

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THIAGO CALIXTO TEIXEIRA

ANÁLISE DE CENÁRIOS PARA A QUEIMA CONJUNTA DE LODO INDUSTRIAL E  
CAVACO DE EUCALIPTO PARA GERAÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO EM  
ABATEDOUROS DE AVES

PALOTINA

2023

THIAGO CALIXTO TEIXEIRA

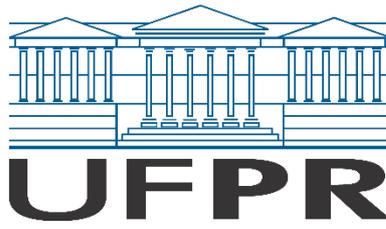
ANÁLISE DE CENÁRIOS PARA A QUEIMA CONJUNTA DE LODO INDUSTRIAL E  
CAVACO DE EUCALIPTO PARA GERAÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO EM  
ABATEDOUROS DE AVES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como  
requisito para obtenção de título de Bacharel em  
Engenharia de Energia pela Universidade Federal do  
Paraná – Setor Palotina.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin

PALOTINA

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

## ATA DE REUNIÃO

Aos vinte e três dias do mês de junho do ano de 2023, no horário das 14h00min às 16h00min, na plataforma virtual Microsoft Teams link: [https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%253aqrpuafP9o5kRC\\_X6eLrcAGslpLahzEpw6kRm1ZmDao1%2540thread.tacv2/1685982913715?context=%257b%2522Tid%2522%253a%2522c37b37a3-e9e2-42f9-bc67-4b9b738e1df0%2522%252c%2522Oid%2522%253a%2522859f03e9-4b46-45a0-b0bf-ea059d175955%2522%257d](https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%253aqrpuafP9o5kRC_X6eLrcAGslpLahzEpw6kRm1ZmDao1%2540thread.tacv2/1685982913715?context=%257b%2522Tid%2522%253a%2522c37b37a3-e9e2-42f9-bc67-4b9b738e1df0%2522%252c%2522Oid%2522%253a%2522859f03e9-4b46-45a0-b0bf-ea059d175955%2522%257d), compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia o aluno Thiago Calixto Teixeira, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "Análise de cenários para a queima conjunta de lodo industrial e cavaco de eucalipto para geração de vapor de processo em abatedouros de aves". Constituíram a Banca Examinadora os professores: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin (Orientador e Presidente da Banca), Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Elaine Virmond e a Me. Fabiana de Marqui Mantovan. O orientador e Presidente da Banca concedeu a palavra ao discente, para exposição do seu trabalho. A seguir, foi concedida a palavra em ordem sucessiva aos membros da Banca de Exame, os quais passaram a arguir o discente. Ultimada a defesa, que se desenvolveu nos termos normativos, a Banca de Exame, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo atribuído ao discente as seguintes notas: **Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin, nota: 95 (noventa e cinco), Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Elaine Virmond, nota: 95 (noventa e cinco), e Me. Fabiana de Marqui Mantovan, nota: 95 (noventa e cinco).** A nota final do discente, após a média aritmética dos três membros da banca de exame, foi **95 (noventa e cinco)** considerando o discente **APROVADO**. As considerações e sugestões feitas pela Banca de Exame deverão ser atendidas pelo discente sob acompanhamento de seu orientador. Nada mais havendo a tratar foi lavrada a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.



Documento assinado eletronicamente por **EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/06/2023, às 13:39, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Fabiana de Marqui Mantovan, Usuário Externo**, em 26/06/2023, às 15:08, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Elaine Virmond, Usuário Externo**, em 26/06/2023, às 15:36, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **5418819** e o código CRC **C8BBA4B1**.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao professor Eduardo Burin, meu orientador, por sua orientação, incentivo e confiança ao longo de todo o processo. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para o sucesso desta pesquisa.

Gostaria também de agradecer à minha amada família, em especial aos meus pais, Marcos e Claudia, e ao meu irmão, Matheus. Sua constante motivação, carinho e apoio foram essenciais para me encorajar a estudar e buscar conhecimento. Sou profundamente grato por todo o suporte, dedicação e instrução que recebi de vocês.

À Yasmin, cuja atenção, dedicação, amizade e incentivo foram fundamentais para que este trabalho pudesse ser realizado. Sua colaboração e suporte foram inestimáveis.

Gostaria também de agradecer ao Laboratório de Produção em Biocombustíveis (LPB) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela oportunidade de adquirir conhecimento e estar em contato com pessoas qualificadas que me apoiaram e incentivaram ao longo deste trabalho. Agradeço a todos os membros do laboratório pela valiosa contribuição e apoio.

Um agradecimento especial ao corpo técnico da agroindústria, em particular à engenheira Letícia e ao engenheiro Christian, por permitirem as visitas ao local e a coleta de dados técnicos essenciais para este trabalho. Sua disponibilidade e expertise foram fundamentais para o progresso e conclusão desta pesquisa.

Aos excelentes professores do corpo docente do curso de Engenharia de Energia, da UFPR, expressei minha gratidão pelos conhecimentos transmitidos ao longo da graduação. Suas aulas e orientações tornaram minha jornada acadêmica mais rica e facilitaram o caminho para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de graduação, sou grato pelo companheirismo e pela troca de experiências ao longo do percurso acadêmico. Nossa colaboração mútua permitiu o crescimento pessoal e o enriquecimento da jornada universitária.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Sua influência e suporte foram fundamentais para o seu sucesso.

Mais uma vez, meu sincero agradecimento a todos.

## RESUMO

O aumento da demanda mundial por alimentos traz para as indústrias de produção e transformação de alimentos a necessidade de uma melhor destinação dos resíduos gerados no processo, bem como a necessidade de melhorar a eficiência global da produção. Em particular, os abatedouros de aves geram resíduos como o lodo industrial, que contém um potencial energético que pode ser reaproveitado dentro do próprio processo. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar cenários em que o lodo industrial será destinado à queima em uma caldeira a biomassa de cavaco de eucalipto para a produção de vapor. Inicialmente, foi realizado uma análise para a definição dos cenários que seriam estudados. Para garantir o cumprimento de normas de emissões gasosas, os cenários para queima conjunta do lodo apresentaram um limite mássico ou energético de 20% em relação ao fluxo mássico e energético total disponibilizado na fornalha da caldeira. Ao todo, foram analisados três cenários: (Cenário 1) caso base em que não há a queima de lodo na caldeira, e os resíduos são destinados na totalidade para a compostagem, não havendo um aproveitamento desse resíduo na indústria; (Cenário 2) em que é realizada a queima parcial do resíduo proveniente da ETE (Estação de Tratamento de Efluentes), com um alto índice de umidade (65%); e (Cenário 3) em que o lodo passa por um processo de secagem previamente à destinação para a queima e compostagem, chegando ao percentual de interesse de 56%. Analisando os resultados, a queima de lodo industrial úmido (Cenário 2) levou a uma redução de destinação do resíduo para compostagem em 59% e, ao mesmo tempo, uma redução de 15% no consumo de cavaco destinado à queima. Para o Cenário 3, em que foi considerada a secagem parcial do resíduo, a redução média de lodo destinado para a compostagem foi de 80% em relação ao caso base (Cenário 1), e também houve a redução do cavaco destinado à queima em aproximadamente 17%. O estudo mostra que direcionar o resíduo com potencial energético para a queima em caldeiras industriais que usam como combustível principal o cavaco de eucalipto é bastante eficiente, tanto na destinação dos resíduos quanto na redução de biomassa utilizada, representando uma alternativa viável para as agroindústrias.

Palavras-chave: Biomassa; Geração de vapor; Resíduos industriais; Secagem de resíduos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação caldeira flamotubular.....	13
Figura 2 - Representação caldeira aquatubular.....	14
Figura 3 - Esquema caldeira mista .....	15
Figura 4 - Processos do tratamento de efluentes .....	16
Figura 5 - Localização agroindústria .....	21
Figura 6 - Fluxograma metodologia .....	22
Figura 7 - Cenário 1 - Cenário base.....	23
Figura 8 - Cenário 2 – Queima de lodo úmido .....	24
Figura 9 - Cenário 3 – Secagem do resíduo.....	24
Figura 10 - Secador a vapor.....	25
Figura 11 - Secador a gases quentes .....	26
Figura 12 – Resultados da análise de sensibilidade da secagem - Secador a vapor .....	30
Figura 13 – Resultados da análise de sensibilidade da secagem - Secador a gases quentes ....	31
Figura 14 - Análise de sensibilidade dos custos evitáveis na secagem .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado da análise imediata, elementar e do poder calorífico do lodo flotado ...	17
Tabela 2 - Dados de entrada da simulação .....	27
Tabela 3 - Dados de entrada da simulação - Secadores.....	27
Tabela 4 - Dados de entrada da simulação .....	28
Tabela 5 - Comparativo entre Cenários 1 e 2 - Resultados mássicos.....	29
Tabela 6 – Comparativo dos cenários 1 e 3 - Resultados mássicos .....	32
Tabela 7 - Cenários 2 e 3 - Resultados da análise financeira .....	33
Tabela 8 - Cenários 2 e 3 – <i>Payback</i> e TIR .....	34
Tabela 9 - Cenário 3 – Resultados análise <i>upgrade</i> .....	34
Tabela 10 - Implementação da queima e da secagem como um pacote completo .....	35
Tabela 11 - Implementação dos secadores como <i>upgrade</i> do Cenário 2 .....	35

## LISTA DE ABREVIACOES

ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
ASME	<i>The American Society of Mechanical Engineers</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
evp	evaporada
h	hora
H <sub>2</sub> O	gua
kcal	quilocaloria
kg	quilograma
kJ	quilojoule
MJ	Megajoule
NR	Norma Regulamentadora
PCI	Poder Calorífico Inferior
PTC	<i>Performance Test Codes</i>
SEMA	Secretária de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
ton	Tonelada
VPL	Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
2.1.	UNIDADES GERADORAS DE VAPOR .....	11
2.1.1.	Tipos geradores de vapor .....	12
2.2.	LODO INDUSTRIAL .....	15
2.3.	QUEIMA DE LODO INDUSTRIAL.....	18
2.4.	SECAGEM TÉRMICA DO LODO INDUSTRIAL .....	19
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
3.1.	CENÁRIOS ESTUDADOS .....	22
3.1.1.	Cenário 1 .....	22
3.1.2.	Cenário 2 .....	23
3.1.3.	Cenário 3 .....	24
3.2.	BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA .....	27
3.3.	ANÁLISE DE VIABILIDADE.....	28
<b>4.</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>37</b>
	<b>APÊNDICE A - EQUAÇÕES DO CENÁRIO 1 .....</b>	<b>39</b>
	<b>APÊNDICE B - EQUAÇÕES DO CENÁRIO 2.....</b>	<b>41</b>
	<b>APÊNDICE C - EQUAÇÕES DO CENÁRIO 3 - SV .....</b>	<b>43</b>
	<b>APÊNDICE D - EQUAÇÕES DO CENÁRIO 3 - SGQ.....</b>	<b>45</b>
	<b>APÊNDICE E: ANÁLISE FINANCEIRA.....</b>	<b>47</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa um cenário de destaque como um dos maiores produtores e exportadores de proteína de aves do mundo. Segundo relatório da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) (2023) os valores chegaram, em 2022, a 14% de toda a produção mundial. Tais valores de destaque trazem também a preocupação quanto à gestão dos resíduos gerados no processo, havendo a necessidade de práticas de gerenciamento alinhadas com as políticas de desenvolvimento sustentável (LORENCETTI, 2018).

Os abatedouros de aves, em particular, apresentam como característica uma grande geração de resíduos provenientes das diversas etapas do processo. Os resíduos gerados, em grande maioria, são tratados nas indústrias e a fração sólida orgânica proveniente das Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), o lodo industrial, segue para a compostagem, destinação aceita de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

O método de compostagem se caracteriza como uma disposição ambientalmente adequada, porém, maneiras de reutilizar os resíduos na indústria podem ser explorados. Devido ao alto poder calorífico do lodo industrial, a sua queima para a produção de vapor em caldeiras passa a ser uma alternativa interessante (BORGES et al., 2008).

Visando agregar valor ao lodo industrial e encontrar uma destinação mais vantajosa, diversos estudos têm sido conduzidos sobre a co-queima desse resíduo em caldeiras juntamente com o combustível principal. A exemplo, De Sena (2005) realizou um estudo com o objetivo de otimizar o tratamento primário de efluentes, avaliando a queima do resíduo para geração de energia em diferentes teores de umidade, 70% e 15% em massa.

Em outra pesquisa, Virmond (2007) conduziu um estudo onde teve como objetivo analisar a viabilidade técnica da utilização do resíduo como fonte de energia. A autora comparou o rendimento da queima exclusiva de cavaco de eucalipto, com a queima conjunta do resíduo seco (com uma umidade de 15-20%), em uma proporção de 9:1 (cavaco:lodo). Os resultados mostraram uma redução nos custos de aquisição de biomassa, mas não levaram em consideração os custos associados à secagem do resíduo.

Mantovan (2022) estudou a respeito da queima conjunta do lodo de frigorífico, com 65% de umidade, e cavaco de eucalipto em uma caldeira para geração de vapor de processo. A autora realizou a análise de sensibilidade para a eficiência do equipamento via método indireto,

conforme norma ASME PTC4 (2013), de acordo com a variação do teor mássico de lodo na mistura. Os resultados mostraram um aumento na eficiência até o percentual mássico de 15%, para valores superiores foi observado uma ligeira queda, até o percentual de 20%, onde foram encontrados problemas quanto a alimentação de lodo na mistura.

Em relação aos impactos causados pela prática da queima conjunta, o trabalho de Burin et al. (2022) avaliou o impacto da formação de incrustações e corrosão em uma caldeira a partir da queima de lodo industrial e cavaco de eucalipto. Os resultados obtidos demonstraram que a co-queima do resíduo não impactou negativamente na formação de incrustações na fornalha do equipamento. Entretanto, os resultados com relação à corrosão foram inconclusivos.

Os trabalhos citados avaliaram a queima do resíduo, porém, há aspectos importantes que podem ser explorados, como exemplo, a análise financeira do investimento para a realização da queima conjunta, a viabilidade econômica da secagem do resíduo, bem como qual seria o ponto ótimo para o teor de umidade do resíduo após secagem.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo geral analisar a viabilidade da secagem do lodo de um abatedouro de aves em função do teor de umidade do resíduo, considerando dois modelos de secadores com fontes térmicas distintas disponíveis no mercado, um secador a vapor e outro com gases quentes, visando à aplicação do lodo na co-queima com cavaco de eucalipto.

São objetivos específicos:

- Identificar o teor de umidade ótimo do lodo que viabilize a aplicação do lodo na co-queima com cavaco de eucalipto em uma unidade geradora de vapor;
- Comparar a viabilidade da implementação de dois modelos distintos de secadores industriais: um com utilização de vapor como fonte térmica, e um com fornalha própria, utilizando gases quentes como fonte térmica.
- Analisar três cenários de utilização do lodo industrial como combustível alternativo e seu impacto em termos de destinação à compostagem e redução no consumo do combustível principal.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Iniciou-se essa revisão abordando conceitos-chave relacionados ao tema de equipamentos para a produção de vapor de processo, fornecendo definições claras e atualizadas. Em seguida, examinaremos os tratamentos de efluente de frigoríficos, seguido da sua caracterização na literatura e seu potencial de aproveitamento.

Posteriormente, são destacados trabalhos que analisaram e contribuíram para o entendimento da queima do resíduo em caldeiras a biomassa, e também, referências trazendo definições acerca da secagem do resíduo e, por fim, autores que consideraram a secagem de maneira prévia à queima.

### 2.1. UNIDADES GERADORAS DE VAPOR

A utilização de vapor de água para beneficiamento da civilização ocorre desde os primórdios da humanidade, onde era utilizado como principal meio de cocção de alimentos. Com o passar dos tempos, o vapor passou a ser explorado com fins energéticos no desenvolvimento industrial, onde serviria como meio de geração, transporte e utilização de energia (BIZZO, 2003; FILHO, 2014).

No fim do século XVIII o desenvolvimento e as melhorias de motores a vapor realizadas por James Watt forneceram a força motriz necessária para que as indústrias se desenvolvessem em ritmo acelerado, tornando o vapor uma das principais bases da Revolução Industrial (FILHO, 2014).

A fim de atender a demanda da época foram desenvolvidas as primeiras caldeiras com tubos de água, e em 1856, o modelo criado por John Stevens foi responsável pela navegação de um barco a vapor no Rio Hudson, dando início ao desenvolvimento e produção de equipamentos geradores de vapor com grande sucesso comercial (BIZZO, 2003).

Atualmente, a utilização do vapor para fins industriais pode ser facilmente justificada. Segundo Botelho et al. (2015) quando há a necessidade de energia térmica em diferentes pontos no processo, a melhor solução econômica e operacional se dá pelo aquecimento de água até a formação do vapor saturando, sendo então direcionado aos locais de consumo.

Os equipamentos responsáveis pela transformação da água no estado líquido em vapor são conhecidos como caldeiras, e são definidas na NR 13, do Ministério do Trabalho e Emprego

como: “[...] equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os fervedouros e equipamentos similares utilizados em unidades de processo”.

No Brasil, os setores industriais responsáveis pela maior utilização de vapor são os das refinarias de petróleo, da indústria de papel e celulose, da indústria química e da indústria alimentícia, onde aproximadamente 34% de toda demanda energética são provenientes do vapor produzido nas caldeiras, tendo como finalidade a cocção de alimentos, higiene, esterilização, aquecimento, dentre outros (FILHO, 2014).

Em grande maioria, os combustíveis queimados nas fornalhas das caldeiras industriais são lenha, cavacos de madeira, bagaço de cana, carvão, gases, e em alguns casos se utiliza energia elétrica (BOTELHO et al., 2015).

Para caldeiras de combustíveis sólidos provenientes da biomassa, comumente são empregadas fornalhas de leito fixo dotadas de grelhas, responsáveis por servir de leito para a queima e com a finalidade de realizar a queima total do combustível. Para combustíveis gasosos, líquidos ou com uma pequena granulometria outras tecnologias são utilizadas, como queimadores e pulverizadores (BAZZO, 1995).

Para caldeiras de porte médio, até 200 ton/h de vapor, a utilização de grelhas para a queima assume um papel importante, podendo ser fixa, para equipamentos menores, ou móvel, para equipamentos maiores. As grelhas são flexíveis quanto à queima do combustível, podendo se adaptar a queima de diferentes biomassas sem grandes mudanças em sua configuração (BAZZO, 1995).

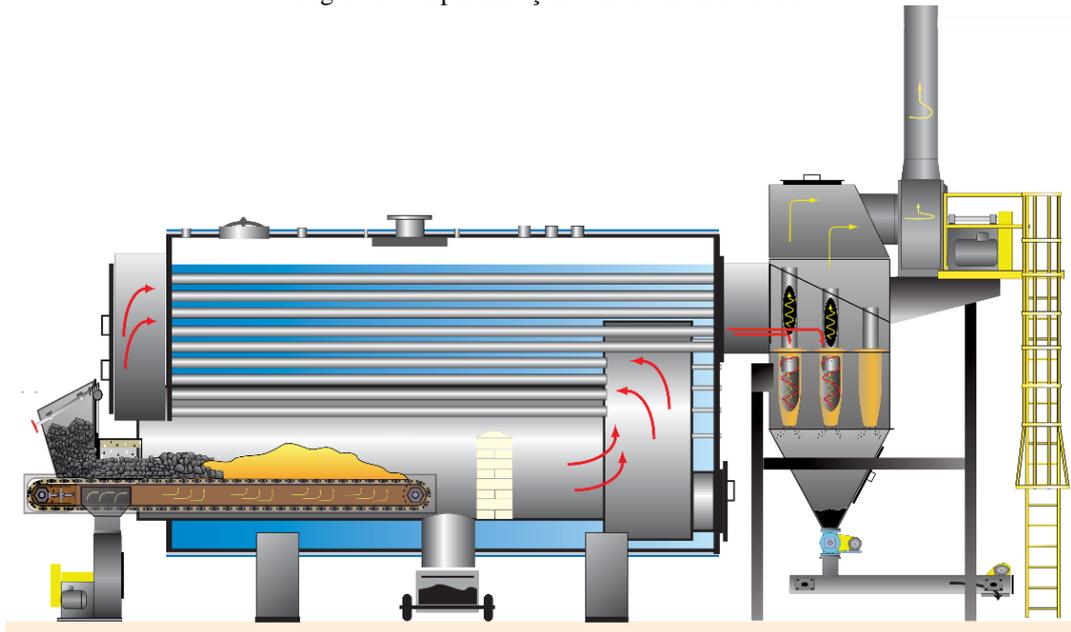
Além da fornalha e grelhado, outros elementos compõem uma unidade geradora de vapor, onde pode se destacar os tubos internos, que a depender do funcionamento e modelagem do equipamento pode transportar água ou gases quentes de combustão, equipamentos de exaustão dos gases quentes, responsável pela retirada e direcionamento dos gases à atmosfera, e equipamentos para recuperação de calor (BIZZO, 2003).

### 2.1.1. Tipos geradores de vapor

As unidades geradoras de vapor apresentam três classificações quanto aos escoamentos dos fluidos nos tubos e seus aspectos construtivos, sendo elas: caldeiras flamotubulares, caldeiras aquatubulares e caldeiras mistas.

Nas caldeiras flamotubulares (Figura 1), os gases de combustão proveniente da queima de combustível na fornalha escoam internamente aos tubos, onde a partir do escoamento dos gases é possível a transformação de água em vapor, produto final de interesse energético na indústria (FILHO, 2014).

Figura 1 - Representação caldeira flamotubular



Fonte: Adaptado de Taplin (2014)

Na representação esquemática de uma caldeira flamotubular apresentada na Figura 1, está evidenciado o trajeto dos gases de combustão a altas temperaturas escoando internamente aos tubos. Tal escoamento transfere calor para a água armazenada no lado de fora dos tubos e segue para a exaustão.

De maneira geral, as caldeiras do tipo flamotubulares são as mais utilizadas para pequenas demandas de vapor, aproximadamente 10 ton/h, a baixas pressões chegando até 20 bar. Grande parte do calor fornecido pela fornalha em equipamentos com essa configuração é proveniente de combustíveis líquidos ou gasosos. Tendo em vista a complexidade da combustão de combustíveis sólidos, essas caldeiras são utilizadas em menor quantidade (BIZZO, 2003).

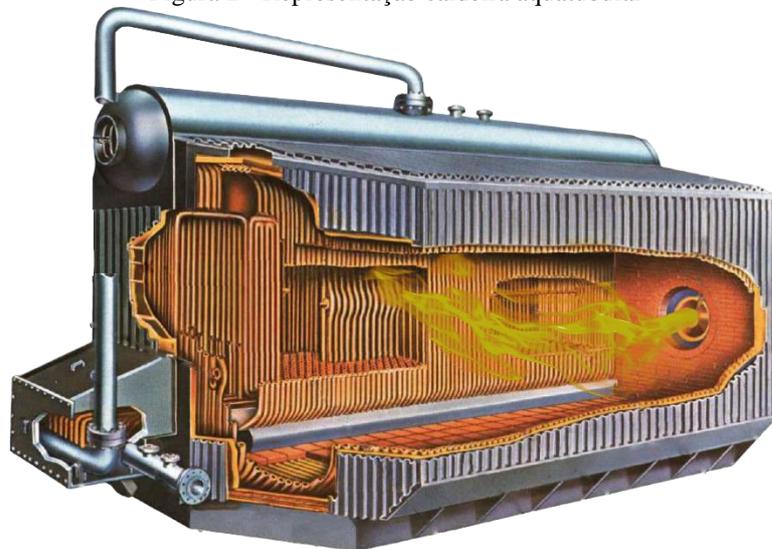
Outro modelo de gerador de vapor muito utilizado industrialmente são os geradores de vapor aquatubulares. Nessa configuração, a mudança de fase ocorrerá no lado interno dos tubos a partir da transferência de calor realizada pelos gases de combustão que escoam na face externa (BIZZO, 2003).

As caldeiras do tipo aquatubulares permitem maiores pressões de trabalho, uma vez que a construção de tubos que resistam a alta pressão é mais factível quando comparada com tanques de alta pressão, problemática que ocorre no caso das caldeiras flamotubulares. Nesse sentido, para esta configuração, existem modelos industriais com capacidade de geração de vapor igual ou maior a 150 ton/h com elevadas pressões (FILHO, 2014).

O funcionamento de uma caldeira aquatubular ocorre em grande maioria pela instalação de dois tubulões, o superior, onde se concentrará o vapor gerado e ocorrerá a extração para o processo, e o inferior, onde irá ocorrer a deposição de sedimentos provenientes do processo evaporativo, sendo necessária a extração periódica dos sedimentos através do acionamento de descargas de fundo (BIZZO, 2003).

A Figura 2 demonstra o funcionamento de uma caldeira aquatubular, onde o vapor é formado na face interna dos tubos e extraído a partir do tubulão superior, enquanto os gases de combustão após a troca de calor seguem para a exaustão na face externa dos tubos.

Figura 2 - Representação caldeira aquatubular

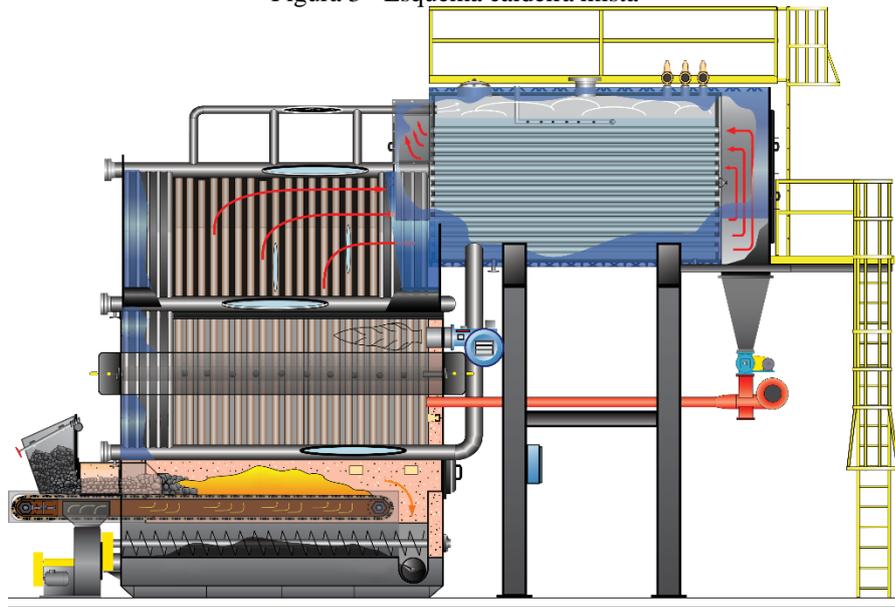


Fonte: Adaptado de Bizzo (2003)

Por fim, as caldeiras com configurações mistas surgem a partir da necessidade de se utilizar combustíveis sólidos para caldeiras com baixas pressões e grande demanda de vapor, pois reúnem as vantagens de caldeiras aquatubulares e caldeiras flamotubulares, sendo uma solução prática quando se tem acesso a combustíveis sólidos com baixo custo, sendo possível ainda a queima de combustíveis líquidos e gasosos sem grandes modificações (BIZZO, 2003).

O funcionamento de uma caldeira mista pode ser observado na Figura 3. Nessa representação esquemática, é apresentado o trajeto dos gases de combustão fluindo em um primeiro momento na face externa dos tubos que constituem as paredes d'água, onde água escorre internamente nos tubos, até a seção flamotubular da caldeira, por dentro de tubos, envoltos por água, onde seguirá para a exaustão.

Figura 3 - Esquema caldeira mista



Fonte: Hurst Boiler (2023)

## 2.2. LODO INDUSTRIAL

De acordo com a ABPA (2023) a produção de carne de frango em 2022 foi de 14,524 milhões de toneladas, onde o estado do Paraná apresentou uma produção aproximada de 36% de toda a produção do Brasil, número expressivo e que traz um lugar de destaque no setor.

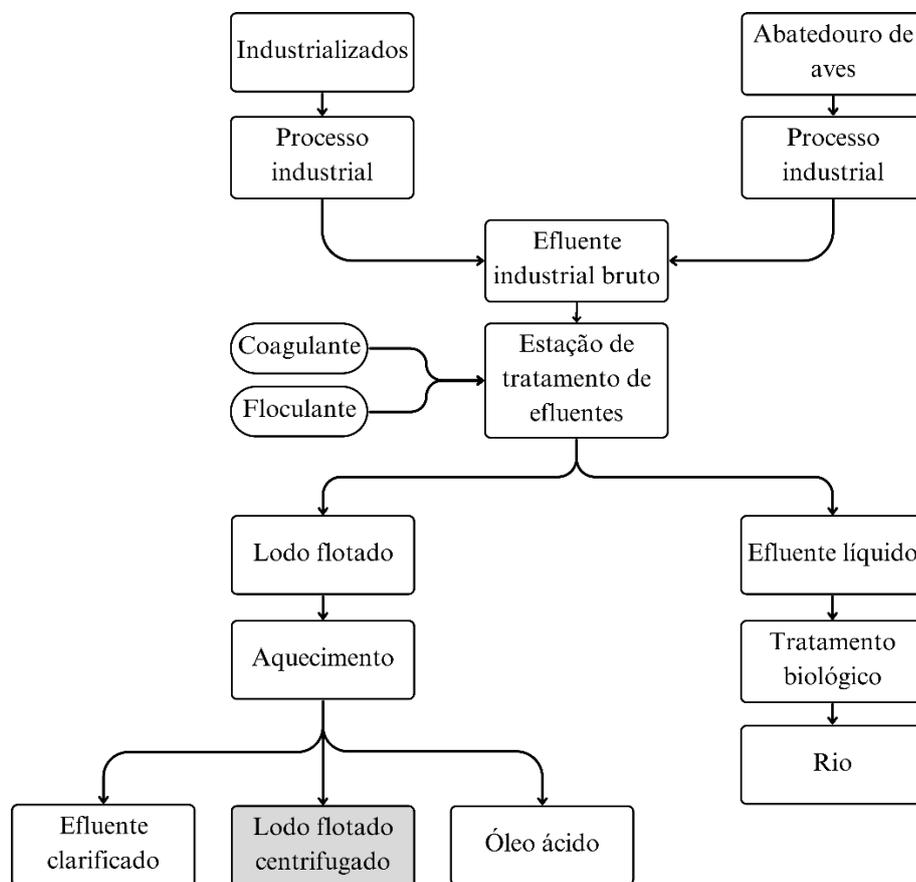
Grande parte da produção de frango segue para exportação, área onde o estado do Paraná segue se destacando. Segundo a ABPA (2023), em 2022 o estado foi responsável por aproximadamente 40% de todo frango destinado à exportação pelo país.

A alta produção de proteína pelos abatedouros, traz à tona pontos que merecem atenção, destacando a produção de resíduos. De acordo com o Ministério da Agricultura e Pecuária (BRASIL, 1998) o volume médio de efluente gerado por ave abatida após todo o processamento é de 30 litros. O efluente gerado é proveniente da limpeza da carcaça,

higienização de bancada e equipamentos, e resíduos da parcela não comestível, como sangue e ossos (FERREIRA et al., 2018).

O volume de efluente gerado apresenta um grande potencial de contaminação e deve passar por tratamentos para que seja possível o descarte (SENA, 2005). Industrialmente, o processo acontece na ETE, onde é realizado o tratamento físico-químico do resíduo. O esquema de tratamento é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Processos do tratamento de efluentes



Fonte: Autoria Própria (2023)

O resíduo de interesse para a queima em caldeiras é o lodo flotado centrifugado, considerado uma biomassa residual com alto poder calorífico, que pode ser utilizado para a queima direta, alternativa que pode trazer benefícios ambientais e econômicos na sua destinação final (DE SENA, 2005).

A Tabela 1 representa um compilado de resultados de análises imediatas, elementares e do poder calorífico inferior de diversas literaturas, onde os valores de interesse para este

trabalho foram adquiridos por Mantovan (2022), dado que o estudo foi realizado no mesmo complexo industrial.

Tabela 1 – Resultado da análise imediata, elementar e do poder calorífico do lodo flotado

Autores	Virmond et al. (2011)		Floriani et al. (2010)	Padilha et al. (2019)	De Sena et al. (2008)		Mantovan (2022)
Origem	Frigorífico de aves e suínos		Indústria de processamento de carne	Frigorífico de aves	Frigorífico de aves e suínos		Frigorífico de aves
Coagulante	Sulfato Férrico	--	--	Policloreto de Alumínio	Cloreto Férrico	Sulfato Férrico	Cloreto Férrico
Análise Imediata (%)							
CZ <sup>a</sup>	12,3	10,43	4,32	12,2	5,7	11,7	7,73
Umidade <sup>b</sup>	15	21	25,85	15,70	70	15	65,02
MV <sup>a,c</sup>	85,29	85,61	79,66	82,69	85,7	84,2	92,83
CF <sup>a,c</sup>	9,58	14,39	20,34	17,08	14,3	15,8	6,61
Análise elementar (%) <sup>a,c</sup>							
C	58,04	63,66	47,05	45,9	57,9	59,1	54,03
H	9,01	9,48	6,71	9	8,1	8,4	9,06
N	9,24	5,86	3,45	5,58	8,7	9,7	7,65
S	0,34	<0,1	0,5	0,46	<0,01	0,8	0,7
O	22,68	20,36	42,19	26,87*	25,3	21,84	25,22
Cl	0,18	0,3	0,1	--	nd	0,16	0,026
F	<0,2	<0,2	--	--	--	--	<0,003
P	1,03	0,64	--	--	--	--	--
Poder calorífico inferior (MJ.kg <sup>-1</sup> ) <sup>a,c</sup>							
PCI	25,77	25,89	21,24	--	26,6	28,2	25,5

Nota: a = base seca; b = base bruta; c = livre de cinzas; nd = não detectado; \*valor calculado por diferença

Fonte: Adaptado de Mantovan (2022)

Após os tratamentos, o lodo flotado centrifugado apresenta uma umidade média de 65%, onde a destinação amplamente utilizada é o encaminhamento para compostagem, medida que está de acordo com a legislação vigente nº 12.305, de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Porém, tal destinação gera custos à empresa, que está muitas vezes atrelado ao transporte do material orgânico. (FAGNANI, 2017).

Como alternativa para esses custos, vem se estudando a combustão do resíduo para a geração de calor, sendo uma destinação mais nobre e que pode trazer à indústria retornos financeiros (DE SENA, 2005).

### 2.3. QUEIMA DE LODO INDUSTRIAL

Estudos a respeito da viabilidade da combustão de lodo flotado em caldeiras vêm sendo desenvolvidos e demonstram a viabilidade técnica da atividade, salientando alguns pontos de atenção, como exemplo, às emissões gasosas.

A Resolução n° 42/08 da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) estabelece critérios para a queima desses resíduos em caldeiras. A resolução traz parâmetros para a não descaracterização do combustível principal, onde a queima do resíduo não deve ultrapassar um percentual de 20% em massa ou energia da quantidade total disposta na caldeira.

A queima deve respeitar também os limites de emissão estipulados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na Resolução n° 382/06, que estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos.

O estudo realizado por De Sena (2005) em uma indústria de processamento de carne buscou utilizar o lodo da estação de tratamento para a geração de energia. No trabalho o lodo é secado de maneira prévia à queima, e as emissões foram observadas. O autor traz também um estudo quanto ao tipo de coagulante utilizado e qual melhor desempenha para a geração de energia, concluindo o uso de sulfato férrico como eficiente para tal fim.

O trabalho de Virmond (2007) analisou a possibilidade da queima de lodo seco (15-20% de umidade) juntamente ao cavaco de eucalipto, em uma razão 9:1 (cavaco:lodo), comparando com a queima apenas do cavaco. A autora observou parâmetros de poluentes e perdas energéticas na emissão dos gases de combustão, observando um ganho de potência térmica igual a 2% na queima e uma economia anual na demanda de cavaco. Porém, a autora destaca alguns desafios referentes à co-queima da biomassa residual, dado problemas de incrustações e homogeneidade da mistura, concluindo que para se obter uma melhor eficiência do processo, cada etapa deve ser otimizada.

Borges et al. (2008) utilizou como objeto de estudo amostras provenientes de distintas estações de tratamento, onde observou efluentes sanitários, efluentes de indústrias têxteis e de indústrias de papel e celulose. O autor realizou a caracterização desses resíduos observando semelhanças na composição elementar das amostras do lodo sanitário e têxtil, enquanto as amostras da indústria de papel e celulose apresentaram valores para carga orgânica e sólidos voláteis elevados. No trabalho destacou-se ainda o potencial desses resíduos para a geração de

energia térmica a partir da queima, dado o poder calorífico encontrado ser próximo a outras biomassas, na ordem de 19 MJ/kg.

Meneghini et al. (2015) avaliou a utilização de lodo primário proveniente da indústria frigorífica para a geração de vapor. O resíduo foi queimado com lenha em diferentes percentuais mássicos, o autor avaliou a emissão de acordo com resoluções vigentes. A fim de respeitar a Resolução CONAMA nº382 de 2006, o limite mássico encontrado foi igual a 15% de todo o combustível disposto, apresentando um incremento no rendimento térmico de 4% com uma economia de lenha igual a 17,6%. Em concentrações maiores de resíduos as emissões de poluentes ficaram elevadas.

Mantovan (2022) realizou um estudo no mesmo complexo industrial do presente trabalho, onde teve como objetivo verificar a queima do lodo proveniente da estação de tratamentos de efluente do frigorífico junto ao cavaco de eucalipto. Para tanto, a autora caracterizou os combustíveis a fim de avaliar os potenciais energéticos. No trabalho foi realizado também uma análise de sensibilidade em relação à quantidade de lodo misturado ao cavaco, onde para cada proporção de lodo na mistura foi realizado um cálculo de eficiência da unidade pelo método indireto, conforme a norma ASME PTC4 (2013). A autora encontrou valores crescentes na eficiência até o percentual mássico de lodo na mistura igual a 15%, onde para o percentual de 20% ocorreu uma ligeira queda na eficiência devido a perdas de energia e dificuldade no controle da alimentação do lodo. As emissões gasosas monitoradas pela autora ficaram dentro das normas nacionais e alemãs, aprovando a viabilidade técnica da co-queima de lodo em caldeiras a biomassa.

#### 2.4. SECAGEM TÉRMICA DO LODO INDUSTRIAL

O processo de secagem térmica pode ser caracterizado como a operação destinada à remoção de líquido agregado a um sólido a partir da vaporização térmica. Tal processo ocorre em um meio gasoso insaturado, por exemplo, ar, gases de combustão ou a mistura desses, permitindo que a vaporização seja viável a uma temperatura menor que a de ebulição do líquido na pressão do sistema (DAVID, 2002).

Há métodos mecânicos de extração de umidade, porém, tais processos são denominados de desaguamento. O termo secagem deve ficar restrito apenas para processos que ocorram a vaporização do líquido. Para lodos provenientes de ETE, os métodos de

desaguamento garantem um teor de sólidos máximos de aproximadamente 40% (DAVID, 2002).

Para atingir um valor superior para o teor de sólidos, métodos de secagem térmica tendem a ser mais adequados. Segundo informações dos fabricantes, para a secagem de lodos industriais é necessária uma disponibilidade energética na ordem de 800 kcal a 1000 kcal para cada quilograma de água evaporada (DAVID, 2002).

Os secadores podem ser classificados de acordo com seus aspectos construtivos, seu funcionamento e a fonte de energia térmica. De acordo com seu funcionamento, os secadores mais encontrados na indústria são secadores do tipo rotativo, podendo ser direto, por exemplo, secador por gases quentes, onde os gases entram em contato direto com o material seguindo para a exaustão, ou indireto, como, por exemplo, o secador a vapor, onde o vapor circula por dentro de tubos, transferindo apenas calor para o material, sem contato direto (DAVID, 2002).

Ferreira (2016) realizou um estudo com os objetivos de analisar a viabilidade técnica e econômica da implementação do processo de secagem previamente a queima em uma caldeira a biomassa. Referente a queima, o autor encontrou valores para a mistura que possibilitaram uma economia de 10% no consumo de cavaco. Para o processo considerando a secagem prévia e o investimento em um secador, o autor calculou o *payback* descontado, com uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 14%, onde seu investimento foi retornado em aproximadamente 2 anos e 11 meses, com um valor presente líquido (VPL) igual a R\$ 2.108.273,69 e uma taxa interna de retorno (TIR) de 45,73%, atestando para o autor a viabilidade econômica do investimento com um baixo risco.

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado a partir de um estudo de campo e de dados coletados em um abatedouro de aves localizado no oeste do estado do Paraná, na cidade de Palotina, cuja localização é indicada na Figura 5.

Figura 5 - Localização agroindústria



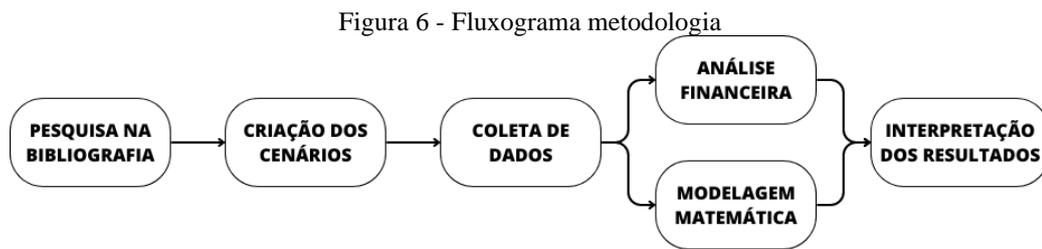
Fonte: Autoria Própria (2023)

O complexo industrial conta com a geração de vapor saturado a partir de uma caldeira do tipo mista alimentada com cavaco de eucalipto, biomassa adquirida de fornecedores e associados da região. O equipamento gerador de vapor, apresenta como capacidade nominal a geração de 40 ton/h de vapor a 15 bar.

Como parâmetros operacionais a caldeira trabalha abaixo dos parâmetros nominais, gerando vapor saturado a uma pressão igual a 9 bar, com uma demanda de vapor média igual a 23 ton/h, utilizado principalmente para aquecimentos e higienização, e apresenta uma eficiência térmica igual a 86%, conforme indicado por Mantovan (2022).

A demanda de vapor é necessária para atender a capacidade do complexo, que abate em média 615 mil aves por dia, gerando aproximadamente 60 ton/dia de lodo flotado centrifugado. A destinação adotada pela indústria é a compostagem, com custos anuais na ordem de 350 mil reais.

A motivação para o presente trabalho surgiu da necessidade de se reaproveitar o resíduo e reduzir os custos atrelados a sua destinação. O fluxograma a seguir (Figura 6) mostra os passos que foram seguidos para se obter os resultados esperados ao fim do projeto, onde após estudos da literatura, ocorreu a elaboração dos cenários, a coleta de dados, a modelagem matemática e a análise financeira dos cenários e, por fim, a interpretação dos resultados.



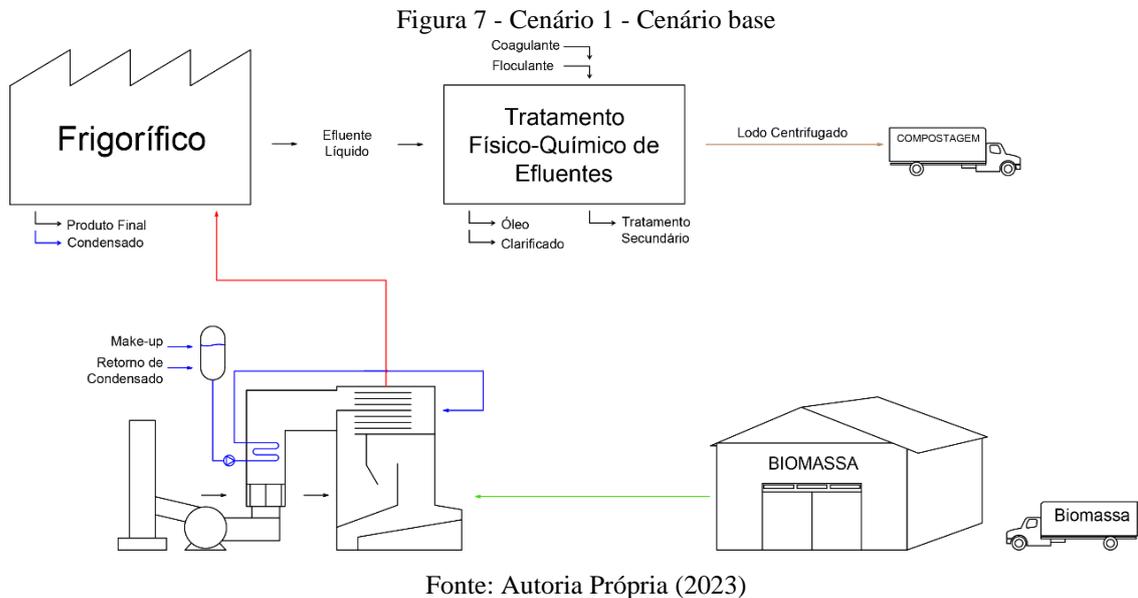
Fonte: Autoria Própria (2023)

### 3.1. CENÁRIOS ESTUDADOS

A metodologia utilizada tende a encontrar maneiras de se reduzir custos para a agroindústria e buscar uma melhor destinação do resíduo proveniente da estação de tratamento de efluentes, o lodo flotado centrifugado. Para atingir tais resultados, foram propostos três cenários, buscando sempre respeitar as normas quanto à queima de resíduos em caldeiras industriais a biomassa.

#### 3.1.1. Cenário 1

O cenário inicial (Cenário 1) proposto é o mais comum e utilizado em abatedouros, onde o resíduo após o tratamento é destinado na sua totalidade a compostagem, com um alto teor de umidade. Tal Cenário servirá no presente trabalho como Cenário base e está representado esquematicamente na Figura 7.



De acordo com a operação do Cenário 1 o efluente líquido sai do frigorífico e segue para estação de tratamento de efluentes, onde ocorre o tratamento físico-químico do material. Em seguida o resíduo é encaminhado à compostagem, por uma empresa terceirizada, com uma umidade média igual a 65%. O custo mensal para a destinação a compostagem do Cenário 1, é de R\$ 346.477,00.

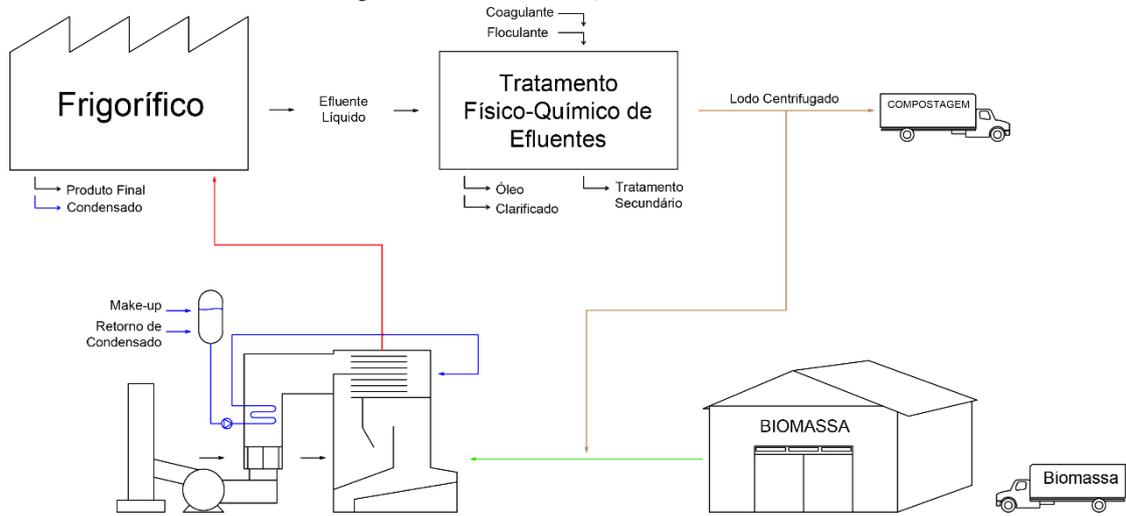
A respeito do vapor fornecido ao abatedouro, 23 ton/h, ele é gerado a partir da queima apenas de cavaco de eucalipto, 169 ton/dia, sem a adição de resíduos tratados na combustão, resultando em um custo mensal de aquisição do eucalipto para queima de R\$ 959.690,00.

### 3.1.2. Cenário 2

O Cenário em questão busca entender as vantagens em realizar a queima parcial do resíduo úmido na caldeira, tendo em vista o baixo custo de implementação e o alto custo que pode ser evitado, tanto em economia de cavaco, quanto em economia na destinação do lodo a compostagem.

O Cenário 2, representado pela Figura 8, apresenta uma operação muito semelhante ao Cenário base (Cenário 1), sendo a única diferença a destinação parcial de lodo úmido para a queima na caldeira junto ao cavaco de eucalipto, onde o teor de resíduo misturado ao combustível principal, de acordo com a Resolução n° 42/08 da SEMA, não pode ultrapassar o teor de 20% em base mássica ou energética.

Figura 8 - Cenário 2 – Queima de lodo úmido

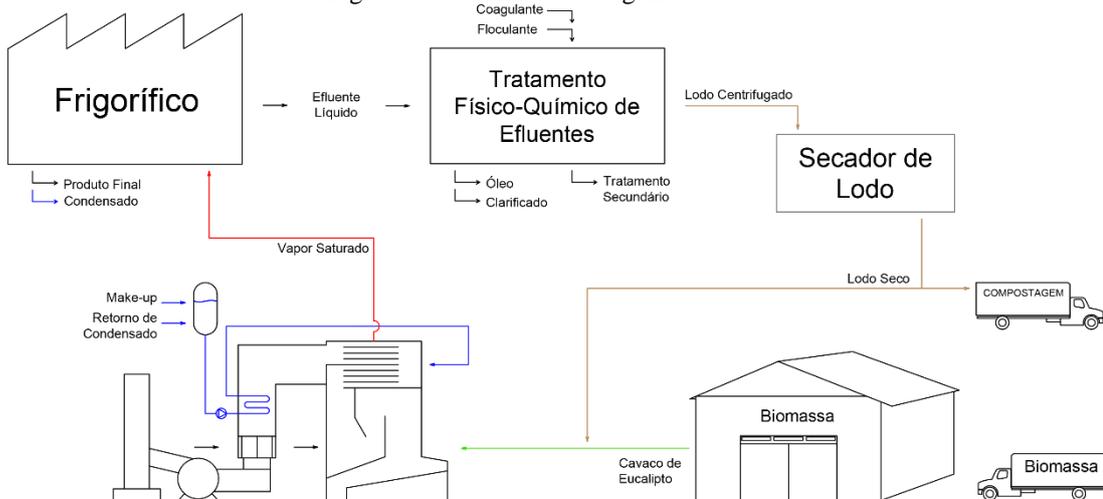


Fonte: Autoria Própria (2023)

### 3.1.3. Cenário 3

No Cenário 3 ocorre a queima parcial de lodo, porém previamente seco, e o volume não queimado é destinado a compostagem. A adaptação em relação ao Cenário 2 ocorre com a adição de um secador de lodo após o tratamento físico-químico que ocorre na ETE, conforme representado na Figura 9.

Figura 9 - Cenário 3 – Secagem do resíduo

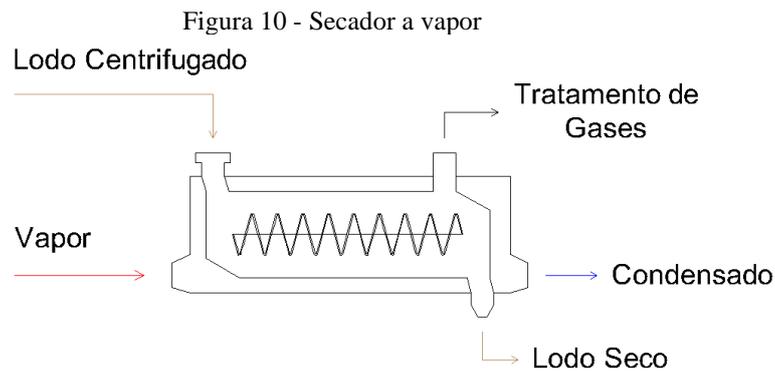


Fonte: Autoria Própria (2023)

Tal cenário busca reduzir os custos de destinação, tendo em vista que quando o lodo apresenta uma elevada umidade boa parte do seu volume é água. Ao retirar uma parte desse

volume de água na secagem o volume para a compostagem é menor, e há um aumento no poder calorífico do resíduo. Dessa forma, quando for destinado à queima ele apresentará um valor energético maior por unidade de massa.

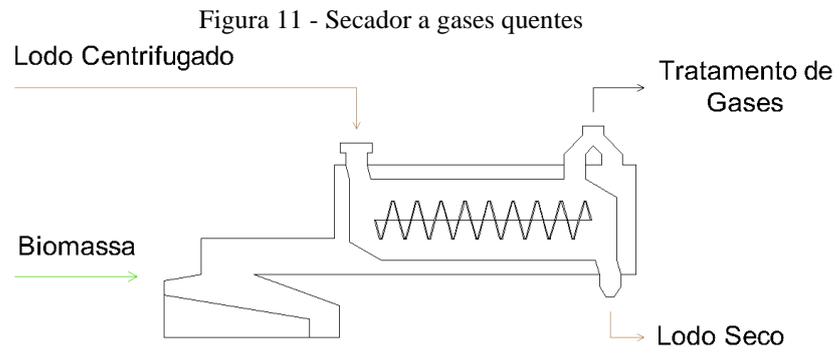
Tendo em vista os distintos modelos de secadores do mercado, o presente trabalho buscou analisar duas diferentes configurações de equipamentos, onde a principal diferença está na origem da energia térmica para o aquecimento do resíduo e secagem. Um leva em conta o vapor como fonte de calor, enquanto o outro leva em consideração os gases quentes provenientes da queima de cavaco de eucalipto, a partir de uma fornalha própria. Os esquemas para os secadores acionados a vapor e a biomassa são apresentados nas Figuras 10 e 11, respectivamente.



Fonte: Autoria Própria (2023)

O secador a vapor utiliza vapor proveniente da caldeira principal do complexo industrial, a mesma estudada neste trabalho. Nesse sentido, o vapor fornece calor ao lodo úmido, realizando a secagem. O gasto energético desse equipamento, de acordo com o fabricante, é igual a 900 kcal por kg de água evaporada.

Já o secador a gases quentes funciona com uma fornalha própria onde ocorre a queima de cavaco de eucalipto. Os gases quentes de combustão são os responsáveis pela transferência de calor ao resíduo, promovendo assim a secagem. O modelo apresenta um gasto energético de 1.100 kcal por kg de água evaporada, valor fornecido pelo fabricante.



Fonte: Autoria Própria (2023)

### 3.2. BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA

Para o balanço de massa e energia, foram definidos dois volumes de controle de interesse. As equações estão descritas nos apêndices A, B e C para os Cenários 1, 2 e 3 respectivamente e foram resolvidas a partir do *software Engineering Equation Solver (EES)*.

Um deles envolve a caldeira de vapor saturado a biomassa, onde as respostas do código devem retornar à quantidade de combustível consumido para atender a demanda, a partir da eficiência direta, tanto para cavaco de eucalipto quanto para o lodo industrial, respeitando os limites da legislação tomada como referência.

Para a resolução dos balanços, variáveis foram coletadas com o grupo de engenharia da agroindústria e retrata valores do diretório para dias operacionais típicos, as quais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de entrada da simulação

<b>Dado de Entrada</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Eficiência térmica da caldeira</b>	87	%
<b>Temperatura da água de alimentação</b>	70	°C
<b>Pressão de operação da caldeira</b> <sup>(abs)</sup>	9	bar
<b>Demanda de vapor saturado no abatedouro</b>	23	ton/h
<b>Vazão de lodo disponível pela ETE</b>	60	ton/dia
<b>Umidade do cavaco</b>	40	%
<b>Umidade do lodo disponível</b>	65	%
<b>Teor de hidrogênio do cavaco</b> <sup>a,b</sup>	7,23	%
<b>Teor de hidrogênio do lodo</b> <sup>a,b</sup>	8,63	%
<b>Poder calorífico superior do cavaco</b> <sup>a,b</sup>	18,707	MJ/kg
<b>Poder calorífico superior do lodo</b> <sup>a,b</sup>	25,936	MJ/kg

Nota: abs = pressão absoluta; a = base seca; b = livre de cinzas

Fonte: Autoria Própria (2023)

O outro volume de controle foi considerado para a análise do processo de secagem do lodo. Para tanto, foram utilizados os diferentes valores de gasto energético conforme informação dos fabricantes, sendo os valores utilizados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de entrada da simulação - Secadores

<b>Dados de Entrada</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Gasto energético secador a vapor</b>	900	kcal/kg H <sub>2</sub> O evp
<b>Gasto energético secador a gases quentes</b>	1.100	kcal/kg H <sub>2</sub> O evp

Fonte: Autoria Própria (2023)

### 3.3. ANÁLISE DE VIABILIDADE

Para a análise de viabilidade econômica dos três cenários propostos, foram utilizados diferentes indicadores, sendo eles, *payback* simples, *payback* descontado, VPL e TIR. As equações utilizadas estão descritas no apêndice E, e foram resolvidas com auxílio do *software Microsoft Excel*.

Os dados considerados para a análise de viabilidade dos cenários são apresentados na Tabela 4. Os custos dos secadores foram cotados com fornecedores, em e os demais dados foram fornecidos pela equipe de engenharia do frigorífico de aves objeto de estudo. Por fim, o custo operacional para os Cenários 2 e 3 inclui deslocamento, consumo de diesel, e horas de serviço dos operadores, para alimentação da moega necessária para alimentação de cavaco na fofalha.

Tabela 4 - Dados de entrada da simulação

<b>Dado de Entrada</b>	<b>Valor</b>
<b>Custo de biomassa – cavaco de eucalipto</b>	R\$ 270,00/ton
<b>Custo de destinação a compostagem – lodo tratado</b>	R\$ 275,00/ton
<b>TMA</b>	12% a.a.
<b>Custos de licenciamento e estudos para queima <sup>2,3</sup></b>	R\$ 100.000,00
<b>Custo do secador de lodo a vapor <sup>3</sup></b>	R\$ 3.700.000,00
<b>Custo do secador de lodo a gases quentes <sup>3</sup></b>	R\$ 3.000.000,00
<b>Taxa de manutenção dos secadores <sup>*,3</sup></b>	2% a.a.
<b>Custo implementação da moega <sup>2,3</sup></b>	R\$ 150.000,00
<b>Custo operacional <sup>2,3</sup></b>	R\$ 76.365,00/ano
<b>Estudo de análise dos gases <sup>2,3</sup></b>	R\$ 50.000,00/ano

Nota: \* em relação ao custo dos equipamentos; <sup>1</sup> Cenário 1; <sup>2</sup> Cenário 2; <sup>3</sup> Cenário 3

Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Realizadas as pesquisas bibliográficas e elaborados os cenários de interesse, o balanço energético e mássico foram realizados com a implementação do equacionamento, descritos nos apêndices de A a D, no *software* EES. Os dados de entrada utilizados podem ser observados na Tabela 1, na seção de metodologia.

Os resultados obtidos a partir dos cálculos do balanço de massa e energia mostram o consumo necessário de combustível para garantir o atendimento da demanda de vapor da indústria. O comparativo entre os valores do Cenário 1, opção onde a caldeira é alimentada apenas com cavaco e todo lodo gerado é destinado a compostagem, e o Cenário 2, opção que considera a co-queima de uma parte do lodo flotado na caldeira com uma umidade elevada, 65%, podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparativo entre Cenários 1 e 2 - Resultados mássicos

Material	Cenário 1 (ton/dia)	Cenário 2 (ton/dia)
Cavaco	169	143
Lodo flotado centrifugado gerado na ETE	60	60
Lodo destinado a co-queima	-	36
Lodo destinado a compostagem	60	24

Fonte: Autoria Própria (2023)

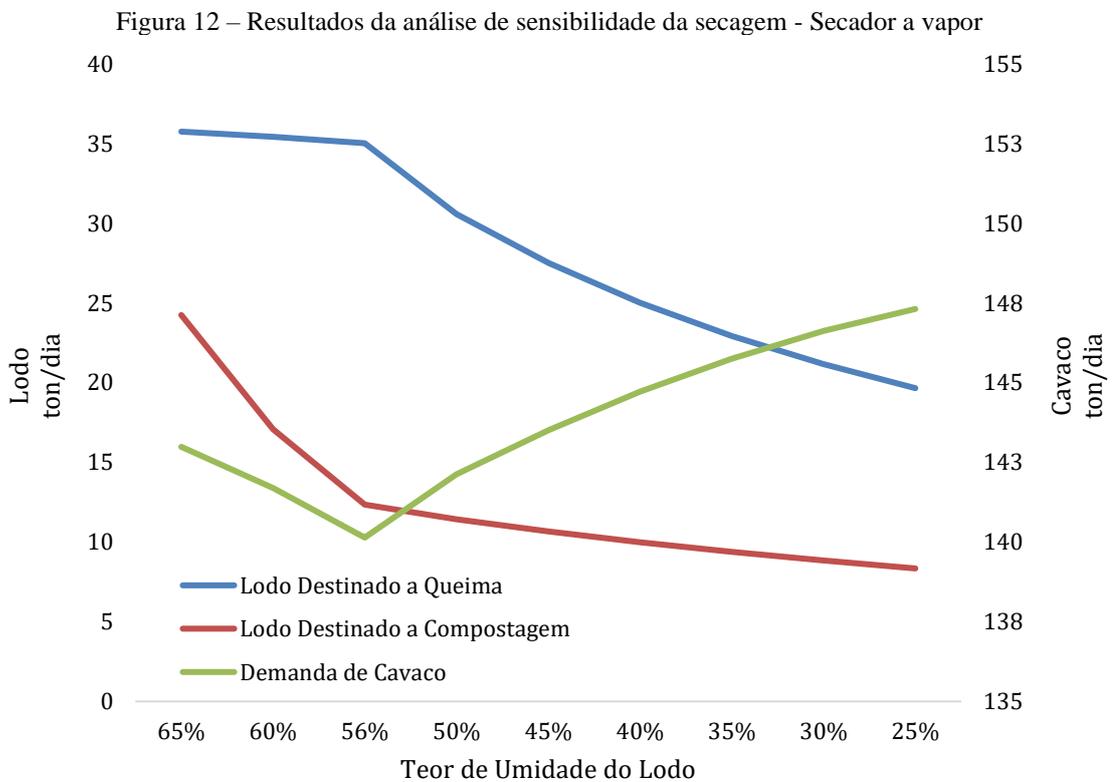
A partir da interpretação dos resultados, pode-se observar uma economia em cavaco de eucalipto aproximada de 15%, valor expressivo tendo em vista que o custo da biomassa tem aumentado significativamente nos últimos anos, com valores de R\$ 270,00 por tonelada.

Os valores encontrados estão próximos ao da literatura, Meneghini et al. (2015) encontrou uma economia de lenha igual a 17,6%, com um limitante mássico de 15% na aplicação do lodo.

No Cenário 2 foram destinados para a co-queima na caldeira 60% de todo lodo flotado centrifugado, atingindo o teor limitante de lodo misturado ao cavaco igual a 20% em base mássica, percentual limite estabelecido na resolução SEMA n°42/08. Tendo em vista a umidade média considerada para o resíduo igual a 65%, o lodo que é alimentado na caldeira apresenta um PCI de 6,8 MJ/kg, valor 36% menor do que o do cavaco utilizado, que apresenta um PCI igual a 9,3 MJ/kg, valores em base úmida.

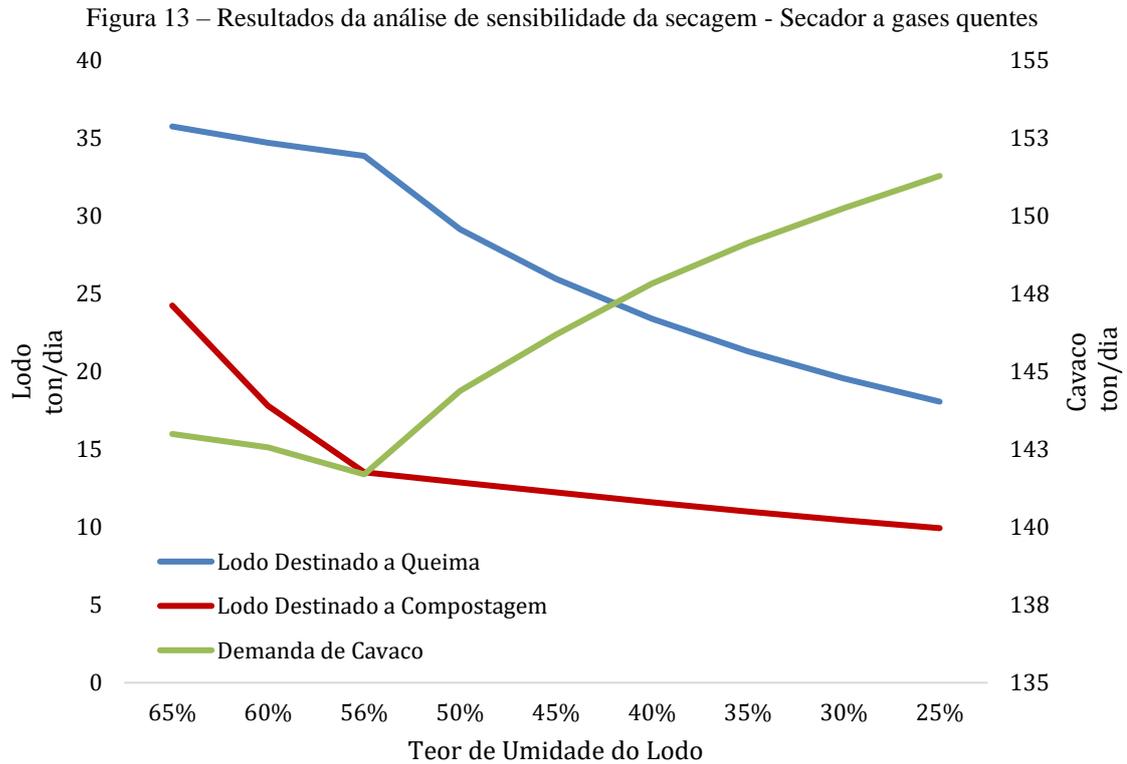
Destinar lodo à queima é de interesse, uma vez que essa parcela do resíduo não seguirá para a compostagem, e poderá representar, assim como a economia com cavaco de eucalipto, um custo evitável para a agroindústria.

Para o Cenário 3, no qual se considera a realização da secagem do combustível residual, foi realizada uma análise de sensibilidade variando-se a umidade final do material. As Figuras 12 e 13 mostram a análise realizada no processo de secagem a vapor e a gases quentes, respectivamente.



Fonte: Autoria Própria (2023)

O valor ótimo encontrado para o teor de umidade após a secagem foi de aproximadamente 56%, no qual o teor de lodo misturado ao cavaco atinge o limite de 20% em massa e em energia, simultaneamente.

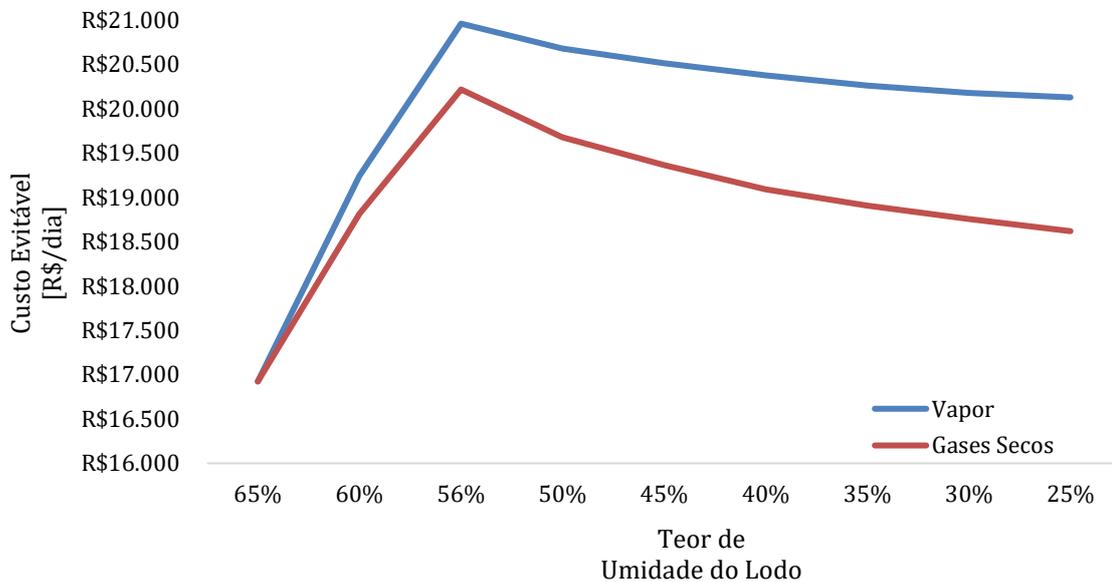


Fonte: Autoria Própria (2023)

Os gráficos das Figuras 12 e 13 mostram um comportamento semelhante para os dois secadores, com alguns pontos de destaque. Pode-se observar um maior consumo de cavaco para a realização da secagem no secador a gases quentes, isso devido a demanda energética 20% maior em comparação com o secador a vapor e também devido ao fato de o mesmo ter sua fonte térmica dependente apenas da queima do cavaco em uma fornalha própria, enquanto a energia disponível para o secador a vapor é produzida na caldeira a partir da co-queima de cavaco e lodo.

Quanto à análise de sensibilidade, o teor de umidade de 56% para o Cenário 3 se mostrou, para o frigorífico e processo estudado, a mais viável. Nessa condição, os custos evitados com compra de cavaco e despesas relacionadas com destinação do lodo atingem o valor máximo (Figura 14).

Figura 14 - Análise de sensibilidade dos custos evitáveis na secagem



Fonte: Autoria Própria (2023)

O gráfico apresentado na Figura 14 mostra qual o teor de umidade para o lodo é de interesse do ponto de vista financeiro, levando em conta os custos evitáveis na aquisição de cavaco e os custos evitáveis na destinação do lodo. O comportamento do gráfico mostra um acentuado aumento dos custos evitáveis, decorrente do uso do resíduo como combustível, na faixa do teor de umidade do lodo de 65% à 56%. Após o ponto de 56% há uma queda nos custos evitáveis, ponto onde o limitante energético de 20% foi atingido, não sendo possível a destinação de mais energia por parte do resíduo para a caldeira.

Neste contexto, o teor de umidade de interesse igual a 56% foi considerado nas análises de secagem do Cenário 3, para os diferentes secadores utilizados. Os resultados estão apresentados e comparados com o Cenário 1 (caso base), na Tabela 06.

Tabela 6 – Comparativo dos cenários 1 e 3 - Resultados mássicos

Dados	Cenário 1 (ton/dia)	Cenário 3 (ton/dia)	
		Vapor	Gases Quentes
Configuração do secador	-	Vapor	Gases Quentes
Cavaco	169	138	142
Lodo flotado centrifugado gerado na ete	60	60	60
Lodo disponível após a secagem	-	47	47
Lodo destinado a co-queima	-	35	34
Lodo destinado a compostagem	60	12	13

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os resultados obtidos nas simulações apresentaram valores semelhantes entre os tipos de secadores, com uma diferença percentual de aproximadamente 1,5% na demanda de cavaco pela agroindústria, com um valor maior para o secador a gases quentes, devido ao combustível utilizado para geração de calor ser somente cavaco de eucalipto.

Já para a queima do lodo, o valor foi maior para o secador a vapor, apresentando uma diferença percentual aproximada de 6%, isso devido a maior demanda de vapor imposta por este modelo de secador, onde a energia necessária para a secagem do lodo neste equipamento é parcialmente fornecida pela queima de lodo na geração de vapor.

Comparando os dois modelos, os resultados dos balanços de massa e energia tornam o secador com a energia térmica proveniente do vapor o secador mais apropriado para os fins requeridos, porém, deve-se realizar um estudo financeiro, uma vez que seu valor é aproximadamente 20% maior comparado ao outro secador.

Em comparação ao Cenário base, os valores de economia para o cavaco se aproximaram aos 18% no Cenário 3. Já a destinação de lodo para a compostagem apresentou uma redução média igual a 79%, se mostrando como um Cenário viável para o processamento do resíduo.

Quanto à análise de viabilidade financeira, alguns pontos podem ser observados na Tabela 7, que traz resultados quanto ao custo de implementação de cada cenário, custos evitáveis e fluxos de caixa mensal.

Tabela 7 - Cenários 2 e 3 - Resultados da análise financeira

Dados	Cenário 2	Cenário 3	
		Vapor	Gases Quentes
Configuração do secador	-		
Custo de implementação	R\$ 250.000,00	R\$ 3.950.000,00	R\$ 3.250.000,00
Custo evitável total por mês	R\$ 355.395,60	R\$ 453.522,90	R\$ 424.614,96
Fluxo de caixa – 1º mês	R\$ 344.453,00	R\$ 436.470,00	R\$ 408.717,65

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os valores obtidos indicam um aumento médio do custo evitável no Cenário 3, em comparação com o Cenário 2, de 25%, sendo que o investimento do Cenário 3 quando comparado com o Cenário 2 apresenta um valor médio para os dois secadores 28 vezes maior, devido ao alto custo do investimento em um equipamento secador de lodo.

A partir dos valores apresentados na Tabela 7 e, das taxas e custos operacionais apresentados na Tabela 4, foi possível realizar o cálculo das variáveis de interesse, que são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Cenários 2 e 3 – *Payback* e TIR

Dados	Cenário 2	Cenário 3	
<b>Configuração do Secador</b>	-	Vapor	Gases quentes
<b><i>Payback</i> Simples</b>	16 dias	9 meses e 2 dias	7 meses e 20 dias
<b><i>Payback</i> Descontado</b>	16 dias	9 meses e 11 dias	8 meses e 7 dias
<b>TIR</b>	-	49% a.a.	125% a.a.

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os resultados que constam na Tabela 8 atestam a viabilidade econômica da implementação de ambos os Cenário 2 e 3. O valor de TIR obtido para o Cenário 2 não foi apresentado devido ao baixo tempo de *payback*, (16 dias) apresentando uma TIR muito elevada em taxas anuais. Observando em um período menor, a TIR obtida para o Cenário 2 foi de 138% ao mês. As taxas e o *payback* obtido, mostram que a implementação do Cenário 2 é viável, onde o retorno do investimento ocorrerá no primeiro mês.

Já para a implementação da secagem e queima do resíduo proposto no Cenário 3, os valores de *payback* se tornam maiores, porém, ainda se mostra um investimento interessante, uma vez que os valores da TIR para o Cenário 3 se mostraram muito maiores do que a TMA adotada.

Há também a possibilidade da análise dos resultados considerando a aquisição dos secadores como um *upgrade* do Cenário 2, onde apenas os ganhos da secagem são analisados. Nesse sentido, os valores considerando a aquisição dos secadores como um *upgrade* podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Cenário 3 – Resultados análise *upgrade*

Dados	Secador a vapor	Secador a gases quentes
<b>Custo de implementação</b>	R\$ 3.700.000,00	R\$ 3.000.000,00
<b>Custo evitável mensal</b>	R\$ 98.127,29	R\$ 69.219,09
<b>Fluxo de caixa – 1º mês</b>	R\$ 92.016,00	R\$ 64.264,62
<b><i>Payback</i> simples</b>	3 anos e 4 meses	3 anos e 10 meses
<b><i>Payback</i> descontado</b>	4 anos e 2 meses	5 anos e 1 meses
<b>TIR</b>	18%	11%

Fonte: Autoria Própria (2023)

A análise da secagem sendo considerado como *upgrade*, onde o investimento está relacionado apenas com a aquisição e instalação dos secadores, e os custos operacionais já existem na queima do resíduo, apresentaram valores de *payback* maiores, isso devido a não contribuição da parcela de economia proveniente da queima no retorno do investimento.

Ao observar as taxas de TMA considerada e TIR obtida, o investimento se torna viável, porém, o secador de interesse passa a ser o secador a vapor, isso devido ao gasto energético menor, se comparado com o secador a gases de combustão, e sua fonte térmica ser proveniente da queima conjunta dos combustíveis, contribuindo para custos evitáveis maiores neste modelo, 30% maior se comparado com o modelo de fornalha própria.

Os valores comparativos para a destinação de lodo e aquisição da biomassa são apresentados na Tabela 10, para as condições de um pacote completo onde se considera a implantação do Cenário 3 em relação ao caso base (Cenário 1), e na Tabela 11, para as condições de *upgrade* (comparativo da implantação do Cenário 3 em relação a um Cenário 2 já existente na empresa), onde os valores entre parênteses indicam a diferença entre os cenários comparados.

Tabela 10 - Implementação da queima e da secagem como um pacote completo

Cenário	Cenário 1	Cenário 3 - Pacote	
<b>Configuração do Secador</b>	-	Vapor	Gases quentes
<b>Cavaco [ton/dia]</b>	169	138 (- 31)	142 (- 27)
<b>Compostagem [ton/dia]</b>	60	12 (- 48)	13 (- 47)

Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 11 - Implementação dos secadores como *upgrade* do Cenário 2

Cenário	Cenário 2	Cenário 3 - Upgrade	
<b>Configuração do Secador</b>	-	Vapor	Gases quentes
<b>Cavaco [ton/dia]</b>	143	138 (- 5)	142 (- 1)
<b>Compostagem [ton/dia]</b>	24	12 (- 12)	13 (- 11)

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os resultados obtidos na Tabela 10, mostram uma grande redução na destinação de resíduo e aquisição de biomassa para a implementação do Cenário 3 como um pacote completo. Já para os resultados da Tabela 11, os valores reduzem significativamente, consequência da análise do Cenário 3 como um *upgrade*, onde os valores de economia provenientes da implementação do Cenário 2 são desconsiderados, tendo em vista que a empresa já realiza a queima do resíduo.

## 5. CONCLUSÕES

Em resumo, este estudo teve como objetivo analisar o cenário da queima conjunta de lodo industrial e cavaco de eucalipto em um abatedouro de aves, para diferentes teores de umidade do resíduo. Além disso, buscou-se determinar o ponto ótimo para a secagem do lodo em um equipamento industrial, considerando dois modelos com fontes térmicas distintas disponíveis no mercado: um secador a vapor e outro com gases quentes de combustão.

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da queima do resíduo e evidenciaram que o investimento para essa aplicação é baixo. No entanto, em relação à secagem, verificou-se a necessidade de um investimento maior para a aquisição do equipamento, resultando em *paybacks* mais longos.

A respeito do ponto ótimo, identificou-se que este está diretamente relacionado aos custos, aspectos produtivos e características da geração de vapor de processo, destacando a importância de analisar cada caso de acordo com suas especificidades.

No entanto, é importante salientar que este estudo apresentou limitações em relação à análise de emissões gasosas tanto para a queima do resíduo úmido quanto para o seco, bem como em relação às características ideais de operação e aos possíveis danos causados pela queima do resíduo.

Como recomendação para estudos futuros, sugere-se a análise das emissões gasosas para diferentes níveis de teores de umidade adotados, além de investigar as consequências da queima e os aspectos operacionais da caldeira. Essas pesquisas adicionais aprimorariam a compreensão dos impactos ambientais e dos riscos associados à queima conjunta do lodo industrial e cavaco de eucalipto, contribuindo para uma implementação mais eficiente e sustentável dessa prática.

Por fim, espera-se que os resultados e as recomendações apresentados neste trabalho estimulem e orientem pesquisas futuras nessa área, visando aprimorar ainda mais a eficiência e a sustentabilidade das práticas de gestão de resíduos em setores industriais.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **ASME PTC 4: Fired Steam Generators**, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.001: Sistemas de gestão ambiental: Requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro, p. 41. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Relatório anual 2023**. 2023. Disponível em: <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2023/04/Relatorio-Anual-2023.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2023.
- BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitários e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia**. Joinville, p. 27-32. 2008.
- BOTELHO, Manoel Henrique C.; BIFFANO, Hercules M. **Operação de caldeiras, gerenciamento, controle e manutenção**. São Paulo: Editora Blucher, 2015. E-book. ISBN 9788521209447.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Pecuária, Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Animal – DIPOA. **Conforme Portaria N° 210**. Brasília: [S.N.], 10 nov. 1998.
- BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Lei n° 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010
- BRASIL. **Resolução CONAMA n° 382**, de 26 de dezembro de 2006: “Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas”, 2006.
- BUENO, Victoria Mamede. **Caracterização físico-química de resíduos de abatedouros de frangos**. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2022. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/235913>>.
- BURIN, Eduardo Lucas Konrad et al. Analysis of Corrosion And Fouling Development In A Biomass Steam Generator Burning Sludge From A Slaughterhouse Effluent Treatment Plant. In: **Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering**, 19., 2022, Bento Gonçalves. 2022.
- DAVID, Airton Checoni. **Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. doi:10.11606/D.3.2002.tde-30042003-131628. Acesso em: 2023-06-06
- DE SENA, R. F. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia**. 2005. 83 f. Tese (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- DE SENA, R. F.; CLAUDINO, A.; MORETTI, K.; BONFANTI, Í. C.P.; MOREIRA, R. F.P.M.; JOSÉ, H. J.. **Biofuel application of biomass obtained from a meat industry wastewater plant through the flotation process—A case study**. *Resources, Conservation and Recycling*, [S.L.], v. 52, n. 3, p. 557-569, jan. 2008.
- FAGNANI, Kátia Cristina. **Comparação do potencial energético do lodo tratamento físico-químico de efluentes provenientes do abate de aves utilizando diferentes coagulantes**. 2017. Tese: Mestrado – Programa de Pós-graduação em Tecnologia em Bioprodutos Industriais. Universidade Federal do Paraná. 2017.
- FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Agricultural Outlook 2015-2024**. Paris: OECD Publishing, 2015. 148p.
- FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; CREMONEZ, P. A.; DIETER, J.; TELEKEN, J. G.; SAMPAIO, S. C.; KUNH, P. D. **Brazilian poultry activity waste: destinations and energetic potential**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 81, p. 3081-3089, jan. 2018.
- FILHO, Guilherme Eugênio Filippo F. **Máquinas Térmicas Estáticas e Dinâmicas** - 1ª edição - 2014. São Paulo: Editora Saraiva, 2014. E-book. ISBN 9788536530758.

- FLORIANI, S. L.; VIRMOND, E.; LUIZ, D. B.; ALTHOFF, C. A.; JOSÉ, H. J.; MOREIRA, R. F. P. M.. Potential of Industrial Solid Wastes as Energy Sources and Gaseous Emissions Evaluation in a Pilot Scale Burner (ES2008-54355). **Journal of Energy Resources Technology**, [S.L.], v. 132, n. 1, p. 1-7, 1 mar. 2010.
- GIROTTO, A., Girotto, F., Anschau, C., & Serpa, E. (2018). Secagem de lodos de efluentes industriais para queima na caldeira como biomassa na geração de energia e redução de custos com a destinação dos resíduos. **Anais da Engenharia de Produção** / ISSN 2594-4657, 2(1), 175 - 190.
- GONDIM, Gustavo Vieira. **Potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos gerados em uma unidade agroindustrial**. 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia - Ciências Térmicas, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.
- HURST BOILER & WELDIND COMPANY. Hybrid WW CG: coal fired. Inc. Coolidge, GA – USA.
- LORENCETTI, Grasielle Adriane Toscan. **Solid waste management in a poultry slaughtering unit in southwestern**. Paraná. 2018. 39 pg. Monograph (Specialization in Environmental Management in Municipalities). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.
- MANTOVAN, Fabiana de Marqui. **Estudo da queima de lodo flotado de estação de tratamento de efluentes em caldeiras a biomassa**. 2022. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Bioenergia, Pós-Graduação em Bioenergia, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2022.
- MARTINELLI JUNIOR, Luis Carlos. **Introdução as máquinas térmicas - caldeira**. São Paulo: Unip-SP. 2012, 141p. Apostila.
- MENEGHINI, C.; PROINELLI, R.; PINTRO, D. A B. Avaliação técnica e econômica da co-combustão de lodo frigorífico primário para geração de vapor. 2015. 7f. **VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental** - Universidade do Oeste de Santa Catarina, Porto Alegre, RS. 2015.
- MORAN, M. J., SHAPIRO, H.N. MUNSON, B.R. e DE WITT, D. P. **Engenharia de Sistemas Térmicos**, 1ª Ed., Rio de Janeiro, LTC, 2005.
- NR 13**: manual técnico de caldeiras e vasos de pressão – edição comemorativa 10 anos da NR 13. Brasília: MTE: SIT: DSST, 2006. 124 p.
- PADILHA, J.; KUREK, A. P.; SOUZA, O.; SELLIN, N. **Avaliação da potencialidade energética de lodos gerados no tratamento de efluentes de abatedouro e frigorífico de aves**. In: Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, 30, 2019, São Paulo. Anais.... São Paulo: AESabesp, p. 1 – 17, 2019.
- SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - SEMA. **Resolução nº 42/08**. Estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras e dá outras providências. Curitiba, PR (2008).
- SOARES, S. R. A., Matos, Z. M. R. de ., & Bernardes, R. S.. (2001). Modelagem do processo de desidratação de lodo anaeróbio em leitos de secagem simulados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 5(2), 313–319. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000200023>.
- TAPLIN, R. **Boiler Plant and Distribution System Optimization Manual**. The Fairmount Press, Inc. Lilburn, GA – USA, 2014. p. 293.
- VIEIRA, Ana Carla. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.
- VIRMOND, E.; SCHACKER, R. L.; ALBRECHT, W.; ALTHOFF, C. A.; SOUZA, M. de; MOREIRA, R. F.P.M.; JOSÉ, H. J.. **Organic solid waste originating from the meat processing industry as an alternative energy source**. Energy, [S.L.], v. 36, n. 6, p. 3897- 3906, jun. 2011.
- VIRMOND, Elaine. **Aproveitamento de lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. 2007. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

## APÊNDICE A - EQUAÇÕES DO CENÁRIO 1

As equações de balanços mássicos e energéticos utilizadas para a resolução dos cenários propostos estão descritas a seguir:

A Equação 1 foi utilizada para trazer os teores de base seca para base úmida.

$$X_{wb} = X_{db} * (1 - H_2O) \quad (1)$$

Onde:

$H_2O$  = Teor de umidade do combustível [kg/kg]

$X_{db}$  = Teor em base seca [kg/kg]

$X_{wb}$  = Teor em base úmida [kg/kg]

A Equação 2 foi utilizada para trazer o PCS em base úmida para o PCI do combustível estudado.

$$PCI = PCS_{wb} - \{2440 * [(9 * H_{wb}) + H_2O]\} \quad (2)$$

Onde:

$H_2O$  = Teor de umidade do combustível [kg/kg]

$H_{wb}$  = Teor de hidrogênio em base úmida [kg/kg]

$PCS_{wb}$  = Poder calorífico superior em base úmida [kJ/kg]

As Equações 3 e 4 apresentam o balanço de massa proposto para a resolução do Cenário 1.

$$\dot{m}_{lodo,ETE} = \dot{m}_{lodo,comp} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{comb} = \dot{m}_{biom} \quad (4)$$

Onde:

$\dot{m}_{biom}$  = Vazão mássica de biomassa para alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{comb}$  = Vazão mássica total de combustível na alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{lodo,comp}$  = Vazão mássica de LFC destinado a compostagem [kg/s]

$\dot{m}_{lodo,ETE}$  = Vazão mássica de LFC disponível na saída da ETE [kg/s]

As Equações 5, 6 e 7 apresentam o balanço de energia proposto para a resolução do Cenário 1.

$$\dot{Q}_{\text{proc}} = \dot{m}_{\text{vap,proc}} * \Delta h_{\text{vap}} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{\text{comb,cald}} = \frac{\dot{Q}_{\text{proc}}}{\eta_{\text{cald}}} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{\text{biom}} = \frac{\dot{Q}_{\text{proc}}}{\text{PCI}_{\text{biom}}} \quad (7)$$

Onde:

$\dot{Q}_{\text{comb,cald}}$  = Taxa de calor disponível na fornalha [kW]

$\dot{Q}_{\text{proc}}$  = Taxa de calor necessário para geração de vapor de processo [kW]

$\dot{m}_{\text{biom}}$  = Vazão mássica de biomassa para alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{\text{vap,proc}}$  = Vazão mássica de vapor para o processo [kg/s]

$\eta_{\text{cald}}$  = Eficiência térmica da caldeira [kJ/kJ]

$\Delta h_{\text{vap}}$  = Delta de entalpia para geração de vapor saturado [kJ/kg]

$\text{PCI}_{\text{biom}}$  = Poder calorífico inferior da biomassa [kJ/kg]

## APÊNDICE B - EQUAÇÕES DO CENÁRIO 2

As equações de balanços mássicos e energéticos utilizadas para a resolução do sistema proposto no Cenário 2 estão descritas a seguir:

Para a queima do resíduo, conforme Resolução SEMA, o limite mássico foi atingido e é descrito na Equação 8.

$$20\% = \frac{\dot{m}_{\text{lodo,queima}}}{\dot{m}_{\text{comb}}} \quad (8)$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{lodo,queima}}$  = Vazão mássica de LFC destinado a queima [kg/s]

$\dot{m}_{\text{comb}}$  = Vazão mássica total de combustível na alimentação da caldeira [kg/s]

As Equações 9 e 10 apresentam o balanço de massa proposto para a resolução do Cenário 2.

$$\dot{m}_{\text{lodo,ETE}} = \dot{m}_{\text{lodo,comp}} + \dot{m}_{\text{lodo,queima}} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{\text{comb}} = \dot{m}_{\text{biom}} + \dot{m}_{\text{lodo,queima}} \quad (10)$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{biom}}$  = Vazão mássica de biomassa para alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{\text{comb}}$  = Vazão mássica total de combustível na alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,comp}}$  = Vazão mássica de LFC destinado a compostagem [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,ETE}}$  = Vazão mássica de LFC disponível na saída da ETE [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,queima}}$  = Vazão mássica de LFC destinado a queima [kg/s]

As Equações 11, 12, 13 e 14 apresentam o balanço de energia proposto para a resolução do Cenário 2.

$$\dot{Q}_{\text{proc}} = \dot{m}_{\text{vap,proc}} * \Delta h_{\text{vap}} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{\text{comb,cald}} = \frac{\dot{Q}_{\text{proc}}}{\eta_{\text{cald}}} = \dot{Q}_{\text{biom}} + \dot{Q}_{\text{lodo,queima}} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{\text{biom}} = \dot{m}_{\text{biom}} * \text{PCI}_{\text{biom}} \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{\text{lodo,queima}} = \dot{m}_{\text{lodo,queima}} * \text{PCI}_{\text{lodo,queima}} \quad (14)$$

Onde:

$\dot{Q}_{\text{biom}}$  = Taxa de calor disponível na fornalha pela biomassa [kW]

$\dot{Q}_{\text{comb,cald}}$  = Taxa de calor disponível na fornalha [kW]

$\dot{Q}_{\text{lodo,queima}}$  = Taxa de calor disponível na fornalha pelo lodo [kW]

$\dot{Q}_{\text{proc}}$  = Taxa de calor necessário para geração de vapor de processo [kW]

$\dot{m}_{\text{biom}}$  = Vazão mássica de biomassa para alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,queima}}$  = Vazão mássica de LFC destinado a queima [kg/s]

$\dot{m}_{\text{vap,proc}}$  = Vazão mássica de vapor para o processo [kg/s]

$\eta_{\text{cald}}$  = Eficiência térmica da caldeira [kW/kW]

$\Delta h_{\text{vap}}$  = Delta de entalpia para geração de vapor saturado [kJ/kg]

$\text{PCI}_{\text{biom}}$  = Poder calorífico inferior da biomassa [kJ/kg]

$\text{PCI}_{\text{lodo}}$  = Poder calorífico inferior do lodo [kJ/kg]

### APÊNDICE C - EQUAÇÕES DO CENÁRIO 3 - SV

As equações de balanços mássicos e energéticos utilizadas para a resolução do sistema proposto no cenário 3 (secador a vapor) estão descritas a seguir:

Para a queima do resíduo, conforme Resolução SEMA, o limite energético foi atingido e é descrito na Equação 15.

$$20\% = \frac{\dot{Q}_{\text{lodo,queima}}}{\dot{Q}_{\text{comb,cald}}} \quad (15)$$

Onde:

$\dot{Q}_{\text{comb,cald}}$  = Taxa de calor disponível na fornalha [kW]

$\dot{Q}_{\text{lodo,queima}}$  = Taxa de calor disponível na fornalha pelo lodo [kW]

As Equações 16, 17, 18, 19 e 20 apresentam o balanço de massa proposto para a resolução do Cenário 3, para o secador a vapor, e as Equações 21, 22, 23, 24 e 25 apresentam o balanço energético proposto.

$$\dot{m}_{\text{lodo,ETE}} = \dot{m}_{\text{lodo,comp}} + \dot{m}_{\text{lodo,queima}} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{\text{comb}} = \dot{m}_{\text{biom}} + \dot{m}_{\text{lodo,queima}} \quad (17)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O, evp, sec}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O, lodo, ETE}} - \dot{m}_{\text{H}_2\text{O, lodo, seco}} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O, lodo, ETE}} = \dot{m}_{\text{lodo, ETE}} * H_{2\text{O, lodo, ETE}} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O, lodo, seco}} = \dot{m}_{\text{lodo, seco}} * H_{2\text{O, lodo, seco}} \quad (20)$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{biom}}$  = Vazão mássica de biomassa para alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{\text{comb}}$  = Vazão mássica total de combustível na alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo, comp}}$  = Vazão mássica de LFC destinado a compostagem [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo, ETE}}$  = Vazão mássica de LFC disponível na saída da ETE [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo, queima}}$  = Vazão mássica de lodo seco destinado a queima [kg/s]

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O, evp, sec}}$  = Vazão mássica de água evaporada no secador [kg/s]

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O, lodo, ETE}}$  = Vazão mássica de água no lodo na saída da ETE [kg/s]

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O, lodo, seco}}$  = Vazão mássica de água no lodo na saída do secador [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,seco}}$  = Vazão mássica de lodo seco na saída do secador [kg/s]

$H_2O_{\text{lodo,ETE}}$  = Teor de umidade do lodo na saída da ETE [kg/kg]

$H_2O_{\text{lodo,seco}}$  = Teor de umidade do lodo na saída do secador [kg/kg]

$$\dot{Q}_{\text{proc}} = \dot{m}_{\text{vap,proc}} * \Delta h_{\text{vap}} \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{\text{sec}} = \dot{m}_{\text{vap,sec}} * \Delta h_{\text{vap,sec}} = \dot{m}_{H_2O, \text{evp,sec}} * Q_{\text{evp,fab}} \quad (22)$$

$$\dot{Q}_{\text{comb,cald}} = \frac{\dot{Q}_{\text{proc}} + \dot{Q}_{\text{sec}}}{\eta_{\text{cald}}} = \dot{Q}_{\text{biom}} + \dot{Q}_{\text{lodo,queima}} \quad (23)$$

$$\dot{Q}_{\text{biom}} = \dot{m}_{\text{biom}} * PCI_{\text{biom}} \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{\text{lodo,queima}} = \dot{m}_{\text{lodo,queima}} * PCI_{\text{lodo}} \quad (25)$$

Onde:

$\dot{Q}_{\text{sec}}$  = Taxa de calor necessária para secagem do resíduo [kW]

$\dot{m}_{\text{vap,sec}}$  = Vazão mássica de vapor necessária para secagem do resíduo [kg/s]

$\dot{m}_{H_2O, \text{evp,sec}}$  = Vazão mássica de água evaporada no secador [kg/s]

$Q_{\text{evp,fab}}$  = Energia necessária para evaporar uma unidade mássica de água [kJ]

$\dot{Q}_{\text{biom}}$  = Taxa de calor dispónivel na fornalha pela biomassa [kW]

$\dot{Q}_{\text{comb,cald}}$  = Taxa de calor dispónivel na fornalha [kW]

$\dot{Q}_{\text{lodo,queima}}$  = Taxa de calor dispónivel na fornalha pelo lodo seco [kW]

$\dot{Q}_{\text{proc}}$  = Taxa de calor necessário para geração de vapor de processo [kW]

$\dot{m}_{\text{biom}}$  = Vazão mássica de biomassa para alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,queima}}$  = Vazão mássica de lodo seco destinado a queima [kg/s]

$\dot{m}_{\text{vap,proc}}$  = Vazão mássica de vapor para o processo [kg/s]

$\eta_{\text{cald}}$  = Eficiência térmica da caldeira [kW/kW]

$\Delta h_{\text{vap}}$  = Delta de entalpia para geração de vapor saturado [kJ/kg]

$PCI_{\text{biom}}$  = Poder calorífico inferior da biomassa [kJ/kg]

$PCI_{\text{lodo}}$  = Poder calorífico inferior do lodo seco [kJ/kg]

## APÊNDICE D - EQUAÇÕES DO CENÁRIO 3 - SGQ

As equações de balanços mássicos e energéticos utilizadas para a resolução do sistema proposto no cenário 3 (secador a gases quentes) estão descritas a seguir:

Para a queima do resíduo, conforme Resolução SEMA, o limite energético foi atingido e é descrito na Equação 26.

$$20\% = \frac{\dot{Q}_{\text{lodo,queima}}}{\dot{Q}_{\text{comb,cald}}} \quad (26)$$

Onde:

$\dot{Q}_{\text{comb,cald}}$  = Taxa de calor disponível na fornalha [kW]

$\dot{Q}_{\text{lodo,queima}}$  = Taxa de calor disponível na fornalha pelo lodo [kW]

As Equações 27, 28, 29, 30 e 31 apresentam o balanço de massa proposto para a resolução do Cenário 3, para o secador a vapor, e as Equações 32, 33, 34, 35 e 36 apresentam o balanço energético proposto.

$$\dot{m}_{\text{lodo,ETE}} = \dot{m}_{\text{lodo,comp}} + \dot{m}_{\text{lodo,queima}} \quad (27)$$

$$\dot{m}_{\text{comb}} = \dot{m}_{\text{biom}} + \dot{m}_{\text{lodo,queima}} + \dot{m}_{\text{biom,sec}} \quad (28)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,evp,sec}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,lodo,ETE}} - \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,lodo,seco}} \quad (29)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,lodo,ETE}} = \dot{m}_{\text{lodo,ETE}} * H_2O_{\text{lodo,ETE}} \quad (30)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,lodo,seco}} = \dot{m}_{\text{lodo,seco}} * H_2O_{\text{lodo,seco}} \quad (31)$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{biom}}$  = Vazão mássica de biomassa para alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{\text{comb}}$  = Vazão mássica total de combustível na alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,comp}}$  = Vazão mássica de LFC destinado a compostagem [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,ETE}}$  = Vazão mássica de LFC disponível na saída da ETE [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,queima}}$  = Vazão mássica de lodo seco destinado a queima [kg/s]

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,evp,sec}}$  = Vazão mássica de água evaporada no secador [kg/s]

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,lodo,ETE}}$  = Vazão mássica de água no lodo na saída da ETE [kg/s]

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,lodo,seco}}$  = Vazão mássica de água no lodo na saída do secador [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,seco}}$  = Vazão mássica de lodo seco na saída do secador [kg/s]

$H_2O_{\text{lodo,ETE}}$  = Teor de umidade do lodo na saída da ETE [kg/kg]

$H_2O_{\text{lodo,seco}}$  = Teor de umidade do lodo na saída do secador [kg/kg]

$$\dot{Q}_{\text{proc}} = \dot{m}_{\text{vap,proc}} * \Delta h_{\text{vap}} \quad (32)$$

$$\dot{Q}_{\text{sec}} = \dot{m}_{\text{biom,sec}} * PCI_{\text{biom}} = \dot{m}_{H_2O, \text{evp,sec}} * Q_{\text{evp,fab}} \quad (33)$$

$$\dot{Q}_{\text{comb,cald}} = \frac{\dot{Q}_{\text{proc}}}{\eta_{\text{cald}}} = \dot{Q}_{\text{biom}} + \dot{Q}_{\text{lodo,queima}} \quad (34)$$

$$\dot{Q}_{\text{biom}} = \dot{m}_{\text{biom}} * PCI_{\text{biom}} \quad (35)$$

$$\dot{Q}_{\text{lodo,queima}} = \dot{m}_{\text{lodo,queima}} * PCI_{\text{lodo,queima}} \quad (36)$$

Onde:

$\dot{Q}_{\text{sec}}$  = Taxa de calor necessária para secagem do resíduo [kW]

$\dot{m}_{\text{vap,sec}}$  = Vazão mássica de vapor necessária para secagem do resíduo [kg/s]

$\dot{m}_{H_2O, \text{evp,sec}}$  = Vazão mássica de água evaporada no secador [kg/s]

$Q_{\text{evp,fab}}$  = Energia necessária para evaporar uma unidade mássica de água [kJ]

$\dot{Q}_{\text{biom}}$  = Taxa de calor dispónivel na fornalha pela biomassa [kW]

$\dot{Q}_{\text{comb,cald}}$  = Taxa de calor dispónivel na fornalha [kW]

$\dot{Q}_{\text{lodo,queima}}$  = Taxa de calor dispónivel na fornalha pelo lodo seco [kW]

$\dot{Q}_{\text{proc}}$  = Taxa de calor necessário para geração de vapor de processo [kW]

$\dot{m}_{\text{biom}}$  = Vazão mássica de biomassa para alimentação da caldeira [kg/s]

$\dot{m}_{\text{lodo,queima}}$  = Vazão mássica de lodo seco destinado a queima [kg/s]

$\dot{m}_{\text{vap,proc}}$  = Vazão mássica de vapor para o processo [kg/s]

$\eta_{\text{cald}}$  = Eficiência térmica da caldeira [kW/kW]

$\Delta h_{\text{vap}}$  = Delta de entalpia para geração de vapor saturado [kJ/kg]

$PCI_{\text{biom}}$  = Poder calorífico inferior da biomassa [kJ/kg]

$PCI_{\text{lodo}}$  = Poder calorífico inferior do lodo seco [kJ/kg]

## APÊNDICE E: ANÁLISE FINANCEIRA

As equações utilizadas para a análise financeira dos cenários estão descritas a seguir:

$$VPL_{(i)} = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - INV_0 \quad (37)$$

$$0 = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+TIR)^j} - INV_0 \quad (38)$$

$$\text{Payback Simples} = \frac{INV_0}{RM_i} \quad (39)$$

$$\text{Payback Descontado} = \frac{INV_0}{LLM_i} \quad (40)$$

$$INV_0 \text{ (Cenário 2)} = R\$_{Moega} + R\$_{Estudos} \quad (41)$$

$$INV_0 \text{ (Cenário 3)} = R\$_{Moega} + R\$_{Estudos} + R\$_{Secador} \quad (42)$$

Onde:

VPL = Valor presente líquido [R\$]

FC = fluxo de caixa [R\$]

I = Período [mês]

$INV_0$  = Investimento inicial [R\$]

TIR = Taxa interna de retorno [%]

$RM$  = *Receita média* [R\$]

$LLM$  = *Lucro líquido médio* [R\$]

$R\$_{Moega}$  = *Custo da moega* [R\$]

$R\$_{Estudos}$  = *Custo dos estudos* [R\$]

$R\$_{Secador}$  = *Custo do secador* [R\$]