos de modo a diminuir as chances de entrada de metais ferrosos no triturador. Após essa etapa, uma esteira reversível alimentará dois trituradores com o intuito de dividir o fluxo entre eles. Vale ressaltar que o triturador de CDR é um equipamento com um rotor composto de múltiplas facas para forçar a passagem da matéria-prima através do espaço entre elas, além disso, é composto pelas contra facas que são responsáveis pelo corte dos materiais em pedaços menores. Conforme os materiais vão sendo triturados, os que já estão com dimensões reduzidas vão passar através de uma grelha inferior disposta no equipamento. Os trituradores têm como objetivo reduzir a granulometria dos materiais para 50 mm, sendo descarregados em uma nova esteira que finalizará o processo. Logo, ao final do processo, será obtido um CDR de granulometria de 50 mm pronto para uso, além dos materiais recicláveis devidamente separados. Os materiais que foram retirados do processo serão considerados rejeitos e destinados ao aterro sanitário (STADLER DO BRASIL 2022).

Cada unidade de tratamento possui uma capacidade máxima de operação a depender do dimensionamento dos equipamentos. Para o presente trabalho, considerou-se o estudo de três cenários com diferentes capacidades de processamento de RSU apresentados na Tabela 4, sendo os Cenário 1 e 2 dados pelas unidades de tratamento da CONRESOL (2022) e o Cenário 3, pela Stadler do Brasil (2022).

Tabela 4. Capacidade de processamento de RSU para cada cenário.

| Parâmetro | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
|------------------------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| Referência | CONRESOL (2022) | CONRESOL (2022) | Stadler do Brasil (2022) |
| Capacidade de processamento de RSU | 70 ton/h | 45 ton/h | 40 ton/h |

Fonte: Elaboração própria.

4.3. Composição da matéria-prima do CDR

A composição de RSU a compor o CDR varia conforme a gravimetria do RSU coletado e depende de aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos. A Tabela 5 apresenta duas composições típicas do CDR produzido em instalações de Unidades de Tratamento Mecânico e Biológico na Holanda e Alemanha (MARSH *et al.* 2007).

Tabela 5. Composições típicas para produção de CDR.

| Material | Composição (%) | |
|-----------------|-----------------------|----------------------|
| | Grontmij (Holanda) | Herhof (Alemanha) |
| Orgânica | 25% | 0% |
| Papel e papelão | 25% | 55% |
| Têxteis e couro | 0% | 5% |
| Madeira | 15% | 15% |
| Plástico | 20% | 10% |
| Borracha | 15% | 15% |

Fonte: RAMA 2010; MARSH *et al.* 2007.

Analisando a Tabela 5, percebe-se que no caso da unidade de tratamento mecânico apresentada anteriormente, não seria possível seguir com a composição de Grotmij, uma vez que a planta não tem capacidade para o processamento de matéria orgânica, ou seja, proveniente de restos de alimentos que possuem alto teor de umidade. Logo, a composição selecionada deve ser algo mais próximo ao que é praticado em Herhof, porém com algumas diferenças devido a disponibilidade de cada material no RSU de Campinas.

Como o RSU adentrará a planta sem nenhuma separação prévia, o CDR será obtido a partir do material que entra na planta após as etapas de triagem e separação, de modo que materiais como matéria orgânica, metais ferrosos e não ferrosos, folha, mato e galhada, vidro, louça, cerâmica e pedra, agregado fino, fraldas, isopor, especiais e perdas não farão parte do processo. O motivo disso é que alguns não são materiais de interesse no processo e outros podem causar danos as instalações, especialmente ao triturador. Com isso, o CDR pode ser composto pelos materiais dispostos na Tabela 6.

Tabela 6. Matéria-prima disponível para a produção de CDR.

| Material | Fração do RSU total |
|----------------------|----------------------------|
| Papel | 10,43% |
| Papelão | 3,19% |
| Embalagem longa vida | 1,98% |
| PEAD | 6,63% |
| PET | 1,59% |
| Plástico duro | 4,26% |
| Filme | 2,31% |
| Madeira | 3,50% |
| Couro e borracha | 1,50% |
| Têxteis | 6,40% |
| Total (%) | 41,79% |

Fonte: Elaboração própria.

Assim, sabe-se que 41,79% do RSU total está disponível para a produção de CDR, porém parte desses materiais serão separados como materiais recicláveis. Então, para estimar a fração de materiais realmente disponíveis, adotou-se o conceito de eficiência de reciclagem apresentado na Equação (3), sendo que a parcela que irá para o processamento em CDR é dado pela Equação (4). A Tabela 7 traz valores típicos da eficiência de separação de materiais recicláveis.

$$\text{Reciclagem} = \% \text{ Eficiência} \times \text{Matéria prima} \quad (3)$$

$$\text{CDR} = \text{Matéria prima} - \text{Reciclagem} \quad (4)$$

Tabela 7. Eficiência de separação de materiais recicláveis.

| Material | Eficiência |
|--------------------------------------|-------------------|
| PET | 75,0% |
| PEAD (polietileno de alta densidade) | 70,0% |
| PP (polipropileno) | 50,0% |
| Plástico Filme | 50,0% |
| Embalagem longa vida | 60,0% |
| Papel e Papelão | 17,8% |
| Metais ferrosos | 90,0% |
| Metais não ferrosos | 40,0% |
| Vidro | 40,0% |

Fonte: Tulio (2020) *apud* Stadler do Brasil (2019).

Com a devida separação dos materiais recicláveis, a matéria-prima realmente disponível que adentrará a etapa de produção do CDR está disposta na Tabela 8, que mostra que 29,06% do RSU total será processado em CDR.

Tabela 8. Matéria-prima disponível para a produção de CDR após separação de recicláveis.

| Material | Fração do RSU total |
|----------------------|----------------------------|
| Papel | 8,58% |
| Papelão | 2,63% |
| Embalagem longa vida | 0,79% |
| PEAD | 1,99% |
| PET | 0,40% |
| Plástico duro | 2,13% |
| Filme | 1,16% |
| Madeira | 3,50% |
| Couro e borracha | 1,50% |
| Têxteis | 6,40% |
| Total | 29,06% |

Fonte: Elaboração própria.

Com isso, determinou-se a composição final do CDR, apresentada na Tabela 9.

Tabela 9. Composição do Combustível Derivado de Resíduos.

| Material | Fração (%) |
|----------------------|-------------------|
| Papel | 29,51% |
| Papelão | 9,03% |
| Embalagem longa vida | 2,73% |
| PEAD | 6,85% |
| PET | 1,37% |
| Plástico duro | 7,34% |
| Filme | 3,98% |
| Madeira | 12,03% |
| Couro e borracha | 5,15% |
| Têxteis | 22,01% |
| Total (%) | 100% |

Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, a partir da composição do CDR, é possível calcular o poder calorífico inferior (PCI) em base seca como forma de prever se o combustível alternativo atende aos critérios evidenciados na Tabela 2. Para isso, pode-se utilizar correlações que consideram cada componente combustível constituinte do CDR. Lin *et al.* (2013) trouxeram em seu estudo um método considerando a composição física do CDR apresentado na Equação (5):

$$PCI_{CDR} = (38,52 \cdot P_{pa} + 92,09 \cdot P_{pl} + 49,24 \cdot P_{te} + 38,34 \cdot P_{wo} + 37,55 \cdot P_{fo} + 64,07 \cdot P_{ru}) \times \left(\frac{100 - W}{100} \right) - 6 \times W \quad (5)$$

Sendo:

PCI_{CDR} = Poder calorífico inferior para o CDR em kcal/kg

P_{pa} = % em massa de papel e cartão

P_{pl} = % em massa de plásticos

P_{te} = % em massa de têxteis

P_{wo} = % em massa de madeira

P_{fo} = % em massa de matéria orgânica

P_{ru} = % em massa de borracha e couro

W = Teor de umidade (%)

Para efeito de comparação, utilizou-se a média ponderada considerando a gravimetria do CDR e os valores típicos de PCI em base seca para cada constituinte. Assim, tem-se o PCI dado pela Equação (6), sendo os valores típicos de PCI apresentados na Tabela 10.

$$PCI = \sum_{componente=1}^{n=componente} \frac{m_{componente}}{m_{RSU/CDR}} \cdot PCI_{componente} \quad (6)$$

Tabela 10. Valores típicos de PCI para cada constituinte.

| Resíduo | PCI (kJ/kg) |
|-------------------------|--------------------|
| Matéria Orgânica | 4.652,0 |
| Papel, papelão e jornal | 16.282,0 |
| Embalagem longa vida | 16.282,0 |
| PET | 32.564,0 |
| Isopor | 32.564,0 |
| Plástico mole | 32.564,0 |
| Plástico duro | 32.564,0 |
| Trapos e panos | 17.445,0 |
| Borracha | 32.564,0 |

Fonte: Viana 2017.

4.4 Avaliação Econômica

Para realizar a avaliação econômica do projeto, foi preciso definir o valor de investimento (CAPEX) e custos operacionais (OPEX) de cada cenário. Para isso, foi necessário definir alguns parâmetros descritos a seguir:

- A vida útil das plantas para todos os cenários foi de 20 anos;
- Será realizada pausa de 1h a cada turno de operação para limpeza e, caso necessário, manutenção rápida dos equipamentos;
- Para o Cenário 1, definiu-se operação de dois turnos por dia de 8h de produção. Já para os Cenários 2 e 3, foi definido que para os 5 primeiros anos, a unidade irá operar com dois turnos de 8h e, a partir do ano 5, serão realizados três turnos de 7h. Ao final de cada turno, haverá 1h para limpeza e manutenção dos maquinários;
- Para todos os cenários, considerou-se operação de segunda à sexta-feira com operação de 252 dias por ano;
- Os custos de compra de terreno para implementação da unidade de tratamento não foram contabilizados no presente trabalho uma vez que a planta de CDR poderá ser construída em áreas públicas que estejam desocupadas e sem projetos futuros de uso;
- As receitas serão obtidas com a venda de CDR e de materiais recicláveis que foram separados durante a triagem do RSU.

Dessa forma, o CAPEX foi obtido a partir do custo da unidade de triagem e tratamento mecânico do RSU, ponte rolante, estação de transbordo, balança rodoviária digital, obras para construção da infraestrutura industrial, compensação ambiental, custo de estoque permanente de peças e construção da

área de apoio administrativo, do barracão que irá abrigar a unidade de tratamento mecânico e do barracão para estoque do CDR. Além disso, como supracitado, considerou-se a receita obtida pela venda de materiais recicláveis que serão separados no processo.

Já o OPEX foi calculado a partir da Equação (7), onde C_{RM} é o custo com matéria-prima, C_{WT} é o custo com tratamento de efluentes, C_{UT} é o custo com utilidade, C_{OL} é o custo com mão de obra e FCI é o valor do investimento (CAPEX). Além disso, também foram calculados os custos com energia elétrica e com o destino dos rejeitos gerados na unidade de tratamento.

$$COM_d = 1,23 \cdot (C_{RM} + C_{WT} + C_{UT}) + 2,73 \cdot C_{OL} + 0,180 \cdot FCI \quad (7)$$

Definido os valores de CAPEX e OPEX e as considerações para o projeto, a avaliação econômica pôde ser realizada a partir do auxílio do software Excel® na qual foram analisados os indicadores: Valor Presente Líquido (VPL), Preço Mínimo de Venda (PMV), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback* descontado do investimento.

Para o cálculo do VPL, foi necessário fixar um valor para a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que varia para cada empresa. Para o presente estudo, utilizou-se o mesmo valor descrito por CONRESOL (2022), 9,37%. Dessa forma, foi possível calcular o VPL do fluxo de caixa para vida útil do projeto a partir da Equação (8):

$$VPL = \sum_{n=1,2,\dots}^{n=N} \frac{FC_n}{(1+i)^n} = \frac{FC_1}{(1+TMA)^1} + \frac{FC_2}{(1+TMA)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+TMA)^n} - Investimento\ inicial \quad (8)$$

A Taxa Interna de Retorno (TIR) foi calculada igualando o VPL da Equação (8) a zero e o tempo de *payback* foi obtido a partir da Equação (9).

$$Payback = \sum_{n=1,2,\dots}^{n=N} \frac{FC_t}{(1+TMA)^n} \geq 0 \quad (9)$$

Para determinar o Preço Mínimo de Venda (PMV), foi utilizado o Solver disponível no Excel® colocando como restrição $VPL = 0$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Cenários de Capacidade

A fim de definir a capacidade de produção de CDR em cada cenário apresentado na Tabela 4, realizou-se o balanço de massa considerando a gravimetria do RSU apresentada na Tabela 1 e a eficiência de recuperação de materiais conforme a utilizada por Tulio (2020) *apud* Stadler do Brasil (2019) apresentada na Tabela 7.

Dessa forma, utilizou-se as eficiências de reciclagem da Tabela 7 para determinar a quantidade de material que será destinado à reciclagem. Além disso, com os valores de eficiência de reciclagem, foi possível definir a quantidade de resíduos recicláveis que seriam destinados à produção de CDR somados a outros materiais não recicláveis. Assim, obteve-se a Tabela 11, que apresenta a porcentagem dos materiais destinados à reciclagem, à produção de CDR e os rejeitos que serão destinados aos aterros sanitários, e a Tabela 12, que apresenta a quantidade em toneladas por dia

Tabela 11. Porcentagem em massa do destino de cada constituinte do RSU de Campinas.

| Material | % reciclagem | % CDR | % rejeitos |
|-------------------------|---------------------|--------------|-------------------|
| Matéria orgânica | 0,0% | 0,0% | 100,0% |
| Papel | 17,8% | 82,2% | 0,0% |
| Papelão | 17,8% | 82,2% | 0,0% |
| Embalagem longa vida | 60,0% | 40,0% | 0,0% |
| PEAD | 70,0% | 30,0% | 0,0% |
| PET | 75,0% | 25,0% | 0,0% |
| Plástico duro | 50,0% | 50,0% | 0,0% |
| Filme | 50,0% | 50,0% | 0,0% |
| Madeira | 0,0% | 100,0% | 0,0% |
| Couro e borracha | 0,0% | 100,0% | 0,0% |
| Têxteis | 0,0% | 100,0% | 0,0% |
| Folha, mato e galhada | 0,0% | 0,0% | 100,0% |
| Metal ferroso | 90,0% | 0,0% | 10,0% |
| Metal não ferroso | 40,0% | 0,0% | 60,0% |
| Vidro | 40,0% | 0,0% | 60,0% |
| Louça, cerâmica e pedra | 0,0% | 0,0% | 100,0% |
| Agregado fino | 0,0% | 0,0% | 100,0% |
| Fraldas | 0,0% | 0,0% | 100,0% |
| Isopor | 0,0% | 0,0% | 100,0% |
| Especiais | 0,0% | 0,0% | 100,0% |
| Perdas | 0,0% | 0,0% | 100,0% |

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 12. Quantidade em toneladas por dia e fração do destino de cada componente do RSU do município de Campinas.

| Material | Recicláveis (ton/dia) | Fração do RSU total | CDR (ton/dia) | Fração do RSU total | Rejeitos (ton/dia) | Fração do RSU total |
|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Matéria orgânica | 0,00 | 0,0% | 0,00 | 0,0% | 377,58 | 32,1% |
| Papel | 21,86 | 1,9% | 100,95 | 8,6% | 0,00 | 0,0% |
| Papelão | 6,69 | 0,6% | 30,90 | 2,6% | 0,00 | 0,0% |
| Embalagem longa vida | 13,99 | 1,2% | 9,33 | 0,8% | 0,00 | 0,0% |
| PEAD | 54,64 | 4,6% | 23,42 | 2,0% | 0,00 | 0,0% |
| PET | 14,05 | 1,2% | 4,68 | 0,4% | 0,00 | 0,0% |
| Plástico duro | 25,10 | 2,1% | 25,10 | 2,1% | 0,00 | 0,0% |
| Filme | 13,63 | 1,2% | 13,63 | 1,2% | 0,00 | 0,0% |
| Madeira | 0,00 | 0,0% | 41,16 | 3,5% | 0,00 | 0,0% |
| Couro e borracha | 0,00 | 0,0% | 17,61 | 1,5% | 0,00 | 0,0% |
| Têxteis | 0,00 | 0,0% | 75,30 | 6,4% | 0,00 | 0,0% |
| Folha, mato e galhada | 0,00 | 0,0% | 0,00 | 0,0% | 103,72 | 8,8% |
| Metal ferroso | 19,83 | 1,7% | 0,00 | 0,0% | 2,20 | 0,2% |
| Metal não ferroso | 5,59 | 0,5% | 0,00 | 0,0% | 8,38 | 0,7% |
| Vidro | 9,87 | 0,8% | 0,00 | 0,0% | 14,80 | 1,3% |
| Louça, cerâmica e pedra | 0,00 | 0,0% | 0,00 | 0,0% | 12,41 | 1,1% |
| Agregado fino | 0,00 | 0,0% | 0,00 | 0,0% | 13,30 | 1,1% |
| Fraldas | 0,00 | 0,0% | 0,00 | 0,0% | 41,70 | 3,5% |
| Isopor | 0,00 | 0,0% | 0,00 | 0,0% | 40,69 | 3,5% |
| Especiais | 0,00 | 0,0% | 0,00 | 0,0% | 8,41 | 0,7% |
| Perdas | 0,00 | 0,0% | 0,00 | 0,0% | 26,73 | 2,3% |
| TOTAL | 185,24 | 15,7% | 342,06 | 29,1% | 648,93 | 55,2% |

Fonte: Elaboração própria.

Assim, obteve-se o balanço de massa para as unidades de triagem e produção de CDR, sendo que, das 1.177 toneladas por dia de RSU que entram no processo, 15,7% do material é destinado à reciclagem, 29,1% do material é destinado à produção de CDR e 55,2% do material é considerado rejeito. Sendo assim, é possível perceber que uma grande parcela de RSU é considerado rejeito e tem como fim o aterro sanitário. Isso acontece devido à grande parcela de matéria orgânica e materiais inertes presentes no RSU.

Além disso, sabendo que 29,1% do RSU que irá entrar na unidade será convertido em CDR, é possível definir a capacidade de produção de CDR para cada um dos três cenários apresentados na Tabela 4. Dessa forma, foram obtidos os valores de produção de CDR por ano apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Cenários de produção de CDR por ano de operação.

| Ano | Toneladas de CDR produzidas por ano | | |
|-----|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Cenário 1 ^(a) | Cenário 2 ^(b) | Cenário 3 ^(c) |
| 1 | 82.009 | 52.720 | 46.862 |
| 2 | 82.009 | 52.720 | 46.862 |
| 3 | 82.009 | 52.720 | 46.862 |
| 4 | 82.009 | 52.720 | 46.862 |
| 5 | 82.009 | 52.720 | 46.862 |
| 6 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 7 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 8 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 9 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 10 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 11 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 12 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 13 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 14 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 15 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 16 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 17 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 18 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 19 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |
| 20 | 82.009 | 69.195 | 61.507 |

^(a) Produção de CDR considerando processamento de 70 ton/h de RSU operando a 2 turnos de 8 horas por 5 vezes na semana; vida útil da unidade de 20 anos.

^(b) Produção de CDR considerando processamento de 45 ton/h de RSU operando a 2 turnos de 8 horas por 5 vezes na semana nos primeiros 5 anos e 3 turnos de 7 horas por 5 vezes na semana nos anos seguintes; vida útil da unidade de 20 anos.

^(c) Produção de CDR considerando processamento de 40 ton/h de RSU operando a 2 turnos de 8 horas por 5 vezes na semana nos primeiros 5 anos e 3 turnos de 7 horas por 5 vezes na semana nos anos seguintes; vida útil da unidade de 20 anos.

5.2 Validação do CDR como combustível: Poder Calorífico Inferior

Além da análise técnico-econômica, é necessário entender se o CDR possui as características necessárias disponíveis na Tabela 2 para ser utilizado como combustível alternativo. Dessa forma, utilizou-se duas maneiras para calcular o seu Poder Calorífico Inferior (PCI) em base seca: utilizando os valores típicos de PCI para cada constituinte do CDR e utilizando o modelo utilizado por Lin *et al.* (2013).

Utilizando o método dos valores típicos de PCI para cada constituinte de CDR a partir da Equação (6) e das Tabelas 9 e 10, obtêm-se os valores de cada componente do CDR apresentada na Tabela 14. Dessa forma, o valor de PCI para o CDR de base seca é a soma desses constituintes, sendo esse valor 4.976,75 kcal/kg.

Tabela 14. Valores do Poder Calorífico Inferior para cada constituinte do CDR pelo método de média ponderada.

| Material | Composição CDR | PCI (kJ/kg) | PCI (kcal/kg) |
|----------------------|----------------|------------------|-----------------|
| Papel | 29,5% | 4805,16 | 1147,69 |
| Papelão | 9,0% | 1471,00 | 351,34 |
| Embalagem longa vida | 2,7% | 443,94 | 106,03 |
| PEAD | 6,8% | 2229,19 | 532,43 |
| PET | 1,4% | 445,91 | 106,50 |
| Plástico duro | 7,3% | 2389,06 | 570,62 |
| Filme | 4,0% | 1297,20 | 309,83 |
| Madeira | 12,0% | 2238,81 | 534,73 |
| Couro e borracha | 5,1% | 1676,22 | 400,36 |
| Têxteis | 22,0% | 3840,16 | 917,21 |
| Total | 100,0% | 20.836,65 | 4.976,75 |

Fonte: Elaboração própria.

Para efeito de comparação, utilizou-se o método apresentado por Lin *et al.* (2013) conforme Equação (5). Os valores de PCI para cada constituinte e para o CDR estão apresentados na Tabela 15, na qual o valor do PCI para o CDR é de 5.263,82 kcal/kg.

Tabela 15. Valores do Poder Calorífico Inferior para cada constituinte do CDR pelo apresentado por Lin *et al.* (2013).

| Material | Composição CDR | PCI (kcal/kg) |
|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Papel | 29,5% | 1136,81 |
| Papelão | 9,0% | 348,01 |
| Embalagem longa vida | 2,7% | 105,03 |
| PEAD | 6,8% | 630,41 |
| PET | 1,4% | 126,10 |
| Plástico duro | 7,3% | 675,62 |
| Filme | 4,0% | 366,85 |
| Madeira | 12,0% | 461,28 |
| Couro e borracha | 5,1% | 329,80 |
| Têxteis | 22,0% | 1083,92 |
| Total | 100,0% | 5.263,82 |

Fonte: Elaboração própria.

Os valores de PCI apresentaram diferença de 287,07 kcal/kg, o que é justificado pelos diferentes modelos usados em seu cálculo. Utilizando o valor médio entre os resultados obtidos, pode-se dizer que o CDR produzido a partir das unidades de triagem e tratamento no município de Campinas apresenta poder calorífico inferior em torno de 5.120,29 kcal/kg. Assim, o CDR está dentro das especificações de PCI apresentadas na Tabela 2 para ser usado em caldeiras industriais a biomassa, fornos de produção de clínquer, pirólise e gaseificação.

Além disso, o teor de cloro a base seca é um fator importante a ser analisado uma vez que pode, por exemplo, enfraquecer o concreto em termos de resistência quando utilizado em fornos para produção de clínquer (BRÁS *et al.*, 2019). A presença de cloro também pode causar deposições e corrosões internas nos equipamentos de combustão, prejudicando seu desempenho (VICZEK *et al.*, 2020). Em resíduos sólidos urbanos e combustíveis derivados de resíduos, o teor de cloro é proveniente de materiais como plásticos, compósitos, combustíveis e resíduos alimentares (VICZEK *et al.*, 2020). Além disso, níveis elevados de cloro podem estar relacionados com produtos que contenham policloreto de vinila (PVC) ou ao uso de cloreto de polivinilideno (PVDC) como revestimento de embalagens de alimentos, como biscoitos e barras de chocolate, para reduzir a permeabilidade aos sabores dos alimentos, garantindo assim longa vida útil (VICZEK *et al.*, 2020).

No estudo realizado por Infiesta *et al.* (2019), a composição gravimétrica do CDR é semelhante ao utilizado no presente trabalho e apresentou teor de cloro para o CDR em torno de 0,50% em massa. Este valor é confirmado pelo estudo de Costa (2014), na qual o CDR proveniente de resíduos sólidos urbanos apresentou teor de cloro no valor de 0,571%.

Utilizando isso como base, pode-se dizer que o teor de cloro para o CDR proposto neste trabalho não ultrapassará o nível máximo de 1% conforme especificação. Contudo, sugere-se que o município de Campinas analise o teor de cloro do RSU e CDR em uma planta já existente no Brasil para avaliar a viabilidade da utilização do CDR como combustível alternativo para confirmação dos resultados.

5.3 Viabilidade Técnico-Econômica

A seguir, serão analisados os custos tecnológicos das unidades de triagem e produção de CDR, o valor do investimento (CAPEX) e o valor do custo operacional (OPEX) a fim de realizar a análise da viabilidade econômica para implantação da tecnologia no município de Campinas.

5.3.1 CAPEX

A fim de se determinar o custo das tecnologias para produção de CDR a partir do processamento mecânico de RSU, contatou-se 3 fornecedores com atuação no Brasil para solicitação do orçamento, sendo que apenas a Stadler retornou com o valor do investimento com capacidade de processamento de 40 ton/h de RSU, na qual os equipamentos serão importados de Hamburgo – Alemanha. Para comparar diferentes cenários de capacidade, buscou-se na literatura estudos da implementação dessa tecnologia e, dessa forma, foi utilizado os estudos realizados pelo Consórcio Intermunicipal para Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (CONRESOL) em 2022 para unidades de tratamento mecânico com capacidade de processamento de RSU de 70 ton/h e 45 ton/h. Sendo assim, obteve-se os valores de investimento apresentados na Tabela 16, sendo esses valores CIF (Cost, Insurance and Freight, no português, Custo, Seguro e Frete), que considera o valor do frete até a cidade de Campinas – SP.

Tabela 16. Valor da tecnologia para unidade de triagem e tratamento mecânico de RSU.

| Cenários | Capacidade de processamento de RSU | Investimento | Referência |
|-----------------|---|---------------------|--------------------------|
| Cenário 1 | 70 ton/h | R\$ 81.599.591,97 | CONRESOL (2022) |
| Cenário 2 | 45 ton/h | R\$ 37.986.016,95 | CONRESOL (2022) |
| Cenário 3 | 40 ton/h | € 3.392.862,00 | Stadler do Brasil (2022) |

Fonte: CONRESOL (2022) e Stadler do Brasil (2022).

Os valores de investimento para os Cenários 1 e 2 estão considerando a aplicação da alíquota PIS/COFINS sobre os equipamentos e os valores do Cenário 3 desconsidera valores de impostos. Assim, para calcular o valor do imposto sob os equipamentos do Cenário 3, utilizou-se o Simulador do Tratamento Tributário e Administrativo das Importações disponível no site da Receita Federal do Brasil, na qual os valores das Alíquotas II (Imposto de Importação), IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados), PIS (Programa de Integração Social) e COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social) estão apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17. Valores dos impostos sobre os equipamentos.

| Parâmetro | Valores |
|---------------------|----------------|
| Alíquota II (%) | 11,20% |
| Alíquota IPI (%) | 0,00% |
| Alíquota PIS (%) | 2,10% |
| Alíquota COFINS (%) | 10,65% |

Fonte: Receita Federal 2022.

Considerando a Taxa de Câmbio do Euro para o Real como R\$ 5,1187 e as porcentagens das alíquotas para importação da tecnologia, foi possível calcular o valor do investimento para o Cenário 3 a partir da Equação (10), sendo esse valor R\$ 21.526.449,45.

$$Custo [R\$] = \frac{Custo [€]}{R\$ 5,1187} + (11,20\% + 0\% + 2,10\% + 10,65) \times \frac{Custo [€]}{R\$ 5,1187} \quad (10)$$

Além dos custos com os equipamentos de triagem e processamento mecânico de RSU, é necessário considerar outros custos atrelados a implementação da unidade, como ponte rolante para o transporte de materiais, estação de transbordo onde será realizado o traslado dos resíduos sólidos, balança rodoviária para controle da quantidade de RSU que entra na unidade, obras para infraestrutura da unidade (como portões, acessos, ligações de água, esgoto e energia), projeto e construção da área de apoio administrativo e de barracões para abrigar a unidade de tratamento mecânico e armazenamento de CDR, além de estoque permanente de peças para manutenção e valor para compensação ambiental. Esses valores foram obtidos a partir do estudo realizado por CONRESOL (2022) e estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18. Investimento (CAPEX) da implementação da unidade de triagem e tratamento mecânico de CDR.

| Tipo | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
|--|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Unidade de tratamento mecânico | R\$ 81.599.591,97 | R\$ 37.986.016,95 | R\$ 21.526.449,45 |
| Ponte rolante | R\$ 4.563.703,72 | R\$ 3.549.547,34 | R\$ 3.549.547,34 |
| Estação de transbordo | R\$ 3.169.238,70 | R\$ 3.169.238,70 | R\$ 3.169.238,70 |
| Balança rodoviária | R\$ 860.250,00 | R\$ 573.500,00 | R\$ 573.500,00 |
| Obras de infraestruturas | R\$ 5.894.075,65 | R\$ 597.504,60 | R\$ 597.504,60 |
| Projeto e construção da área administrativa | R\$ 483.270,00 | R\$ 217.471,50 | R\$ 217.471,50 |
| Projeto e construção do barracão para unidade de tratamento mecânico | R\$ 8.802.117,35 | R\$ 4.601.555,00 | R\$ 4.601.555,00 |
| Projeto e construção do barracão para armazenamento do CDR | R\$ 657.365,00 | R\$ 657.365,00 | R\$ 657.365,00 |
| Estoque permanente de peças para manutenção | R\$ 190.148,92 | R\$ 190.148,92 | R\$ 190.148,92 |
| Compensação ambiental | R\$ 1.978.879,92 | R\$ 947.701,87 | R\$ 947.701,87 |
| Total | R\$ 108.198.641,23 | R\$ 52.490.049,88 | R\$ 36.030.482,38 |

Fonte: Adaptado de CONRESOL (2022) e Stadler do Brasil (2022).

Dessa forma, foi possível definir o investimento ou CAPEX para cada unidade de tratamento conforme apresentado na Tabela 18 e, a partir desses valores, será possível determinar a viabilidade econômica de cada cenário descrito.

5.3.3 OPEX

Para a determinação dos custos operacionais ou OPEX, foi considerado os custos diretos ou variáveis, que envolve gastos com matéria prima, mão de obra, manutenção e reparos; custo indiretos ou fixos, como depreciação, taxas locais e seguros, e; custos gerais de produção, como custo de administração, distribuição e vendas.

Dessa forma, primeiro é necessário definir os custos do investimento (CAPEX), custo de mão de obra, custo de utilidades, custo de tratamento de efluentes e custo de matéria prima. Como o valor do CAPEX para cada cenário foi definido anteriormente, partiu-se para a definição do custo com mão de obra. Para isso, utilizou-se os requisitos de mão de obra disponibilizados por Stadler do Brasil (2022) para uma unidade de processamento de 40 toneladas de RSU por hora, considerando o salário base do site vagas.com, disponível na Tabela 19.

Tabela 19. Mão de obra para linha operando a 40 ton/h de RSU.

| Cargo | Quantidade | Função | Salário base |
|------------------------------------|-------------------|---|---------------------|
| Encarregado de Produção | 1 | Gerenciar equipe, controlar horários de produção, movimentação de cargas e triagem, controlar o sistema de automação da planta, controlar e supervisionar equipe de manutenção, gerenciar equipe de colaboradores | R\$ 2.700,00 |
| Auxiliar de Pátio de Descarga | 1 | Auxiliar a descarga dos caminhões no pátio | R\$ 1.400,00 |
| Operador de Pá Carregadeira | 1 | Alimentar a planta | R\$ 2.100,00 |
| Operador de Mini Pá Carregadeira | 1 | Alimentação direta | R\$ 2.100,00 |
| Triagem de Impróprios | 2 a 4 | Remoção de impróprios | R\$ 1.300,00 |
| Triagem e Controle Final | 10 a 20 | Separação manual de diferentes recicláveis | R\$ 1.300,00 |
| Mecânico | 2 | Realizar manutenção mecânica | R\$ 2.400,00 |
| Eletricista | 1 | Realizar manutenção elétrica | R\$ 2.600,00 |
| Gerente de Planta | 1 | Controlar toda a cadeia produtiva da planta | R\$ 14.200,00 |
| Engenheiro de Manutenção | 1 | Gerenciar planos de manutenção e fazer planejamento de trabalho da equipe de manutenção | R\$ 8.500,00 |
| Engenheiro de Qualidade e Produção | 1 | Controlar os níveis de qualidade do resíduo, da seleção de materiais e produtividade da planta | R\$ 6.900,00 |

Fonte: Stadler do Brasil, 2022; Vagas.com, 2022.

Dessa forma, adaptou-se o time necessário para operação conforme a capacidade de processamento para cada cenário e, a partir da remuneração base disponível no site do Vagas.com, foi possível estimar o custo com mão de obra para os três cenários considerando:

- FGTS: 8% do salário ao mês;
- Férias: Valor integral do salário + 1/3 do salário;
- 13º Salário: Valor integral do salário;

- Vale transporte: R\$ 10,00 por dia útil com 6% descontado do salário;
- Vale alimentação: R\$ 20,00 por dia útil;
- INSS: 9% descontado do salário.

É válido lembrar que, para os cargos de gerência (gerente de planta, engenheiro de manutenção e engenheiro de qualidade e produção), não são considerados os valores de vale transporte.

Além disso, os custos de utilidades, tratamento de efluentes e matéria-prima não foram considerados neste estudo uma vez que não se aplicam ao processo de triagem e tratamento mecânico do RSU. Dessa forma, é possível determinar o custo de produção para cada cenário conforme a Equação (7). Os valores para os três cenários estão apresentados nas Tabelas 20 e 21, na qual a última apresenta os valores considerando o aumento de produção dos Cenários 2 e 3.

Tabela 20. Custos operacionais para cada cenário para os anos 1 a 5.

| Custos | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| CAPEX | R\$ 108.198.641,23 | R\$ 52.490.049,88 | R\$ 36.030.482,38 |
| Mão de obra | R\$ 1.548.170,67 | R\$ 992.362,67 | R\$ 992.362,67 |
| Utilidade | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| Tratamento de Efluentes | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| Matéria-prima | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| OPEX (R\$) | R\$ 23.702.261,34 | R\$ 12.157.359,06 | R\$ 9.194.636,91 |

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 21. Custos operacionais para cada cenário para os anos 6 a 20.

| Custos | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| CAPEX | R\$ 108.198.641,23 | R\$ 52.490.049,88 | R\$ 36.030.482,38 |
| Mão de obra | R\$ 1.548.170,67 | R\$ 1.270.266,67 | R\$ 1.270.266,67 |
| Utilidade | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| Tratamento de Efluentes | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| Matéria-prima | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| OPEX (R\$) | R\$ 23.702.261,34 | R\$ 12.916.036,98 | R\$ 9.953.314,83 |

Fonte: Elaboração própria.

5.3.4 Receita com a venda de recicláveis

Como especificado anteriormente, aproximadamente 15,7% do material é separado como materiais recicláveis na proporção apresentada na Tabela 11. Por se tratar de uma parcela considerável de resíduos com um bom potencial econômico, optou-se pela venda desses materiais. Para estimar a

receita proveniente dessa operação, adotou-se valores médios de venda como referência, além de considerar uma perda no valor por se tratar de materiais recicláveis, ou seja, há uma redução na qualidade. Para os materiais plásticos, adicionou-se também uma redução de 20% no valor original, uma vez que estes serão vendidos em uma só categoria (a de materiais plásticos) e não serão separados conforme sua tipologia (PET, PEAD, PP, dentre outros). A Tabela 22 apresenta o preço por tonelada de cada material reciclado.

Tabela 22. Valor médio unitário praticado para a venda de recicláveis.

| Material | Valor médio por tonelada | Redução no valor por qualidade | Redução no valor por não separação | Valor unitário por tonelada |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|------------------------------------|
| Papel | R\$ 313,33 | 20% | - | R\$ 250,66 |
| Papelão | R\$ 521,67 | 20% | - | R\$ 417,34 |
| Embalagem longa vida | R\$ 323,33 | 10% | - | R\$ 291,00 |
| PEAD | R\$ 1.058,51 | 5% | 20% | R\$ 793,88 |
| PET | R\$ 1.607,03 | 5% | 20% | R\$ 1.205,27 |
| Plástico duro | R\$ 1.058,51 | 5% | 20% | R\$ 793,88 |
| Filme | R\$ 670,40 | 5% | 20% | R\$ 502,80 |
| Metal ferroso | R\$ 415,00 | 5% | - | R\$ 394,25 |
| Metal não ferroso | R\$ 4.088,33 | 5% | - | R\$ 3.883,91 |
| Vidro | R\$ 118,33 | 5% | - | R\$ 112,41 |

Fonte: CONRESOL, 2022

Dessa forma, para determinar a quantidade de recicláveis separadas por ano, multiplicou-se a capacidade adotada para cada cenário pela fração do RSU total correspondente a cada cenário, sendo que ambos os dados estão dispostos na Tabelas 12 e 13. Com isso, as Tabelas 23 e 24 apresentam as quantidades de materiais recicláveis disponíveis para a venda em cada cenário e as Tabelas 25 e 26 dispõem a receita anual obtida com a venda.

Tabela 23. Quantidade em toneladas por ano de materiais recicláveis separados para venda em cada cenário para os anos 1 a 5.

| Material | Quantidade (ton/ano) | | |
|----------------------|----------------------|-----------|-----------|
| | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
| Papel | 5.241 | 3.369 | 2.995 |
| Papelão | 1.604 | 1.031 | 917 |
| Embalagem longa vida | 3.354 | 2.156 | 1.917 |
| PEAD | 13.099 | 8.421 | 7.485 |
| PET | 3.369 | 2.166 | 1.925 |
| Plástico duro | 6.017 | 3.868 | 3.438 |
| Filme | 3.267 | 2.100 | 1.867 |
| Metal ferroso | 4.755 | 3.057 | 2.717 |
| Metal não ferroso | 1.339 | 861 | 7.65 |
| Vidro | 2.366 | 1.521 | 1.352 |

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 24. Quantidade em toneladas por ano de materiais recicláveis separados para venda em cada cenário para os anos 6 a 20.

| Material | Quantidade (ton/ano) | | |
|----------------------|----------------------|-----------|-----------|
| | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
| Papel | 5.241 | 4.422 | 3.931 |
| Papelão | 1.604 | 1.354 | 1.203 |
| Embalagem longa vida | 3.354 | 2.830 | 2.516 |
| PEAD | 13.099 | 11.053 | 9.824 |
| PET | 3.369 | 2.843 | 2.527 |
| Plástico duro | 6.017 | 5.077 | 4.512 |
| Filme | 3.267 | 2.756 | 2.450 |
| Metal ferroso | 4.755 | 4.012 | 3.566 |
| Metal não ferroso | 1.339 | 1.130 | 1.005 |
| Vidro | 2.366 | 1.996 | 1.774 |

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 25. Receita anual obtida com a venda de materiais recicláveis para os anos 1 a 5.

| Material | Receita anual | | |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
| Papel | R\$ 1.313.719,25 | R\$ 844.533,80 | R\$ 750.696,71 |
| Papelão | R\$ 669.576,08 | R\$ 430.441,77 | R\$ 382.614,90 |
| Embalagem longa vida | R\$ 976.022,65 | R\$ 627.443,13 | R\$ 557.727,23 |
| PEAD | R\$ 10.399.288,77 | R\$ 6.685.257,07 | R\$ 5.942.450,72 |
| PET | R\$ 4.060.467,06 | R\$ 2.610.300,25 | R\$ 2.320.266,89 |
| Plástico duro | R\$ 4.776.473,93 | R\$ 3.070.590,38 | R\$ 2.729.413,67 |
| Filme | R\$ 1.642.584,96 | R\$ 1.055.947,48 | R\$ 938.619,98 |
| Metal ferroso | R\$ 1.874.574,67 | R\$ 1.205.083,72 | R\$ 1.071.185,53 |
| Metal não ferroso | R\$ 5.202.135,27 | R\$ 3.344.229,82 | R\$ 2.972.648,73 |
| Vidro | R\$ 265.945,39 | R\$ 170.964,90 | R\$ 151.968,80 |
| TOTAL | R\$ 31.180.788,03 | R\$ 20.044.792,31 | R\$ 17.817.593,16 |

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 26. Receita anual obtida com a venda de materiais recicláveis para os anos 6 a 20.

| Material | Receita anual | | |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
| Papel | R\$ 1.313.719,25 | R\$ 1.108.450,62 | R\$ 985.289,44 |
| Papelão | R\$ 669.576,08 | R\$ 564.954,82 | R\$ 502.182,06 |
| Embalagem longa vida | R\$ 976.022,65 | R\$ 823.519,11 | R\$ 732.016,99 |
| PEAD | R\$ 10.399.288,77 | R\$ 8.774.399,90 | R\$ 7.799.466,58 |
| PET | R\$ 4.060.467,06 | R\$ 3.426.019,08 | R\$ 3.045.350,29 |
| Plástico duro | R\$ 4.776.473,93 | R\$ 4.030.149,88 | R\$ 3.582.355,45 |
| Filme | R\$ 1.642.584,96 | R\$ 1.385.931,06 | R\$ 1.231.938,72 |
| Metal ferroso | R\$ 1.874.574,67 | R\$ 1.581.672,38 | R\$ 1.405.931,00 |
| Metal não ferroso | R\$ 5.202.135,27 | R\$ 4.389.301,63 | R\$ 3.901.601,45 |
| Vidro | R\$ 265.945,39 | R\$ 224.391,43 | R\$ 199.459,05 |
| TOTAL | R\$ 31.180.788,03 | R\$ 26.308.789,90 | R\$ 23.385.591,03 |

Fonte: Elaboração própria.

5.3.5 Custo com energia elétrica

Para o funcionamento da unidade de triagem e tratamento mecânico de RSU, é necessário considerar custos com energia elétrica. Para isso, utilizou-se a potência estimada de consumo em kW dada pela Stadler do Brasil (2022) para uma linha operando a 40 toneladas de RSU por hora, sendo esse valor de 549 kW. Dessa forma, para estimar a potência para os três cenários, utilizou-se a Equação (11), sendo i referente aos dados dos Cenários 1, 2 e 3 e *baseline* os dados disponibilizados pela Stadler do Brasil (2022).

$$Potência_i = Capacidade_i \times \frac{Potência_{baseline}}{Capacidade_{baseline}} \quad (11)$$

Sabendo que o preço médio por kWh que a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) em 2022 é de R\$ 0,98 para tarifa industrial (NG SOLAR, 2022), é possível estimar o gasto anual com energia elétrica para cada cenário a partir da Equação (12), na qual $Custo_{i,E}$ é o custo com energia elétrica, t é o tempo de operação por dia em horas, P é a potência dos equipamentos em kW, $Preço$ é o preço do kWh e d são os dias úteis no ano de operação.

$$Custo_{i,E} = t \left[\frac{h}{dia} \right] \times P [kW] \times Preço \left[\frac{R\$}{kWh} \right] \times d [dia] \quad (12)$$

Dessa forma, foi possível obter os custos com energia elétrica conforme apresentado na Tabela 27.

Tabela 27. Custos anuais com energia elétrica para os três cenários.

| Cenários | Potência (kW) | Custo (R\$) | |
|-----------|---------------|------------------|------------------|
| | | Anos 1 a 5 | Anos 6 a 20 |
| Cenário 1 | 961 | R\$ 3.796.269,12 | R\$ 3.796.269,12 |
| Cenário 2 | 618 | R\$ 2.440.458,72 | R\$ 3.203.102,07 |
| Cenário 3 | 549 | R\$ 2.169.296,64 | R\$ 2.847.201,84 |

Fonte: Elaboração própria.

5.3.6 Custo com Aterro Sanitário

Além do custo da energia elétrica, é necessário estimar o custo com o destino adequado dos rejeitos produzidos pela unidade de triagem e processamento de RSU. Levando em consideração que o destino adequado para esses resíduos é o aterro sanitário e sabendo que o município de Campinas gastava, em média, R\$ 48 milhões para destinar 1.500 toneladas de lixo por dia para aterros sanitários em 2018, torna-se possível estimar o valor gasto com aterro sanitário.

A quantidade de rejeitos produzidos por dia é 55,2% em massa da quantidade de RSU que é processada em cada unidade conforme pode ser visto na Tabela 12. Dessa forma, é possível calcular a quantidade de rejeitos produzidos anualmente em cada cenário conforme a Equação (13), sendo $m_{rejeitos}$

a quantidade de rejeitos gerados, RSU_p a quantidade de RSU processado e d o número de dias de operação de cada unidade por ano.

$$m_{rejeitos} = \frac{55,2}{100} \times RSU_p \times d \quad (13)$$

Assim, torna-se possível calcular o custo com destino adequado para esses resíduos, que pode ser obtido conforme a Equação (14), sendo $Custo_{i,A}$ o custo com aterro, $Custo_{ref}$ o custo referência de R\$ 48 milhões e m_{ref} a quantidade referência de resíduos destinados a aterros.

$$Custo_{i,A} = Custo_{ref} \cdot \frac{m_{rejeitos}}{m_{ref}} \quad (14)$$

Dessa forma, obteve-se os custos com aterro sanitário apresentados na Tabela 28.

Tabela 28. Quantidade anual de rejeitos e custo anual com aterro sanitário para cada cenário.

| Cenários | Rejeito (ton/ano) | | $Custo_{i,A}$ (R\$/ano) | |
|-----------|-------------------|-------------|-------------------------|-------------------|
| | Anos 1 a 5 | Anos 6 a 20 | Anos 1 a 5 | Anos 6 a 20 |
| Cenário 1 | 155.819,8 | 155.819,8 | R\$ 13.660.916,30 | R\$ 13.660.916,30 |
| Cenário 2 | 100.169,9 | 131.473,0 | R\$ 8.782.017,62 | R\$ 11.526.398,13 |
| Cenário 3 | 89.039,9 | 116.864,9 | R\$ 7.806.237,89 | R\$ 10.245.687,23 |

Fonte: Elaboração própria.

Ademais, não foram considerados os custos com a quantidade de RSU não processado na unidade de triagem e tratamento uma vez que se entendeu que o descarte não seria de responsabilidade da planta de CDR, visto que seria recebido na planta apenas a quantidade a ser processada.

5.3.7 Avaliação Econômica

Com os parâmetros definidos, foi possível calcular o preço mínimo de venda (PMV) do CDR para cada cenário. Isso foi feito através de uma análise do fluxo de caixa anual proveniente das receitas e débitos, como mostra a Tabela 29.

Tabela 29. Receitas e débitos do fluxo de caixa.

| Sinal | Parâmetro |
|--------------|---|
| (+) | Receita proveniente da venda CDR |
| (+) | Receita proveniente da venda de recicláveis |
| (-) | OPEX (custos operacionais) |
| (-) | Gastos com energia elétrica |
| (-) | Gastos com descarte de rejeitos |
| = | EBITDA (Lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização) |
| (-) | Depreciação (linear) |
| = | EBIT (Lucros antes de juros e imposto de renda) |
| (-) | Custos de capital (empréstimos) |
| = | EBT (Lucros antes de imposto de renda) |
| (-) | Imposto de renda (34%) |
| = | Lucro Operacional (após impostos) |
| (+) | Depreciação |
| (-) | Investimentos (CAPEX) |
| = | Fluxo de Caixa Livre |

Fonte: Elaboração própria.

A depreciação é caracterizada pela perda de valor dos ativos ou bens de uma empresa ao longo do tempo, logo, para o cálculo da depreciação anual, considerou-se que essa seria linear durante os anos de produção, dessa forma, a Equação (15) detalha como esse valor foi obtido para cada cenário.

$$Depreciação_{anual} = \frac{CAPEX}{t} \quad (15)$$

Sendo que t é o tempo de produção em anos. Assim, os resultados de depreciação para cada cenário estão dispostos na Tabela 30.

Tabela 30. Depreciação anualizada em cada cenário.

| Cenários | CAPEX | Tempo de produção (anos) | Depreciação anual |
|-----------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Cenário 1 | R\$ 108.198.641,23 | 20 | R\$ 5.409.932,06 |
| Cenário 2 | R\$ 52.490.049,88 | 20 | R\$ 2.624.502,49 |
| Cenário 3 | R\$ 36.030.482,38 | 20 | R\$ 1.801.524,12 |

Fonte: Elaboração própria.

Já, os custos de capital são referentes aos juros pagos em casos de empréstimos. Neste caso, o valor do CAPEX em cada cenário foi dividido em uma entrada de 10 milhões de reais e duas parcelas anuais de igual valor a uma taxa de juros de 12% ao ano. Logo, para determinação do preço de cada prestação utilizou-se a Equação (16).

$$Prestação = (CAPEX - 10 \text{ MR\$}) \times \left[\frac{(1 + i)^n \cdot i}{(1 + i)^n - 1} \right] \quad (16)$$

Onde i é a taxa de juros anual e n é o número de prestações. Dessa forma, a Tabela 31 apresenta os valores obtidos.

Tabela 31. Entrada, prestações e juros dos investimentos (CAPEX).

| Cenários | CAPEX | Entrada (Ano 0) | Prestações (Ano 1 e 2) | Juros |
|-----------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Cenário 1 | R\$ 108.198.641,23 | R\$ 10.000.000,00 | R\$ 58.103.950,74 | R\$ 18.009.260,24 |
| Cenário 2 | R\$ 52.490.049,88 | R\$ 10.000.000,00 | R\$ 25.141.282,34 | R\$ 7.792.514,81 |
| Cenário 3 | R\$ 36.030.482,38 | R\$ 10.000.000,00 | R\$ 15.402.187,31 | R\$ 4.773.892,24 |

Fonte: Elaboração própria.

Com os valores de receita e custo definidos, foi possível estimar o Preço Mínimo de Venda (PMV) utilizando o Solver da ferramenta Excel®, sendo que as Figuras 6, 7 e 8 apresentam os fluxos de caixas para os três cenários.

Figura 6. Fluxo de caixa livre a valor presente do Cenário 1 em milhões de reais quando VPL = 0.

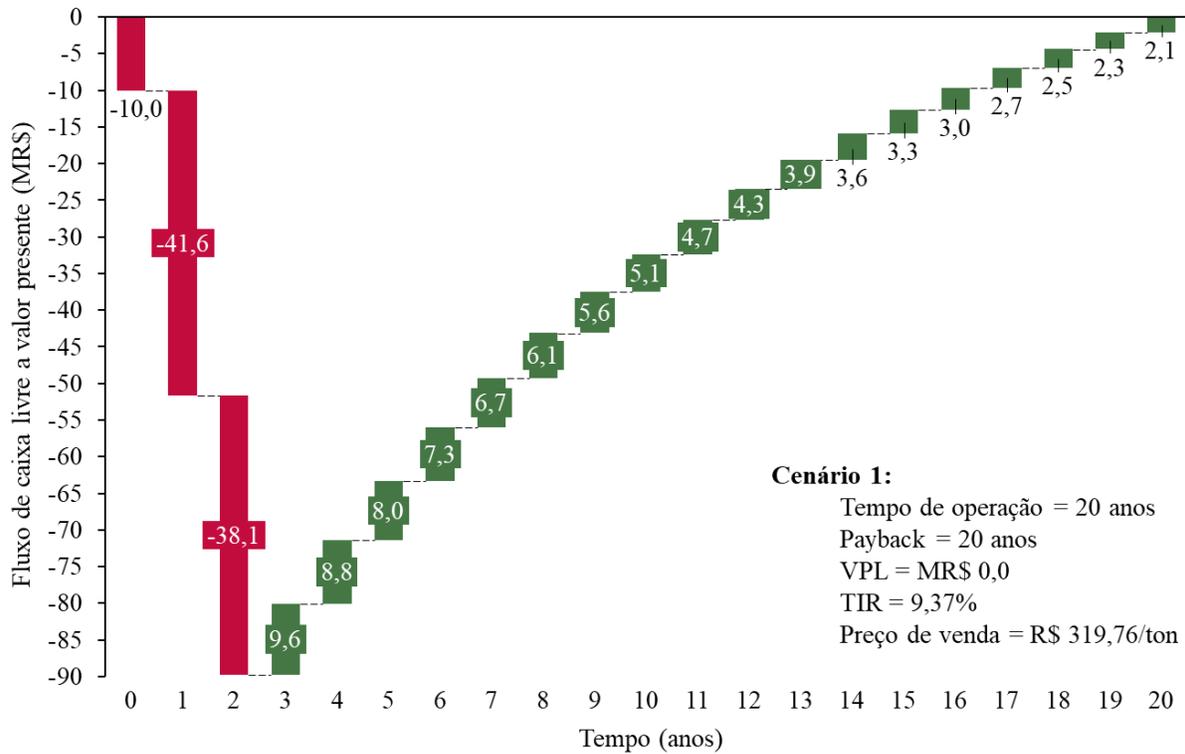


Figura 7. Fluxo de caixa livre a valor presente do Cenário 2 em milhões de reais quando VPL = 0.

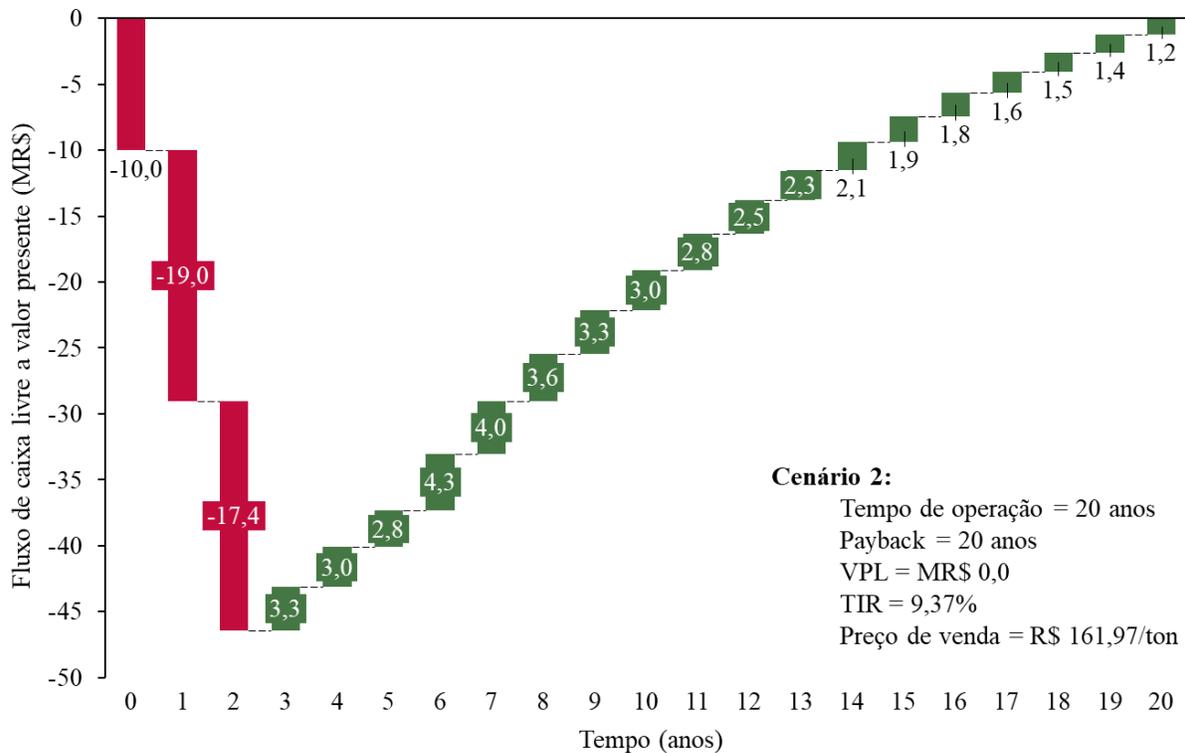
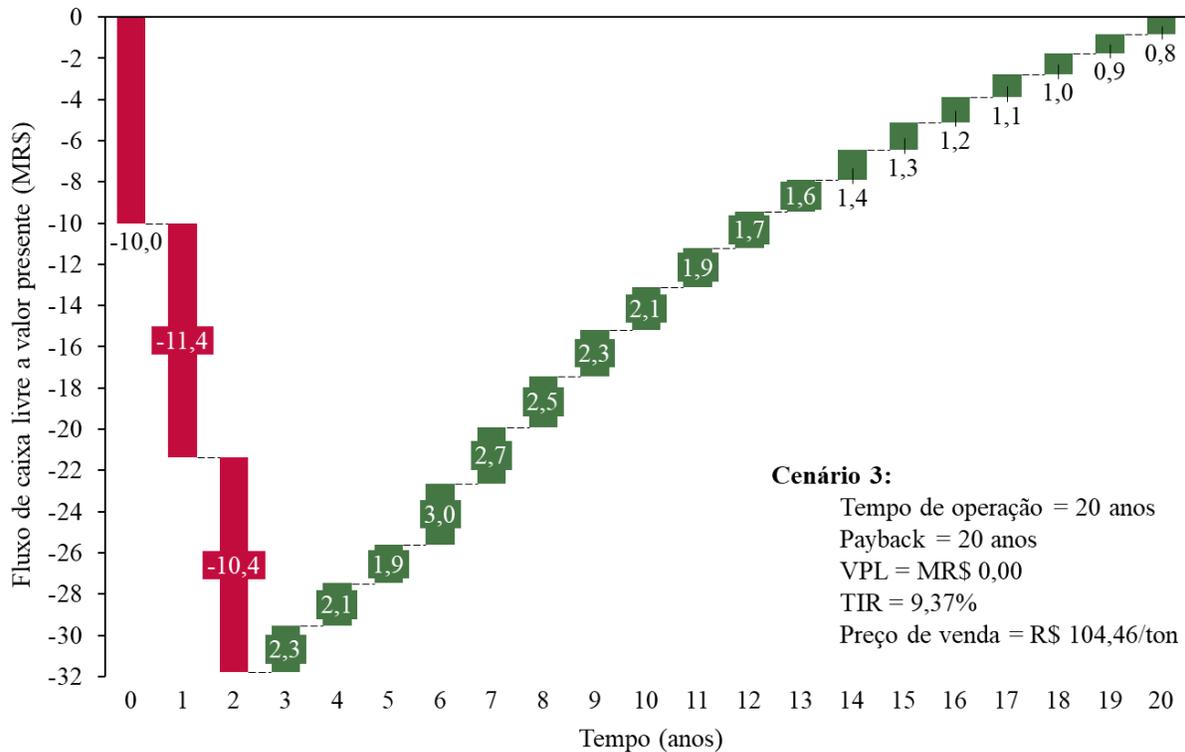


Figura 8. Fluxo de caixa livre a valor presente do Cenário 3 em milhões de reais quando VPL = 0.



Analisando as Figuras 6, 7 e 8, constata-se que no Ano 0, 1 e 2, o fluxo de caixa livre apresentou valor negativo devido ao valor de investimento (CAPEX). A partir do Ano 3 de operação, os ganhos com as receitas são maiores que os custos operacionais e, dessa forma, obteve-se lucro com a operação. Além disso, é possível notar que o fluxo de caixa a valor presente é nulo, ou seja, a TIR foi igualada à TMA e é possível obter o preço mínimo de venda (PMV) do CDR para cada cenário. Para o Cenário 1, o preço mínimo de venda foi de R\$ 319,76/ton de CDR, para o Cenário 2, R\$ 161,97/ton de CDR e para o Cenário 3, R\$ 104,46/ton de CDR. Sendo assim, a partir do PMV é possível afirmar que o Cenário 1 é o menos favorável por apresentar preço mínimo de venda maior que nos outros dois cenários.

Visto que o CDR está apto para ser utilizado como combustível alternativo por estar de acordo com as especificações apresentadas na Tabela 2, tais quais PCI e teor de cloro, é possível estimar o preço de venda do CDR. Para isso utiliza-se o poder calorífico inferior do CDR produzido no município de Campinas, sendo este valor igual a 5.120,29 kcal/kg. Ao compará-lo com o valor do coque de petróleo comumente utilizado nos fornos industriais cimenteiros, que apresenta PCI em torno de 8.390 kcal/kg, pode-se dizer que o poder calorífico inferior do CDR apresenta redução de 39% quando comparado com o coque de petróleo.

Ao comparar o preço, a tonelada do coque de petróleo custa US\$ 300,00 ou R\$ 1575,00, o que equivale a R\$ 1,575 por kg ou R\$ 0,00019 por kcal, sendo a cotação média do dólar de R\$ 5,25 em outubro/22. Visto o valor do PCI, é válido assumir um valor de venda para o CDR menor que o valor do coque de petróleo. Além disso, por se tratar de um recurso secundário que possui limitações em relação a presença de cloro, será considerado um valor de venda 85% menor em relação ao preço do coque de petróleo, atingindo um valor de venda de R\$ 236,25 por tonelada de CDR. Dessa forma, o valor por kg de CDR é de R\$ 0,236 ou R\$ 0,000046 por kcal, sendo um combustível mais barato que o coque de petróleo.

Dessa forma, é possível realizar a avaliação econômica de cada cenário com o preço de venda do CDR definido. As Figuras 9, 10 e 11 apresentam o fluxo de caixa livre a valor presente em milhões de reais para os Cenário 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 9. Fluxo de caixa livre a valor presente em milhões de reais para o Cenário 1, considerando o preço de venda definido R\$ 236,25 por tonelada de CDR.

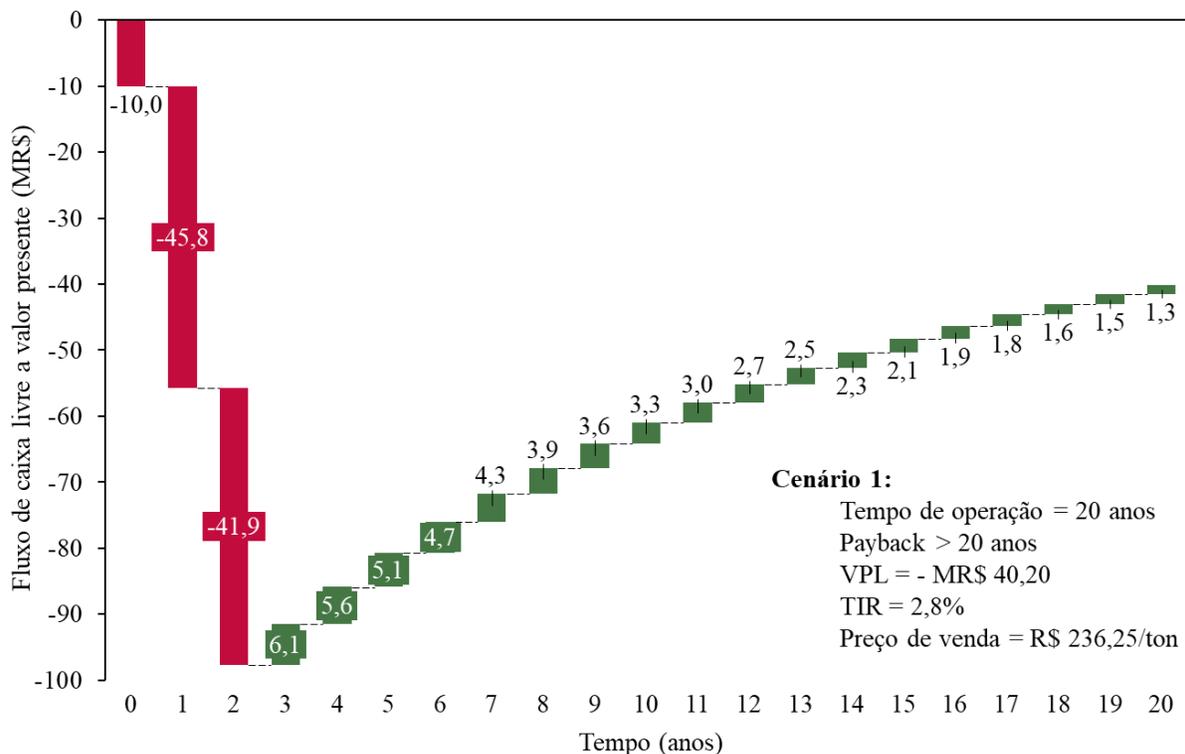


Figura 10. Fluxo de caixa livre a valor presente em milhões de reais para o Cenário 2, considerando o preço de venda definido R\$ 236,25 por tonelada de CDR.

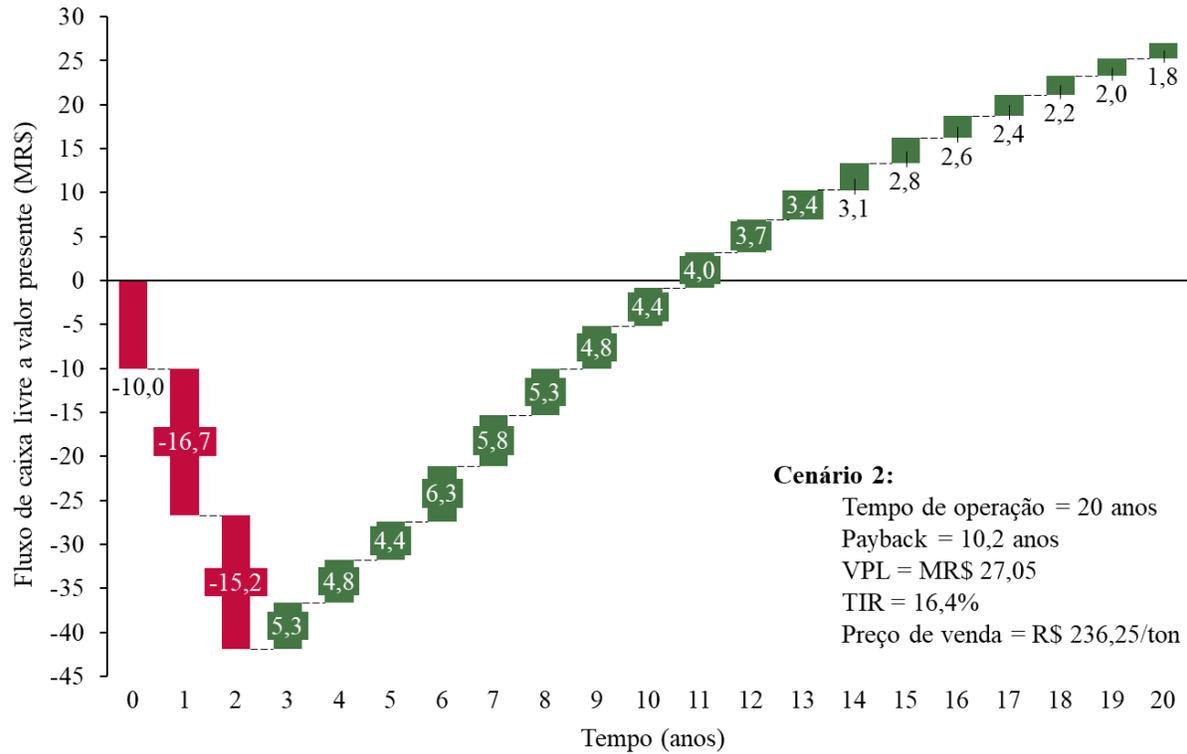
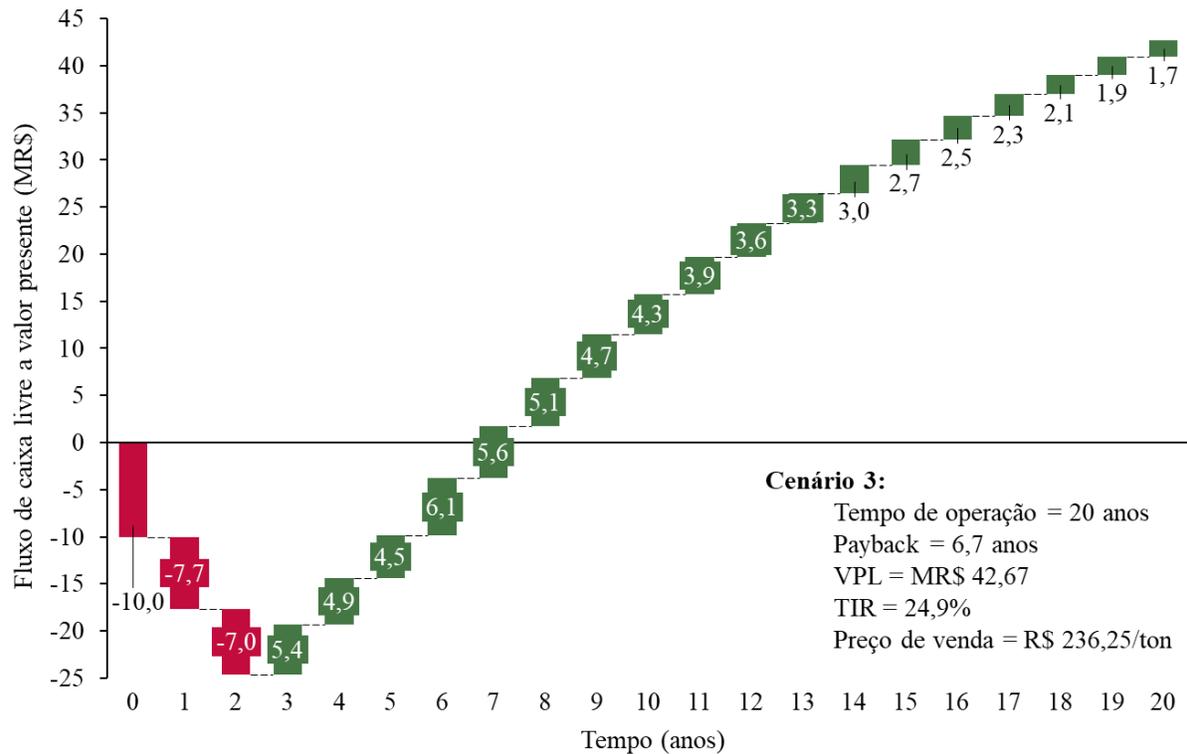


Figura 11. Fluxo de caixa livre a valor presente em milhões de reais para o Cenário 3, considerando o preço de venda definido de R\$ 236,25 por tonelada de CDR.



A partir das Figuras 9, 10 e 11, é possível notar que, nos Anos 0, 1 e 2, o fluxo de caixa livre apresentou valor negativo e, a partir do Ano 3, se tornam positivo devido ao ganho com as receitas serem maiores que as despesas, além de não haver gastos com o valor do investimento, assim como visto nas Figuras 6, 7 e 8. Para o preço de venda por tonelada de CDR definido em R\$ 236,25, observa-se que para o Cenário 1, não é obtido lucro ao longo da vida útil de operação da unidade, sendo o VPL negativo, o tempo de *payback* maior que 20 anos e a TIR em 2,8%, sendo menor que a TMA definido em 9,37%. Isso ocorreu uma vez que o preço de venda definido para o CDR é menor que o preço mínimo de venda, tornando este cenário inviável. Já para os Cenários 2 e 3, o preço de venda definido foi maior que o preço mínimo de venda e, dessa forma, obteve-se VPL positivo, tempo de *payback* menor que a vida útil de operação da planta e TIR maior que TMA, o que torna esses dois cenários economicamente viáveis.

Dessa forma, dentre os três cenários propostos neste trabalho, as alternativas que apresentam viabilidade econômica e são passíveis de implementação são os Cenários 2 e 3 uma vez que seus indicadores econômicos expressam aspectos positivos. Contudo, o Cenário 3 oferece condições melhores que o Cenário 2 por apresentar valores de VPL e TIR maiores e menor tempo de *payback*.

Sendo assim, o Cenário 3 demonstrou condições econômicas favoráveis para implementação da tecnologia de tratamento de RSU e produção de CDR no município de Campinas. Além disso, a utilização dos resíduos se mostrou promissora para o cumprimento de uma das etapas do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS).

Ademais, cerca de 50% da quantidade de RSU gerados atualmente no município seriam tratados na unidade proposta pela Stadler do Brasil (2022), sendo que dessa parcela, 29% são convertidos em CDR, 16% são recuperados para reciclagem e 55% são considerados rejeitos. Neste contexto, devido a oferta de RSU e a grande fração de rejeitos, há novas oportunidades a serem exploradas, tais como expansão da linha de triagem e tratamento do RSU e produção de CDR, e tratamento biológico dos rejeitos a fim de minimizá-los, como uso de biomassa para geração de energia, compostagem e digestão anaeróbica, visto que a maior parte do rejeito é representada por matéria orgânica.

Apesar da viabilidade de implementação, recomenda-se o estudo mais aprofundado das características químicas do RSU da cidade, como PCI, teor de cloro, de cinzas, de umidade e outros componentes químicos, como zinco, cobre, cromo e mercúrio a fim de validar a composição desses componentes no CDR.

6. CONCLUSÃO

A partir dos cenários definidos e considerando as premissas adotadas para determinação da operação das unidades de tratamento de RSU, é possível concluir que a produção de CDR é viável economicamente no município de Campinas, além de trazer benefícios ambientais e econômicos à cidade, como desafogamento de aterros sanitários, reaproveitamento dos materiais recicláveis, geração de emprego e reaproveitamento energético sustentável dos resíduos produzidos no município. Dentre as alternativas analisadas, os Cenários 2 e 3 se apresentaram técnico e economicamente viáveis com preço de venda de R\$ 236,25 por tonelada de CDR. Como forma de obter o máximo desempenho econômico da unidade de tratamento do RSU e produção de CDR, o Cenário 3 proposto pela Stadler do Brasil (2022) é a melhor alternativa visto que os valores de VPL e TIR são maiores e o tempo de *payback* é menor neste cenário quando comparado com o Cenário 2. Ademais, o CDR apresentou características adequadas, como PCI elevado e baixo teor de cloro, para ser utilizado como combustível alternativo em caldeiras industriais, fornos de produção de clínquer em indústrias cimenteiras, em usinas de recuperação de energia (URE) e em processos de pirólise e gaseificação.

Além disso, a utilização de resíduos sólidos urbanos para produção de CDR cumpre os eixos de reciclagem, tratamento dos resíduos e disposição final dos rejeitos proposto pelo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de Campinas. Contudo, levando em consideração os dois primeiros eixos do plano municipal (não geração e redução da produção de resíduos), o município deve traçar um plano paralelo à implementação da unidade de tratamento de RSU a fim de cumprir com a PMGIRS.

Por fim, a partir do balanço material da planta, obteve-se que 50% em massa do RSU total gerado anualmente no município é processado na unidade proposta pela Stadler do Brasil (2022). Desses 50%, 55,2% em massa é considerado rejeito e, dessa parcela, 32,1% é material orgânico, que poderia ter um destino mais adequado, como por exemplo, o uso como biomassa para geração de energia. Sendo assim, para futuros estudos, sugere-se que seja analisado a implementação de uma unidade de tratamento biológico junto com a unidade de tratamento mecânico de RSU com objetivo de reduzir a quantidade de rejeitos e produzir energia elétrica a partir da biomassa. Isso reduziria os gastos com a destinação adequada dos rejeitos e, inclusive, reduziria os gastos com energia elétrica na unidade de tratamento mecânico de RSU.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Brasileira nº NBR 16.849, de 10 de fevereiro de 2020. Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – Requisitos, NBR 16.849. Rio de Janeiro, RJ. 2020.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Brasileira nº NBR 10.004, de 31 de maio de 2004. Resíduos Sólidos – Classificação, NBR 10.004. Rio de Janeiro, RJ. 2004.

AESBE, Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento. **Combustível de resíduo ajuda a diminuir emissão de gás carbônico**. 2020. [Citado em 15 de setembro de 2022]. Disponível em: <https://aesbe.org.br/novo/combustivel-de-residuo-ajuda-a-diminuir-emissao-de-gas-carbonico/>

BARRAK, E. **Análise técnica e econômica da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos através da incineração e do gás de aterro sanitário**. 2018. Tese (Doutorado).

BERTICELLI, R. **Gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: análise de viabilidade econômica de cenários para um município de médio porte**. Orientador: Prof. Dr. Adalberto Pandolfo e Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf. 2016. 158 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade de Passo Fundo - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Passo Fundo, 2016.

BRÁS, I. *et al.* Refuse Derived Fuel from Municipal Solid Waste rejected fractions- a Case Study. **Energy Procedia**, v. 120, p. 349-356, 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.227>

BRASIL (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Brasília, DF. 2010. [Citado em 14 de maio de 2022]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.

CARACOL, P. M. O. **Avaliação da viabilidade dos combustíveis derivados de resíduos Caso de estudo da indústria cimenteira**. Orientador: Prof. Doutor João Torres de Quinhones Levy. 2016. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Técnico Lisboa, Instituto Superior técnico, Lisboa. 2016.

CHAVANDO, J. A. M. *et al.* Snapshot review of refuse-derived fuels. **Utilities Policy**, v. 74, p. 101316, 2022. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101316>.

CONRESOL - CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL PARA GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômico-Financeira (EVTE)**. Curitiba: CONRESOL, 2022. 120 p. Acesso em: 04 out. 2022.

CONSIMARES, Consórcio Intermunicipal de Manejo de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Campinas. **Revisão do Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PIGIRS)**, Nova Odessa, 2021. [Citado em 12 de maio de 2022]. Disponível em: https://www.consimares.com.br/_files/ugd/017ca0_eaf75dca2bf340e99102fe262a625913.pdf

COSTA, J. M. B. **Coprocessamento de CDR no processo de produção de cimento**. Orientador: Eng. Sandro Conceição e Prof. Doutor Pedro Simões. 2014. 143 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Química e Bioquímica) - Faculdade de Ciência e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

FERREIRA, C. R. N. **Projeto de linha industrial para o processamento de resíduos sólidos urbanos e produção de combustível derivado de resíduos para a gaseificação em reator termoquímico: análise experimental do Syngas para a produção de energia térmica e elétrica**. Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho. 2021. 153 p. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia/MG, 2021.

G1: CAMPINAS E REGIÃO. **Com Aterro Delta A inoperante, Prefeitura inaugura nova estação de transferência de lixo em Campinas**. 2018 [Citado em 12 de maio de 2022]. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/nova-estacao-de-transferencia-de-lixo-em-campinas-beneficia-solo-mas-aterro-delta-a-segue-inoperante.ghtml>

GALLARDO, A. *et al.* Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 83, p.118-125, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.085>

GOLDMAN, P. **Viabilidade de Empreendimentos imobiliários: modelagem técnica, orçamento e risco de incorporação**, São Paulo, Pini 2015.

GUEDES, F. L. **Análises do Ciclo de Vida e Emissões de Gases na Produção e Uso de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos em Paulista-PE, Brasil**. Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá e Prof^a. Dra. Soraya Giovanetti El-Deir. 2022. 113 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama da população de Campinas**. Brasil, 2022. [Citado em 12 de maio de 2022]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/campinas/panorama>

INFIESTA, L. R. *et al.* Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. **Journal of environmental management**, v. 236, p. 715-719, 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.017>.

LIN, C-J. *et al.* Swift model for a lower heating value prediction based on wet-based physical components of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 33, p. 268-276, 2013. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.11.003>

MARSH, R. *et al.* Physical and thermal properties of extruded refuse derived fuel. **Fuel Processing Technology**, v. 88, p. 701-706, 2007. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.01.015>.

MONTEIRO, J. H. P. *et al.* **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Coordenação Técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 204 p.

MONTEIRO, V. A. L. *et al.* Industrial scale circulating fluidized-bed gasification of refuse-derived fuel. **ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)**, Uberlândia/MG, 2019.

MÜZEL, S. D. *et al.* Poder Calorífico da Madeira de Eucalyptus grandis e da Hevea brasiliensis. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 8, n. 2, p. 166-172, 2014.

NG SOLAR. **Preço da Energia Elétrica CPFL 2022**. Atualizado em 30 mai 2022. 2022. [Citado em 25 de outubro de 2022]. Disponível em: <https://www.ngsolar.com.br/single-post/preco-kwh-cpfl#:~:text=Com%20o%20reajuste%20de%202021,86%20kWh%20para%20tarifa%20comercial>

PAOLO, Massarini; PAOLA, Muraro. RDF: From Waste to Resource – The Italian Case. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 81, p.569-584, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.136>.

PAULA, A. S. *et al.* **Caderno Temático 3: Recuperação energética de resíduos sólidos urbanos**. Ded, Governo Brasileiro, v. 3, n. 12.578, p. 51 p., 2019. [Citado em 20 de outubro de 2022]. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab/3-CadernotematicoRecuperacaoEnergeticadeRSU.pdf

PINTO, S. C. de O. P. da S. **Caracterização de Combustíveis Derivados de Resíduos Obtidos a Partir de Resíduos Industriais Não Perigosos**. Orientador: Prof.^a Doutora Maria da Graça Martinho. 2009. 227 p. Dissertação (Mestre em Valorização de Resíduos) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS (Campinas - SP). CAMPINAS (SP). 30 de abril de 2021. **Suplemento Decreto Nº 21.466, de 29 de abril de 2021: INSTITUI O PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E DÁ OUTRAS PROVIDÊNCIAS**, Campinas - SP, ano L, n. 12.578, p. 402 p., 2021. [Citado em 03 de outubro de 2022]. Disponível em: https://suplementos.campinas.sp.gov.br/admin/download/suplemento_2021-04-30_cod585_1.pdf.

RAHMAN, A. *et al.* Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plant performance: an overview. **Procedia Engineering**, v. 56, p. 393-400, 2013. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.138>.

RAMA, A. C. C. de O. **Análise da viabilidade de produção de combustíveis derivados de resíduos**. Orientador: Dra. Sofia Santos. 2010. 119 p. Dissertação (Mestrado em Gestão) - Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, 2010.

RENOVA – Consórcio Renova Ambiental. **5ª Caracterização dos Resíduos Sólidos provenientes da coleta regular domiciliar e da varrição de vias e logradouros públicos**. Campinas – SP, 2018. [Citado em 15 de outubro de 2022]. Disponível em: <https://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/servicos-publicos/2021/consulta-publica/2-2-anexo-II-projeto-basico.pdf>

REZA, B. *et al.* Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 81, p.105-114, dez. 2013.

SILVA, D. A. L. *et al.* Análise de viabilidade econômica de três sistemas produtivos de carvão vegetal por diferentes métodos. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 185-193, fev. 2014. FapUNIFESP (SciELO).

SIMA, Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente. **Resolução SIMA nº 047, de 06 de agosto de 2020**. Governo do Estado de São Paulo, 2020. [Citado em 14 de maio de 2022]. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/legislacao/sites/40/2020/08/resolucao-sima-047-2020-republicacao-processo-cetesb-1321-2019-diretrizes-e-condicoes-para-o-licenciamento-de-unidades-de-preparo-de-cdr-republicacao.pdf>

SOARES, E. L. de S. F. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. Orientador: Claudio Fernando Mahler. 2011. 150 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2011.

STADLER DO BRASIL. **Instalação de classificação de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2019.

STADLER DO BRASIL. **Proposta comercial: Instalação para CDR 600 T/DIA**. 2022.

TULIO, T. J. **Análise custo-benefício da mudança de tecnologia no tratamento dos RSU: Um estudo para a área do CONRESOL**. Orientador: Prof. Dr. Arno Paulo Schmitz. 2020. 206 p. Dissertação (Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

VIANA, L. B. **Estudo da viabilidade técnica e econômica de uma planta de incineração de Resíduos Sólidos Urbanos**. Orientador: Profo Dr. José Antônio Perrella Balestieri. 2017. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. A. **Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos**. Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. AB de Castilho Júnior (Coordenador), São Carlos, SP: Rima Artes e Textos, 2003.