

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

RICARDO CECILIO MORENO DAS NEVES

APRIMORAMENTO DO MÉTODO *LEVELIZED COST OF HEAT*
PARA COMPARAÇÃO DE INVESTIMENTOS EM GLP, GÁS
NATURAL E BIOMASSA EM PROCESSO DE COMBUSTÃO
INDUSTRIAL

SÃO PAULO
2022

RICARDO CECILIO MORENO DAS NEVES

APRIMORAMENTO DO MÉTODO *LEVELIZED COST OF HEAT* PARA
COMPARAÇÃO DE INVESTIMENTOS EM GLP, GÁS NATURAL E BIOMASSA
EM PROCESSO DE COMBUSTÃO INDUSTRIAL

Versão Corrigida

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Energia

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Virginia Parente

São Paulo

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

NEVES, Ricardo Cecilio Moreno das.

Aprimoramento do método Levelized Cost of Heat para comparação de investimentos em GLP, gás natural e biomassa em processo de combustão industrial. /Ricardo Cecilio Moreno das Neves; orientadora: Virginia Parente. -- São Paulo, 2022.

139 f.: il; 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Gás natural. 2. Biomassa. 3. LCOH convencional. 4. LCOH aprimorado. 5. Geração de calor. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: NEVES, Ricardo Cecilio Moreno das

Título: Aprimoramento do método *Levelized Cost of Heat* para comparação de investimentos em GLP, gás natural e biomassa em processo de combustão industrial

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Aprovado em: 26/10/2022

Banca examinadora:

Prof.^a Dr.^a Virginia Parente (Orientadora e Presidente da Banca)

Instituição: Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Patrícia Helena Lara dos Santos Matai

Instituição: IEE-USP

Prof. Dr. Fernando Mario Rodrigues Marques

Instituição: FIA

Prof. Dr. Luciano José da Silva

Instituição: UFV

Prof. Dr. Javier Ignacio Toro González

Instituição: GIZ

Prof. Dr. Sergio Valdir Bajay

Instituição: UNICAMP

DEDICATÓRIA

A Deus, por me propiciar a vida com saúde para superar os desafios que nela surjam. Por me permitir mais este importante aprendizado e evolução, sempre iluminando meus caminhos.

À minha querida esposa Anna Carolina Mazeto Manzan e aos nossos filhos maravilhosos, Henrique e Isadora, por sempre estarem ao meu lado. Agradeço por me proporcionarem amor incondicional, e, principalmente, pela paciência com minhas ausências durante o desenvolvimento desta tese.

Aos meus pais, Solange Bozelli Cecilio Moreno das Neves e Paulo Roberto Moreno das Neves que sempre acompanharam meus passos, minhas derrotas e minhas vitórias ao longo da vida, com muito apoio e carinho.

AGRADECIMENTOS

À querida orientadora Prof^a Dr^a Virginia Parente, pela atenção, por me guiar durante este processo, e, principalmente, por acreditar em meu potencial independentemente dos desafios interpostos por este período de pandemia.

Ao meu grande amigo Sílvio Aparecido Verdério Júnior, por todo auxílio e por suas de excelentes sugestões tão pertinentes ao aprimoramento da minha tese.

Aos meus gestores, Vicente Zuffo, Oreste Trombetta e Lari Barbosa Jr., por não medirem esforços para que este projeto de tese pudesse ser concluído da melhor forma possível.

Aos amigos, Rafael Ribeiro e Alex Donizete Mariano Ponce, por contribuir com seus profundos conhecimentos sobre os mercados de biomassa, GLP e gás natural.

À JBS S.A por fornecer dados para que o estudo de caso incluído nesta tese pudesse ter uma maior aderência à realidade industrial.

A todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Energia, do Instituto de Energia e Ambiente da USP, pelo aprendizado e amadurecimento proporcionados nestes anos. E, também, a todos os funcionários do IEE, em especial àqueles da Secretaria de Pós-Graduação, Renata Boaventura Cabral, Raphael Diegues e Adriana Pelege, pelo suporte e disponibilidade em tornar minha passagem pela USP mais funcional e agradável.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas, Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Martin Luther King

RESUMO

NEVES, Ricardo Cecilio Moreno das. **Aprimoramento do método *Levelized Cost of Heat* para comparação de investimentos em GLP, gás natural e biomassa em processo de combustão industrial**. 2022. 139 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

A utilização de métodos para análise de investimentos em geração de calor vem se intensificando desde os anos 2000. Esse crescimento está relacionado principalmente à grande diversidade de fontes de energia e diferentes tecnologias para esse fim. O método de custo nivelado de energia sob a forma de calor, conhecido como *Levelized Cost of Heat*, ou simplesmente LCOH, é o que mais se aplica para esse objetivo. Este método pode, dentre outras finalidades, englobar os valores de CAPEX e OPEX envolvidos em empreendimentos de geração de calor, levando em conta a vida útil dos equipamentos. Embora muito útil, o método do LCOH em sua forma convencional não faz menção aos efeitos que a eficiência de conversão térmica aliados à qualidade da fonte de energia possa ter sobre os custos. Nesse contexto, esta tese busca realizar o aprimoramento da equação convencional do LCOH acrescentando termos que possam refletir tanto os efeitos da eficiência de conversão energética dos equipamentos, quanto os efeitos do poder calorífico das fontes primárias de energia sobre os custos totais de geração. Os cálculos comparativos para o LCOH convencional e para o LCOH aprimorado foram aplicados a um estudo de caso no segmento industrial alimentício, de forma a auxiliar na tomada de decisão de investimento referente à tecnologia e fonte de energia. Diferentes arranjos de equipamentos geradores de calor, utilizando fontes de energia como o GLP, o gás natural, e a biomassa (florestal) foram experimentadas. Os resultados obtidos demonstraram maior robustez e segurança para o método LCOH aprimorado, evidenciando também o gás natural e sua respectiva tecnologia de conversão como o melhor resultado financeiro para esse estudo de caso. O novo método poderá ser experimentado em outros projetos para confirmação da hipótese.

Palavras-chaves: LCOH convencional; LCOH aprimorado; GLP; gás natural; biomassa; avaliação de projetos; geração de calor.

ABSTRACT

NEVES, Ricardo Cecilio Moreno das. **Improvement of the Levelized Cost of Heat method for comparing investments in LPG, natural gas, and biomass for industrial combustion process.** 2022. 139 f. Thesis (PhD) – Institute of Energy and Environment, University of São Paulo, São Paulo, 2022.

The use of methods to analyze investments in heat generation has been intensified since the 2000's. This growth is mainly related to the great diversity of energy sources and different technologies for this purpose. The method of the leveled cost of energy in the form of heat, known as *Levelized Cost of Heat*, or simply LCOH, is the most used for this purpose. This method can, among other finalities, encompass both the CAPEX and OPEX values involved in heat generation projects, considering the lifespan of the equipment. Although very useful, the LCOH method in its conventional form does not take into account the effects that thermal conversion efficiency combined with energy source quality can have upon costs. In this context, this thesis seeks to improve the conventional LCOH equation by adding variables that can reflect both the effects of energy conversion efficiency of the equipment and the effects of the calorific power of the primary energy sources on the total costs of heat generation. A case study was used to make comparative valuations between the conventional LCOH and the improved LCOH in a food company aiming to assist the investment decision making regarding the most appropriate type of heat generation. Different architectures of heat generating equipment, using energy sources such as LPG, natural gas, and biomass (wood) were tried. The results showed greater robustness for the improved LCOH method, also showing natural gas and its respective conversion technology as the best financial result for this case study. The new method can be tried in other projects to confirm the hypothesis.

Keywords: conventional LCOH; improved LCOH; LPG; natural gas; biomass; project valuation; heat generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Número de artigos publicados sobre LCOH pela base Scopus	25
Figura 2 – Publicações e citações na linha do tempo para LCOE e LCOH	26
Figura 3 – Áreas de concentração de pesquisa para os termos LCOE e LCOH.....	27
Figura 4 – Sobreposição de palavras para LCOE e LCOH na base da <i>Web of Science</i>	28
Figura 5 – Evolução das redes temáticas entre o período P1 e P5	29
Figura 6 – Rede de distribuição de gás natural em Campo Grande	32
Figura 7 – Mapa de áreas do Estado do Mato Grosso do Sul	33
Figura 8 – Mapa de florestas plantadas no Brasil	34
Figura 9 – Processo de secagem de um equipamento <i>spray dryer</i>	35
Figura 10 – Hemácias (tom escuro) e plasmas após processamento	36
Figura 11 – Fluxograma do processo de secagem de sangue de origem animal	37
Figura 12 – Fluxo da concepção original dos secadores (<i>spray dryers</i>)	40
Figura 13 – Tipo de queima do GLP com troca indireta de calor	41
Figura 14 – Fluxo das correntes para troca térmica.....	42
Figura 15 – Proposta de modificação da troca térmica indireta por direta.....	44
Figura 16 – Fluxo de gases com troca térmica por contato direto	45
Figura 17 – Fluxograma utilizando o gás natural com troca de calor direto.....	46
Figura 18 – Comparativo de troca térmica direta e indireta para GLP e gás natural.....	47
Figura 19 – Posição do queimador de GLP no <i>spray dryer</i>	48
Figura 20 – Configuração proposta para secagem utilizando biomassa e GLP.....	51
Figura 21 – <i>Layout</i> proposto para locação do gerador de gás quente.....	51
Figura 22 – Sistema de secagem utilizando caldeira a vapor de água	54
Figura 23 – Modelo mental para aprimoramento do método LCOH.....	57
Figura 24 – Evolução histórica e projeção das fontes de energia e inflação	70
Figura 25 – Evolução anual dos custos de manutenção e operação do queimador de GLP	71
Figura 26 – Custo nivelado da energia para o GLP pelo método LCOH convencional...	73
Figura 27 – Comparativo entre troca térmica direta e indireta para o GLP.....	74
Figura 28 – Energia térmica produzida entre troca térmica indireta e direta para o GLP	75
Figura 29 – Custo nivelado de energia para o GLP via contato direto	77
Figura 30 – O LCOH convencional para troca térmica direta e indireta do GLP	78
Figura 31 – Evolução anual dos custos de manutenção e operação para o gás natural	79
Figura 32 – Evolução dos gastos com gás natural versus a geração de calor anual	80
Figura 33 – LCOH convencional para o gás natural via contato indireto	82
Figura 34 – Comparativo entre troca térmica direta e indireta para o gás natural.....	83
Figura 35 – Energia térmica produzida para troca térmica indireta e direta para o gás natural	84
Figura 36 – Custo nivelado de energia para o gás natural via contato direto	86
Figura 37 – LCOH convencional para troca térmica direta e indireta para gás natural .	87
Figura 38 – Reajuste projetado para a biomassa até 2038.....	88
Figura 39 – Evolução dos preços da biomassa para queima em caldeira	89
Figura 40 – Geração de calor (Et) entre caldeira a biomassa e queimado a gás natural via transferência de calor por contato direto	90

Figura 41 – Gastos com fonte de energia (Ft)	91
Figura 42 – Investimento (It) para um processo de secagem utilizando vapor de água	92
Figura 43 – Evolução da inflação utilizada nos cálculos de Mt	93
Figura 44 – Evolução dos custos de manutenção e operação (Mt) para a biomassa	94
Figura 45 – Custo nivelado da energia para caldeira a vapor utilizando biomassa	96
Figura 46 - Distribuição financeira dos investimentos nos anos de 2019 e 2020.....	97
Figura 47 – Evolução dos custos de manutenção e operação (Mt) do sistema.....	98
Figura 48 – Gastos com fonte de energia (Ft) para o gerador de gás quente a biomassa com complemento em GLP	99
Figura 49 – Geração de calor (Et) entre três arquiteturas analisadas.....	100
Figura 50 – LCOH convencional para o gerador de gás quente com complemento em GLP	102
Figura 51 – Gastos com fonte de energia Ft.....	104
Figura 52 – LCOH aprimorado para GLP por contato indireto	105
Figura 53 – LCOH convencional e aprimorado para o GLP por contato indireto.....	106
Figura 54 – Gastos com fonte de energia (Ft) para GLP por contato direto	107
Figura 55 – LCOH aprimorado para GLP com troca térmica por contato direto.....	109
Figura 56 – Comparativo entre os métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado para o custo nivelado de energia para GLP via contato direto	110
Figura 57 – Gastos com fonte de energia (Ft) para o gás natural por contato indireto	111
Figura 58 – LCOH aprimorado para o gás natural por contato indireto	113
Figura 59 – LCOH convencional e aprimorado para o gás natural via contato indireto	114
Figura 60 – Gastos com fonte de energia (Ft) para o gás natural por contato direto .	116
Figura 61 – LCOH aprimorado para o gás natural por contato direto	117
Figura 62 – LCOH convencional e aprimorado para o gás natural via contato direto .	118
Figura 63 – Gastos com fonte de energia (Ft) para a biomassa utilizando caldeira	120
Figura 64 – LCOH aprimorado para a caldeira a vapor com biomassa	122
Figura 65 – LCOH convencional aprimorado para caldeira com biomassa.....	123
Figura 66 - Gastos com fonte de energia (Ft) para utilização de gerador de gás quente e complemento de calor via GLP por contato direto	125
Figura 67 – LCOH aprimorado para gerador de gás quente com biomassa e complemento de GLP	127
Figura 68 – LCOH convencional e aprimorado para gerador de gás quente com biomassa e complemento de GLP	128
Figura 69 – Resultados para o método LCOH convencional	129
Figura 70 – Resultados para o método LCOH aprimorado.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Períodos de pesquisa de palavras-chave	27
Tabela 2 – Organização dos dados coletados in loco	38
Tabela 3 – Poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis	39
Tabela 4 – Média de preços aplicados no estudo de caso	39
Tabela 5 – Organização das tecnologias para o estudo de caso	43
Tabela 6 – Dados do gerador de gás quente estudado	49
Tabela 7 – Potência elétrica instalada e consumida pelo gerador de gás quente.....	50
Tabela 8 – Vantagens e desvantagens da aplicação de gerador de gás quente.....	52
Tabela 9 – Dados da caldeira estudada.....	53
Tabela 10 – Vantagens e desvantagens de aplicar caldeira a vapor	55
Tabela 11 – Mão de obra para operação de caldeira e gerador de gás quente.....	56
Tabela 12 – Folha de pagamento do pacote pessoal (em USD \$)	56
Tabela 13 – Dados de entrada na equação de LCOH convencional.....	72
Tabela 14 – Dados de entrada na equação de LCOH convencional via contato direto..	76
Tabela 15 – Dados de entrada na equação de LCOH convencional.....	81
Tabela 16 – Dados de entrada na equação de LCOH convencional via contato direto..	85
Tabela 17 – Dados de entrada na equação de LCOH convencional para caldeira a vapor	95
Tabela 18 – Dados para obter o LCOH convencional para o gerador de gás quente com complemento em GLP	101
Tabela 19 – Dados complementares para obter o LCOH aprimorado para o GLP via contato indireto	103
Tabela 20 – Dados para obter o LCOH aprimorado para GLP por contato direto.....	108
Tabela 21 – Dados para obter o LCOH aprimorado para o gás natural por contato indireto.....	112
Tabela 22 – Dados para obter o LCOH aprimorado para o gás natural por contato direto	115
Tabela 23 – Dados para obter os gastos com energia (Ft) com uso de biomassa.....	119
Tabela 24 – Dados para obter o LCOH aprimorado para a caldeira com biomassa.....	121
Tabela 25 – Dados para obter os gastos com energia (Ft) para gerador de gás quente à biomassa e complemento de calor em GLP.....	124
Tabela 26 – Dados para obter o LCOH aprimorado para o gerador de gás quente com biomassa e complemento de calor com GLP por contato direto	126
Tabela 27 – Resultados dos métodos LCOH convencional e aprimorado	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A_d : Despesas para aquisição de água e esgoto e/ou necessárias para tratamento
- A_L : Porcentagem de vazamento de ar
- ASME: *American Society of Mechanical Engineers*
- CAPEX: *Capital Expenditure*
- C_{pA} : Calor específico do ar
- C_{pG} : Calor específico do gás
- D_c : Demais despesas não listadas
- E_e : Gastos com energia elétrica
- E_r : Energia requerida pelo sistema no ano
- \dot{E}_r : Energia requerida pelo sistema gerador de calor
- E_t : Geração de energia térmica no ano t
- F_t : Despesas com a fonte de energia (combustível)
- GLP: Gás liquefeito de petróleo
- h_v : Entalpia do vapor
- h_a : Entalpia da água de alimentação da caldeira
- I_t : Despesas de investimento
- LCOE: *Levelized Cost of Energy*
- LCOH: *Levelized Cost of Heat*
- $LCOH_{APC}$: *Levelized Cost of Heat* aprimorado para caldeira
- $LCOH_{APCG}$: *Levelized Cost of Heat* aprimorado para gerador de gás quente
- $LCOH_{APGG}$: *Levelized Cost of Heat* aprimorado para gás quente e GLP
- $LCOH_{APTd}$: *Levelized Cost of Heat* aprimorado p/ gás em troca térmica direta
- $LCOH_{APTi}$: *Levelized Cost of Heat* aprimorado p/ gás em troca térmica indireta
- m_c : Massa da fonte de energia consumida
- $m_{c'}$: Massa da fonte de energia consumida
- \dot{m}_c : Fluxo de massa da fonte de energia (combustível)
- $\dot{m}_{c'}$: Fluxo de massa da fonte de energia
- m_{fe} : Massa consumida da fonte de energia
- m_m : Custos referentes à manutenção de máquinas e equipamentos industriais
- m_p : Custos referentes à manutenção predial realizada no ano t
- M_t : Despesas de operação e manutenção

M_{tot} : Custos totais de manutenção da planta

\dot{m}_v : Fluxo de massa do vapor

n : Vida útil do sistema

η_{MD} : Rendimento térmico pelo método direto

η_{GC} : Rendimento térmico para o gerador de gás quente

η_{QG} : Rendimento térmico do queimador a gás

OPEX: *Operational Expenditure*

O_{tot} : Custos totais de operação

PCI_{BIO} : Poder calorífico inferior da biomassa

PCI_{fe} : Poder calorífico inferior da fonte de energia

PCI_{GLP} : Poder calorífico inferior do gás liquefeito de petróleo

PCI_{GN} : Poder calorífico inferior do gás natural

P_p : Custos salariais dos colaboradores

Pr_{BIO} : Preço da biomassa

Pr_{EE} : Preço da energia elétrica

Pr_{D} : Preço do Diesel

Pr_{fe} : Preço unitário da fonte de energia

Pr_{GLP} : Preço do gás liquefeito de petróleo

Pr_{GN} : Preço do gás natural

r : Taxa de desconto

SCIMAT: *Science Mapping Analysis Software Tool*

t : Tempo restante de vida útil

T_{EA} : Temperatura de entrada de ar

T_{EG} : Temperatura de entrada do gás

T_o : Taxas (municipais, estaduais e federais) necessárias para a operação

T_{SG} : Temperatura de saída do gás

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Motivação, justificativa e relevância do tema	16
1.2. Objetivos, questão central e hipótese	19
1.3. Metodologia e estrutura da pesquisa	20
2. MÉTODO LCOH	22
2.1. Descrição e conceituação do método LCOH.....	22
2.2. Análise bibliométrica do método LCOH.....	24
3. PROPOSIÇÃO DE APRIMORAMENTO AO MÉTODO LCOH	30
3.1. Fundamentos para a escolha da empresa adequada ao estudo de caso.....	30
3.2. Delineamento da pesquisa	37
3.3. Tecnologias de geração de calor aplicadas ao estudo de caso.....	43
3.4. Procedimentos específicos.....	57
3.5. Considerações finais do Capítulo 3	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1. Premissas gerais assumidas para os métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado	68
4.2. LCOH convencional	70
4.3. LCOH aprimorado	102
4.4. Comparativos entre os métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado ...	128
4.5. Considerações finais do Capítulo 4	130
5. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES.....	132
REFERÊNCIAS	137

1. INTRODUÇÃO

O método *Levelized Cost of Heat* (LCOH) é derivado do método *Levelized Cost of Energy* (LCOE), este último mais amplamente conhecido e difundido tanto no meio acadêmico quanto no meio profissional. O método LCOE é utilizado, sobretudo, para equalizar o custo de geração de energia elétrica através de diferentes fontes de energia, a citar como exemplo: (i) o gás natural; (ii) a biomassa; (iii) a energia solar; (iv) a energia eólica; e (v) a hidráulica, entre outras. O resultado da equação do LCOE fornece o custo unitário da energia elétrica gerada, em reais por quilowatt hora (USD \$/kWh), simplificando muito as análises comparativas de custo. Quando o intuito é comparar os custos unitários para a produção de calor com diferentes fontes de energia, o LCOE passa então a se denominar LCOH. Com o mesmo princípio do LCOE, o LCOH calcula o custo de geração de calor em reais por quilowatt hora térmico (USD \$/kWh) para diferentes tipos de combustíveis (UECKERDT, F. *et al.* 2013).

Neste contexto, utilizando-se da metodologia do LCOH, esta tese apresenta uma análise comparativa aplicada a um estudo de caso que aborda os custos envolvidos para a geração de calor através das três fontes de energia mais comumente utilizadas no segmento industrial no Brasil, a saber: (i) o gás liquefeito de petróleo (GLP); (ii) o gás natural; e (iii) a biomassa florestal. Não limitado a isso, este trabalho também busca propor um aprimoramento na metodologia de cálculo do LCOH para auxiliar na tomada de decisão a respeito da fonte a ser utilizada na geração de calor dentre as fontes supracitadas. O trabalho utiliza-se, conforme mencionado, de um estudo de caso para uma decisão real de investimento de uma indústria do setor alimentício, cuja planta situa-se no Estado do Mato Grosso do Sul e que necessita escolher a fonte mais adequada para a geração de calor necessária a seus processos industriais.

1.1. Motivação, justificativa e relevância do tema

O Brasil é um país rico em fontes de energia. Para os processos industriais, é comum se escolher fontes como a biomassa, o gás natural e o GLP, dentre outras. Conforme dados históricos, obtidos do Balanço Energético Nacional (EPE, 2020), desde 1970 a oferta desses recursos vem aumentando significativamente, ano após ano.

Com o aumento da oferta desses energéticos, a decisão de investimento de qual tipo de geração de calor deve ser escolhida passa a exigir um conceito claro para equalização dos custos. Nesse aspecto, a metodologia do LCOH destaca-se como uma ferramenta auxiliar que permite equalizar os custos a valor presente de forma igualitária entre as fontes energéticas envolvidas em um investimento.

Embora os termos LCOE e LCOH ainda não fossem utilizados, nos fins da década de 1970, Bright e Davitian (1979) já calculavam o custo nivelado para a energia e o calor gerados. Os termos LCOE e LCOH começaram de fato a ser utilizados no final dos anos 1990, quando despertaram o interesse da academia e do meio empresarial (CHANG, G. 2016). Após esse período, as publicações contendo as palavras-chaves *levelized cost of electricity* e *levelized cost of heat* cresceram exponencialmente, de acordo com as informações extraídas da base de dados da *Web of Science* e *Scopus*.

A escolha do tipo do combustível durante a fase de investimento da planta industrial, de modo geral, não se baseia em estudos mais aprofundados sobre os custos envolvidos durante a vida útil de determinado processo. Tais escolhas podem, então, ficar condicionadas a uma opção técnica ou a uma opção financeira vistas de uma forma não integrada, diferentemente do que ocorre quando se utiliza o método LCOH (CHANG, G., 2015).

De acordo com a AIE (2020), a disponibilidade geográfica das fontes de energia é uma das premissas para a escolha bem-sucedida da fonte a ser utilizada em processos industriais. Quando se considera o gás natural no Brasil, observa-se que existe uma limitação na infraestrutura para distribuição desse combustível, devido à baixa capilaridade existente na malha física. No entanto, o gás natural extraído, mesmo sem perspectivas da garantia de capilaridade no atendimento à demanda, cresceu 32% entre 2015 e 2020 (EPE, 2015). Assim, denota-se que o gás natural é uma fonte de energia com boas perspectivas de oferta no País, que passa a ser cada vez mais considerada em processos industriais de geração de calor.

Do ponto de vista de oferta de biomassa no Brasil, o relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2020) aponta que o País conta com significativa

disponibilidade dessa fonte. O denominado maciço florestal fechou o ano de 2019 com 9 milhões de hectares plantados, divididos entre: (i) florestas de eucalipto (6,97 milhões de hectares); (ii) florestas de Pinus (1,64 milhão de hectares); e (iii) outras espécies (0,39 milhão de hectares). Somente no Estado do Mato Grosso do Sul, o maciço florestal possui 1,14 milhão de hectares plantados, representando 12,66% do total nacional, de acordo com dados do Ibá para o ano de 2019.

De acordo com o Sindgás (2022), o GLP se apresenta como a opção mais flexível no âmbito de disponibilidade regional de fontes de energia, sobretudo quando comparado ao gás natural. As principais vantagens sobre o gás natural são: (i) logística sobre rodas já consolidada; (ii) armazenamento de fácil aplicação; e (iii) ampla rede de revenda. Ainda conforme os dados do Sindgás (2022), o GLP respondeu, em 2020, por 3,3% da matriz energética nacional. Embora possua fatores de emissões ambientais maiores em comparação aos do gás natural, ele ainda vem sendo visto no segmento industrial como uma opção energética altamente viável para casos em que inexistem outras fontes de energia, como o gás natural ou a biomassa.

Para Blair *et al.* (2018), a análise de investimento requer que os quesitos técnicos e financeiros estejam em perfeito alinhamento, de forma a evitar retrabalhos futuros. A resultante de uma análise de investimento mal dimensionada, principalmente sobre a escolha de qual fonte energética utilizar, pode acarretar uma série de problemas. Entre eles, o autor destaca: (i) baixa eficiência de processo; (ii) falta de abastecimento de combustível; (iii) aumento desnecessário dos investimentos, mais conhecidos como CAPEX (*capital expenditure*), para modificações e/ou adaptações à nova realidade energética; e (iv) aumento momentâneo ou contínuo dos custos de operação, conhecidos como OPEX (*operational expenditure*). Em suma, a falta de uma análise de investimento correta pode levar a empresa a abraçar um projeto desastroso que cause sua perda de competitividade frente aos concorrentes, ou mesmo até a sua própria insolvência.

Levando em conta esse contexto, a presente tese irá abordar a aplicação do conceito do LCOH em uma planta industrial de secagem de sangue bovino localizada em Campo Grande, no Estado de Mato Grosso do Sul. Conforme já mencionado, a cidade de Campo Grande possui oferta de gás natural, biomassa florestal e também de

GLP; dessa forma, os estudos são concentrados nessas três fontes de energia. Ainda para os cálculos de custo do valor presente de calor, é apresentado um aprimoramento do LCOH para garantir uma abrangência das características energéticas individuais, assim como dos processos de combustão em que elas serão aplicadas.

1.2. Objetivos, questão central e hipótese

Mediante a necessidade de equalizar os investimentos em geração de calor através de distintas fontes de energia cujas tecnologias possuem diferentes CAPEX e OPEX e distintos prazos de implantação e de vida útil, esta tese tem como objetivo principal:

- analisar a aplicação do método LCOH para a geração de calor em planta industrial de indústria alimentícia, comparando as tecnologias de geração através do gás natural, do GLP, e da biomassa florestal, para indicar a mais vantajosa; e, também, propor um aprimoramento do referido método, inserindo parâmetros técnicos que levem em conta as características individuais dos energéticos em seus respectivos processos de combustão para a geração de calor.

Ademais, os objetivos secundários são:

- (i) revisar a bibliografia a respeito da utilização do LCOH;
- (ii) apresentar informações sobre tipos de arquitetura a ser aplicada nos processos de combustão para geração de calor em uma planta de indústria alimentícia;
- (iii) levantar os custos necessários para cada processo de combustão;
- (iv) fazer uma análise de cada tecnologia e dos respectivos custos envolvidos.

A questão central pode ser descrita da seguinte forma:

É possível aplicar o método do LCOH para processos de tomada de decisão quanto à escolha da fonte a ser utilizada na geração de calor em indústria alimentícia e contribuir para o aprimoramento desse método com ajustes que tragam resultados superiores aos da aplicação do LCOH convencional?

Nesse sentido, a hipótese a ser investigada é que o método LCOH é útil para a tomada de decisão almejada, e a incorporação de parâmetros técnicos relativos às características individuais de cada energético frente ao seu respectivo processo de combustão pode levar a um resultado mais aderente à realidade do investimento a ser executado.

1.3. Metodologia e estrutura da pesquisa

Para o desenvolvimento desta tese, a metodologia utilizada está baseada em quatro pilares fundamentais: (i) percepção do problema; (ii) análise dos trabalhos que aplicaram o LCOH em distintas circunstâncias; (iii) levantamento de dados industriais da planta do estudo de caso, focado em custos e fator de utilização; e (iv) obtenção dos resultados e análise crítica do método LCOH aplicado em combustão industrial.

Na etapa de percepção do problema, é realizada uma análise prévia da situação industrial da planta, tipo de processo de combustão existente, dificuldades, desafios, assim como se aponta quais seriam as opções de energéticos a se utilizar no processo de combustão para a geração de calor, que poderiam entrar nas análises de LCOH.

Para a organização e classificação das referências bibliográficas, utiliza-se como plataforma de apoio o *Software SciMat (Science Mapping Analysis Tool)*. Busca-se nessa etapa encontrar modelos de LCOH aplicados de formas distintas para a geração de calor, priorizados os artigos que mais se relacionam com o tema proposto.

O pilar sobre o levantamento de dados da planta de estudo conta com visitas técnicas *in loco* para buscar informações como: (i) custos operacionais; (ii) investimentos já realizados; (iii) processo de geração de calor existente; e (iv) possíveis alternativas de arquitetura de processos de combustão.

No quarto e último pilar, são obtidos os resultados calculados do LCOH a que a tese se propõe. Após a geração dos resultados, uma ampla análise do tema é realizada. Alia-se também à análise uma visão de projetos de forma a propor soluções economicamente viáveis para a planta estudada. É também nesse último pilar que são demonstradas as lições aprendidas sobre a aplicação de um tema teórico para um caso prático.

Quanto à estrutura desta tese, ela está dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo corresponde a esta introdução, na qual foram apresentadas as motivações e a justificativa para o desenvolvimento do estudo, bem como os objetivos principais e secundários. Nela também foram contempladas a questão central e a hipótese elaborada diante do problema de pesquisa, além de breve descrição da metodologia, que será mais detalhada no terceiro capítulo do trabalho.

O segundo capítulo dedica-se à revisão da literatura, com pontos pertinentes ao método LCOH aplicado em casos distintos. Entre esses pontos, destacam-se: (i) equação do LCOH; (ii) tipos de processos aplicados; e (iii) análise bibliométrica.

O terceiro capítulo apresenta a descrição detalhada da metodologia utilizada na presente tese e aplicada para o estudo de caso. Também é nesse capítulo que são apresentadas as arquiteturas de processo de combustão para a referida planta, baseadas em soluções de engenharia disponíveis no mercado.

São apresentados, no quarto capítulo, os resultados obtidos nos cálculos realizados com o método convencional de LCOH, assim como em sua forma aprimorada para cada fonte energética: (i) GLP; (ii) gás natural; e (iii) biomassa. Apresenta-se ainda nesse capítulo o comparativo de resultados obtidos entre o método LCOH convencional e o seu modelo aprimorado proposto nesta tese.

Por fim, as considerações finais são sumarizadas no quinto capítulo, apresentando as principais respostas para a pergunta levantada, bem como uma retomada dos objetivos propostos. Nessa seção, também são destacadas as indicações de trabalhos futuros, as limitações e dificuldades encontradas para a realização da tese.

2. MÉTODO LCOH

Este capítulo tem como principal objetivo mostrar como o método LCOH vem sendo aplicado em diferentes áreas de atuação. Na primeira parte deste capítulo é demonstrado as principais funcionalidades do método nos processos que envolvem geração de calor, podendo ser ela renovável ou não. Está na primeira parte do capítulo também alguns exemplos de onde o método convencional do LCOH já foi ou pode ser aplicado. Na segunda parte é realizada uma pesquisa estatística dos artigos publicados ao longo dos anos sobre o assunto. Também são mostradas as principais áreas de concentração ao qual foram publicados os artigos.

2.1. Descrição e conceituação do método LCOH

O setor industrial é responsável por cerca de 32% do consumo de energia no mundo. Essa alta taxa de consumo energético está relacionado em parte à utilização de caldeiras e fornos para a produção de calor que é utilizado no processo. Muitos desses processos fazem utilização de fontes de energia não renováveis, e que, muitas vezes não possuem um grau de conversão térmica razoável, aumentando então as emissões de CO₂ para o ambiente (KUMAR L. *et al.*, 2019).

O calor aplicado em processos industriais demanda uma grande variedade de temperaturas. Tais temperaturas podem variar de 30°C as mais baixas, ultrapassando valores acima de 1200°C. De modo geral a maior taxa de concentração de calor utilizado no segmento industrial utiliza valores que vão até 250°C, representando algo em torno de 35% de todas as temperaturas mais utilizadas (MÜLLER *et al.*, 2014). Por volta de 30% de todo o calor até 250°C está concentrado em quatro segmentos industriais. Tais segmentos são: (i) o químico; (ii) o de papel e celulose; (iii) o alimentício; e (iv) o têxtil (DESBROSSES, 2020).

A indústria alimentícia, assim como outros segmentos industriais, possui uma gama de opções de fontes de energia que pode suprir essa demanda de calor de processo. Dessa forma, a definição de investimento precisa ser baseada em um método que proporcione uma assertividade sobre qual arquitetura de equipamentos utilizar. A métrica mais comumente utilizada para esse fim é o LCOH. O cálculo deste indicador

considera todos os custos (investimento, operação e manutenção, combustível e vida útil do equipamento) a valor presente, juntamente com o calor gerado. Assim, quando aplicado a uma tecnologia de geração de calor específica, o LCOH mede o custo total do ciclo de vida por unidade de energia produzida. A Equação 1 representa numericamente esse método de análise (EDENHOFER, O. *et al.* 2013; UECKERDT, F. *et al.* 2013).

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad \text{Eq. 1}$$

em que:

I_t = despesas de investimento no ano t (incluindo financiamento), em USD \$;

M_t = despesas de operação e manutenção no ano t, em USD \$;

F_t = despesas com a fonte de energia (combustível), em USD \$;

r = taxa de desconto, em %;

t = tempo restante de vida útil, em anos;

n = vida útil do sistema, em anos;

E_t = geração de energia térmica no ano t, em kWh.

Inúmeras aplicações podem ser utilizadas com o método LCOH. Yang T. *et al.* (2021) estudaram as aplicações de como o armazenamento sazonal de energia térmica podem facilitar a substituição do fornecimento de calor baseado em combustíveis fósseis por fontes alternativas de calor, tais como: (i) energia solar térmica; (ii) energia geotérmica; e (iii) calor residual gerado pelas indústrias. Os autores fizeram uso da metodologia do LCOH em sua forma convencional para comprar a viabilidade econômica de cada fonte de energia.

Tester J.W *et al.* (2016) aplicaram o método LCOH em estudos utilizando a fonte de energia geotérmica como substituição das fontes não renováveis como o gás natural e óleo. Em tais estudos os autores comparam os investimentos para geração de calor para residências nos Estados Unidos com diferentes cenários de temperatura, variando de 80 a 120°C. Embora os autores tenham realizados diferentes cenários

comparativos entre tecnologias, temperaturas e fontes de energia, o método LCOH utilizado foi o convencional, sem aperfeiçoamento.

Ravi K. *et al.* (2021) realizaram diversos comparativos de tecnologias híbridas para geração de calor e energia utilizando sistemas de aquecimento solar agregados em caldeiras de vapor. Os autores realizaram diversos detalhamentos técnicos em diversos segmentos industriais, passando por: (i) papel e celulose; (ii) alimentício; (iii) aquecimento residencial, dentre outros. Todos os comparativos foram realizados através do LCOH estratificado conforme método desenvolvido por Louvet *et al.* (2016). Tal estratificação foi realizada no âmbito econômico que compõem os custos de investimento, e operação.

Olasolo P. *et al.* (2016) estudaram a influencia financeira de sistemas geotérmicos para a combinação de calor e energia para residências. Através de software os autores fizeram diversas simulações para encontrar o sistema de aquecimento mais viável financeiramente para ser aplicado para os usuários finais. O método convencional do LCOH compôs a equação que comparou os diferentes cenários.

Yuanlong C. *et al.* (2019) aplicaram o LCOH convencional para determinar o custo nivelado de um sistema de aquecimento geotérmico com utilização de bomba de calor. Os autores ainda compararam diversos sistemas de troca térmica existentes no mercado, assim como suas diversas geometrias e em diferentes temperaturas para encontrar a melhor viabilidade financeira do projeto estudado.

2.2. Análise bibliométrica do método LCOH

Segundo Cobo *et al.* (2012), a análise bibliométrica é um método quantitativo para a pesquisa científica. O objetivo é mensurar a contribuição do conhecimento científico sobre as publicações realizadas em determinada área. Os indicadores resultantes desse tipo de análise são úteis para o planejamento e execução da comunidade científica sobre o sistema em que está inserida.

Para realizar a análise bibliométrica de forma eficiente se faz necessário a utilização de um software para compilar os dados. Neste quesito o software utilizado

para esta finalidade foi o SciMAT (*Science Mapping Analysis Tool*). Segundo Cobo *et al.* (2012), o SciMAT é um software que auxilia na organização dos artigos que melhor se enquadram no(s) grupo(s) de palavra(s) em que se necessita pesquisar dentro de uma base de dados conhecida.

Uma análise bibliométrica eficiente exige palavras chaves diretamente relacionadas ao tema de pesquisa. Para esta tese, foram pesquisados inicialmente os termos: (i) *Levelized Cost of Heat*; e (ii) *Levelized Cost do Electricity*. A escolha do LCOE não foi por acaso, visto que as equações utilizadas para o LCOH convencional são as mesmas.

Foram utilizadas duas bases de dados conhecidas para a realização da análise bibliométrica. Estas bases de dados foram: (i) *Scopus*; e (ii) *Web of Science*. Como resultado dessas pesquisas foram encontrados milhares de artigos relacionados, assim como inúmeras citações. Para a base de dados da *Scopus*, a Figura 1 apresenta o perfil de publicações ocorridas desde os anos 1979. Através do gráfico é possível notar o aumento exponencial de publicações sobre os temas LCOH e LCOE principalmente após os anos 2009.

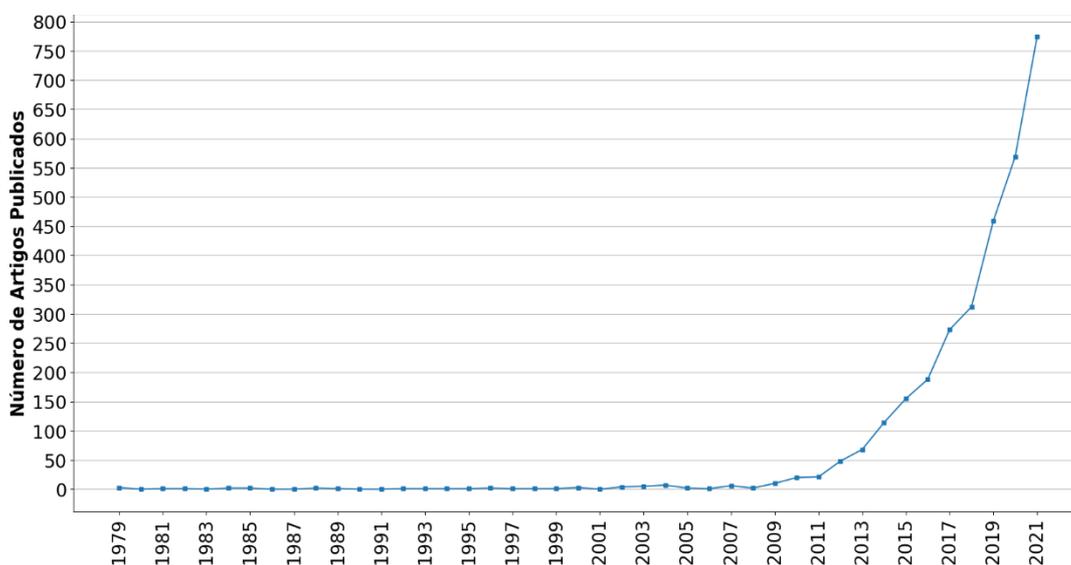


Figura 1 – Número de artigos publicados sobre LCOH pela base Scopus
Fonte: autoria própria a partir de dados da *Scopus* (2022).

Os resultados obtidos com a base de dados da *Web of Science* obedecem ao mesmo perfil apresentado pela base de dados da *Scopus*. A grande diferença está

relacionada a possibilidade de incluir as citações sobre o tema dentro dos próprios artigos publicados. A Figura 2 apresenta os resultados mencionados de publicações e citações dentro dos artigos em um intervalo de tempo que vai de 1996 até início de 2022. É possível notar também, que após 2009 os números de publicações aumentam exponencialmente, sendo acompanhada pela quantidade de citações sobre os temas.

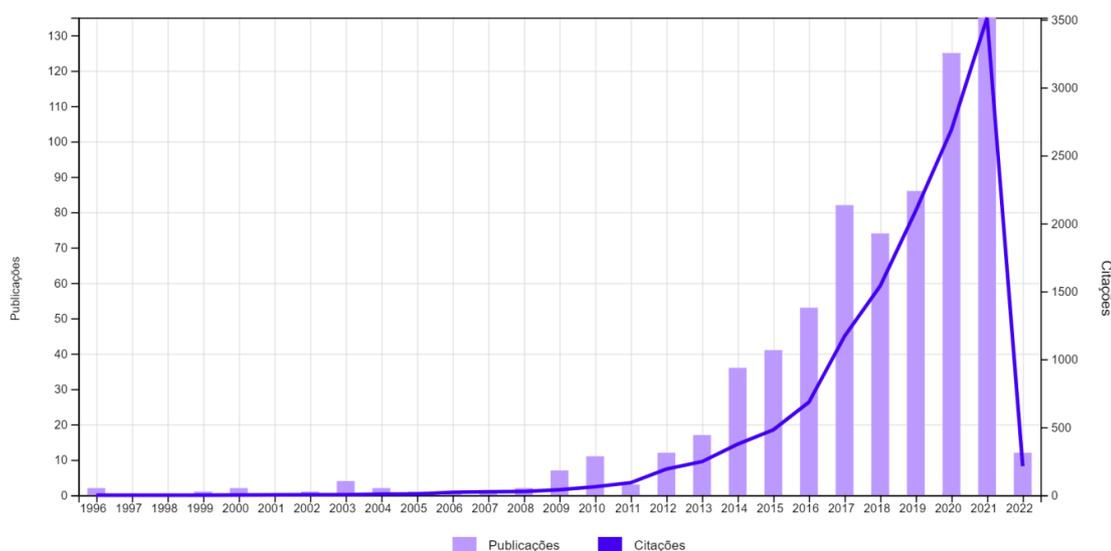


Figura 2 – Publicações e citações na linha do tempo para LCOE e LCOH
Fonte: autoria própria a partir de dados da *Web of Science* (2022).

Uma importante análise que é possível realizar está relacionado às áreas de conhecimento o qual os artigos foram relacionados. A Figura 3 traz os resultados da base de dados da *Web of Science* das áreas de concentração que mais apareceram nos últimos anos. A maior parte das publicações sobre o tema está dentro da área de conhecimento de energia e combustíveis. Justifica-se essa grande quantidade de artigos sobre energia e combustíveis devido à necessidade global de encontrar fontes alternativas em substituição às fontes fósseis de forma a reduzir os níveis de poluição global. Outra área interessante e que vem após a área de energia e combustíveis é a área da termodinâmica, muito utilizada para a geração de calor, uma importante fonte de energia secundária e amplamente utilizada no segmento industrial.

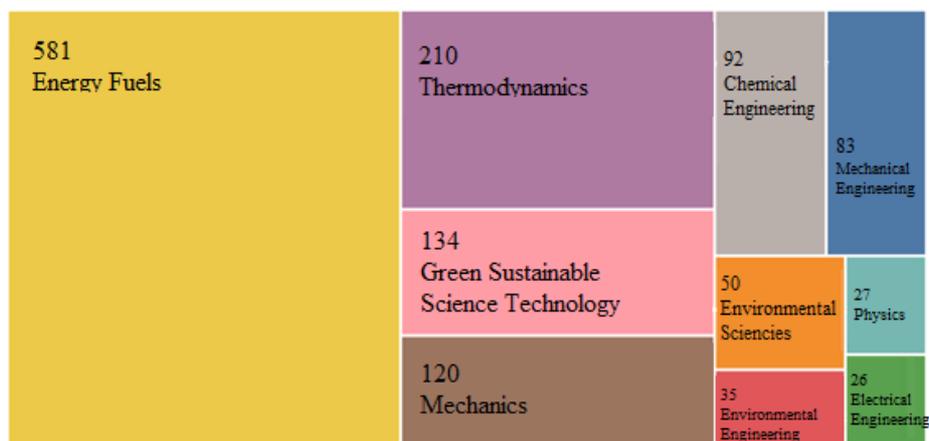


Figura 3 – Áreas de concentração de pesquisa para os termos LCOE e LCOH
 Fonte: autoria própria a partir de dados da *Web of Science* (2022).

Outro dado importante na busca realizada na pesquisa bibliométrica diz respeito à quantidade de citações. De forma a organizar os intervalos de pesquisa ainda com a base de dados da *Web of Science* foi criado a Tabela 1. A organização mostrada na tabela serve para facilitar o entendimento dos períodos estudados e que serão e demonstrados a seguir através do mapa de sobreposição. Os dados foram separados em cinco períodos, sendo que cada período possui um intervalo de tempo definido.

Tabela 1 – Períodos de pesquisa de palavras-chave

Descrição	Período
P1	1978 – 1998
P2	1999 – 2004
P3	2005 – 2010
P4	2011 – 2016
P5	2017 – 2022

Fonte: autoria própria a partir de dados da *Web of Science* (2022).

O mapa de sobreposição é uma das ferramentas de análise realizadas para as palavras-chave pesquisas. A Figura 4 mostra como o mapa de sobreposição ficou. Analisando a figura, do primeiro período (P1) para o segundo período (P2), houve uma continuidade baixa de citações, de apenas 16%. Do segundo período (P2) para o terceiro (P3) o valor de continuidade saltou para 37%, enquanto do terceiro período (P3) para o quarto se estabeleceu uma continuidade de citações de 59%. Quando observado o quarto período (P4) para o quinto (P5), é possível notar uma leve redução de apenas 1%,

estabelecendo-se em 55%. É importante ressaltar que esta leve redução não leva em conta o ano completo de 2022, ou seja, novos artigos serão lançados e podem continuar com o fator de crescimento de citações para tais palavras-chave.

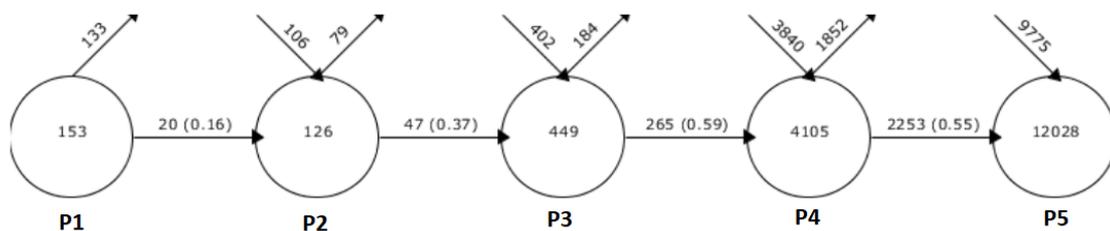


Figura 4 – Sobreposição de palavras para LCOE e LCOH na base da *Web of Science*
 Fonte: autoria própria a partir de dados da *Web of Science* (2022).

Outra maneira de se analisar as relações entre as áreas de conhecimento e seus respectivos temas abordados é por meio do mapa de redes. A Figura 5 mostra como se estabeleceu as relações para os intervalos entre P1 e P5. Quanto maior o círculo, maior é o número de citações, e, os círculos do lado direito representam os temas e os círculos do lado esquerdo representam o campo de estudo em que os temas se relacionaram. É possível notar que diversos artigos abordaram sobre fontes alternativas de energia que contribuem para a redução da emissão de CO₂. Além disso, expressivos documentos foram publicados enfatizando a área de energia renováveis como fontes alternativas de energia. Dentro dessas abordagens estão temas que buscam otimização de processo, como é o caso desta tese.

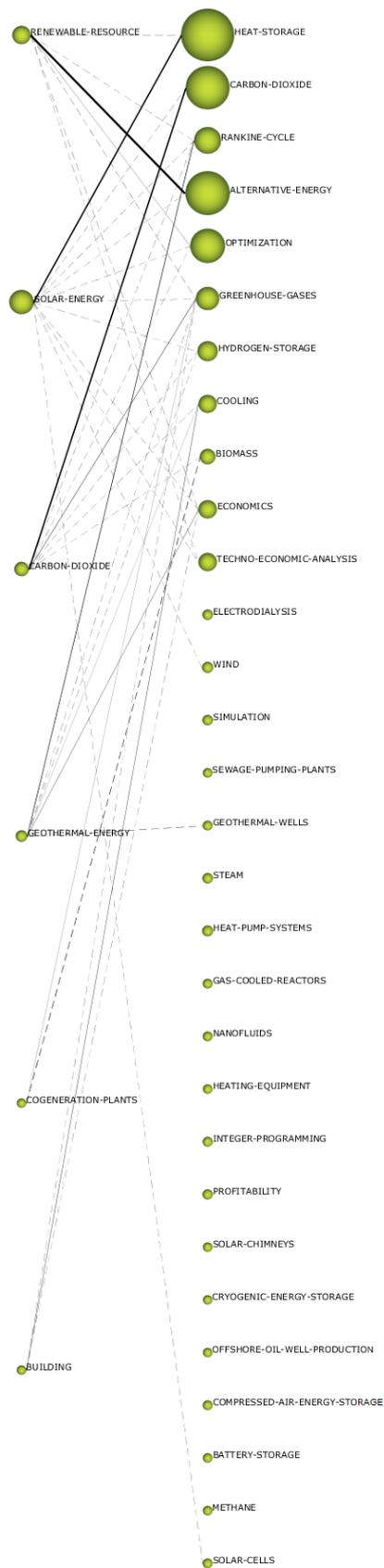


Figura 5 – Evolução das redes temáticas entre o período P1 e P5
 Fonte: autoria própria a partir de dados da *Web of Science* (2022).

3. PROPOSIÇÃO DE APRIMORAMENTO AO MÉTODO LCOH

Este capítulo tem como objetivo elucidar a metodologia utilizada para a aplicação do método LCOH numa indústria alimentícia brasileira, através de um estudo de caso na JBS S.A., situada no Estado do Mato Grosso do Sul. Na primeira parte deste capítulo são descritas as características da região e da empresa objeto do estudo, a qual servirá para a análise dos processos de geração de calor utilizando as fontes do gás liquefeito de petróleo (GLP), do gás natural e da biomassa. Em um segundo momento são propostos aprimoramentos ao método LCOH convencional, com modificação dos parâmetros de entrada relativos à eficiência de conversão dos equipamentos de geração de calor, de sorte que reflitam com mais precisão a entrega energética de cada fonte para que a empresa possa tomar a melhor decisão sobre a fonte a ser utilizada.

3.1. Fundamentos para a escolha da empresa adequada ao estudo de caso

A indústria alimentícia de proteína animal é um importante segmento no setor industrial brasileiro, com uma participação expressiva no PIB brasileiro. Em 2021, ela respondeu por 10,6% do setor secundário, o qual contabiliza a parcela do PIB gerada por todas as indústrias atuantes no país. Também foi responsável pela geração de 1,7 milhões de empregos formais e diretos, fora os indiretos (ABIA, 2022).

No contexto de produção de proteína animal, a JBS S.A., com quase 70 anos de história, é uma multinacional de origem brasileira reconhecida como uma das líderes globais na indústria de alimentos. Sediada na cidade de São Paulo, a JBS está presente em mais de 20 países, contando com cerca de 250 mil colaboradores ao redor do mundo. Além disso, ela detém um portfólio de produtos diversificado, com opções que vão desde carnes *in natura* e congelados até pratos prontos para o consumo, comercializados por meio de marcas reconhecidas no Brasil e no exterior, tais como Friboi, 1953, Swift, Seara, Seara Gourmet, Doriana, Massa Leve, Pilgrim's Pride, Swift Prepared Foods, Primo, entre outras (JBS, 2021).

Não limitada à produção de proteína de origem animal, a JBS possui ainda outros negócios dentro de seu portfólio empresarial, atuando em áreas correlacionadas, como couro, biodiesel, colágeno, envoltórios naturais, higiene pessoal e limpeza,

embalagens metálicas, transportes e soluções em gestão de resíduos, e reciclagem, que promovem a sustentabilidade de toda a cadeia de valor do negócio (JBS, 2021).

Para oferecer a proteína animal da forma em que esta costuma ser consumida no Brasil e no exterior, a primeira etapa consiste em separar o sangue da carne animal. Em uma planta frigorífica de bovinos, por exemplo, o volume de sangue gerado diariamente no processo de separação se tornaria um enorme passivo ambiental se não houvesse um processamento posterior através da secagem e redução do elevado volume líquido. Faz-se necessária, então, a aplicação de calor para que ocorra o processamento do sangue animal, visto como um subproduto secundário, uma vez que pode ser parcialmente utilizado com o aproveitamento das hemácias na fabricação de ração para animais e, também, com a utilização de plasmas para a alimentação humana, conforme será visto em detalhe a seguir. Parte significativa da energia consumida nesse tipo de indústria é justamente voltada para essa finalidade (ABIA, 2022).

A decisão de qual fonte de energia — e da tecnologia a ela associada — trará a melhor relação entre custo e benefício não é trivial. É aí que entra a contribuição da metodologia do LCOH, que se torna bastante útil nessa definição. A escolha da planta do estudo de caso levou em consideração a necessidade de tomada desse tipo de decisão e, ainda, a disponibilidade local de fontes de energia que pudessem viabilizar uma eventual escolha.

Localizada na cidade de Campo Grande, capital do Estado de Mato Grosso do Sul, Região Centro-Oeste do Brasil, a planta selecionada situa-se em meio a uma região com amplo acesso ao gás natural. Esse gás chega ao Estado através do Gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol). Na região também há ampla distribuição do GLP provida por inúmeros fornecedores locais, além da biomassa advinda de várias fazendas de eucaliptos, situadas nas proximidades da planta da JBS. Assim, a escolha da empresa para a aplicação prática do LCOH recaiu sobre uma planta de secagem de sangue de origem bovina da empresa JBS S.A., a qual conta com amplo acesso aos dados de fontes de energia relevantes a esta investigação.

Quando o assunto é oferta, logística e abastecimento de GLP, o município de Campo Grande não se diferencia da maioria dos municípios brasileiros. Vale observar

de Mato Grosso do Sul duas grandes empresas produtoras de celulose: a Eldorado Brasil e a Suzano Papel e Celulose. Ambas as empresas se situam na área de Três Lagoas, cuja cidade principal se localiza a 327 km de distância da capital de Mato Grosso do Sul. A área de Três Lagoas faz divisa com a área de Campo Grande; essas localidades estão destacadas em cores azul e laranja, respectivamente, na Figura 7.



Figura 7 – Mapa de áreas do Estado do Mato Grosso do Sul
Fonte: Governo do Mato Grosso do Sul (2021).

Com 1,14 milhões de hectares de árvores plantadas, o Estado do Mato Grosso do Sul possui 12,66% do total nacional da área cultivada com o plantio de árvores. Do montante de árvores plantadas, somente o eucalipto (*Eucalyptus*) representa 96% desses 1,14 milhões de hectares. O restante fica distribuído entre pinus (*Pinus*), com 0,1 milhões de hectares (1,75%), e as demais espécies, também com 0,1 milhões de hectares (1,75%), como pode ser visualizado no destaque em vermelho da Figura 8. Embora não seja possível quantificar ao certo o volume disponível de madeira destinada à geração de energia térmica, nota-se que o Estado está bem suprido dessa biomassa (IBÁ, 2020).

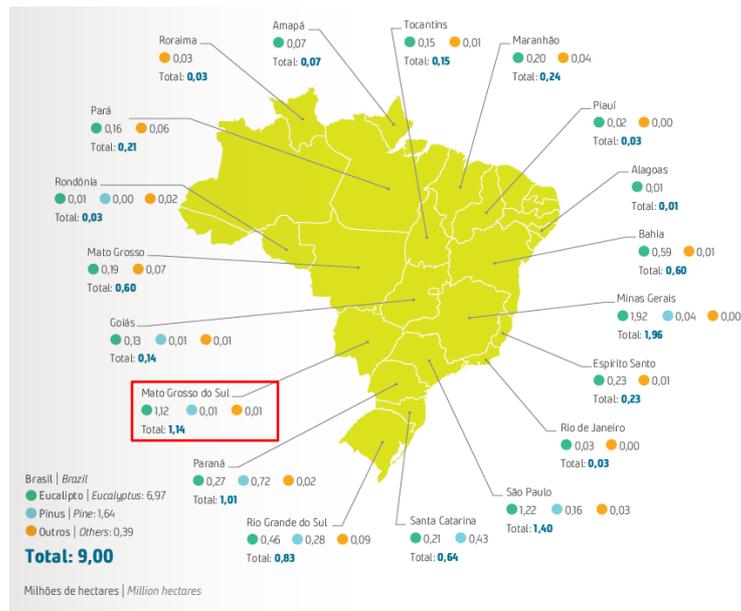


Figura 8 – Mapa de florestas plantadas no Brasil
 Fonte: Ibá (2020).

Quanto à planta do estudo de caso, observa-se que sua operação comercial teve início em 2017. Trata-se de uma planta de processamento de sangue de origem bovina proveniente das outras unidades industriais da empresa JBS. Para a secagem sanguínea, processo que será detalhado na sequência, a JBS utiliza-se de dois secadores tipo *spray dryers*. Esses equipamentos são responsáveis por entregar dois produtos secos para a comercialização: as hemácias e o plasma.

O processo de secagem de produtos líquidos por equipamentos do tipo *spray dryer* é empregado em diversos setores industriais, como o alimentício, o químico, o petroquímico, entre outros. Essa tecnologia é aplicada quando se deseja obter resultados com o mínimo de degradação de propriedades químicas e físicas de determinados produtos, permitindo inclusive estabilizar o produto líquido antes de sua secagem completa, o que evita oxidações (SPRAY PROCESS, 2021).

A secagem de um produto líquido dentro de um equipamento *spray dryer* ocorre de maneira praticamente instantânea. O processo se inicia com a exposição do sangue animal a uma corrente de gases quentes de maneira controlada, que é forçada por ventiladores para dentro de uma câmara de secagem com um volume previamente determinado. O líquido que se deseja secar é bombeado para dentro do equipamento, e, por meio de um atomizador, são geradas microgotas. As microgotas, quando em contato

direto com os gases quentes, evaporam-se instantaneamente, livrando o produto da água nele contida de maneira eficiente (Figura 9).

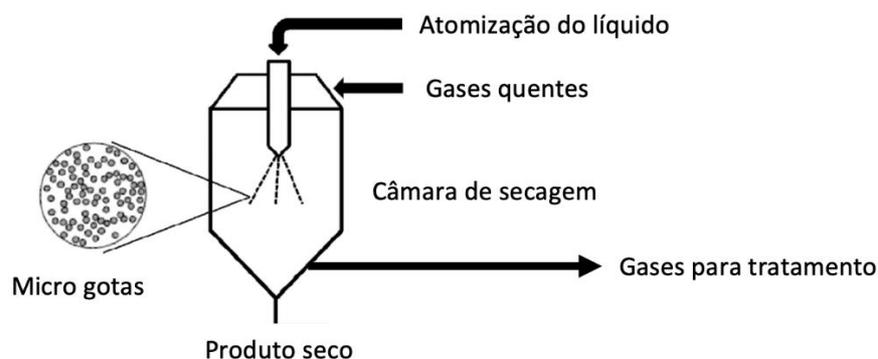


Figura 9 – Processo de secagem de um equipamento *spray dryer*
Fonte: Spray Process (2021).

Além das vantagens mencionadas de se utilizar o *spray dryer* no processo de secagem, essa opção ainda proporciona a redução de custos logísticos. Isso ocorre em decorrência da redução dos pesos e volumes dos subprodutos que interessam — hemácias e plasma —, além da estabilização desses subprodutos, preparando-os para a estocagem (SPRAY PROCESS, 2021).

Para fins de descrição dos produtos obtidos durante o processamento da planta estudada, o sangue sob uma análise macroscópica contém também leucócitos, além das hemácias e do plasma. As hemácias são aquelas que dão o tom avermelhado ao sangue; os leucócitos, por sua vez, possuem tom esbranquiçado; e, por último, o plasma possui um tom amarelado. Embora o sangue apresente esses três produtos em sua forma macroscópica, para o tipo de industrialização realizado na planta da JBS, o resultado gera apenas dois componentes de interesse comercial: (i) as hemácias, que são utilizadas como componente de ração animal; e (ii) o plasma, que é usado como componente de produtos para a alimentação humana (Figura 10).



Figura 10 – Hemácias (tom escuro) e plasmas após processamento
Fonte: JBS (2019).

Para entender melhor o processo em toda a sua completude, vale destacar que a secagem envolve basicamente sete etapas. Inicia-se pelo recebimento da matéria-prima, qual seja, o sangue bovino na forma líquida, correspondente à etapa 1 da Figura 11. Esse sangue chega por meio de caminhões-tanque refrigerados advindos de unidades frigoríficas, nas quais foi realizado o abate de animais, situadas a uma distância que pode variar de 200 km a 2.000 km, em média.

Na segunda etapa, uma amostra de sangue é coletada e analisada para verificar a qualidade do material. Avalia-se, nesta etapa, se o sangue não está coagulado e se ele não se deteriorou durante o processo de transporte. Estando fora dos padrões de qualidade, por exemplo, o produto é enviado para o biodigestor da empresa para a produção de biometano, juntamente com outros resíduos.

Na etapa 3, o sangue previamente analisado é então armazenado em tanques refrigerados. Na etapa seguinte, inicia-se o processo de industrialização do sangue, em que ocorre a separação física por processo de centrifugação. Separam-se, então, as hemácias, que dão o tom avermelhado ao sangue, do plasma, que contém também os leucócitos. Este último segue para a etapa 5, na qual é realizada a secagem, obtendo-se, assim, o plasma seco na forma como será comercializado. Já as hemácias são bombeadas para o processo de secagem da etapa 6, dando origem às hemácias secas, após o término da secagem. Por fim, ambos os produtos são estocados antes da comercialização final, que ocorre na etapa 7.

Esta tese aborda os processos que fazem utilização de calor, envolvidos nas etapas 5 e 6 do fluxograma ilustrado na Figura 11.

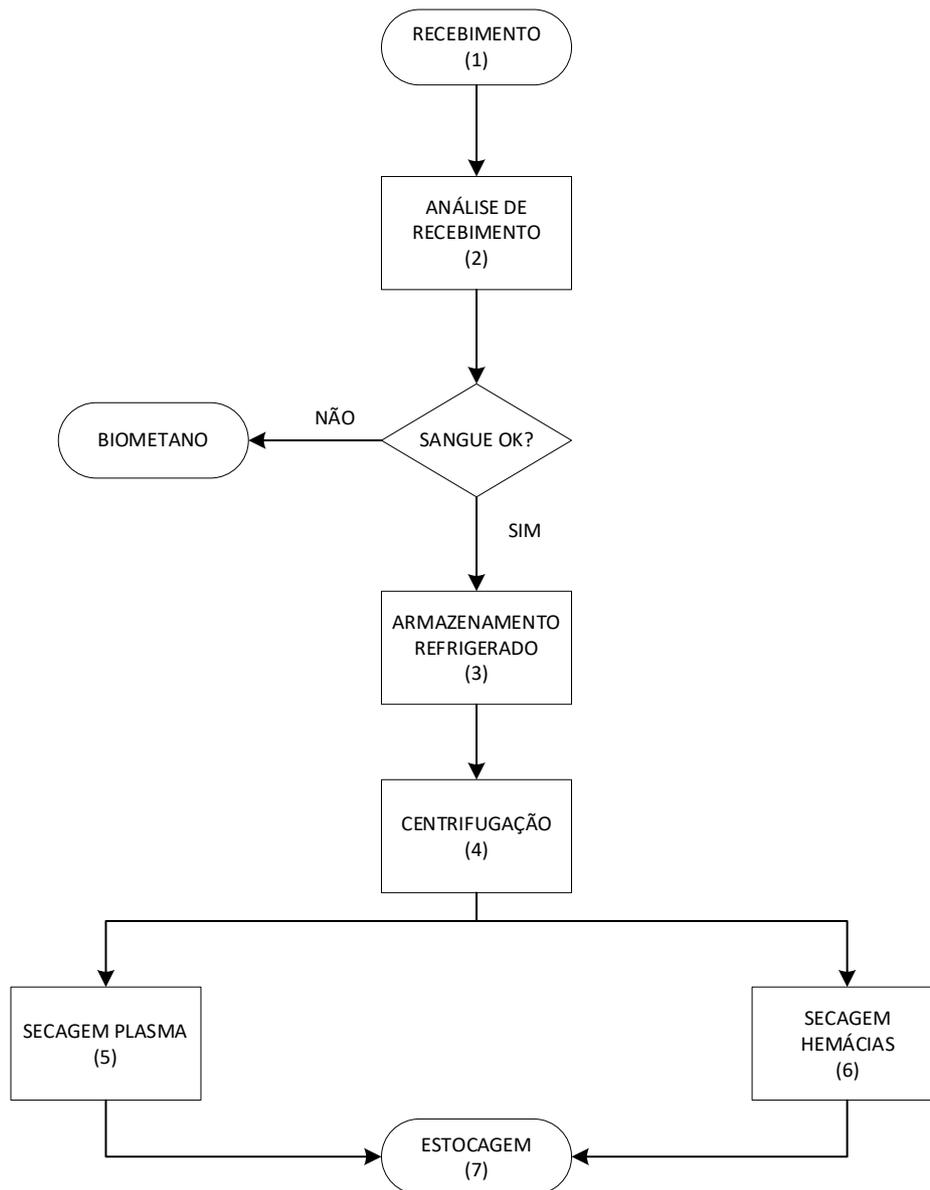


Figura 11 – Fluxograma do processo de secagem de sangue de origem animal
 Fonte: autoria própria a partir de dados de processo da JBS (2019).

3.2. Delineamento da pesquisa

De acordo com Trama, C.P. *et al.* (2021), o LCOH é frequentemente citado como uma medida conveniente da competitividade de diferentes tecnologias e fontes de energia para a geração de calor. Ele representa o custo unitário por kWh, com unidades monetárias descontadas, que agrupam desde a construção da planta até os custos de operação, manutenção e demais necessidades existentes para a geração de calor durante todo o seu ciclo de vida útil econômico.

Os cálculos de LCOH presentes nesta tese utilizam dados reais do processo produtivo da planta de secagem de sangue bovino da JBS. O período de dados coletados foi de 24 meses, tendo como ponto de partida o início da operação comercial da planta, que se deu em abril de 2017. De forma a obter resultados de forma direta, as informações referentes às etapas 5 e 6 foram agrupadas nas categorias de custo fixo e custo variável. Outras formas de dados foram coletadas de maneira pontual: (i) dados técnicos de equipamentos; (ii) dados de energia dos combustíveis; (iii) dados de processos como temperaturas, volume processado, entre outros. A Tabela 2 resume a maneira como foram organizados os dados da planta analisada.

Tabela 2 – Organização dos dados coletados in loco

Descrição	Tipo de organização
Custo fixo	Média do período
Custo variável	Média do período
Dados de equipamentos existentes	Pontual
Dados de energia dos combustíveis	Pontual
Dados padrão de operação	Pontual
Dados de processo	Média do período

Fonte: o autor.

Os dados de energia dos combustíveis são essenciais para realizar cálculos de consumo em processo de geração de calor. Faz-se uso ainda de informações de energia, mais especificamente relativas ao poder calorífico inferior (PCI). A Tabela 3 mostra os valores considerados para fins de cálculos no método LCOH desta tese. Os dados pontuais das medições de energia são fornecidos: (i) pela Ultragaz (GLP) e (ii) pela MSGÁS (gás natural). O valor de energia da biomassa florestal foi obtido de relatório de poder calorífico realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e fornecido pela empresa. É importante ressaltar que a energia da biomassa varia conforme a umidade, portanto, para a tabela, considera-se uma umidade de 40%.

Tabela 3 – Poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis

Descrição	Sigla	Valor	Unidade
Poder calorífico inferior do GLP	PCI_{GLP}	46.046	kJ/kg
Poder calorífico inferior do gás natural	PCI_{GN}	36.000	kJ/m ³
Poder calorífico inferior da biomassa florestal	PCI_{BIO}	10.883	kJ/kg

Fonte: adaptado de MSGÁS, Ultragaz e IPT (2020).

Para complementar os valores técnicos de combustíveis, somam-se os custos unitários praticados. Todos os custos apresentados neste projeto foram repassados pela unidade de negócio em que ocorreu este estudo de caso, e possuem preço sem impostos. São indicados na Tabela 3 os valores de custo unitário das fontes de energia utilizadas para a conversão de calor: (i) GLP, (ii) gás natural e (iii) biomassa. Também são apresentados os custos unitários para a energia elétrica e para o óleo diesel, combustível usado para a movimentação interna de biomassa. Vale ressaltar que esta tese não abordará nenhuma questão de impostos (créditos ou afins). Outro ponto importante é que os valores de referência listados são uma média do período de 2019 e podem ou não representar os valores atuais (Tabela 4).

Tabela 4 – Média de preços aplicados no estudo de caso

Descritivo	Sigla	Valor (USD \$)	Unidade
Preço do GLP	Pr_{GLP}	0,58	USD \$/kg
Preço do gás natural	Pr_{GN}	0,35	USD \$/m ³
Preço da biomassa florestal	Pr_{BIO}	38,29	USD \$/ton
Preço da energia elétrica	Pr_{EE}	66,60	USD \$/MWh
Preço do diesel	Pr_D	0,74	USD \$/litros

Fonte: adaptado de JBS (2020).

A descrição da arquitetura atual de geração de calor utilizada pela empresa se faz necessária para introduzir outras arquiteturas propostas neste trabalho. Para iniciar, a empresa possui dois secadores (*spray dryers*) fisicamente idênticos, ambos com queimador a gás combustível. Assim, o processo de geração de calor original da planta possui em sua composição global os seguintes equipamentos: (i) queimador, (ii)

trocador de calor e (iii) secador (*spray dryer*). É possível notar que os gases de combustão não entram em contato direto no secador, conforme ilustrado na Figura 12.

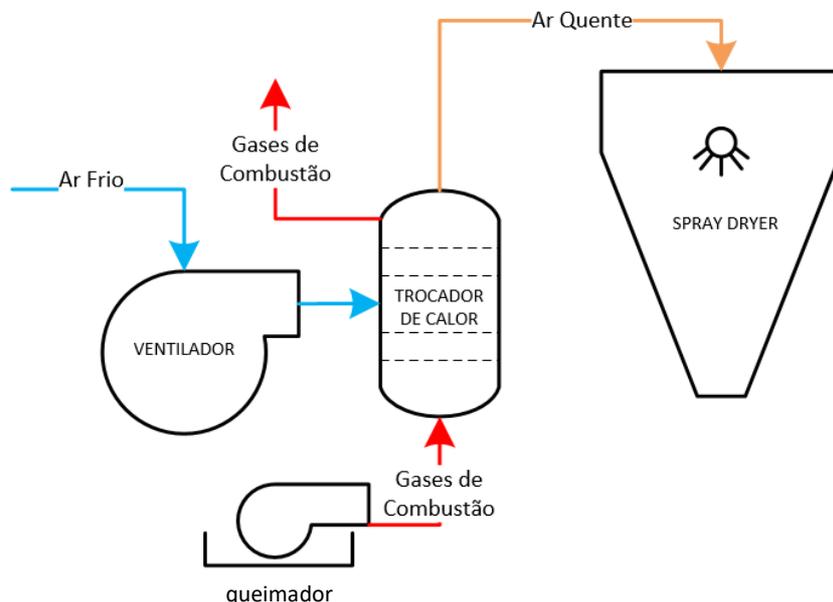


Figura 12 – Fluxo da concepção original dos secadores (*spray dryers*)
Fonte: autoria própria a partir de dados da JBS (2019).

Originalmente, a planta foi concebida para utilizar o gás liquefeito de petróleo (GLP) como combustível para a geração de calor. O calor gerado e utilizado no *spray dryer* para a secagem das hemácias e plasma é proveniente de troca térmica indireta, ou seja, os gases de combustão gerados no queimador de GLP não entram em contato com o produto. Por meio de uma camisa térmica, o ar frio insuflado se aquece, entra no *spray dryer* e, em contato com o produto úmido, proporciona a sua secagem. Já os gases de combustão são eliminados pela atmosfera através de uma chaminé. A Figura 13 mostra de forma ilustrativa a troca térmica indireta que ocorre na camisa térmica.

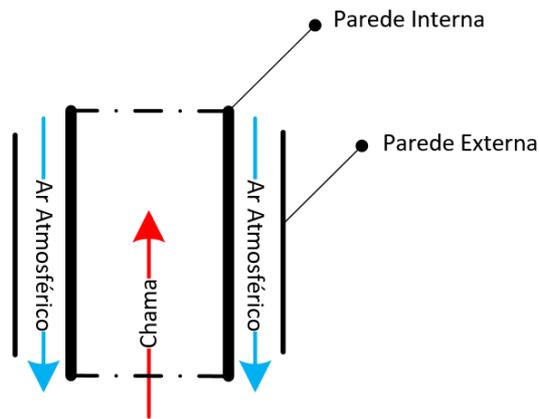


Figura 13 – Tipo de queima do GLP com troca indireta de calor
Fonte: autoria própria.

Embora não seja o foco do trabalho um olhar aprofundado de engenharia, ele se faz necessário para embasar as ideias propostas. Dessa forma, analisando o detalhe do trocador de calor apresentado na Figura 13, podem-se destacar três tipos distintos de perdas térmicas: (i) as perdas de calor para o meio externo do trocador de calor; (ii) as perdas de calor que ocorrem no processo de troca térmica interna da camisa térmica; e (iii) as perdas por reação química ocorridas durante o processo de conversão química da fonte de energia para calor. A ilustração na Figura 14 também aponta as zonas de perdas de calor para o meio que ocorrem em um sistema de troca de calor indireta, reduzindo a eficiência de troca térmica global e, conseqüentemente, aumentando o custo de operação do conjunto devido ao aumento do consumo de combustível.

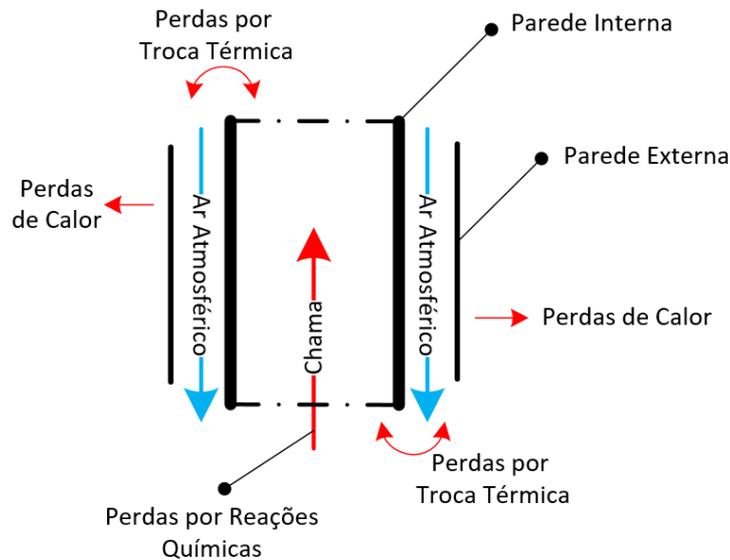


Figura 14 – Fluxo das correntes para troca térmica
 Fonte: autoria própria.

Por se tratar de estudo de caso em uma planta industrial existente, algumas opções tecnológicas são propostas. Para melhor estabelecer os cálculos comparativos entre combustíveis (GLP, gás natural e biomassa) para método LCOH, propõe-se a utilização de GLP com transferência de calor por contato direto ao produto e por contato indireto para efeito comparativo. A utilização do gás natural segue a mesma linha da combustão do GLP, valendo-se de troca térmica por contato direto e indireto.

Para as tecnologias de combustão de biomassa, a troca térmica será por contato inicial indireto, e final direto. Para os equipamentos que utilizam biomassa, as trocas térmicas serão da seguinte forma: (i) o vapor produzido na caldeira a vapor troca calor em um trocador de calor vapor / ar, já o ar aquecido entra em contato direto com o produto dentro do *spray dryer*; (ii) os gases quentes produzidos no gerador de calor vão para um trocador de calor gás / ar, o ar aquecido recebe calor posterior dos gases de combustão do queimador de GLP e este entra em contato direto com o produto dentro do *spray dryer*. Basicamente, a organização do estudo envolvendo as tecnologias propostas e as fontes de energia utilizadas são organizadas conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Organização das tecnologias para o estudo de caso

Combustível	Tecnologia aplicada	Tipo de troca térmica	Sazonalidade energética (*)
GLP	Queimador	Direta Indireta	Não possui
Gás natural	Queimador	Direta Indireta	Não possui
Biomassa florestal	Gerador de gás quente	Indireta e direta	Possui
Biomassa florestal	Caldeira a vapor	Indireta e direta	Possui

(*) Sazonalidade energética refere-se a oscilações na qualidade do combustível que possam impactar na eficiência energética do equipamento de forma considerável.

Fonte: autoria própria.

3.3. Tecnologias de geração de calor aplicadas ao estudo de caso

As tecnologias de geração de calor utilizadas em processos industriais possuem particularidades para cada tipo de combustível. Para se aprofundar de forma eficiente nos custos que são aplicados dentro da equação do LCOH, assim como melhor analisar quais seriam os impactos energéticos e financeiros da alteração do combustível empregado, o presente trabalho focou nas soluções a seguir.

3.3.1. Conceito utilizando a combustão do GLP

O conceito de utilização do GLP para a geração de calor em processos industriais está basicamente centralizado em empregar um equipamento denominado queimador. No processo existente na planta da JBS, utilizando-se da fonte de energia proveniente do GLP, a chama gerada através do processo de combustão do GLP gera os gases quentes que percorrem a camisa térmica e troca calor de forma indireta na camisa térmica, mesmo processo já demonstrado anteriormente. A nova proposta irá valer em retirar a camisa térmica, e agregar o volume de ar necessário para atingir a temperatura de operação do *spray dryer* de 220°C para a secagem dos produtos (ver Figura 15).

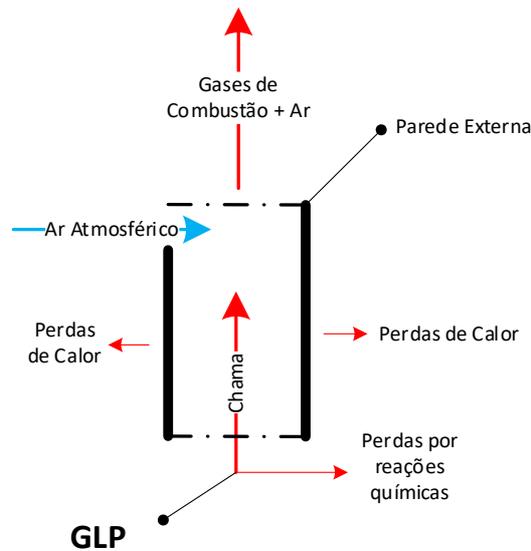


Figura 15 – Proposta de modificação da troca térmica indireta por direta
 Fonte: autoria própria.

A proposta de alteração de troca térmica indireta por direta utilizando o GLP como fonte de energia não altera o fluxo existente do processo de secagem. Embora a proposta de modificação do tipo de troca térmica ocorrida entre os gases de combustão após queimador de GLP com o ar atmosférico altere fisicamente a camisa térmica existente, ele não altera o *layout* do processo de secagem. A diferença nessa alteração ficará por conta dos gases: antes eliminados por uma chaminé, agora irão incorporar o processo de secagem e ser eliminados para a atmosfera após tratamento de gases pós-secagem do produto úmido. A principal vantagem desse tipo de alteração é o ganho de eficiência de troca térmica, atingindo cerca de 10%, segundo dados do fabricante do *spray dryer* (SPRAY PROCESS, 2019). Dessa forma, o novo fluxo de gases se comporta conforme ilustrado pela Figura 16.

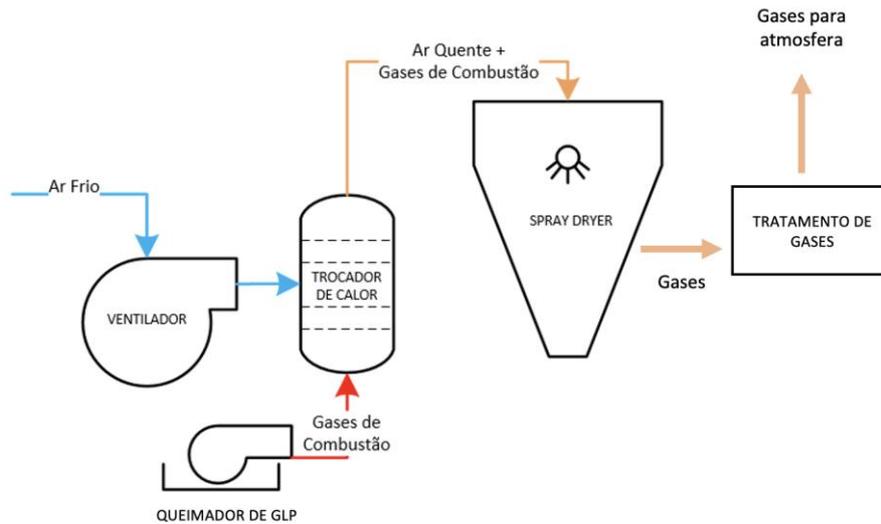


Figura 16 – Fluxo de gases com troca térmica por contato direto
 Fonte: autoria própria.

3.3.2. Conceito utilizando a combustão de gás natural

A combustão do gás natural se assemelha ao processo utilizado com o gás GLP. Assim como proposto no conceito de combustão de GLP, uma pequena modificação foi incluída também para o gás natural. No sistema originalmente concebido, os gases de combustão do GLP trocam calor de forma indireta com o ar frio, sendo que o ar, depois de aquecido, segue até o *spray dryer* para a secagem dos produtos. Na configuração proposta com o gás natural, estabeleceu-se a junção entre o ar frio e os gases de combustão. Dessa forma, o produto do ar frio atmosférico com os gases de combustão é o responsável por realizar a secagem dos produtos úmidos, sendo sua temperatura controlada em 220°C. O novo fluxo de gases está ilustrado pela Figura 17.

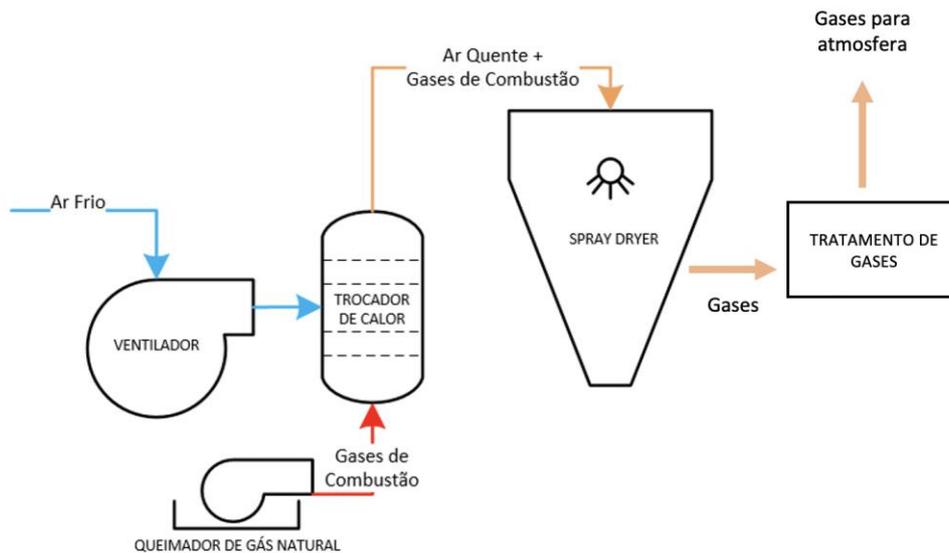


Figura 17 – Fluxograma utilizando o gás natural com troca de calor direto
 Fonte: autoria própria.

O principal benefício na alteração da troca térmica indireta por direta é o aumento da eficiência global do sistema em 10%, conforme dados do fabricante (SPRAY PROCESS, 2019). Esse benefício ocorre justamente por eliminar um ponto de perda térmica, que ocorre quando os gases de combustão aquecem o ar frio atmosférico sem estar em contato direto. Comparando o sistema original com o proposto, têm-se: (i) GLP com troca de calor indireta e (ii) gás natural com troca de calor direta. As perdas para o novo processo de gás natural sugerido, utilizando-se troca direta de calor, ficam resumidas em: (i) perdas para o meio e (ii) perdas químicas. O comparativo entre as perdas por contato indireto com as perdas por contato direto é ilustrado na Figura 18.

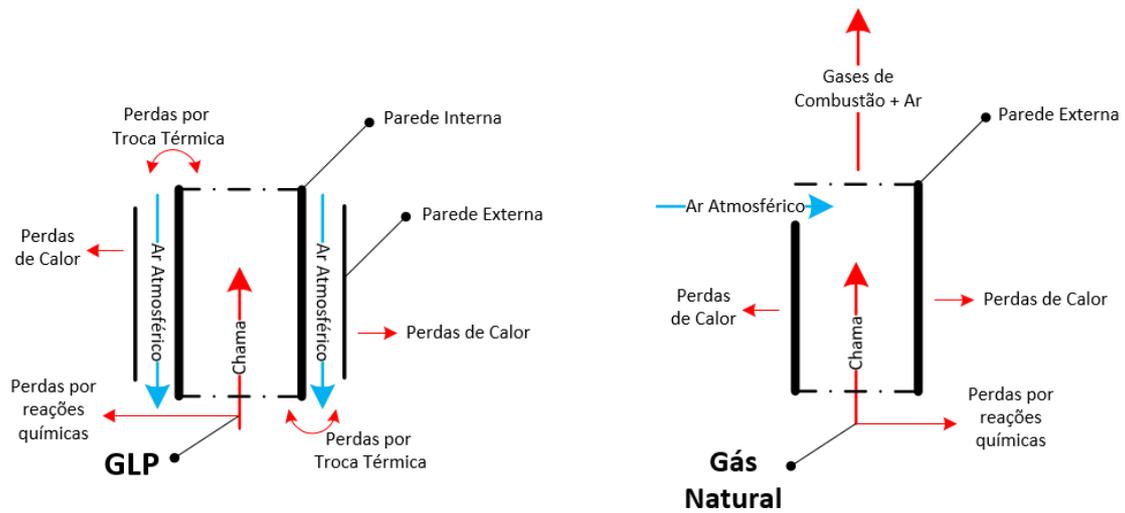


Figura 18 – Comparativo de troca térmica direta e indireta para GLP e gás natural
 Fonte: autoria própria.

i) Custos operacionais dos equipamentos que utilizam gás

Os equipamentos que operam utilizando fontes de energia no estado gasoso possuem necessidade menor de mão de obra quando comparados a sistemas que usam a biomassa como fonte de energia. Para o caso específico que ocorre na planta da JBS de secagem de sangue bovino, o queimador de GLP está localizado ao lado do *spray dryer*. Dessa forma, a planta da JBS não necessita de mão de obra adicional para poder operar o queimador, esteja ele operando com GLP ou com gás natural. A Figura 19 ilustra a posição do queimador de gás frente ao *spray dryer* corroborando sobre a não necessidade de operação adicional.

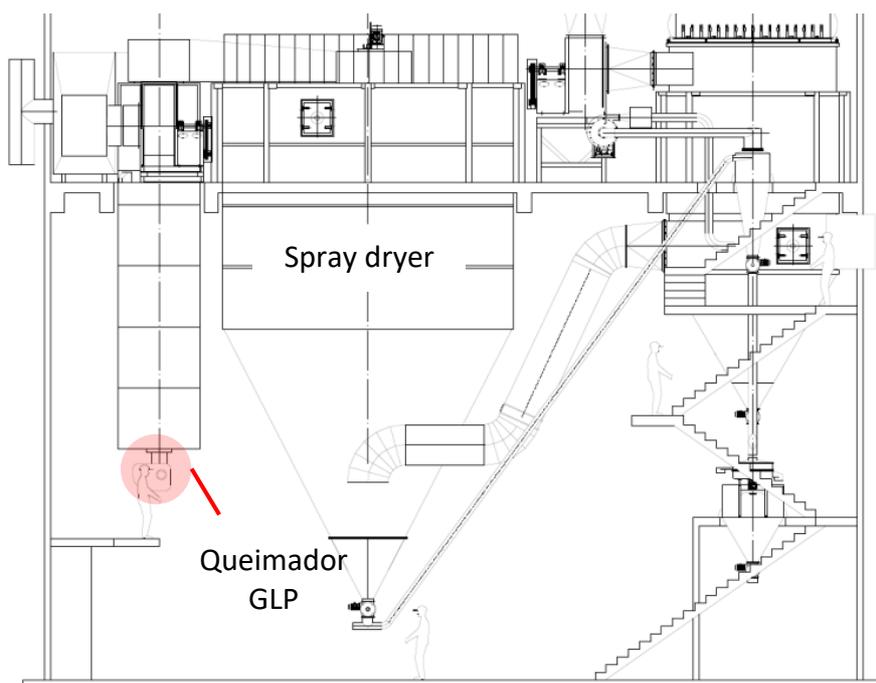


Figura 19 – Posição do queimador de GLP no *spray dryer*
 Fonte: autoria própria a parti de dados da JBS (2019).

3.3.3. Conceito utilizando a combustão de biomassa florestal

Quando se analisa preço por preço, a biomassa florestal é altamente competitiva frente a combustíveis fósseis no Brasil. Existem diversos tipos de configurações de sistemas que podem ser aplicados conforme necessidade e particularidade do processo consumidor de calor. Para o presente estudo de caso, duas configurações utilizando biomassa são analisadas, sendo elas: (i) gerador de gás quente (comumente conhecido como gerador de calor seco) e (ii) caldeira a vapor.

i) Gerador de gás quente

Existem diversos fabricantes de gerador de gás quente a biomassa no Brasil e, embora utilizem os mesmos conceitos de combustão, cada um possui sua particularidade.

Os dados do equipamento utilizado para fins de estudo, a análise da viabilidade técnica e a análise econômica são da fabricante Biocal Burntech. Essa empresa foi escolhida por possuir um descritivo técnico detalhado, facilitando as análises do método LCOH. O trabalho irá utilizar os valores já calculados pelo fabricante para a eficiência

térmica global do sistema, tido por 80%. Os demais dados técnicos do gerador de gás quente movido a biomassa estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados do gerador de gás quente estudado

Descrição	Parâmetro
Fabricante	Biocal Burntech
Equipamento	Gerador de gás quente
Modelo	MSRB-60
Tipo	Seco
Processo	Indireto – trocador ar/gás
Temperatura de saída dos gases para o trocador	500°C
Temperatura de saída do ar quente do trocador	200°C
Área de queima da fornalha	60 m ²
Área do trocador de calor	120 m ²
Comprimento do duto trocador para secador	40 m
Combustível	Cavaco de eucalipto
Umidade do combustível	40%
Poder calorífico inferior (PCI)	10.883 kJ/kg
Eficiência do sistema	80%

Fonte: Biocal Burntech (2019).

Para um estudo completo, além dos dados de eficiência térmica, tornam-se necessários ainda os dados de consumo de energia elétrica para compor os custos da planta. Dessa forma, são considerados também os equipamentos periféricos do gerador de gás quente no quesito potência elétrica instalada, assim como sua potência elétrica consumida considerando o ponto de seleção ditado pela geração de calor na carga nominal. Sendo assim, a potência elétrica do equipamento operando na carga nominal é de 77,57 hp (Tabela 7), ou 57,84 kW. É importante ressaltar que os estudos foram baseados sempre na carga nominal de cada equipamento, de forma a extrair a melhor condição operacional e de eficiência.

Tabela 7 – Potência elétrica instalada e consumida pelo gerador de gás quente

Equipamento	Potência instalada (hp)	Potência consumida (hp)
Ventilador ar primário	7,50	5,16
Ventilador ar secundário	4,00	3,49
Exaustor	75,00	45,4
Ventilador de ar <i>mixer</i> 1	7,50	3,38
Ventilador de ar <i>mixer</i> 2	7,50	3,48
Silo dosador	12,60	6,70
Grelha móvel	6,00	3,76
Moega de alimentação	8,00	4,10
Esteira de alimentação	4,00	2,10
Total	132,10	77,57

Fonte: Biocal Burntech (2019).

Diferentemente do que ocorre com a combustão de GLP e a de gás natural, que demandam pequenas áreas para a instalação dos equipamentos, na combustão de biomassa o espaço requerido é muito maior. Desse modo, principalmente para uma planta já existente, o desafio de área para instalar os equipamentos que utilizam biomassa torna-se maior. Como o sistema original não havia sido pensado para uma futura conversão para biomassa, algumas adaptações se fizeram necessárias para que tal processo de calor se adaptasse da melhor forma possível, mantendo, assim, os requisitos de qualidade do produto após secagem.

A principal premissa assumida na adaptação do gerador de gás quente a biomassa no processo de secagem originalmente concebido para gás foi manter o queimador a GLP para complementar o calor necessário para o processo de secagem. Sendo assim, o fluxo do processo se estabelece da seguinte forma: (i) a biomassa alimenta o gerador de gás quente gerando os gases de combustão após a conversão química da biomassa; e (ii) os gases de combustão então trocam calor de forma *indireta* em um trocador de calor gás/ar, gerando o ar quente. O ar quente por sua vez recebe calor adicional proveniente da combustão do GLP por contato direto, e sua resultante é

encaminhada para dentro do *spray dryer*. O fluxo proposto para incluir o gerador de gás quente à biomassa é ilustrado pela Figura 20.

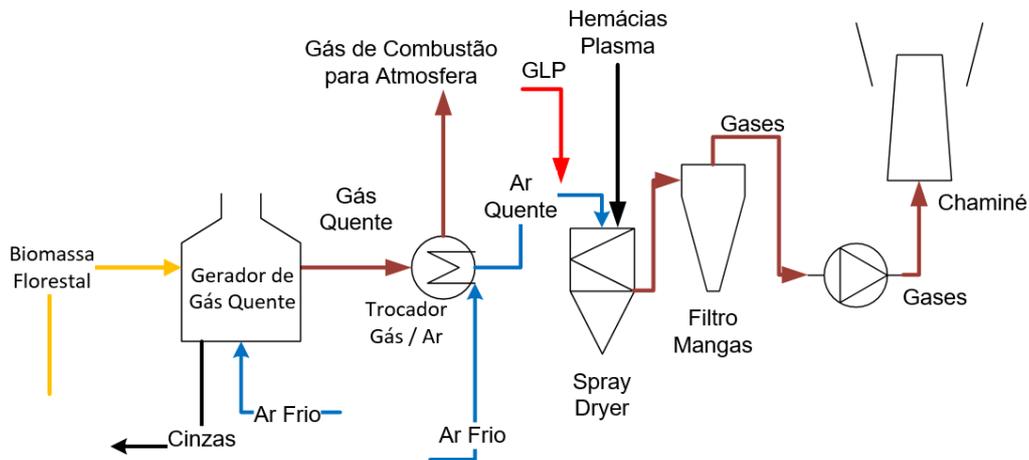


Figura 20 – Configuração proposta para secagem utilizando biomassa e GLP
Fonte: autoria própria.

Tomando como base um estudo de *layout* proposto para a planta da JBS, o gerador de gás quente ficaria instalado na divisa com o prédio onde se localizam os dois *spray dryers*. O fluido que escoar para os *spray dryers* é o ar, e, por sua baixa eficiência em reter o calor a longas distâncias, o equipamento precisa estar locado o mais próximo possível da fonte consumidora e ainda receber complemento de calor. A limitação de área da planta existente impossibilita aplicar um conceito otimizado de *layout* dos equipamentos a biomassa que possa favorecer melhores condições de armazenamento do combustível. Nota-se na Figura 21 a grande dimensão do conjunto dos equipamentos (hachurados) frente ao *spray dryer*.

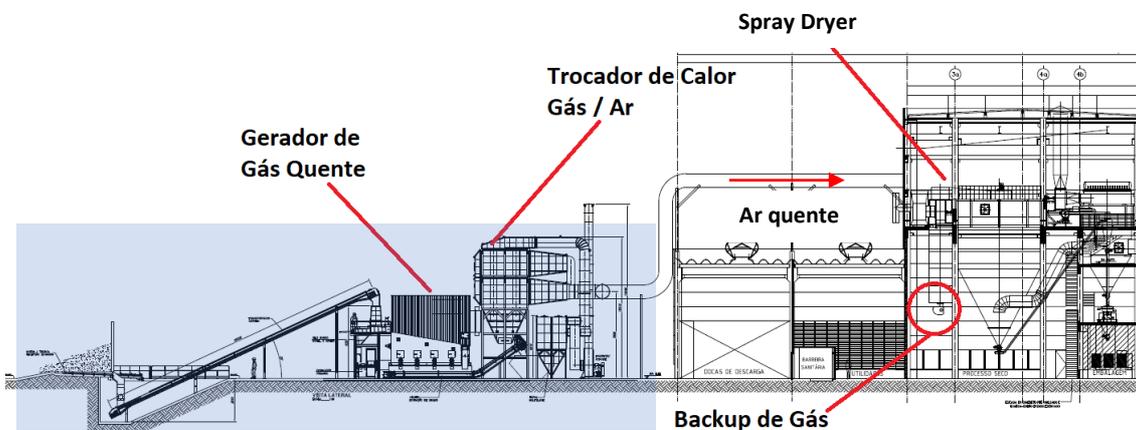


Figura 21 – *Layout* proposto para locação do gerador de gás quente
Fonte: autoria própria a partir de dados da JBS (2019) e Biocal Burntech (2019).

A implantação de equipamentos que geram calor e utilizam biomassa em substituição de processos de geração de calor com GLP ou gás natural como fonte de energia torna-se desafiador quando existe limitação de espaço. As descrições sobre os equipamentos, locação e *layout* podem atingir diretamente o valor do CAPEX durante o projeto. Além disso, algumas desvantagens podem ser atribuídas na aplicação deste estudo de caso para os *spray dryers* existentes: (i) necessidade de disponibilidade física para a instalação, (ii) necessidade de instalação muito próxima ao consumidor de calor e (iii) alto custo de aquisição. A Tabela 8 apresenta também algumas vantagens utilizando o gerador de gás quente na planta da JBS como opção.

Tabela 8 – Vantagens e desvantagens da aplicação de gerador de gás quente

Vantagens	Desvantagens
Consome biomassa com preço competitivo	Necessita de disponibilidade física para a instalação
Consome biomassa heterogênea	Precisa ser instalado muito próximo ao consumidor e necessita de complemento de calor
Tecnologia conhecida	Alto custo de aquisição

Fonte: autoria própria.

ii) Caldeira a vapor

Outra forma comum de se utilizar a biomassa como fonte de energia em processos industriais para a geração de calor é através de uma caldeira. Essa nova proposta de equipamento de conversão de energia produz em sua saída vapor de água, sendo este, portanto, utilizado como fluido quente para as trocas térmicas requeridas. O vapor produzido na configuração proposta é superaquecido, ou seja, utiliza-se de uma pressão de trabalho de 10 kgf/cm² e uma temperatura de 250°C. O fluido quente precisa então trocar calor em um trocador de calor vapor/ar, em que o ar frio atmosférico (30 °C) é aquecido até uma temperatura de 225°C.

O Brasil possui *know-how* tecnológico quando o assunto é a fabricação de equipamentos geradores de vapor. Existe uma infinidade de fabricantes com diferentes

tecnologias que pode variar tanto em termos de preços de aquisição dos equipamentos quanto em eficiência de conversão da fonte de energia em calor. Seguindo a mesma linha do equipamento gerador de calor, a opção técnica da caldeira a vapor utilizou-se da especificação técnica advinda da proposta da fabricante Biocal Burntech. Embora a eficiência de conversão de energia da caldeira seja de 86%, o trocador a placas inseridas na sequência do processo possui uma eficiência de troca térmica de 85%, produzindo então uma eficiência de conjunto (caldeira mais trocador de calor) de apenas 73%, conforme dados técnicos da Tabela 9.

Tabela 9 – Dados da caldeira estudada

Descrição	Parâmetro
Fabricante	Biocal Burntech
Equipamento	Caldeira a vapor
Tipo	Úmido
Pressão de trabalho	10 kgf/cm ²
Temperatura de trabalho	240°C
Produção de vapor	20.000 kg/h
Combustível	Cavaco de eucalipto
Umidade do combustível	40%
Poder calorífico inferior (PCI)	10.883 kJ/kg
Eficiência da caldeira	86%
Eficiência do trocador vapor/ar	85%
Eficiência do sistema caldeira + trocador	73%

Fonte: Biocal Burntech (2019).

Embora a caldeira a vapor se assemelhe ao gerador de calor, para a mesma fonte de energia, o valor de investimento é maior para o primeiro equipamento. O valor de investimento de uma caldeira a vapor pode atingir a faixa de 40% a mais que o preço de aquisição de um gerador de calor. Além do custo maior durante a sua aquisição, a caldeira a vapor exige alguns processos adjacentes que o gerador de gás quente não possui, como: (i) a captação de água (subterrânea ou superficial), (ii) a necessidade de tanques para armazenamento de água bruta e tratada, (iii) o tratamento de água para a

caldeira, e (iv) o tratamento dos efluentes residuais do processo de tratamento de água e geração de vapor.

Nesse sentido, o fluxo do processo de geração de vapor fica mais complexo quando comparado ao fluxo de processo do gerador de gás quente. Para incluir a caldeira a vapor no processo de secagem de sangue, foi necessário incluir todo o sistema de tratamento de água para alimentar a caldeira, sistema de neutralização dos produtos químicos utilizados durante o tratamento de água, tanques para armazenamento de água, além do custo com obra civil adicional para tais equipamentos. Após a geração de vapor, foi incluído um trocador de calor a placas (vapor/ar) para transferir calor ao *spray dryer*. O queimador de GLP foi mantido como *backup* do sistema em caso de falhas. A ilustração desse fluxograma pode ser visualizada na Figura 22.

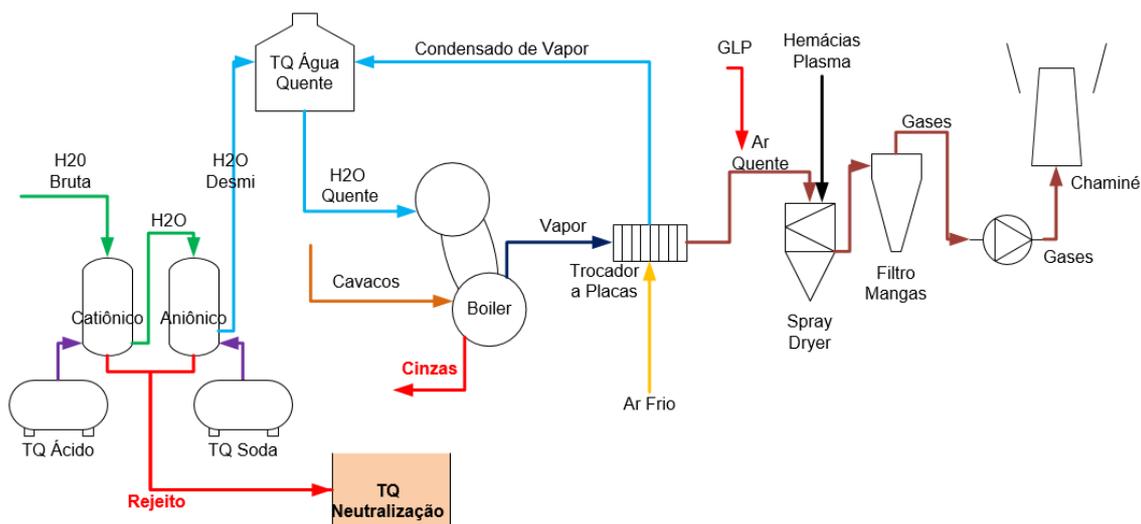


Figura 22 – Sistema de secagem utilizando caldeira a vapor de água
Fonte: autoria própria.

O que mais diferencia a aplicação de caldeira a vapor frente à do gerador de gás quente é a quantidade de equipamentos e processos a ser incrementados, conforme já mencionado. O aumento dos processos e equipamentos em relação ao emprego do gerador de gás quente apresenta algumas consequências importantes: (i) a elevação do custo de CAPEX, (ii) maior quantidade de operadores devido ao maior número de pontos de monitoramento e controle dos processos adjacentes, e (iii) o aumento dos custos operacionais. Além desses pontos importantes, outras vantagens e desvantagens

de aplicar a caldeira a vapor no processo de secagem de sangue são descritas na Tabela 10.

Tabela 10 – Vantagens e desvantagens de aplicar caldeira a vapor

Vantagens	Desvantagens
Tecnologia já consolidada	Alto custo de implantação
Fácil operação	Necessidade de processos adjacentes
Mão de obra treinada disponível no mercado	Mais sensível a oscilações de processo

Fonte: autoria própria.

iii) Custos operacionais dos equipamentos que utilizam biomassa

Os equipamentos que operam utilizando biomassa como fonte de energia possuem algumas particularidades de operação, as quais refletem diretamente no OPEX da empresa. Existe todo um aparato de pessoas necessárias para a operação de equipamentos como caldeiras a biomassa e gerador de gás quente. Para o estudo dentro da planta da JBS, a adequação dos processos de geração de calor para substituição integral ou parcial do GLP eleva os custos com mão de obra.

Quando comparado aos processos de geração de calor que fazem utilização de fonte de energia gasosa, a geração de calor com biomassa possui maior OPEX. Além do aumento do número de pessoas operando e controlando o processo produtivo, outros fatores também influenciam, tais como: (i) custos de movimentação interna e armazenamento da biomassa recebida na empresa; (ii) custos de manutenção; e (iii) custos de produtos químicos para tratamento de água quando se utiliza caldeira a vapor. Com isso, está sendo proposta uma estrutura de certa forma enxuta para operar os equipamentos a biomassa, com um regime de trabalho e uma distribuição dentro do processo produtivo organizados na Tabela 11.

Tabela 11 – Mão de obra para operação de caldeira e gerador de gás quente

Descrição da vaga	Quantidade de pessoas	Regime de trabalho	Distribuição
Operador de caldeira	5	12h × 36h	1 por turno + 1 ferista
Operador de COI	4	12h × 36h	1 por turno
Técnico eletromecânico	5	12h × 36h	1 por turno + 1 ferista
Operador de pá carregadeira	5	12h × 36h	1 por turno + 1 ferista
Supervisor de utilidades	1	Segunda a sábado	1 administrativo
Técnico de laboratório	1	Segunda a sábado	1 administrativo

Fonte: autoria própria.

Além de propor a quantidade de pessoas requeridas para operar a planta, faz-se necessário definir os custos salariais que irão compor parte do custo fixo desse processo de geração de calor. Os salários para cada tipo de cargo são fornecidos com os impostos já incluídos, de forma a refletir um cenário real de custos de operação. Embora possam existir inúmeras configurações de arranjo de pessoas dentro de um processo de geração de calor, este trabalho buscou propor algo que fosse interessante para a realidade da planta da JBS estudada. Na Tabela 12 estão descritos os valores de salário unitário, assim com o montante final considerado para a quantidade de pessoas existentes.

Tabela 12 – Folha de pagamento do pacote pessoal (em USD \$)

Descrição da vaga	Quantidade de pessoas	Salário em dólares (*)	Salário total em dólares
Operador de caldeira	5	1.173	5.865
Operador de COI	4	1.173	4.692
Técnico eletromecânico	5	1.173	5.865
Operador de pá carregadeira	5	1.173	5.865
Supervisor de utilidades	1	2.724	2.724
Técnico de laboratório	1	1.173	1.173
Folha de pagamento total			26.184

(*) Salário já composto de impostos, com referência em dezembro/2019.

Fonte: autoria própria a partir de dados da JBS (2019).

3.4. Procedimentos específicos

O estudo para a aplicação do método LCOH em avaliação de investimento na planta de secagem de sangue da JBS segue duas linhas de pesquisas. A primeira linha utiliza como método comparativo entre fontes de energia para a geração de calor o método LCOH convencional, ou seja, em sua forma original. Já na segunda linha de pesquisa é aplicado o aprimoramento do método LCOH originalmente conhecido. O método aprimorado parte do pressuposto de que, ao incluir fatores inerentes ao processo de conversão térmica, os resultados obtidos representam melhor a realidade do investimento envolvido.

Existem diversas variáveis a serem consideradas em uma avaliação de eficiência térmica dos equipamentos geradores de calor. As perdas de calor para o meio podem ser uma delas, assim como a própria reação química que ocorre no processo de combustão. Essa avaliação de eficiência térmica de equipamentos geradores de calor toma como base três procedimentos de estudo: (i) separar e avaliar os equipamentos conforme a fonte de energia utilizada; (ii) definir o método de cálculo de eficiência a utilizar para cada tipo de equipamento; e (iii) adaptar os cálculos de eficiência dentro do método LCOH convencional para então obter o aprimoramento dele. Com isso, obtém-se um modelo mental, conforme o ilustrado pela Figura 23.

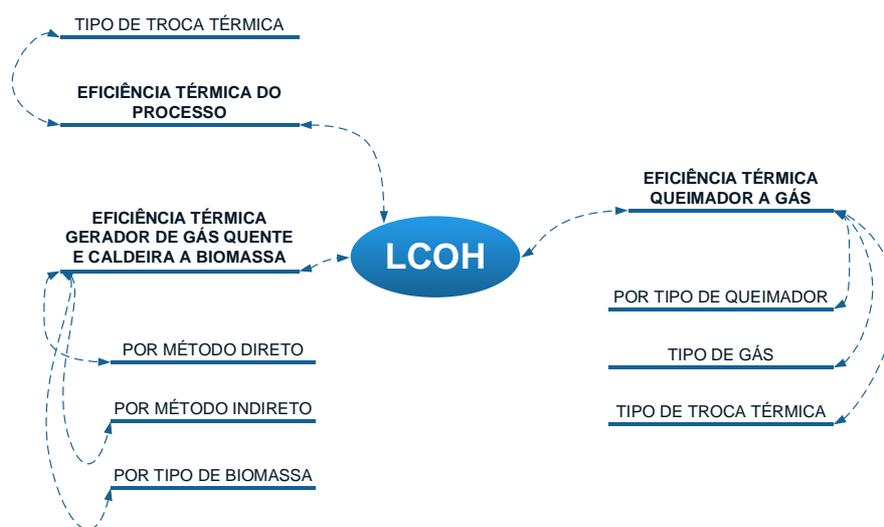


Figura 23 – Modelo mental para aprimoramento do método LCOH
Fonte: autoria própria.

O custo nivelado da energia calcula o preço mínimo pelo qual a unidade de energia deve ser vendida para atingir o ponto de equilíbrio no final da vida útil do projeto. Assim, levam-se em consideração todos os fluxos de caixa durante a vida útil da unidade de produção. As principais variáveis utilizadas para o cálculo do LCOH são os custos de capital descontados, de operação e de manutenção, e o custo de combustível. A Equação 2 descreve o conceito geral para se obter o LCOH; já a Equação 3 realiza o detalhamento numérico da Equação 2 para o método LCOH (TAZI; SAFAEI; HNAIEN, 2021).

$$\text{LCOH} = \frac{\text{Soma dos custos ao longo da vida}}{\text{Soma do calor produzido ao longo da vida}} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad \text{Eq. 3}$$

em que:

I_t = despesas de investimento no ano t (incluindo financiamento), em USD \$;

M_t = despesas de operação e manutenção no ano t, em USD \$;

F_t = despesas com a fonte de energia (combustível), em USD \$;

r = taxa de desconto, em %;

t = tempo restante de vida útil, em anos;

n = vida útil do sistema, em anos;

E_t = geração de energia térmica no ano t, em kWh.

A Equação 4 detalha as despesas de operação e manutenções realizadas no ano t:

$$M_t = O_{\text{tot}} + M_{\text{tot}} \quad \text{Eq. 4}$$

em que:

O_{tot} = custos totais de operação, em USD \$;

M_{tot} = custos totais de manutenção da planta, em USD \$.

Na Equação 5, são detalhadas as variáveis que compõem o custo de operação no ano t:

$$O_{\text{tot}} = P_p + E_e + T_o + A_d + D_c \quad \text{Eq. 5}$$

em que:

P_p = custos salariais dos colaboradores, em USD \$;

E_e = gastos com energia elétrica, em USD \$;

T_o = taxas (municipais, estaduais e federais) necessárias para a operação, em USD \$;

A_d = despesas para aquisição de água e esgoto e/ou necessárias para tratamento, em USD \$;

D_c = demais despesas não listadas, em USD \$.

A Equação 6 detalha as despesas que compõem os custos com a manutenção da planta:

$$M_{\text{tot}} = m_m + m_p \quad \text{Eq. 6}$$

em que:

m_m = custos referentes à manutenção de máquinas e equipamentos industriais no ano t, em USD \$;

m_p = custos referentes à manutenção predial realizada no ano t, em USD \$.

A proposta para o método aprimorado do LCOH se diferencia do LCOH tradicional por detalhar a variável de custo da fonte de energia (F_t) ao nível de conversão de energia dos equipamentos e da qualidade energética da fonte de energia utilizada para a geração de calor. A estratificação dessa variável (F_t) permite identificar o impacto da eficiência térmica dentro do resultado de custo.

3.4.1. Aprimoramento do método LCOH para a combustão de GLP e gás natural para troca térmica indireta

A troca térmica indireta de calor é o conceito utilizado na planta de secagem de sangue da JBS desde a sua construção. A eficiência global do sistema de geração de calor é quem dita se haverá necessidade de consumir mais ou menos de determinada fonte de energia. Por se tratar de uma troca entre dois fluidos, gases quentes de

combustão de um lado e ar frio atmosférico de outro, é possível realizar a análise de eficiência térmica do sistema aplicando o balanço de massa e energia, e, para obtê-la, pode-se fazer uso do método ASME PTC 4.3 (NEVES, 2014). A Equação 7 mostra as variáveis que compõem a equação:

$$\eta_{ASME} = \frac{T_{EG} - \left(\frac{A_L \cdot C_{pA} (T_{SG} - T_{EA})}{100 C_{pG}} + T_{SG} \right)}{T_{EG} - T_{EA}} \quad \text{Eq. 7}$$

em que:

T_{EG} = temperatura de entrada do gás em °C;

T_{SG} = temperatura de saída do gás em °C;

A_L = porcentagem de vazamento de ar;

C_{pA} = calor específico do ar em kJ/kg°C

C_{pG} = calor específico do gás em kJ/kg°C;

T_{EA} = temperatura de entrada de ar (temperatura ambiente) em °C.

De forma geral, a eficiência térmica de um sistema pode ser descrita como a relação entre a energia fornecida ao meio e a energia requerida. Portanto, a energia fornecida pode ser considerada como a massa de uma dada fonte de energia, multiplicada pelo poder calorífico inferior dessa mesma fonte. A Equação 8 descreve como ficaria essa relação:

$$\eta_{ASME} = \frac{E_r}{m_{fe} \cdot PCI_{fe}} \quad \text{Eq. 8}$$

em que:

m_{fe} = massa consumida da fonte de energia, em kg;

PCI_{fe} = poder calorífico inferior da fonte de energia, em kJ/kg;

E_r = energia requerida pelo sistema no ano t, em kJ.

Isolando a variável m_{fe} da Equação 8, que é a massa consumida da fonte de energia, pode-se obter a Equação 9:

$$m_{fe} = \frac{E_r}{\eta_{ASME} \cdot PCI_{fe}} \quad \text{Eq. 9}$$

Inserindo, então, a Equação 7 dentro da Equação 9, obtém-se o consumo da fonte de energia necessário para suprir o sistema geral de troca térmica indireta para o *spray dryer*, expresso pela Equação 10.

$$m_{fe} = \frac{E_r}{\left(\frac{T_{EG} - \left(\frac{A_L \cdot C_{pA}(T_{SG} - T_{EA})}{100C_{pG}} + T_{SG} \right)}{T_{EG} - T_{EA}} \right) \cdot PCI_{fe}} \quad \text{Eq. 10}$$

Isolando-se a parcela de custo da fonte de energia F_t para o método LCOH convencional da Equação 2 e a estratificando, tem-se a Equação 11, aplicada para o queimador de gás, tanto GLP ou gás natural:

$$F_t = m_{fe} \cdot Pr_{fe} \quad \text{Eq. 11}$$

em que:

m_{fe} = massa da fonte de energia consumida no ano t, em kg;

Pr_{fe} = preço unitário da fonte de energia no ano t, em USD \$ por kg (USD \$/kg).

Inserindo-se a Equação 10 dentro da Equação 11, pode-se obter o detalhamento dos custos com a fonte de energia utilizada variando conforme a eficiência do sistema, como visualizado na Equação 12:

$$F_t = \left(\frac{E_r}{\left(\frac{T_{EG} - \left(\frac{A_L \cdot C_{pA}(T_{SG} - T_{EA})}{100C_{pG}} + T_{SG} \right)}{T_{EG} - T_{EA}} \right) \cdot PCI_{fe}} \right) \cdot Pr_{fe} \quad \text{Eq. 12}$$

Para se obter o $LCOH_{APTI}$ aprimorado para troca térmica indireta, basta inserir a Equação 12 dentro da Equação 2, esta última sendo a equação para o método LCOH convencional. O método aprimorado expresso pela Equação 13 pode ser utilizado para as fontes de energia tidas por GLP e gás natural, as quais possuem troca térmica indireta.

$$LCOH_{Ap} = \frac{\sum_{t=1}^n \left(I_t + M_t + \left(\frac{E_r}{\left(\frac{T_{EG} - \left(\frac{A_L \cdot C_{pA} (T_{SG} - T_{EA})}{100 C_{pG}} + T_{SG} \right)}{T_{EG} - T_{EA}} \right)} \cdot PCI_{fe} \right) \cdot Pr_{fe} \right)}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad \text{Eq. 13}$$

3.4.2. Aprimoramento do método LCOH para a combustão de GLP e gás natural para troca térmica direta

A eficiência térmica global de um sistema pode ser descrita como a relação entre a energia requerida e a energia fornecida ao meio, conforme já mencionado anteriormente. Assim, a energia fornecida é a massa de uma dada fonte de energia multiplicada pelo poder calorífico inferior dessa mesma fonte, enquanto a energia requerida é dita como sendo o total de energia necessária para que o sistema consiga converter a fonte de energia para calor, para então fornecer calor ao processo.

Nesse contexto, a Equação 14 demonstra o cálculo geral para o rendimento térmico de um sistema gerador de calor:

$$\eta_{QG} = \frac{E_r}{m_{fe} \cdot PCI_{fe}} \quad \text{Eq. 14}$$

em que:

η_{QG} = rendimento térmico do queimador a gás, em %;

m_{fe} = massa consumida da fonte de energia, em kg;

PCI_{fe} = poder calorífico inferior da fonte de energia, em kJ/kg;

E_r = energia requerida pelo sistema no ano t, em kJ.

Isolando a massa consumida da fonte de energia (variável m_{fe}) da Equação 14, pode-se obter a Equação 15:

$$m_{fe} = \frac{E_r}{\eta_{QG} \cdot PCI_{fe}} \quad \text{Eq. 15}$$

Inserindo a Equação 15 na Equação 11, obtém-se o custo da fonte de energia F_t em USD \$ para o sistema de troca térmica direta na Equação 16. O custo unitário da fonte de energia utilizada (Pr_{fe}) é dado em USD \$/kg.

$$F_t = \left(\frac{E_r}{\eta_{QG} \cdot PCI_{fe}} \right) \cdot Pr_{fe} \quad \text{Eq. 16}$$

O método $LCOH_{APTD}$ aprimorado para troca térmica direta pode ser obtido inserindo a Equação 16 dentro da Equação 2. A Equação 17 mostra numericamente o método aprimorado variando conforme a eficiência do sistema e PCI da fonte de energia.

$$LCOH_{APTD} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + \left(\frac{E_r}{\eta_{QG} \cdot PCI_{fe}} \right) \cdot Pr_{fe}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad \text{Eq. 17}$$

3.4.3. Aprimoramento do método LCOH para a combustão de biomassa

Os métodos de cálculo da eficiência para equipamentos geradores de calor e vapor que utilizam como fonte de energia a biomassa pouco se diferem entre si. De forma geral, os cálculos de eficiência de um determinado processo ou equipamento seguem o mesmo conceito geral descrito na Equação 18, em que a eficiência de um equipamento ou processo é a relação entre a energia produzida (ou requerida) e a energia utilizada para tal produção. Em outras palavras, as perdas de conversão de energia estão presentes nesse contexto, uma vez que a venda de energia para o processo

seguinte sempre será menor que o total de energia utilizada no processo de conversão da fonte de energia.

$$\text{Eficiência de um equipamento ou processo} = \frac{\text{Energia produzida}}{\text{Energia necessária utilizada}} \quad \text{Eq. 18}$$

Nogueira, Rocha e Nogueira (2005) expõem em seu trabalho os métodos de cálculo de eficiência para um gerador de vapor e calor. Os métodos de cálculo apresentados são (i) direto e (ii) indireto, esclarecendo-se as diferenças entre os dois. Na prática, para ambos os métodos, os valores estão condicionados à confiabilidade dos sistemas de instrumentação dos equipamentos, estando, portanto, sujeitos a erros.

O resultado da eficiência calculada pelo método direto é muito mais sensível às variáveis presentes na Equação 18. Por ser mais sensível ao valor das variáveis imputadas na equação, em caso de não confiabilidade nos instrumentos de medição, pode apresentar mais erros que o método indireto. Dessa forma, o método indireto, por se tratar de uma estratificação maior dos efeitos de perdas térmicas, pode apresentar menor erro, mesmo possuindo maior complexidade de obtenção de informações do equipamento (BARROSO *et al.*, 2003).

Visando resultados diretos e de forma a simplificar os resultados, a presente tese se utiliza do método direto, conforme exposto pela Equação 19 para a caldeira a vapor e pela Equação 20 para o gerador de gás quente.

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_v (h_v - h_a)}{\dot{m}_c \cdot PCI_{BIO}} \quad \text{Eq. 19}$$

$$\eta_{GC} = \frac{\dot{E}_r}{\dot{m}_c \cdot PCI_{BIO}} \quad \text{Eq. 20}$$

em que:

η_{MD} = rendimento térmico pelo método direto, em %;

\dot{m}_v = fluxo de massa do vapor, em kg/s;

\dot{m}_c = fluxo de massa da fonte de energia (combustível), em kg/s;

h_v = entalpia do vapor, em kJ/kg

h_a = entalpia da água de alimentação da caldeira, em kJ/kg;

PCI_{BIO} = poder calorífico inferior da biomassa, em kJ/kg;

η_{GC} = rendimento térmico para o gerador de gás quente, em %;

$\dot{m}_{c'}$ = fluxo de massa da fonte de energia, em kg/s;

\dot{E}_r = energia requerida pelo sistema gerador de calor no ano t, em kJ;

Isolando a parcela de custo da fonte de energia F_t para o método LCOH convencional apresentado na Equação 2 e a estratificando, tem-se a Equação 21, utilizada para a caldeira a vapor. Já para o gerador de calor, o cálculo para obter o custo da fonte de energia F_t é feito conforme a Equação 22.

$$F_t = m_c \cdot Pr_{BIO} \quad \text{Eq. 21}$$

$$F_t = m_{c'} \cdot Pr_{BIO} \quad \text{Eq. 22}$$

em que:

m_c = massa da fonte de energia consumida no ano t, em toneladas;

Pr_{BIO} = preço unitário da fonte de energia no ano t, em USD \$ por tonelada (USD \$/ton);

$m_{c'}$ = massa da fonte de energia consumida no ano t.

Isolando a massa da fonte de energia da Equação 19 e retirando a unidade de fluxo tanto da fonte de energia quanto da massa de vapor produzida, e convertendo o resultado para toneladas, tem-se a Equação 23:

$$m_c = \left(\frac{\frac{m_v(h_v - h_a)}{\eta_{MD} \cdot PCI_{BIO}}}{1.000} \right) \quad \text{Eq. 23}$$

em que:

η_{MD} = rendimento térmico pelo método direto, em %;

m_v = massa de vapor produzida, em kg;

m_c = massa da fonte de energia consumida, em kg;

h_v e h_a = entalpia do vapor e da água de alimentação da caldeira, respectivamente, em kJ/kg;

PCI_{BIO} = poder calorífico inferior da biomassa, em kJ/kg.

Inserindo o valor de m_c obtido na Equação 23 dentro da Equação 21 e levando a resultante desse cálculo para a Equação 2, tem-se então o método aprimorado para caldeira a vapor $LCOH_{APC}$, descrito pela Equação 24:

$$LCOH_{APC} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + \left(\frac{\frac{m_v(h_v - h_a)}{\eta_{MD} \cdot PCI_{BIO}}}{1.000} \right) \cdot Pr_{BIO}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad \text{Eq. 24}$$

Para o gerador de gás quente, segue-se o mesmo princípio demonstrado na obtenção da Equação 23 para a caldeira a vapor, isolando a massa da fonte de energia da Equação 20 e retirando a unidade de fluxo tanto da energia requerida quanto da massa de fonte de energia consumida. Após a conversão do resultado para toneladas, tem-se a Equação 25:

$$m_{c'} = \left(\frac{\frac{E_r}{\eta_{GC} \cdot PCI_{BIO}}}{1.000} \right) \quad \text{Eq. 25}$$

em que:

η_{GC} = rendimento térmico do gerador de gás quente, em %;

$m_{c'}$ = massa da fonte de energia consumida, em kg;

E_r = energia requerida pelo sistema no ano t, em kJ;

PCI_{BIO} = poder calorífico inferior da biomassa, em kJ/kg.

Inserir-se o valor de $m_{c'}$ dado pela Equação 25 dentro da Equação 22, e a resultante, dentro da Equação 2 do método LCOH convencional. Tem-se na Equação 26, por fim, o método aprimorado $LCOH_{APGG}$ para a utilização em gerador de gás quente.

$$\text{LCOH}_{\text{APC}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + \left(\left(\frac{E_r}{\eta_{\text{GC}} \cdot \text{PCI}_{\text{BIO}}} \right) \cdot \text{Pr}_{\text{BIO}} \right)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad \text{Eq. 26}$$

Para se obter então a equação do gerador de gás quente com complemento de calor via GLP ($\text{LCOH}_{\text{APCG}}$), basta acrescentar a Equação 16 dentro da Equação 26, resultando então a Equação 27. É importante salientar que os custos de I_t e M_t devem representar ambas tecnologias (biomassa e gás).

$$\text{LCOH}_{\text{APCG}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + \left(\left(\frac{E_r}{\eta_{\text{GC}} \cdot \text{PCI}_{\text{BIO}}} \right) \cdot \text{Pr}_{\text{BIO}} + \left(\frac{E_r}{\eta_{\text{QG}} \cdot \text{PCI}_{\text{fe}}} \right) \cdot \text{Pr}_{\text{fe}} \right)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad \text{Eq. 27}$$

3.5. Considerações finais do Capítulo 3

Neste capítulo foram demonstrados os métodos e procedimentos utilizados para a obtenção das equações para os métodos aprimorados de LCOH. Os aprimoramentos do método convencional do LCOH tiveram como foco três processos distintos: (i) equipamentos que fazem a combustão de GLP e gás natural para troca térmica por contato indireto; (ii) equipamentos que fazem combustão de GLP e gás natural para troca térmica direta; e (iii) equipamentos que fazem utilização de biomassa, como caldeira a vapor e gerador de gás quente.

Além dos métodos de LCOH, o presente capítulo também realizou o descritivo da aplicação do referido método dentro de um contexto prático, ou seja, um estudo de caso do segmento industrial alimentício. Tal segmento foi escolhido por realizar a geração de calor para suprir seu processo industrial, e também pelo fato de possuir disponibilidade de três fontes de energia distintas para sua localização geográfica: o GLP, o gás natural e a biomassa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo elucidar os resultados obtidos com a utilização dos métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado quando aplicados ao estudo de caso industrial. Na primeira parte deste capítulo, estão descritos os resultados para o método LCOH convencional, utilizando como premissa a troca térmica indireta para os processos de transferência de calor do ar atmosférico com os gases de combustão da fonte de energia do gás liquefeito de petróleo, assim como para o gás natural. Aplicou-se ainda o método convencional para as trocas de calor de forma direta, utilizando-se como fonte de energia o GLP e o gás natural. O método convencional também foi aplicado para duas configurações de equipamentos que utilizam biomassa: (i) caldeira a vapor por contato indireto; e (ii) gerador de gás quente por contato indireto com adição de GLP no aquecimento final do ar atmosférico.

A aplicação do método LCOH aprimorado é realizada na segunda parte deste capítulo. Os resultados estão organizados da seguinte forma: (i) troca térmica direta e indireta para as fontes de energia provenientes do GLP e do gás natural; e (ii) troca térmica indireta para os equipamentos que utilizam a biomassa como fonte de energia com ou sem a adição de GLP no aquecimento final do ar atmosférico.

4.1. Premissas gerais assumidas para os métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado

Os cálculos de LCOH tanto convencional quanto aprimorado foram baseados em algumas premissas gerais utilizadas para ambos os métodos. A primeira premissa assumida está relacionada com a vida útil dos equipamentos e processos. Sabe-se que cada tipo de equipamento se comporta de maneira distinta, dependendo do tipo de aplicação industrial, exposição às intempéries, tipo de conservação e manutenções. Entrar dentro desses aspectos para cada tipo de equipamento é propagar o erro. De forma a manter uma isonomia nos cálculos, foi considerado o mesmo tempo de vida útil para todos os equipamentos, de 20 anos.

Outra importante premissa assumida nos cálculos diz respeito ao retorno esperado do investimento. Nesse caso, foi assumida uma taxa de desconto anual de 12%. Conforme entrevista realizada com a gerente administrativa da unidade Sra. Tatiane Queiroz, o valor utilizado pela empresa para valorizar o custo financeiro utilizado em investimentos internos podem apresentar variação entre 10 a 16% ao ano, e, dependem do prazo de retorno (*payback*) que é analisado caso a caso pela diretoria financeira.

Todos os valores financeiros foram convertidos em dólares americanos (USD \$). Para a realização da conversão de câmbio, utilizou-se o valor de R\$4,70 para cada 1 USD \$.

O volume de material processado na indústria foi o mesmo para todos os cenários estudados. Todos os aspectos estudados de demanda de calor para a secagem do produto (hemácias e plasmas) foram considerados para o mesmo volume de produto, ou seja, não houve alteração da quantidade anual de material processado antes e depois da secagem.

A correção monetária projetada para 20 anos de vida útil estipulada como premissa deste trabalho utilizou dois indexadores, inflação e custo com fonte de energia. Considerou-se para a inflação um incremento de 3% anualmente aplicado de 2019 em diante. Já o segundo indicador, pelo menos para os anos de 2019, 2020, e 2021 utilizaram-se de valores reais praticados pela empresa estudada no período. Após 2021 também se utilizou o incremento de 3% anualmente sobre os custos com fonte de energia. A Figura 24 mostra a evolução dos indexadores utilizados para o GLP, gás natural, e inflação. As premissas de indexação utilizadas para a biomassa serão apresentadas posteriormente.

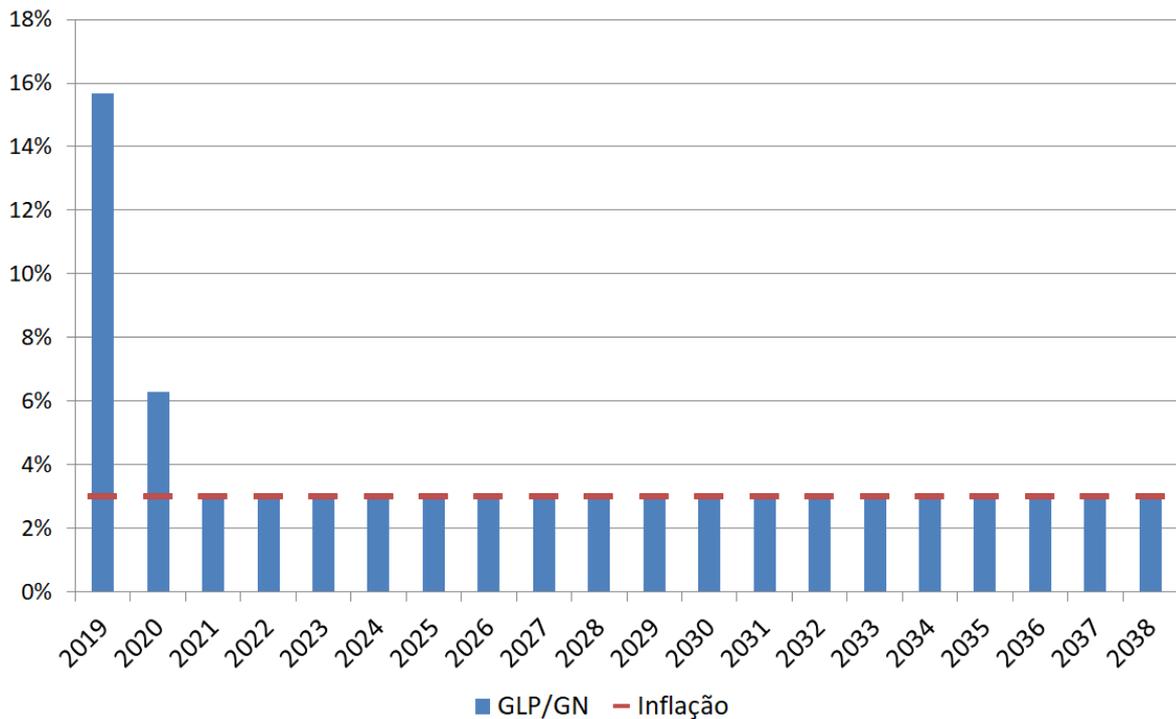


Figura 24 – Evolução histórica e projeção das fontes de energia e inflação
 Fonte: autoria própria a partir de dados da JBS (2021).

4.2. LCOH convencional

4.2.1. LCOH convencional com fonte de energia por GLP via contato indireto

A aplicação do conceito de LCOH convencional para a fonte de energia proveniente do GLP seguiu, nesse caso, com a troca indireta de calor. Conforme já mencionado, o calor gerado pela reação química da combustão do GLP passa por uma troca de calor indireta com o ar atmosférico em temperatura ambiente por meio de um trocador de calor. O ar, agora aquecido, é insuflado para dentro do *spray dryer*, encontrando então o produto atomizado e úmido dentro do secador. O calor contido no ar aquecido é transferido para o produto úmido de tal forma que ocorre a evaporação da água, gerando o produto seco como resultante dessa troca térmica.

Com a projeção dos indexadores já citados, foi possível estimar os custos futuros relacionados à mão de obra e à energia elétrica. Considerando que a operação do queimador que utiliza GLP é praticamente nula, visto que, devido à automação existente, ele opera em automático, o maior custo fica então para a energia elétrica, que também é mínima. Dessa forma, a Figura 25 mostra a evolução dos custos de

manutenção e operação (mão de obra, gastos de produção e energia elétrica) ao longo dos 20 anos de vida útil considerada do equipamento.

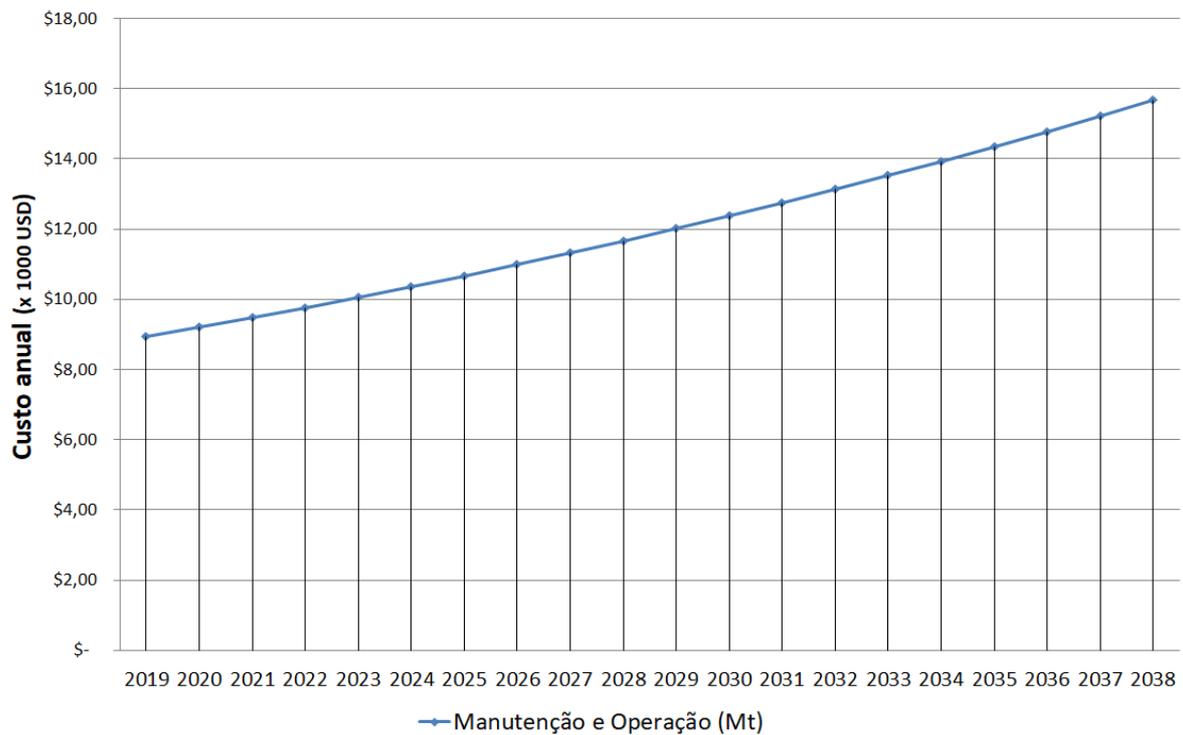


Figura 25 – Evolução anual dos custos de manutenção e operação do queimador de GLP

Fonte: autoria própria.

O custo nivelado da energia no valor presente para o GLP pôde ser obtido inserindo toda a evolução de custo já mencionada somada à demanda de calor do processo. Todas as variáveis necessárias para o processo de obtenção do LCOH convencional estão descritas na Tabela 13, em que o valor de Et é a demanda de energia anual calculada em kWht.

Tabela 13 – Dados de entrada na equação de LCOH convencional

Ano	It (x1000)	Mt (x1000)	Ft (x1000)	r	t	Et (x1000)
2019	\$ 149	\$ 8,9	\$ 956	12%	20	8606
2020	\$ -	\$ 9,2	\$ 1.106	12%	19	8606
2021	\$ -	\$ 9,5	\$ 1.175	12%	18	8606
2022	\$ -	\$ 9,8	\$ 1.211	12%	17	8606
2023	\$ -	\$ 10,1	\$ 1.247	12%	16	8606
2024	\$ -	\$ 10,4	\$ 1.284	12%	15	8606
2025	\$ -	\$ 10,7	\$ 1.323	12%	14	8606
2026	\$ -	\$ 11,0	\$ 1.363	12%	13	8606
2027	\$ -	\$ 11,3	\$ 1.403	12%	12	8606
2028	\$ -	\$ 11,7	\$ 1.446	12%	11	8606
2029	\$ -	\$ 12,0	\$ 1.489	12%	10	8606
2030	\$ -	\$ 12,4	\$ 1.534	12%	9	8606
2031	\$ -	\$ 12,7	\$ 1.580	12%	8	8606
2032	\$ -	\$ 13,1	\$ 1.627	12%	7	8606
2033	\$ -	\$ 13,5	\$ 1.676	12%	6	8606
2034	\$ -	\$ 13,9	\$ 1.726	12%	5	8606
2035	\$ -	\$ 14,3	\$ 1.778	12%	4	8606
2036	\$ -	\$ 14,8	\$ 1.831	12%	3	8606
2037	\$ -	\$ 15,2	\$ 1.886	12%	2	8606
2038	\$ -	\$ 15,7	\$ 1.943	12%	1	8606

Fonte: autoria própria.

Os resultados dos cálculos para obtenção do LCOH convencional podem ser visualizados na Figura 26. O custo do investimento para o equipamento que realiza a combustão do GLP é realizado no ano 1, nesse caso, em 2019. A partir do segundo ano de operação, o custo unitário do calor (medido em USD \$/kWh) apresenta forte alta dentro de um cenário que carrega uma inflação em torno de 3% ao ano como premissa de cálculo.

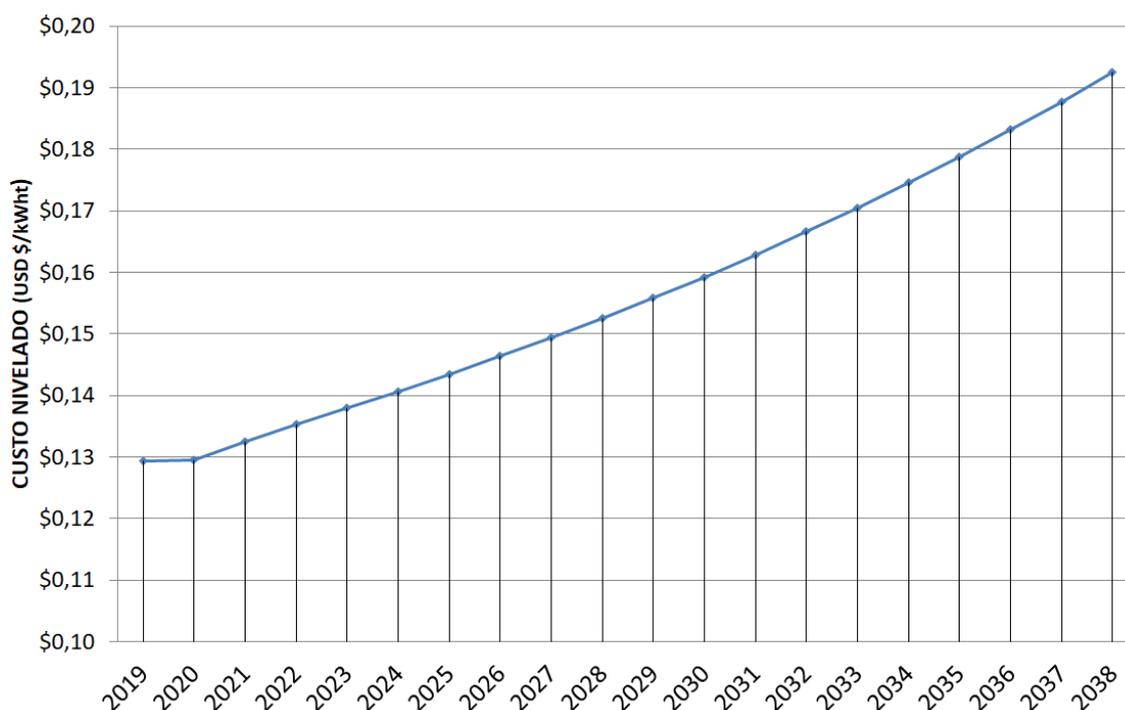


Figura 26 – Custo nivelado da energia para o GLP pelo método LCOH convencional
 Fonte: autoria própria.

4.2.2. LCOH convencional com fonte de energia por GLP via contato direto

O que diferencia o LCOH convencional de GLP por contato indireto do LCOH convencional por contato direto é justamente a inexistência de uma camisa térmica para este último. Conforme já mencionado no Capítulo 3 desta tese, o calor gerado pelos gases de combustão (nesse caso) entra em contato direto com o produto atomizado que deverá ser seco. Vale ressaltar que os resultados aqui obtidos levam em consideração as mesmas informações de entrada do LCOH convencional para GLP, porém com o diferencial de eficiência térmica maior e um investimento pouco inferior ao processo de troca térmica indireta ocorrida no modelo LCOH convencional por contato indireto para o GLP.

Nesse contexto, o incremento de eficiência em se alterar o processo de troca térmica do equipamento queimador de GLP foi de 10%. O ganho de eficiência do processo de troca térmica reduziu os gastos com a fonte de energia quando comparado ao LCOH convencional por contato indireto. A Figura 27 mostra a evolução comparativa dos custos ao longo dos 20 anos. Durante esse período, o montante reduzido pelo processo de troca térmica direta foi de aproximadamente 1,5 milhões de dólares, algo em torno de 5,6% de economia direta.

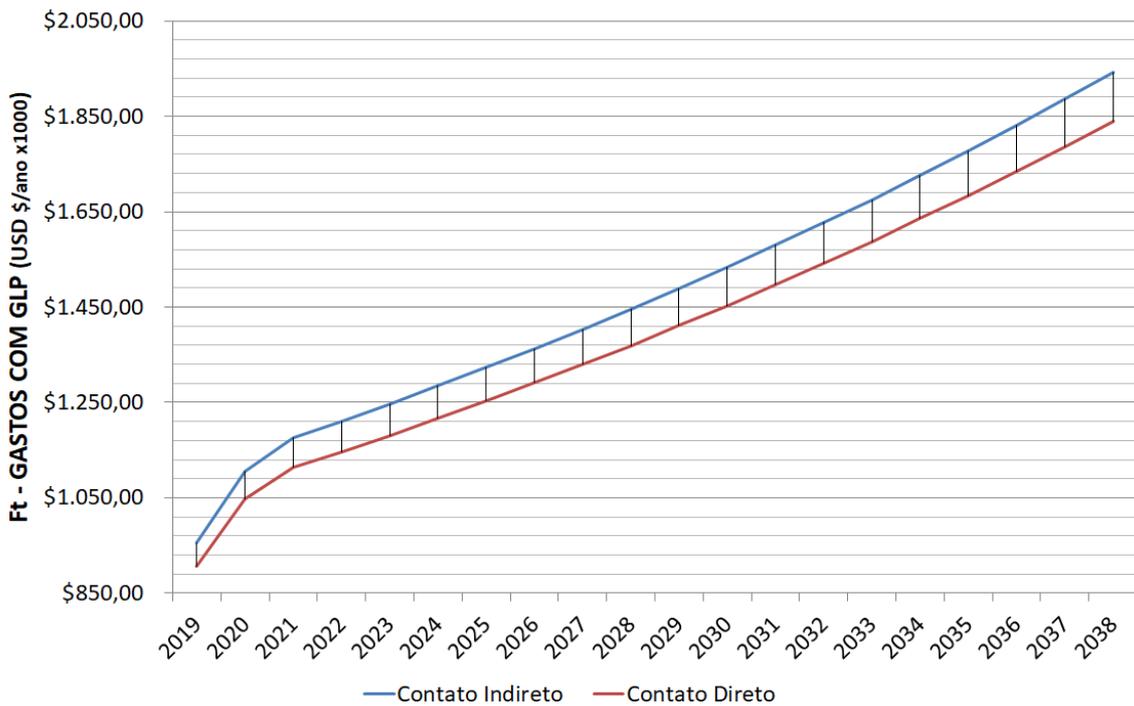


Figura 27 – Comparativo entre troca térmica direta e indireta para o GLP
 Fonte: autoria própria.

O principal responsável pela redução dos gastos com a fonte de energia foi justamente a necessidade de energia térmica produzida no ano t. Com o aumento da eficiência de troca térmica em 10%, a redução da necessidade de energia térmica produzida foi de aproximadamente 5,6%. O impacto anual acumulado por 20 anos foi em torno de 9.000.000 kWh, o que equivale a pouco mais de um ano de energia economizada. A Figura 28 mostra a diferença de energia produzida por ano entre os processos de troca térmica indireta e direta.

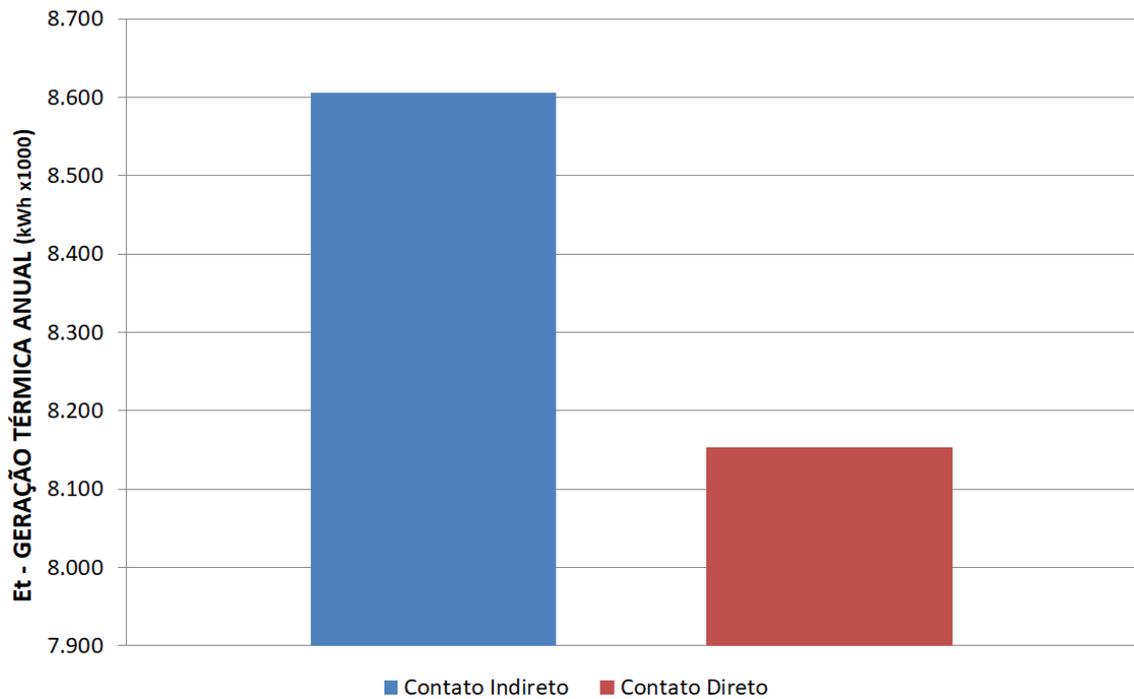


Figura 28 – Energia térmica produzida entre troca térmica indireta e direta para o GLP
 Fonte: autoria própria.

Além da redução de custos com a utilização da fonte de energia aqui representada pelo GLP, houve também a redução com o investimento aplicado no equipamento. Essa redução de CAPEX (I_t) está relacionada à inexistência da camisa térmica utilizada no processo de troca térmica indireta. Com isso, o valor do investimento pode obter em torno de 21% de redução sobre o processo de troca térmica indireta.

A Tabela 14 mostra o agrupamento de todos os valores de entrada utilizados no cálculo de LCOH convencional para contato direto.

Tabela 14 – Dados de entrada na equação de LCOH convencional via contato direto

Ano	It (x1000)	Mt (x1000)	Ft (x1000)	r	t	Et (x1000)
2019	\$ 117	\$ 8,9	\$ 905	12%	20	8153
2020	\$ -	\$ 9,2	\$ 1.047	12%	19	8153
2021	\$ -	\$ 9,5	\$ 1.113	12%	18	8153
2022	\$ -	\$ 9,8	\$ 1.147	12%	17	8153
2023	\$ -	\$ 10,1	\$ 1.181	12%	16	8153
2024	\$ -	\$ 10,4	\$ 1.217	12%	15	8153
2025	\$ -	\$ 10,7	\$ 1.253	12%	14	8153
2026	\$ -	\$ 11,0	\$ 1.291	12%	13	8153
2027	\$ -	\$ 11,3	\$ 1.330	12%	12	8153
2028	\$ -	\$ 11,7	\$ 1.369	12%	11	8153
2029	\$ -	\$ 12,0	\$ 1.411	12%	10	8153
2030	\$ -	\$ 12,4	\$ 1.453	12%	9	8153
2031	\$ -	\$ 12,7	\$ 1.496	12%	8	8153
2032	\$ -	\$ 13,1	\$ 1.541	12%	7	8153
2033	\$ -	\$ 13,5	\$ 1.588	12%	6	8153
2034	\$ -	\$ 13,9	\$ 1.635	12%	5	8153
2035	\$ -	\$ 14,3	\$ 1.684	12%	4	8153
2036	\$ -	\$ 14,8	\$ 1.735	12%	3	8153
2037	\$ -	\$ 15,2	\$ 1.787	12%	2	8153
2038	\$ -	\$ 15,7	\$ 1.840	12%	1	8153

Fonte: autoria própria.

A evolução do custo de nivelado de energia para o LCOH convencional por contato direto pode ver visualizada na Figura 29. O custo unitário de energia ao longo dos 20 anos recebe um aumento expressivo, em torno de 60%, mesmo sem o efeito direto dos custos de investimento. Vale ressaltar que os custos de manutenção foram os mesmos utilizados nos cálculos de LCOH convencional para o GLP na troca térmica indireta.

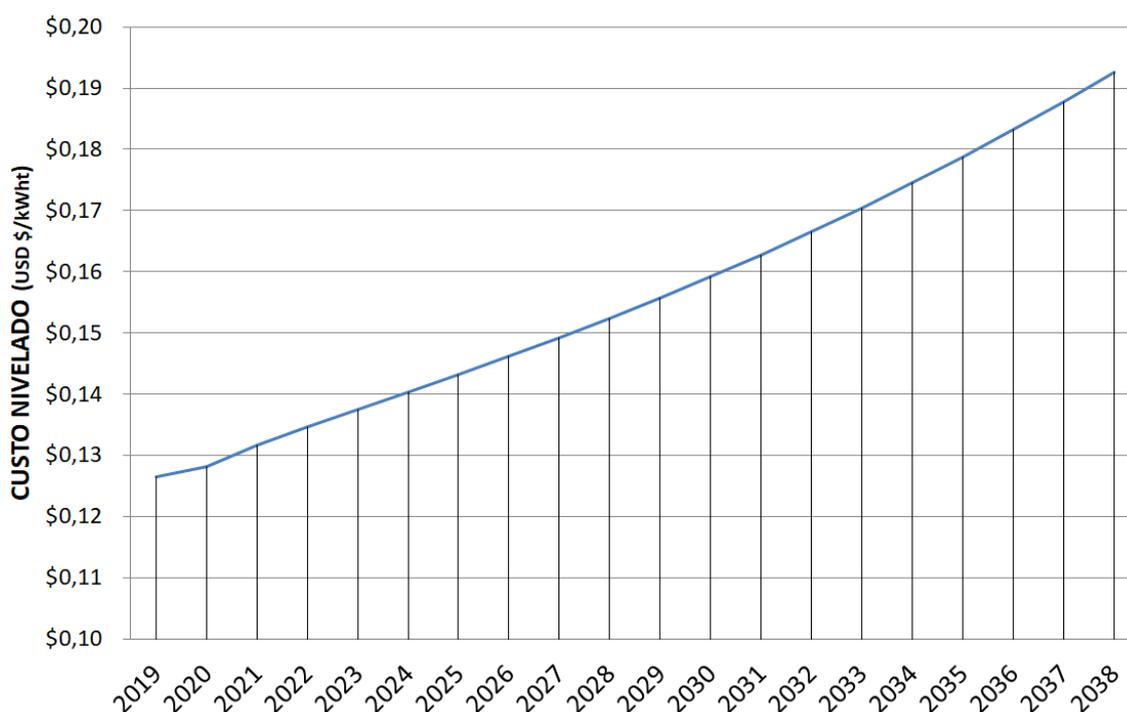


Figura 29 – Custo nivelado de energia para o GLP via contato direto
 Fonte: autoria própria.

O comparativo entre os custos nivelados de energia pelo método LCOH convencional via contato indireto e via contato direto pode ser visto na Figura 30. O custo nivelado de partida no ano 2019 para o contato direto é menor em relação ao do contato indireto. Essa diferença se mantém até 2023, ano em que praticamente se igualam os custos durante o restante de vida útil do equipamento. Embora os custos de utilização da fonte de energia sejam inferiores aos do processo de contato indireto, os valores tendem a se equalizar devido à necessidade de calor produzida também ser menor. Em resumo, enquanto o custo com GLP é o numerador, o calor produzido é o denominador, e ambos possuem a mesma redução em porcentagem, visto que um é diretamente proporcional ao outro.

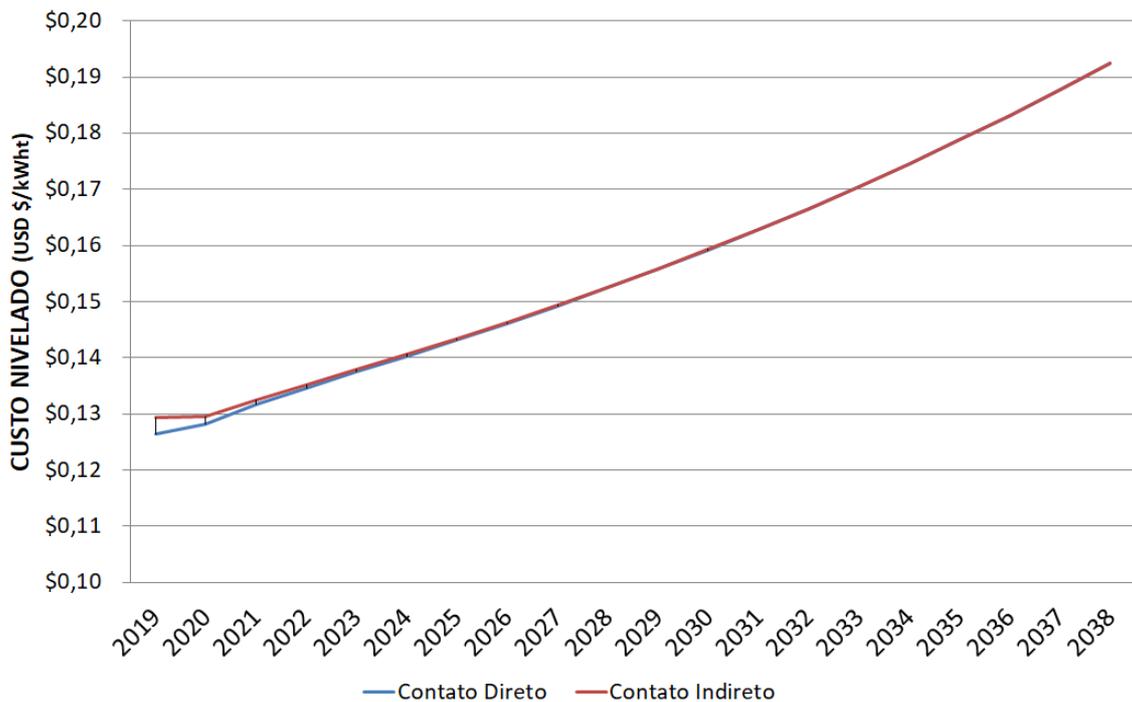


Figura 30 – O LCOH convencional para troca térmica direta e indireta do GPL
 Fonte: autoria própria.

4.2.3. LCOH convencional com fonte de energia por gás natural via contato indireto

A aplicação do conceito de LCOH convencional para a fonte de energia proveniente do gás natural seguiu a mesma linha de cálculo utilizada para o GPL. Da mesma forma que ocorre na combustão do GPL (troca térmica indireta), os gases quentes passam por uma troca de calor indireta com o ar atmosférico em temperatura ambiente por meio de um trocador de calor. Todo o processo restante de secagem segue a mesma linha técnica já exposta.

Por se tratar de uma fonte de energia não renovável, como o GPL, os mesmos dados de correção monetária foram utilizados. A correção para 20 anos de vida útil também utilizou as premissas já informadas anteriormente. Aplicou-se uma inflação de 3% ao ano nos custos de mão de obra, manutenção e energia elétrica, enquanto a variação da fonte de energia utilizou-se os valores realizados entre 2019 e 2021, sendo posteriormente também aplicados os valores de inflação de 3%.

Consideraram-se os custos de manutenção iguais entre os processos de combustão de fontes de energia gasosa. De modo similar, os resultados considerados foram aplicados de forma a obter a mesma vida útil, a mesma qualificação técnica de manutenção, e os mesmos consumos de energia elétrica. A Figura 31 mostra a evolução dos custos de manutenção ao longo do período de 20 anos considerados nesta tese.

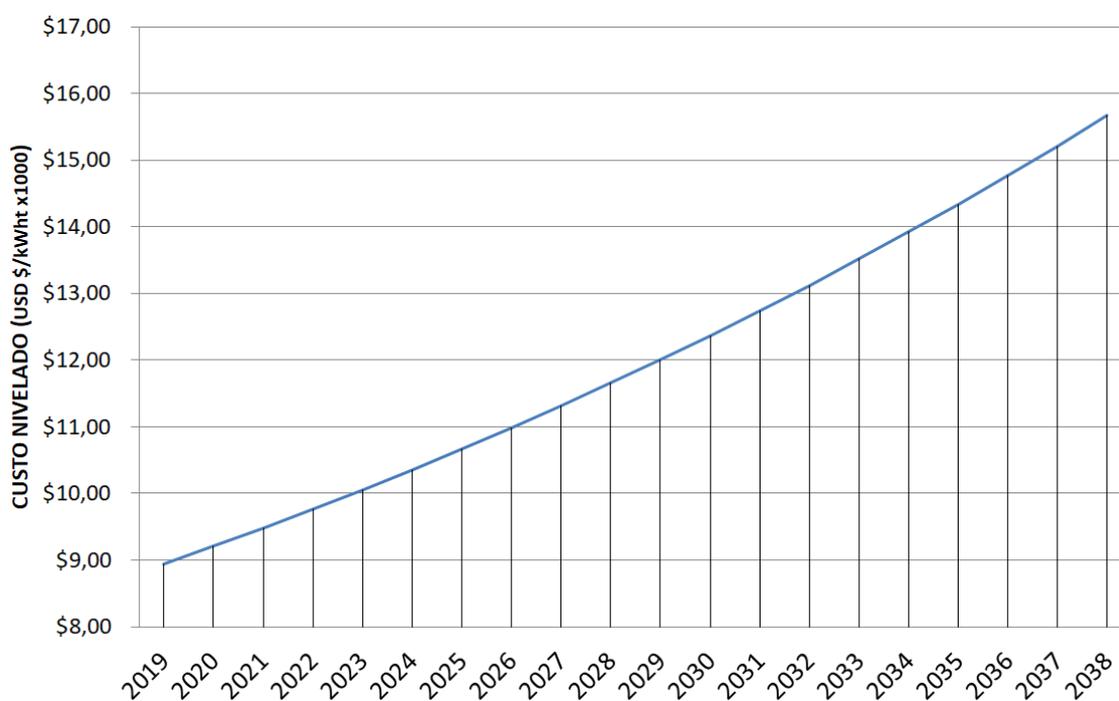


Figura 31 – Evolução anual dos custos de manutenção e operação para o gás natural
Fonte: autoria própria.

A geração de calor considerada para o processo de combustão do gás natural foi a mesma para os 20 anos do estudo. Já o gasto da fonte de energia foi sendo reajustado ano após ano, conforme indexador definido previamente, e pode ser visualizado na Figura 32. Os valores entre os anos de 2019 e 2021 foram dados reais, e a partir de 2022 os valores foram estimados.

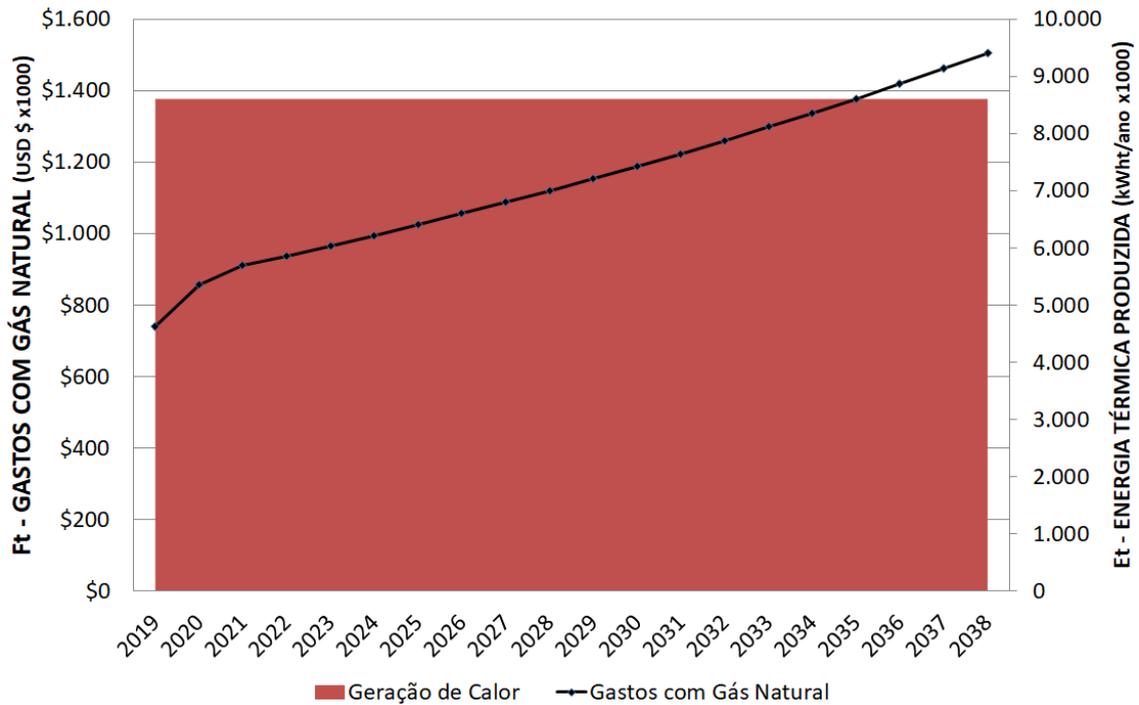


Figura 32 – Evolução dos gastos com gás natural versus a geração de calor anual
 Fonte: autoria própria.

O custo nivelado da energia no valor presente para o gás natural pôde ser obtido inserindo toda a evolução de custo já mencionada somada à demanda de calor do processo. Todas as variáveis necessárias para o processo de obtenção do LCOH convencional estão descritas na Tabela 15, em que o valor de Et é a demanda de energia anual calculada em kWh. O valor de investimento foi aplicado somente no ano 1 (2019).

Tabela 15 – Dados de entrada na equação de LCOH convencional

Ano	It (x1000)	Mt (x1000)	Ft (x1000)	r	t	Et (x1000)
2019	\$ 138	\$ 8,9	\$ 740	12%	20	8606
2020	\$ -	\$ 9,2	\$ 857	12%	20	8606
2021	\$ -	\$ 9,5	\$ 911	12%	20	8606
2022	\$ -	\$ 9,8	\$ 938	12%	20	8606
2023	\$ -	\$ 10,1	\$ 966	12%	20	8606
2024	\$ -	\$ 10,4	\$ 995	12%	20	8606
2025	\$ -	\$ 10,7	\$ 1.025	12%	20	8606
2026	\$ -	\$ 11,0	\$ 1.056	12%	20	8606
2027	\$ -	\$ 11,3	\$ 1.087	12%	20	8606
2028	\$ -	\$ 11,7	\$ 1.120	12%	20	8606
2029	\$ -	\$ 12,0	\$ 1.153	12%	20	8606
2030	\$ -	\$ 12,4	\$ 1.188	12%	20	8606
2031	\$ -	\$ 12,7	\$ 1.224	12%	20	8606
2032	\$ -	\$ 13,1	\$ 1.260	12%	20	8606
2033	\$ -	\$ 13,5	\$ 1.298	12%	20	8606
2034	\$ -	\$ 13,9	\$ 1.337	12%	20	8606
2035	\$ -	\$ 14,3	\$ 1.377	12%	20	8606
2036	\$ -	\$ 14,8	\$ 1.419	12%	20	8606
2037	\$ -	\$ 15,2	\$ 1.461	12%	20	8606
2038	\$ -	\$ 15,7	\$ 1.505	12%	20	8606

Fonte: autoria própria.

Os resultados dos cálculos para a obtenção do LCOH convencional podem ser visualizados na Figura 33. Nesse cenário calculado, como já mencionado, o custo do investimento é amortizado totalmente dentro do primeiro ano. Os custos com as fontes de energia, manutenção e operação de 2019 até 2021 foram os praticados no período. Já para os anos seguintes, tais custos foram indexados até o último ano de vida útil do equipamento considerado. A partir de 2022, os valores seguiram uma projeção estimada de crescimento até o último ano (2038).

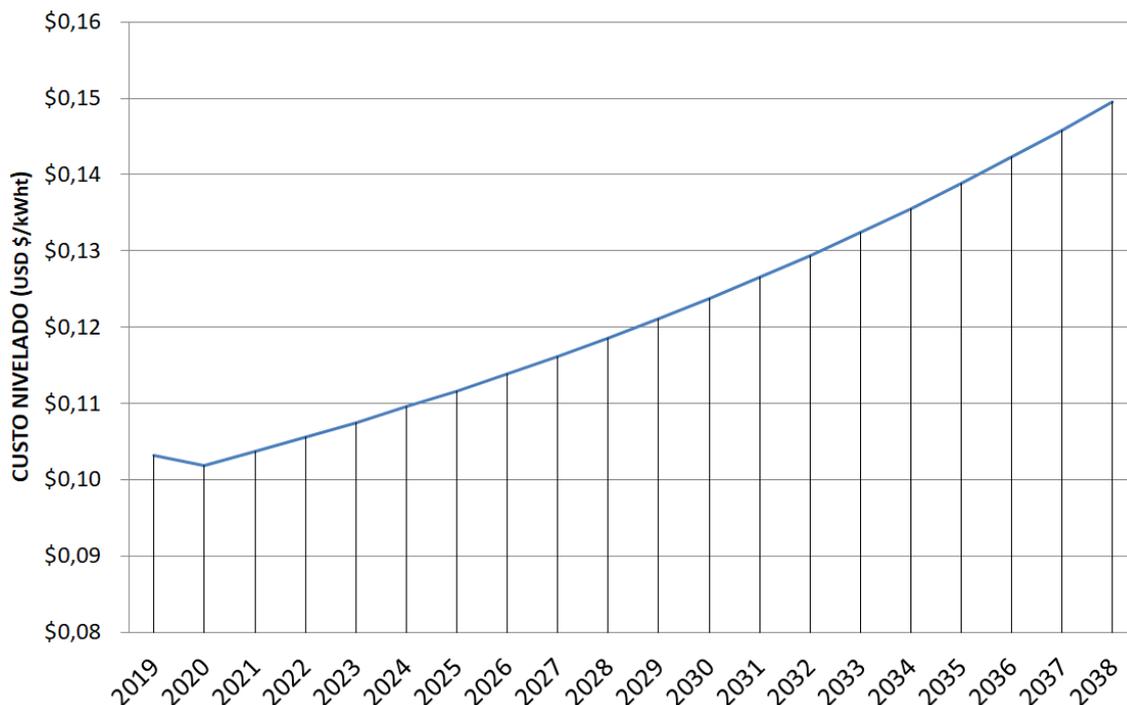


Figura 33 – LCOH convencional para o gás natural via contato indireto
 Fonte: autoria própria.

4.2.4. LCOH convencional com fonte de energia por gás natural via contato direto

Similarmente ao caso do GLP, o estudo do cenário via contato direto, agora para o gás natural, visa entender se existe viabilidade econômica desse processo de geração de calor. Para tanto, os resultados aqui obtidos levam em consideração as mesmas informações de entrada do LCOH convencional para o gás natural via contato indireto. O diferencial desse processo de troca térmica via contato direto está em uma maior eficiência térmica frente ao processo que utiliza transferência de calor via contato indireto. Dessa forma, o investimento necessário passa a ser inferior, quando comparado ao do contato indireto.

Nesse contexto, o incremento de eficiência em se alterar o processo de troca térmica do equipamento queimador de gás natural foi de 10%. O ganho de eficiência do processo de troca térmica reduziu os gastos com a fonte de energia quando comparado aos do LCOH convencional por contato indireto. A Figura 34 mostra a evolução comparativa dos custos ao longo dos 20 anos. Durante esse período, o montante reduzido pelo processo de troca térmica direta foi de aproximadamente 1,2 milhões de dólares, algo em torno de 5,6% de economia direta.

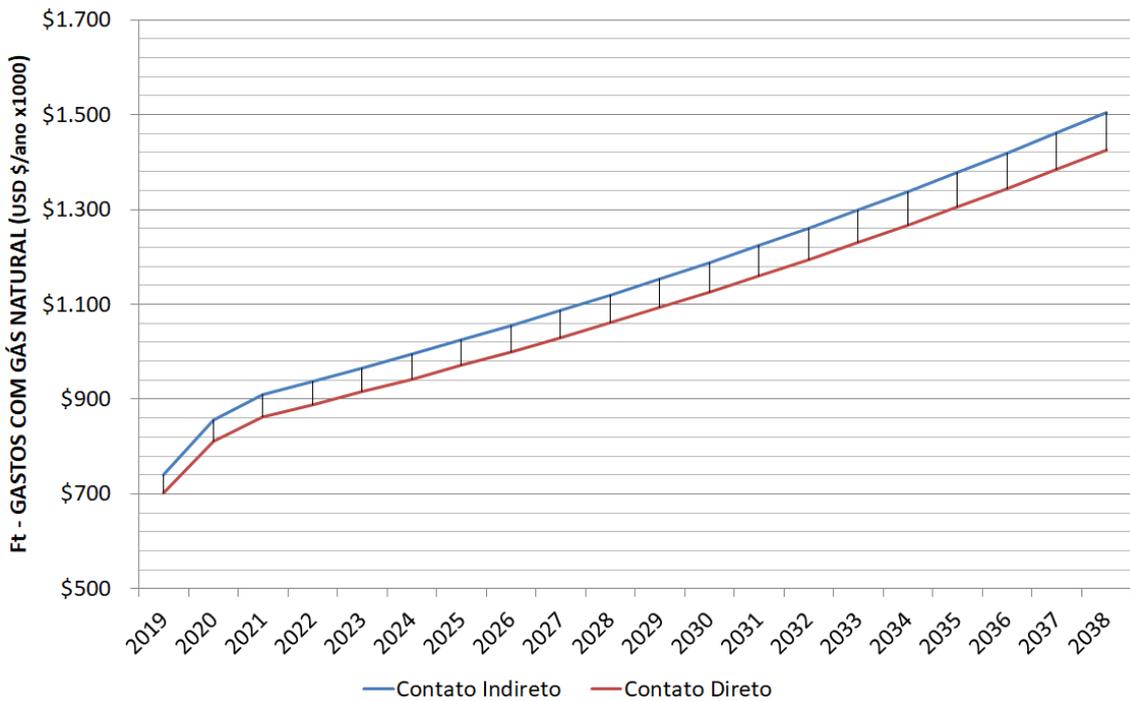


Figura 34 – Comparativo entre troca térmica direta e indireta para o gás natural
 Fonte: autoria própria.

O principal responsável pela redução dos gastos com a fonte de energia foi justamente a necessidade de energia térmica produzida no ano t. Com o aumento em 10% da eficiência de troca térmica, a redução da necessidade de energia térmica produzida foi de aproximadamente 5,6%. O impacto anual acumulado por 20 anos é de cerca de 9.000.000 kWh, o que equivale a pouco mais de um ano de energia economizada. A Figura 35 mostra a diferença de energia produzida por ano entre os processos de troca térmica indireta e direta para o gás natural.

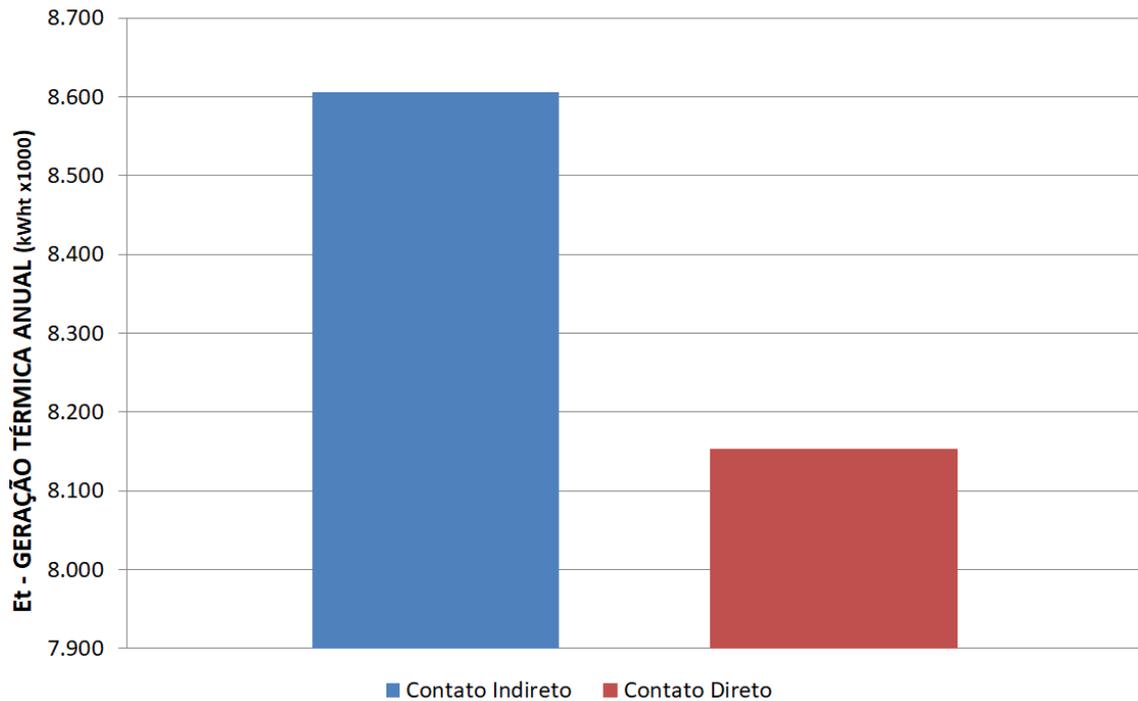


Figura 35 – Energia térmica produzida para troca térmica indireta e direta para o gás natural
 Fonte: autoria própria.

A troca térmica por contato direto proporciona uma redução do investimento do sistema em cerca de 21%. Como já mencionado, a redução de CAPEX (It) está relacionada à inexistência da camisa térmica utilizada no processo de troca térmica indireta. Nesse caso, os gases de combustão passam a entrar em contato com o produto a ser secado. A Tabela 16 mostra o agrupamento de todos os valores de entrada utilizados no cálculo de LCOH convencional para contato direto.

Tabela 16 – Dados de entrada na equação de LCOH convencional via contato direto

Ano	It (x1000)	Mt (x1000)	Ft (x1000)	r	t	Et (x1000)
2019	\$ 106	\$ 8,9	\$ 701	12%	20	8153
2020	\$ -	\$ 9,2	\$ 811	12%	19	8153
2021	\$ -	\$ 9,5	\$ 863	12%	18	8153
2022	\$ -	\$ 9,8	\$ 888	12%	17	8153
2023	\$ -	\$ 10,1	\$ 915	12%	16	8153
2024	\$ -	\$ 10,4	\$ 943	12%	15	8153
2025	\$ -	\$ 10,7	\$ 971	12%	14	8153
2026	\$ -	\$ 11,0	\$ 1.000	12%	13	8153
2027	\$ -	\$ 11,3	\$ 1.030	12%	12	8153
2028	\$ -	\$ 11,7	\$ 1.061	12%	11	8153
2029	\$ -	\$ 12,0	\$ 1.093	12%	10	8153
2030	\$ -	\$ 12,4	\$ 1.125	12%	9	8153
2031	\$ -	\$ 12,7	\$ 1.159	12%	8	8153
2032	\$ -	\$ 13,1	\$ 1.194	12%	7	8153
2033	\$ -	\$ 13,5	\$ 1.230	12%	6	8153
2034	\$ -	\$ 13,9	\$ 1.267	12%	5	8153
2035	\$ -	\$ 14,3	\$ 1.305	12%	4	8153
2036	\$ -	\$ 14,8	\$ 1.344	12%	3	8153
2037	\$ -	\$ 15,2	\$ 1.384	12%	2	8153
2038	\$ -	\$ 15,7	\$ 1.426	12%	1	8153

Fonte: autoria própria.

A Figura 36 mostra o resultado obtido para o método convencional do LCOH com transferência de calor por contato direto. O custo unitário a valor presente sofre ao longo dos 20 anos o efeito dos aumentos projetados para a fonte de energia, manutenção e operação. No final de 20 anos, a variação do custo se estabelece em torno de 57%, incluindo o investimento que se dá no primeiro ano (2019). Vale ressaltar que os custos de manutenção foram os mesmos utilizados nos cálculos de LCOH convencional para o gás natural na troca térmica indireta.

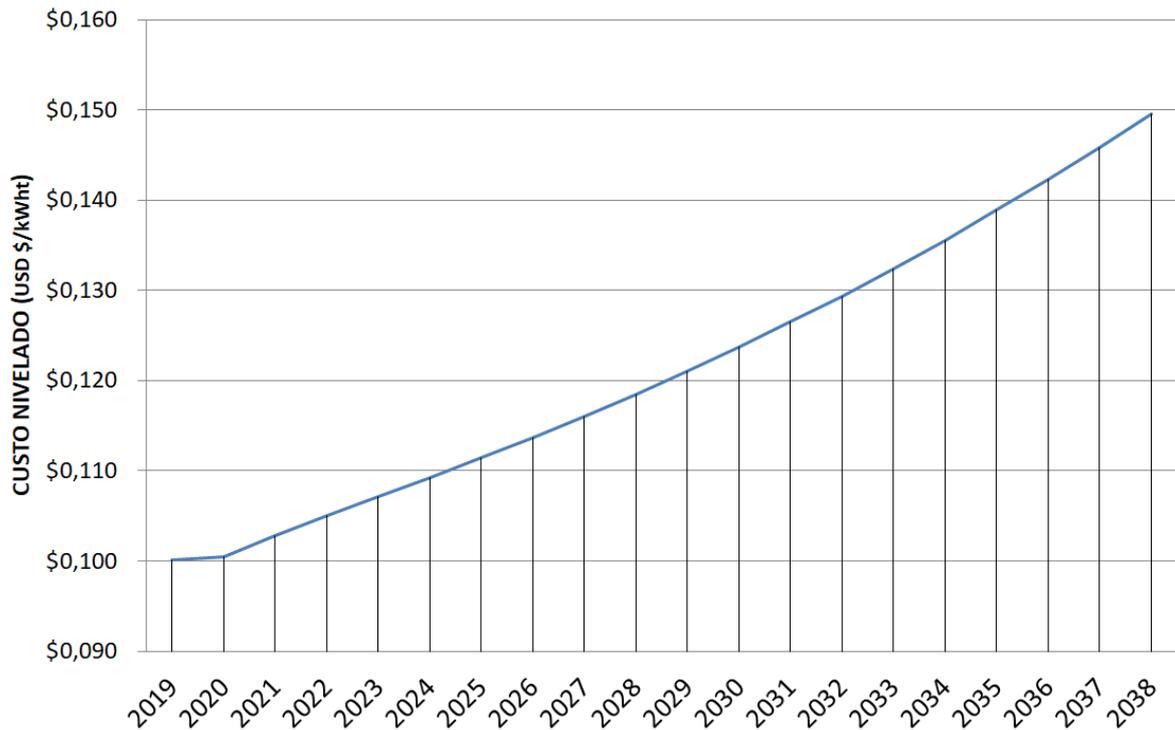


Figura 36 – Custo nivelado de energia para o gás natural via contato direto
 Fonte: autoria própria.

O comparativo entre os custos nivelados de energia pelo método LCOH convencional via contato indireto e via contato direto pode ser visto na Figura 37. O custo nivelado de partida no ano 2019 para o contato direto é menor quando comparado ao do contato indireto. Essa diferença se mantém até 2023, ano em que praticamente se igualam os custos durante o restante de vida útil do equipamento. Embora os custos de utilização da fonte de energia sejam inferiores aos do processo de contato indireto, os valores tendem a se equalizar devido à necessidade de calor produzida também ser menor. Em resumo, enquanto o custo com gás natural é o numerador, o calor produzido é o denominador, e ambos possuem a mesma redução em porcentagem, visto que um é diretamente proporcional ao outro.

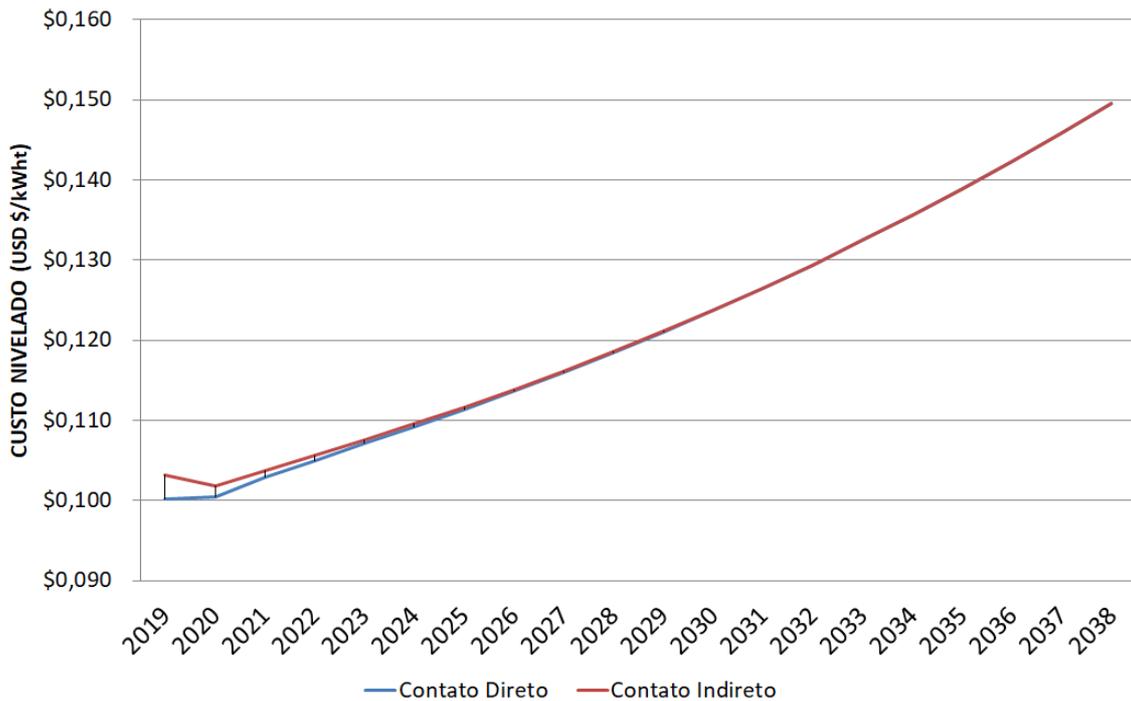


Figura 37 – LCOH convencional para troca térmica direta e indireta para gás natural
 Fonte: autoria própria.

4.2.5. LCOH convencional com fonte de energia por biomassa via caldeira a vapor

As caldeiras que utilizam a biomassa como fonte de energia é uma das alternativas mais comumente utilizadas no meio industrial para a geração de calor com fontes renováveis. A grande disponibilidade de biomassa e seus baixos custos energéticos (quando comparados às fontes não renováveis), em especial proveniente das usinas de açúcar e álcool, assim como de florestas energéticas de eucalipto, proporcionaram ainda mais a propagação deste tipo de tecnologia (NOGUEIRA, L. *et al*, 2005). O calor produzido pela caldeira na forma de vapor de água pode ser facilmente conduzido pelas tubulações até a sua utilização final, que acontece no processo consumidor em questão.

O vapor de água produzido pela caldeira, quando aplicado no processo de secagem via *spray dryer*, não pode ser utilizado via contato direto. O principal motivo disso é o fato de que, durante a troca térmica, o vapor, por ser saturado, tende a se condensar, evitando assim a secagem do produto de forma eficiente. Assim, faz-se necessária a inclusão de um trocador de calor que aqueça outro fluido para que este execute a função de secagem do produto úmido.

A biomassa também é uma *commodity*, ou seja, seu preço acompanha o regime oferta *versus* demanda. Embora exista uma base de preços regionais pelo Cepea Florestal para diversos produtos oriundos da madeira, não existe hoje no Brasil algo que regule esse preço (IBÁ, 2017). Outra peculiaridade desse mercado é que a celulose proveniente do eucalipto é vendida em dólares americanos, o que faz muitas negociações de madeira em pé (plantadas) também ser puramente convertido em reais para fins de negociação no Brasil.

Dentro desse cenário que engloba as negociações de biomassa no Brasil, a presente tese estabeleceu um fator de reajuste projetado até 2038. Como é impossível prever o que o mercado irá praticar, principalmente em um horizonte de 20 anos, foram considerados dois marcos de reajuste: (i) de 2019 a 2021, com os valores sendo a média anual realizada no período; e (ii) de 2022 a 2038, considerando um reajuste médio de 3% ao ano como inflação da categoria. A Figura 38 mostra a evolução gráfica dos períodos mencionados.

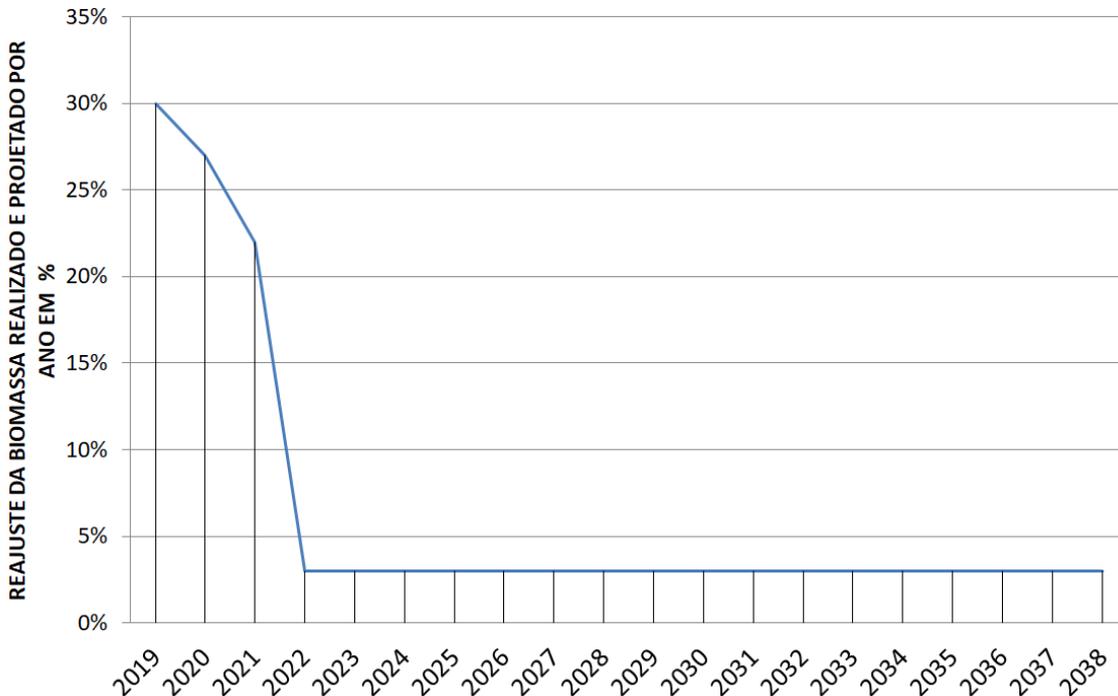


Figura 38 – Reajuste projetado para a biomassa até 2038
Fonte: autoria própria a partir de dados da JBS (2021).

O cenário de reajuste desenhado até 2038 faz com se obtenham os preços por tonelada da biomassa considerada nos cálculos. A Figura 39 mostra tais dados, que vão de 2019 a 2038. Ressalta-se que, para os anos de 2019 a 2021, os valores foram a média do ano praticada e, de 2022 a 2038, a projeção foi realizada conforme reajuste já mencionado.

A grande demanda para essa fonte de energia fez os preços dispararem a partir de 2019. O fator dólar, as exportações de madeira em toras e o aumento das vendas de embalagem durante a pandemia foram os principais fatores desse aumento da demanda.

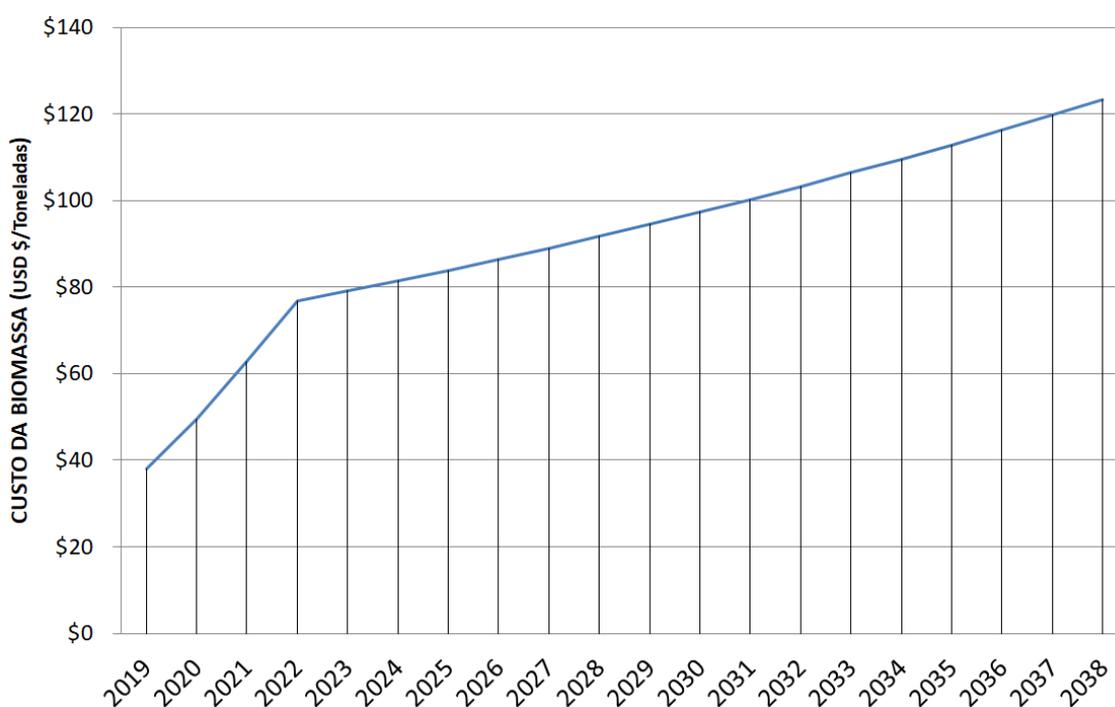


Figura 39 – Evolução dos preços da biomassa para queima em caldeira
Fonte: autoria própria.

Uma das principais vantagens da biomassa frente às fontes de energia gasosa como GLP ou gás natural é o custo da energia, cuja redução pode atingir, em alguns casos, cerca de cinco a seis vezes o valor do gás natural ou GLP. Esse custo se reflete principalmente nos gastos anuais com a fonte de energia (Ft). Embora possua um custo menor de aquisição, também necessita de uma maior geração de calor, justamente para suprir determinadas situações do processo que exigem paradas curtas. A Figura 40 mostra o comparativo entre a geração de calor da caldeira a vapor com biomassa e a do

gás natural via contato direto. A necessidade de geração de calor em um equipamento gerador de vapor por biomassa chega a ser 37% maior que a do gás natural.

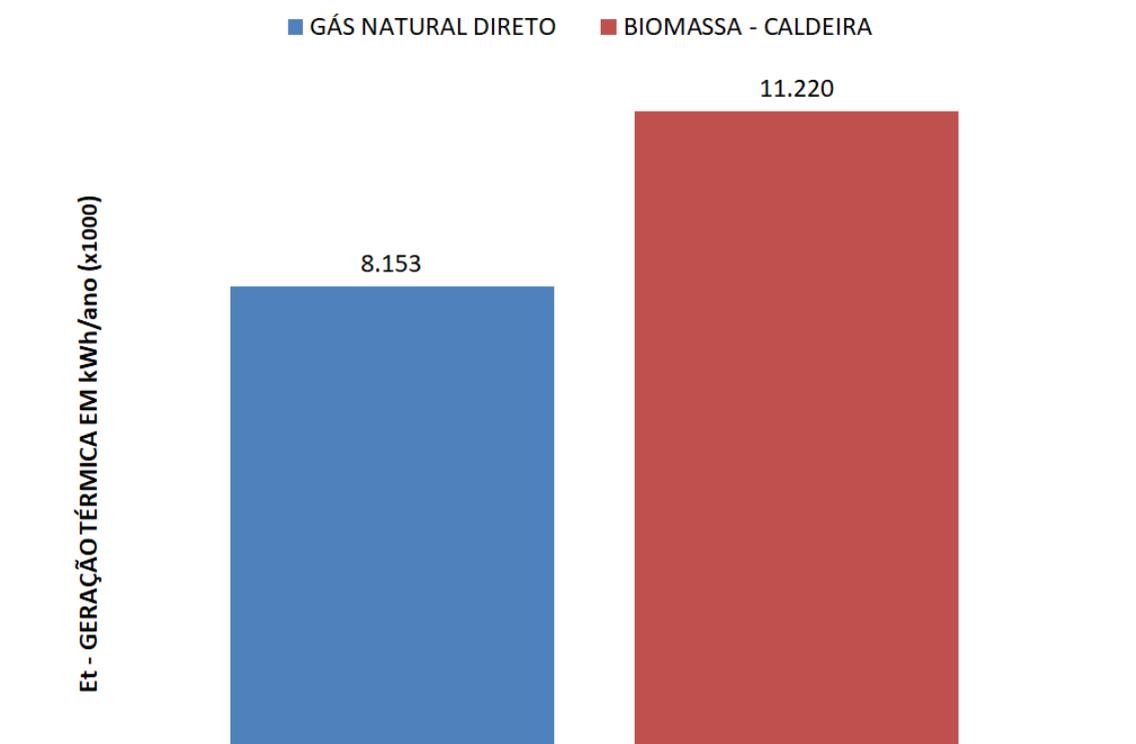


Figura 40 – Geração de calor (Et) entre caldeira a biomassa e queimado a gás natural via transferência de calor por contato direto
Fonte: autoria própria.

Com essa necessidade de maior geração de calor em comparação ao gás natural, porém apresentando um custo unitário de energia relativamente menor, os gastos com a fonte de energia via biomassa podem ser visualizados na Figura 41. Os valores de 2019 a 2021 foram os realmente praticados para o período, enquanto os valores a partir de 2022 até 2038 foram projetados à inflação de 3% conforme já citado anteriormente. Quando analisado o período total (de 2019 até 2038), os gastos com a fonte de energia chegam a atingir o valor acumulado de 20,5 milhões de dólares americanos.

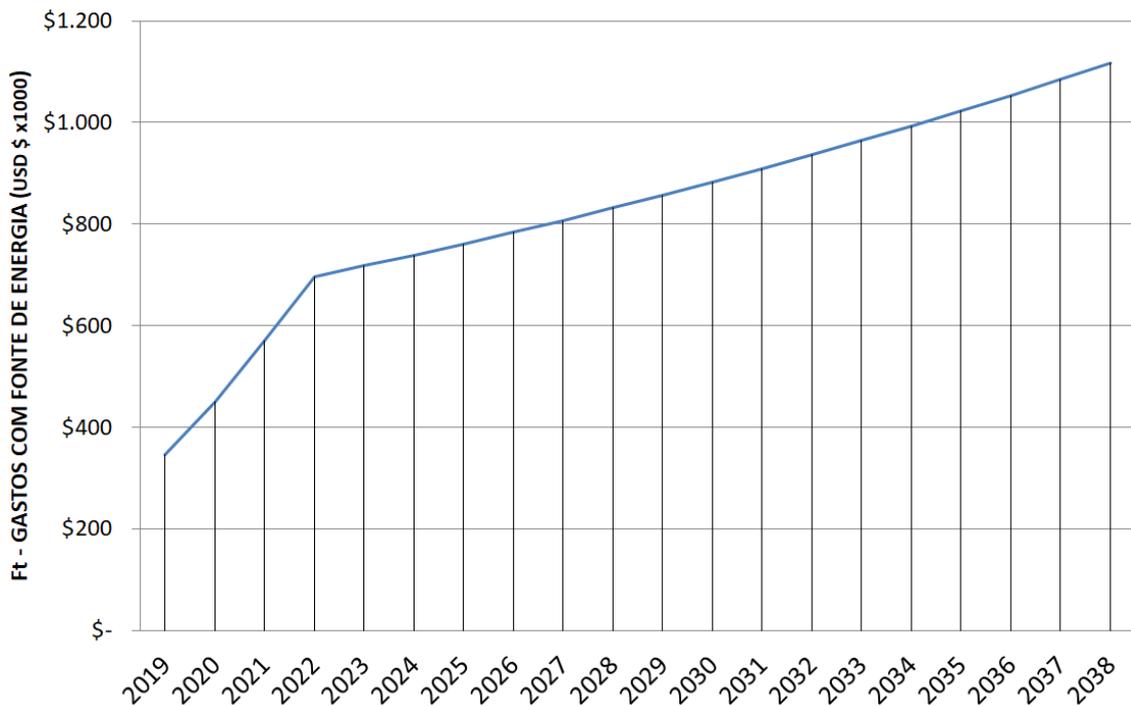


Figura 41 – Gastos com fonte de energia (Ft)
 Fonte: autoria própria.

Os custos de investimento foram aplicados nos dois anos iniciais, em 2019 e 2020. Dentro dos custos de investimento, foram considerados, entre outros: (i) equipamentos; (ii) construção civil; (iii) instalações elétricas; (iv) tubulações de vapor; e (v) demais infraestruturas. Vale mencionar que os valores foram tomados para a realidade do ano de 2019, e não foram atualizados para o valor presente. O maior valor tido para o investimento ocorre no ano 1, ou seja, 2019. Uma pequena parcela de investimento é deixada para o ano seguinte, que é o item de acabamento da obra. A Figura 42 mostra a distribuição do valor financeiro (It) dos investimentos ao longo dos dois anos.

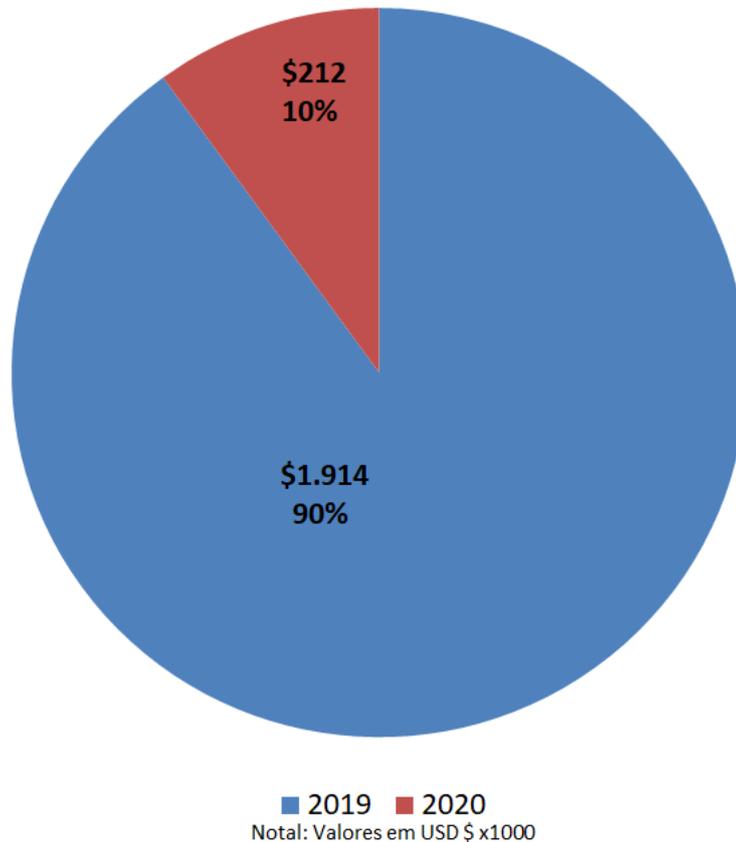


Figura 42 – Investimento (It) para um processo de secagem utilizando vapor de água
Fonte: autoria própria.

O processo que utiliza a biomassa como fonte de energia possui custos de manutenção e operação muito superiores aos dos que utilizam fontes de energia gasosa. Os fatores que mais se destacam por esse aumento são: (i) movimentação de biomassa por pás carregadeiras, incluindo diesel e suas manutenções; (ii) desgastes constantes dos equipamentos por abrasão e corrosão; (iii) gastos com energia elétrica; e (iv) gastos com mão de obra para operação e manutenção.

A correção monetária dos valores de manutenção e operação do sistema foi realizada através de um valor médio anual de 2019, acrescido da inflação dos anos posteriores. A inflação projetada incidiu em todos os itens contidos nos cálculos de Mt, desde diesel e aços, até mão de obra e energia elétrica. A Figura 43 mostra a evolução desses números de reajuste. Para tais reajustes, foi considerada uma inflação média de 3% ao ano até o final do período de estudo (2038).

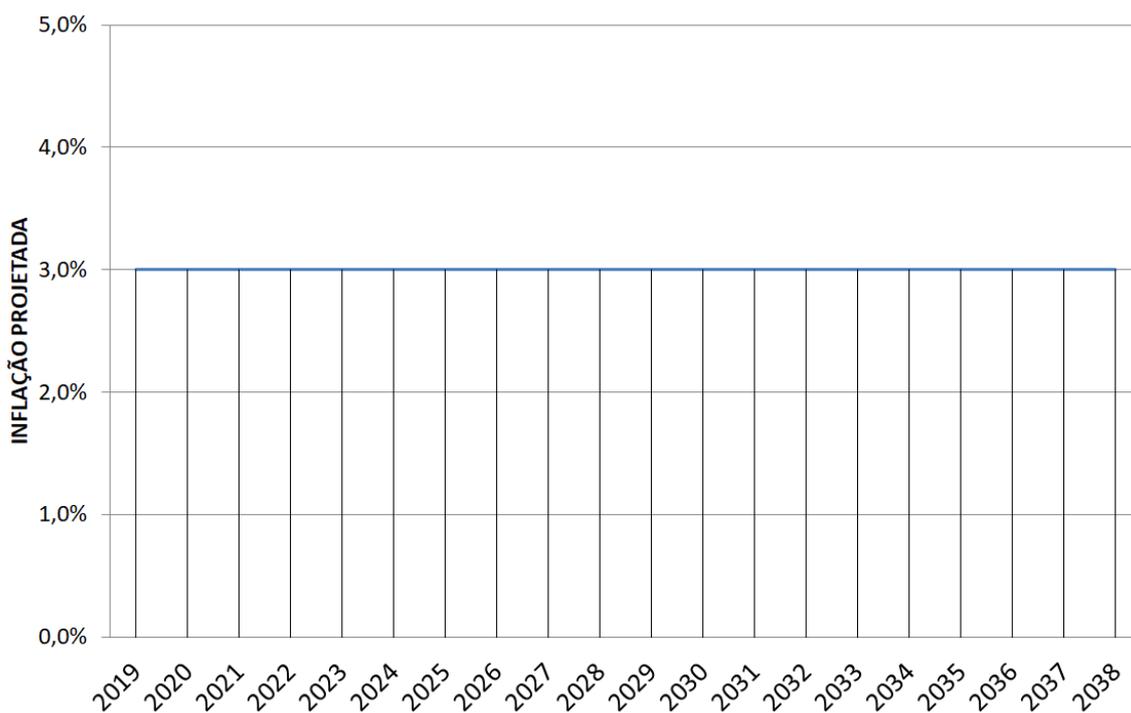


Figura 43 – Evolução da inflação utilizada nos cálculos de Mt
 Fonte: autoria própria.

De posse dos valores para calcular os custos de manutenção e operação e do indexador de reajuste, é possível gerar o gráfico de evolução da variável Mt. A Figura 44 mostra como ficam os custos de operação e manutenção do sistema de geração de vapor utilizando a biomassa como fonte de energia. A operação com biomassa está muito mais sujeita a intervenções da operação e a fatores externos, como umidade, granulometria, entre outros. Todos esses detalhes servem como itens variáveis que podem afetar diretamente esses custos, sobretudo os de manutenção.

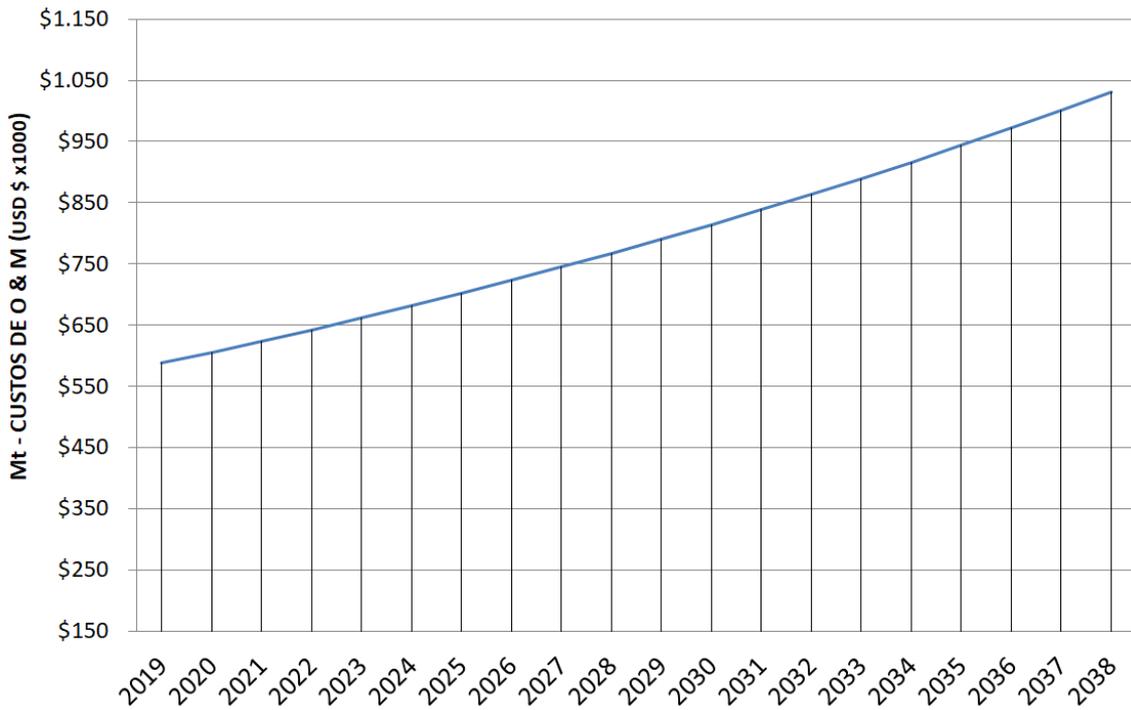


Figura 44 – Evolução dos custos de manutenção e operação (Mt) para a biomassa
 Fonte: autoria própria.

O agrupamento das variáveis que compõem a equação do LCOH convencional utilizando como fonte de energia a biomassa pode visto na Tabela 17. Os dados da tabela são compostos por: (i) custos de investimento; (ii) custos de manutenção e operação; (iii) custos com a fonte de energia; (iv) taxa de desconto; (v) tempo de vida útil do equipamento; e (vi) calor gerado. O valor de calor gerado (Et) foi o mesmo ano a ano, considerando um mesmo padrão de operação.

Tabela 17 – Dados de entrada na equação de LCOH convencional para caldeira a vapor

Ano	It (x1000)	Mt (x1000)	Ft (x1000)	r	t	Et (x1000)
2019	\$ 2.234	\$ 224,6	\$ 269	12%	20	11220
2020	\$ 532	\$ 231,3	\$ 350	12%	19	11220
2021	\$ -	\$ 238,3	\$ 444	12%	18	11220
2022	\$ -	\$ 245,4	\$ 542	12%	17	11220
2023	\$ -	\$ 252,8	\$ 596	12%	16	11220
2024	\$ -	\$ 260,3	\$ 656	12%	15	11220
2025	\$ -	\$ 268,2	\$ 721	12%	14	11220
2026	\$ -	\$ 276,2	\$ 793	12%	13	11220
2027	\$ -	\$ 284,5	\$ 873	12%	12	11220
2028	\$ -	\$ 293,0	\$ 960	12%	11	11220
2029	\$ -	\$ 301,8	\$ 1.056	12%	10	11220
2030	\$ -	\$ 310,9	\$ 1.161	12%	9	11220
2031	\$ -	\$ 320,2	\$ 1.278	12%	8	11220
2032	\$ -	\$ 329,8	\$ 1.341	12%	7	11220
2033	\$ -	\$ 339,7	\$ 1.409	12%	6	11220
2034	\$ -	\$ 349,9	\$ 1.479	12%	5	11220
2035	\$ -	\$ 360,4	\$ 1.553	12%	4	11220
2036	\$ -	\$ 371,2	\$ 1.631	12%	3	11220
2037	\$ -	\$ 382,3	\$ 1.712	12%	2	11220
2038	\$ -	\$ 393,8	\$ 1.798	12%	1	11220

Fonte: autoria própria.

Todas as informações mostradas anteriormente permitem que seja calculado o LCOH convencional para a caldeira a vapor com biomassa como fonte de energia. A Figura 45 mostra a evolução do valor presente em USD \$/kWh do calor gerado em uma caldeira de vapor de água que faz utilização de biomassa. O gráfico dessa evolução se difere bastante do gráfico das fontes de energia gasosa, principalmente no quesito investimento. O ponto de partida para os dois primeiros anos é muito pesado do ponto de vista de amortização do investimento. Existe uma queda brusca do custo nivelado de 2019 até 2026, quando, então, se dá início a uma leve tendência de alta motivada pelos reajustes monetários incidentes nos custos de manutenção, operação e nos gastos com fontes de energia.

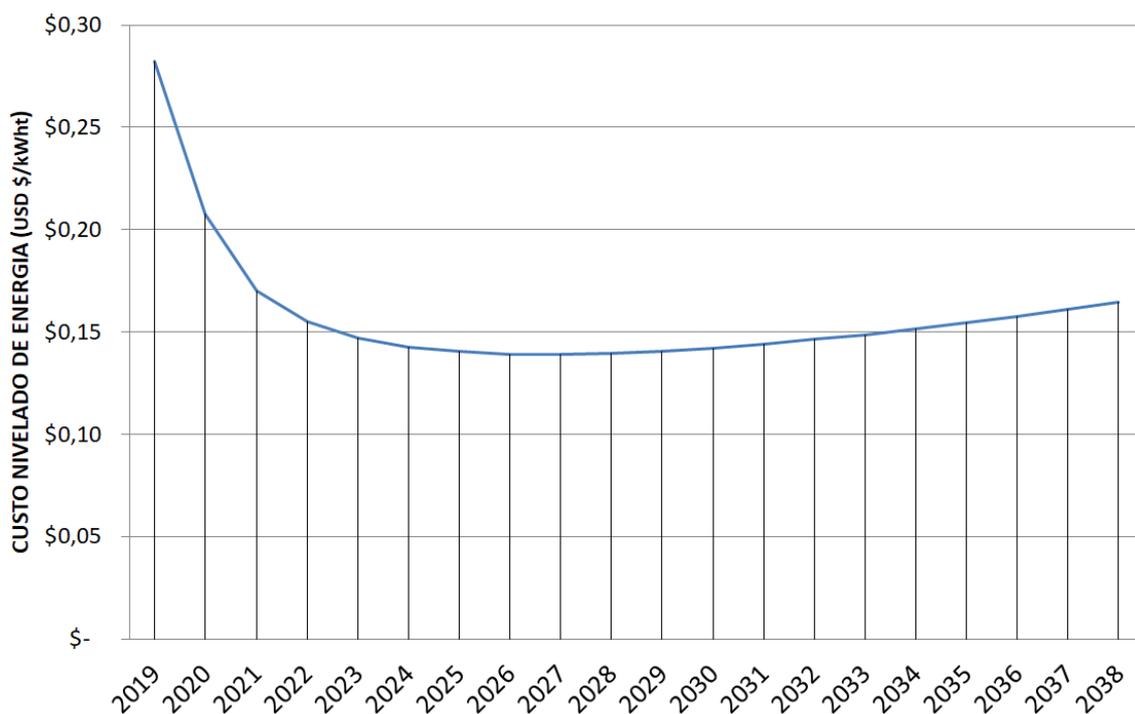


Figura 45 – Custo nivelado da energia para caldeira a vapor utilizando biomassa
 Fonte: autoria própria.

4.2.6. LCOH convencional com fonte de energia por biomassa via gerador de gás quente, com adicional de GLP no aquecimento final do ar atmosférico

A aplicação desse conceito misto de geração de calor foi pensada justamente para verificar a viabilidade técnica e econômica dentro do sistema de secagem. A grande diferença desse sistema é que não existe uma geração de vapor. A fornalha onde ocorre a combustão da fonte de energia sólida (biomassa) é seca, e o calor gerado é então transferido para o ar atmosférico. O ar atmosférico aquecido entra no queimador de GLP para breve rea aquecimento antes de entrar no *spray dryer*. Embora existam inúmeros pontos de perda e inclusão de custos no calor gerado, o sistema possui alta confiabilidade operacional.

Do ponto de vista de investimentos, o sistema de gerador de gás quente, transferência de calor e *backup* em GLP é ligeiramente menor ao da caldeira a vapor. Tais investimentos estão alocados em: (i) equipamentos para combustão de biomassa; (ii) equipamentos para combustão de GLP; (iii) construção civil; (iv) instalações elétricas; (v) dutos de ar quente; e (vi) demais infraestruturas. No quesito CAPEX, utilizaram-se os anos de 2019 e 2020 para baixa de todo o fluxo financeiro referente aos

investimentos. A Figura 46 mostra a distribuição financeira dos investimentos nos dois anos mencionados.

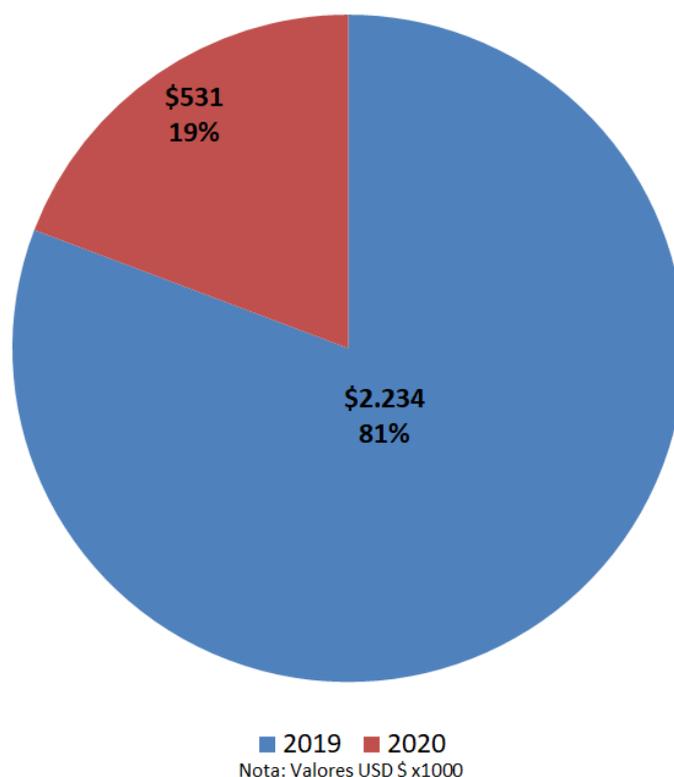


Figura 46 - Distribuição financeira dos investimentos nos anos de 2019 e 2020
Fonte: autoria própria.

Os custos de operação e manutenção dessa arquitetura contendo um queimador de biomassa e outro de GLP são superiores aos demais demonstrados. Basicamente, tais custos são a somatória dos custos de operação e manutenção da caldeira a vapor com os custos de operação e manutenção do queimador de GLP. Mesmo o sistema de queima de GLP sendo utilizado em baixa carga, quando comparado ao processo de combustão integral de GLP para fornecimento de calor ao *spray dryer*, foi considerado os seus custos de manutenção e operação de forma integral. A Figura 47 mostra como fica a evolução desses custos ao longo dos 20 anos, sendo 2019, 2020 e 2021 os valores praticados para a época, e os demais anos projetados.

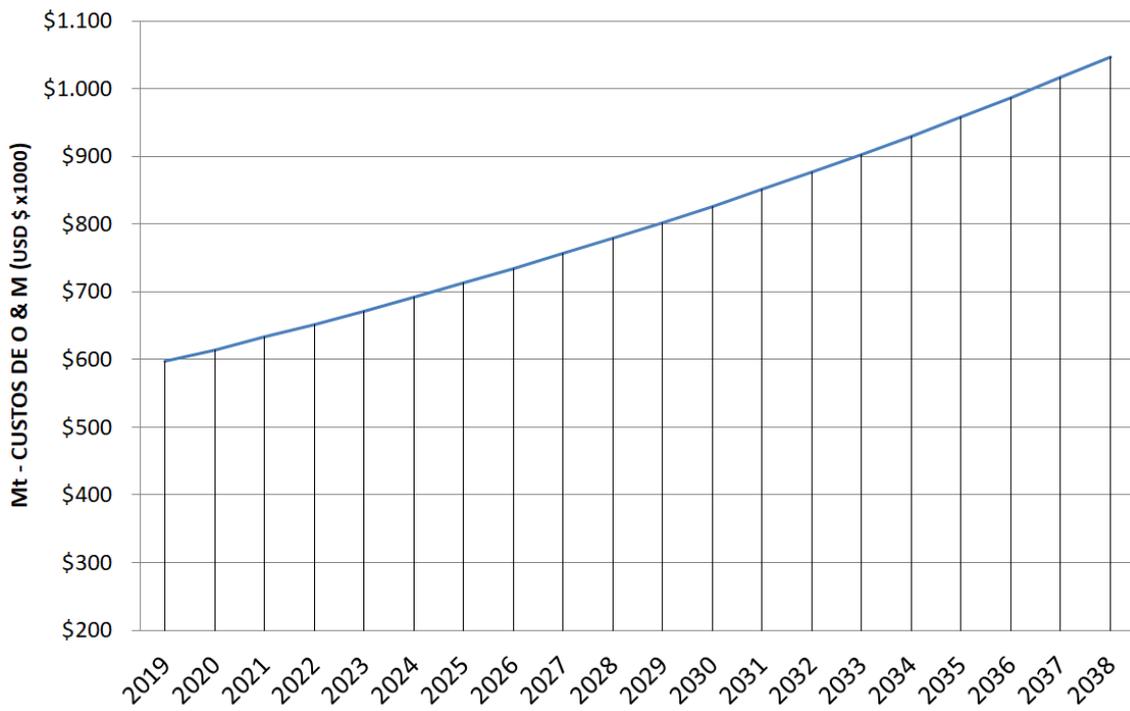


Figura 47 – Evolução dos custos de manutenção e operação (Mt) do sistema
 Fonte: autoria própria.

Por ser um sistema de geração de calor misto (biomassa e GLP), os custos com a fonte de energia ficam mais elevados quando comparados à solução de caldeira a vapor. Mesmo utilizando o GLP como complemento de calor, o impacto no custo chega a atingir aproximadamente 26% na média dos 20 anos e, em pontos isolados, esse custo atinge algo em torno de 40%, principalmente nos primeiros anos, nos quais o custo da biomassa é sensivelmente menor em relação ao do GLP. A Figura 48 mostra essa evolução de custos com fonte de energia (Ft) ao longo da projeção realizada entre 2022 e 2038, e com preços reais praticados na época para os anos de 2019 a 2021.

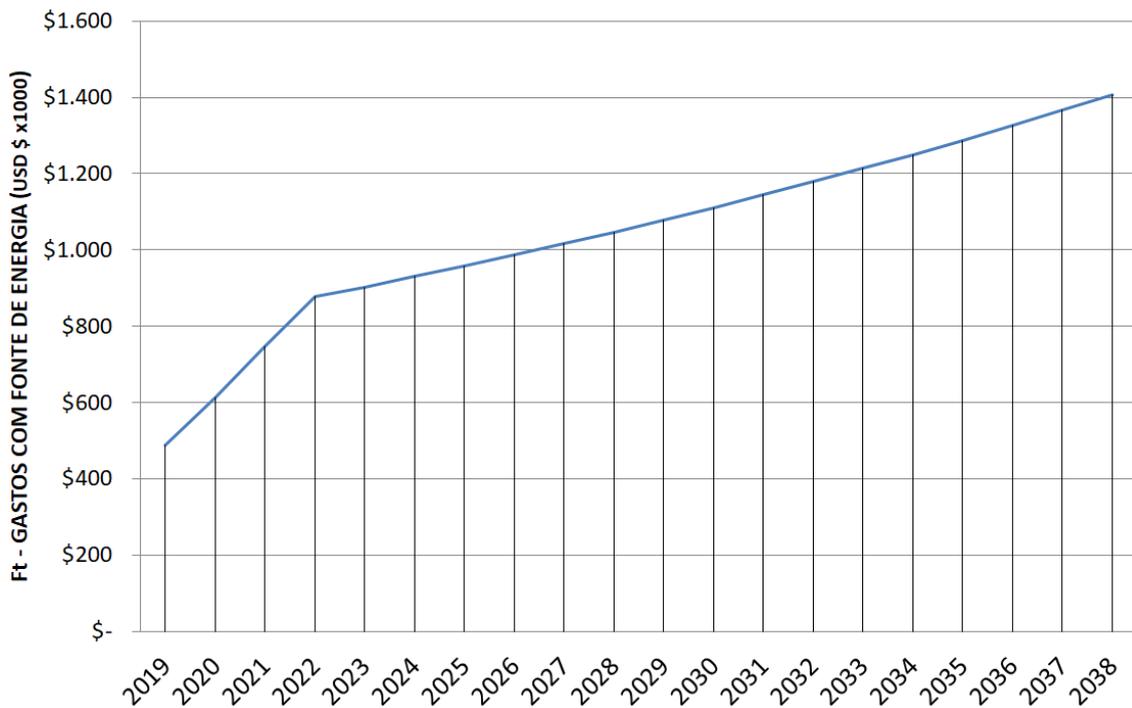


Figura 48 – Gastos com fonte de energia (Ft) para o gerador de gás quente a biomassa com complemento em GLP
 Fonte: autoria própria.

Quanto ao aspecto de geração de calor, comparando a arquitetura de combustão mista à da caldeira a vapor, existe uma retração no valor anual do primeiro sistema. Essa diminuição da geração de calor total deve-se ao fato de o queimador de GLP ser capaz de absorver melhor as reduções, paradas e esperas do sistema de secagem. Em resumo, o sistema que utiliza a fonte de energia gasosa é capaz de entrar e sair de operação muito mais rápido do que um sistema de combustão de combustíveis sólidos. Fora essa rapidez, o sistema ainda possui uma eficiência de conversão química (combustão) maior com redução das perdas. Nesse sentido, a Figura 49 traz um comparativo de geração de calor entre três tipos de arquiteturas: (i) queimador de GLP via transferência de calor por contato direto; (ii) caldeira a vapor d'água (queimador de biomassas); e (iii) gerador de gás quente à biomassa com complemento de GLP via transferência de calor por contato direto.

Embora o gerador de gás quente necessite gerar uma quantidade de calor superior em 25% em relação à do queimador de GLP, ainda consegue vantagem frente à caldeira a vapor. Tal vantagem pode atingir 10% de redução.

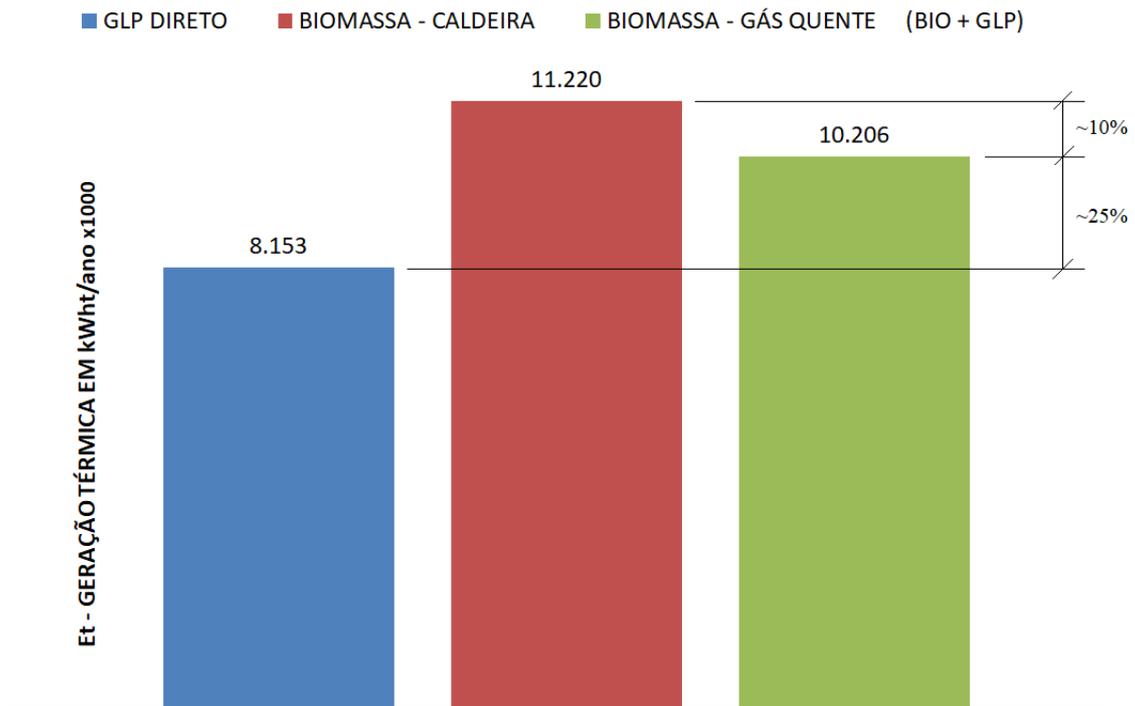


Figura 49 – Geração de calor (Et) entre três arquiteturas analisadas
 Fonte: autoria própria.

O agrupamento das variáveis que compõem a equação do LCOH convencional utilizando como fonte de energia a biomassa e GLP pode ser visto na Tabela 18. Os dados da tabela são compostos por: (i) custos de investimento; (ii) custos de manutenção e operação; (iii) custos com a fonte de energia; (iv) taxa de desconto; (v) tempo de vida útil do equipamento; e (vi) calor gerado. O valor de calor gerado (Et) foi similar ano a ano, considerando um mesmo padrão de operação. Outro detalha da tabela é a distribuição dos investimentos (It) em 2019 e 2020.

Tabela 18 – Dados para obter o LCOH convencional para o gerador de gás quente com complemento em GLP

Ano	It (x1000)	Mt (x1000)	Ft (x1000)	r	t	Et (x1000)
2019	\$ 1.915	\$ 233,5	\$ 411	12%	20	10206
2020	\$ 213	\$ 240,5	\$ 514	12%	19	10206
2021	\$ -	\$ 247,7	\$ 619	12%	18	10206
2022	\$ -	\$ 255,2	\$ 722	12%	17	10206
2023	\$ -	\$ 262,8	\$ 782	12%	16	10206
2024	\$ -	\$ 270,7	\$ 847	12%	15	10206
2025	\$ -	\$ 278,8	\$ 918	12%	14	10206
2026	\$ -	\$ 287,2	\$ 996	12%	13	10206
2027	\$ -	\$ 295,8	\$ 1.081	12%	12	10206
2028	\$ -	\$ 304,7	\$ 1.175	12%	11	10206
2029	\$ -	\$ 313,8	\$ 1.277	12%	10	10206
2030	\$ -	\$ 323,2	\$ 1.390	12%	9	10206
2031	\$ -	\$ 332,9	\$ 1.513	12%	8	10206
2032	\$ -	\$ 342,9	\$ 1.584	12%	7	10206
2033	\$ -	\$ 353,2	\$ 1.658	12%	6	10206
2034	\$ -	\$ 363,8	\$ 1.736	12%	5	10206
2035	\$ -	\$ 374,7	\$ 1.817	12%	4	10206
2036	\$ -	\$ 386,0	\$ 1.903	12%	3	10206
2037	\$ -	\$ 397,5	\$ 1.993	12%	2	10206
2038	\$ -	\$ 409,5	\$ 2.087	12%	1	10206

Fonte: autoria própria.

Todas as informações mostradas anteriormente permitem que seja calculado o LCOH convencional para o gerador de gás quente (biomassa) com complemento em GLP. A Figura 50 mostra a evolução do custo nivelado de energia no valor presente em USD \$/kWht. O ponto de partida para os dois primeiros anos é muito pesado do ponto de vista de amortização do investimento, da mesma forma que acontece na arquitetura de caldeira a vapor. Existe uma queda brusca do custo nivelado que vai de 2019 até 2024, quando se inicia uma leve tendência de alta motivada pelos reajustes monetários incidentes nos custos de manutenção, operação, e, principalmente, nos gastos baseados nas fontes de energia.

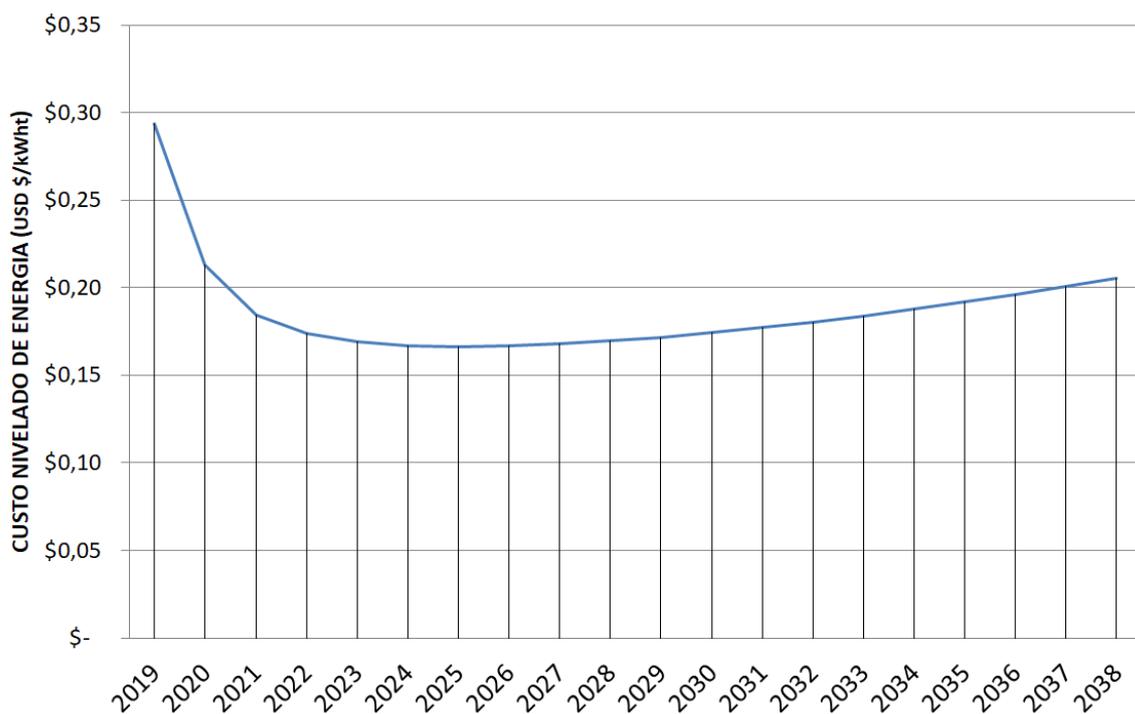


Figura 50 – LCOH convencional para o gerador de gás quente com complemento em GLP

Fonte: autoria própria.

4.3. LCOH aprimorado

4.3.1. LCOH aprimorado com fonte de energia por GLP via contato indireto

O método do LCOH aprimorado pretende estabelecer uma visão mais detalhada no que tange aos gastos com fonte de energia. Gerar a equação do LCOH aprimorado visou detalhar o quesito de eficiência térmica do sistema com uma mais generalista possível, a fim de buscar o equilíbrio entre o que pode ser encontrado no LCOH convencional e o LCOH aprimorado. O primeiro ponto analisado foi a arquitetura utilizada para o GLP quando aplicado em um sistema de troca térmica por contato indireto. A equação, já descrita no terceiro capítulo, traz o detalhamento dos cálculos que foram usados para obter os resultados dos custos nivelados de energia.

Embora tenha sido realizado um trabalho sobre o detalhamento da eficiência térmica do sistema, os demais custos se mantiveram os mesmos. Os valores de manutenção e operação dados por Mt , assim como os valores de investimento (It), seguiram a linha já informada. Além deles, também foram mantidos os valores de geração de calor (Et) e a taxa de desconto (r). Com isso, os novos dados

complementares da equação do LCOH aprimorado para o GLP via transferência de calor por contato indireto podem ser visualizados na Tabela 19. É importante mencionar que o valor de Al, que é a porcentagem de vazamento do sistema, foi considerado nulo, ou seja, o sistema de troca térmica entre os gases de combustão e o ar atmosférico foi considerado 100% hermético. Os dados de temperatura foram extraídos do próprio processo de secagem.

Tabela 19 – Dados complementares para obter o LCOH aprimorado para o GLP via contato indireto

Ano	Er (x1000)	Teg	Tea	Tsg	Al	PClfe	PRfe	t	r
2019	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,58	20	12%
2020	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,68	19	12%
2021	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,72	18	12%
2022	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,74	17	12%
2023	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,76	16	12%
2024	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,78	15	12%
2025	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,81	14	12%
2026	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,83	13	12%
2027	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,86	12	12%
2028	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,88	11	12%
2029	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,91	10	12%
2030	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,94	9	12%
2031	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,96	8	12%
2032	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 0,99	7	12%
2033	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 1,02	6	12%
2034	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 1,05	5	12%
2035	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 1,09	4	12%
2036	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 1,12	3	12%
2037	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 1,15	2	12%
2038	67.852.508	950	25	90	0	46.046	\$ 1,19	1	12%

Fonte: autoria própria.

Com os dados da tabela, foi possível também calcular os novos valores de gastos com a fonte de energia Ft baseados na eficiência térmica do sistema, utilizando-se de informações técnicas sobre as temperaturas dos sistemas e demandas de calor para o processo de secagem da planta em estudo. A Figura 51 mostra como se comportou a evolução dos dados em um período que se inicia em 2019 e percorre até 2038. Pode-se notar o salto de custo que compreende o período de 2019 a 2021 (valores reais) devido a eventos como dólar e pandemia.

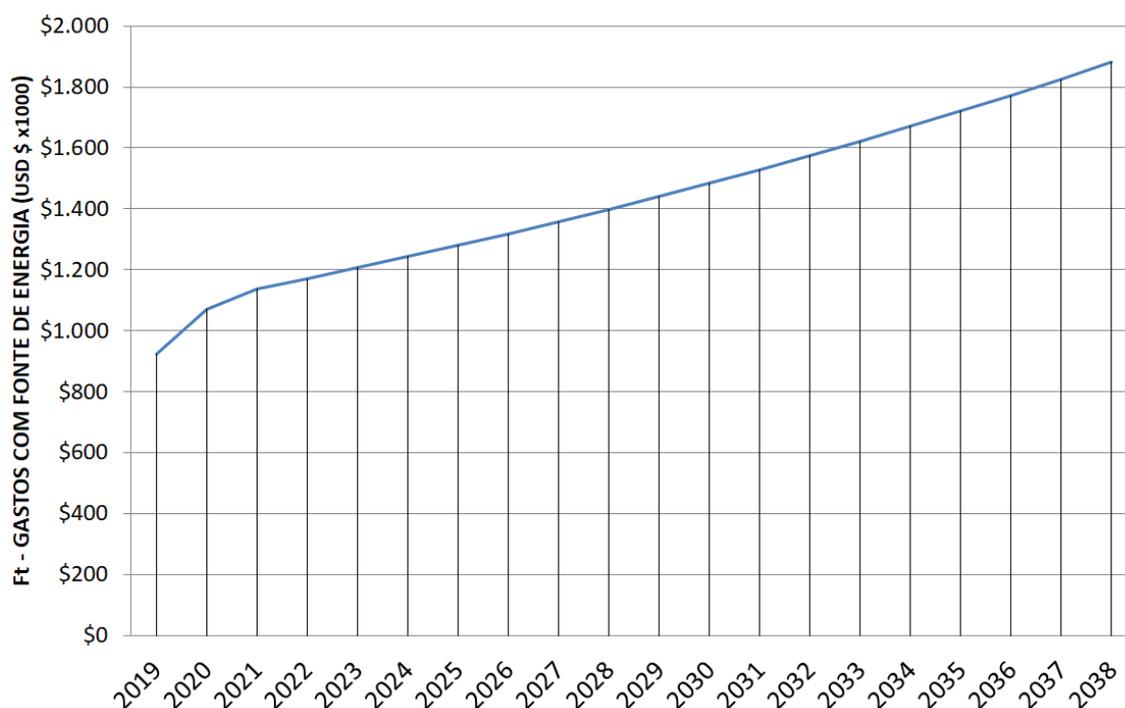


Figura 51 – Gastos com fonte de energia Ft
 Fonte: autoria própria.

O custo nivelado como resultado do método LCOH aprimorado pode ser obtido com todas as variáveis já informadas. A Figura 52 traz a representação gráfica de como se estabeleceram tais valores ao longo dos 20 anos de estudo. Não houve, dentro do horizonte estudado, nenhum fator que pudesse criar alguma estabilidade de preço da energia, principalmente por se tratar de uma projeção de correção monetária ano após ano a partir de 2022.

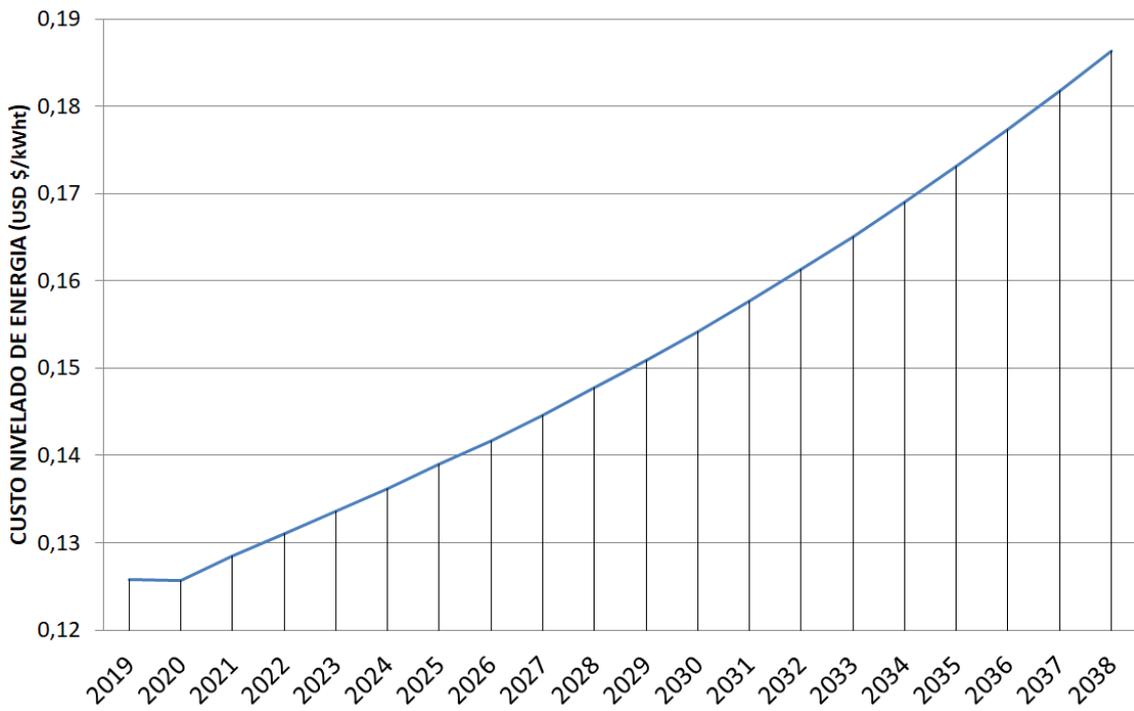


Figura 52 – LCOH aprimorado para GLP por contato indireto
 Fonte: autoria própria.

O efeito comparativo entre os resultados dos métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado é essencial para validar este último. Dessa forma, a Figura 53 mostra como ficaram os dados de LCOH em ambos os casos, utilizando-se do GLP como fonte de energia, assim como a transferência de calor por contato indireto. Ao longo dos 20 anos de estudo, os resultados apresentaram uma redução acumulada de 3,2% no LCOH aprimorado frente aos valores do LCOH convencional para a transferência de calor por contato indireto.

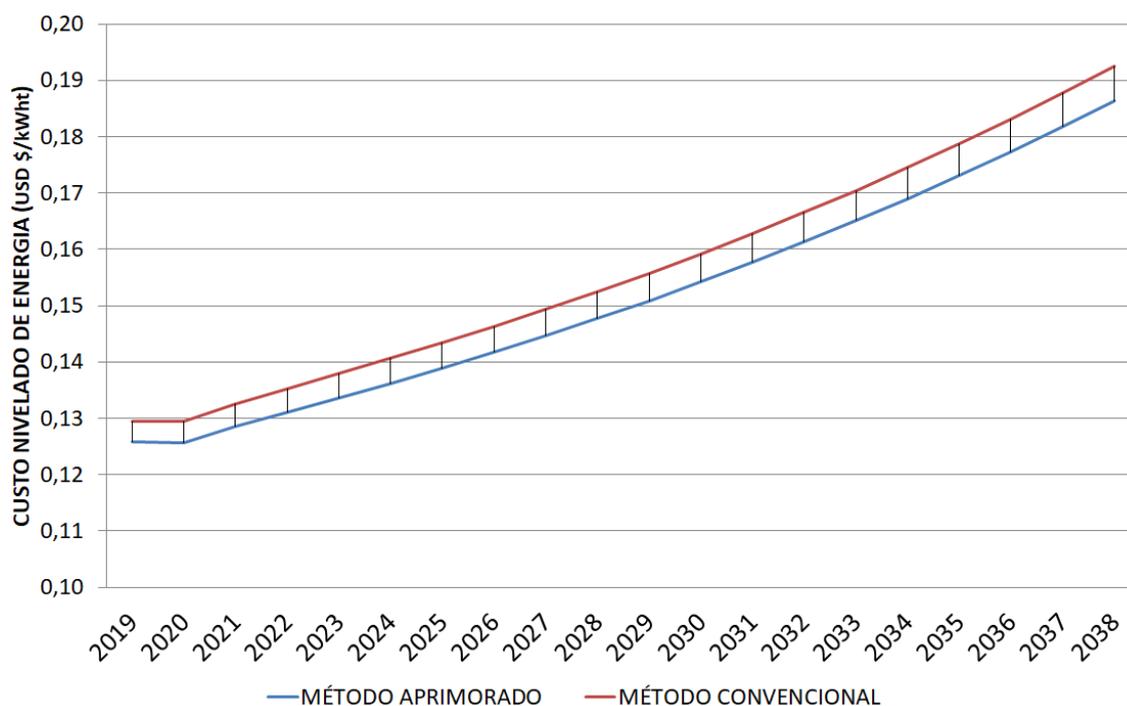


Figura 53 – LCOH convencional e aprimorado para o GLP por contato indireto
 Fonte: autoria própria.

4.3.2. LCOH aprimorado com fonte de energia por GLP via contato direto

O método LCOH aprimorado para transferência de calor por contato direto é trabalhado em uma equação menor que a utilizada para a transferência de calor por contato indireto. Ela se difere, além de outros detalhes, por causa da inexistência de variável que meça a porcentagem de vazamento entre os fluidos. Outro aspecto importante a ser mencionado é o fato de se utilizar a energia requerida teórica pelo sistema de secagem; com isso, também é possível calcular a eficiência de maneira direta, caso necessário.

Além das características já citadas sobre a metodologia aplicada do LCOH aprimorado, há o resultado calculado para a fonte de energia. O destaque do resultado do gasto com a fonte de energia é que, nesse caso, ele pode variar de acordo com a eficiência de combustão do processo e com a energia disponível na fonte de energia. O resultado calculado do gasto com a fonte de energia (Ft) para o método LCOH aprimorado *versus* LCOH convencional para GLP via transferência de calor por contato direto pode ser visualizado na Figura 54. Para o período de 20 anos do estudo, existe uma variação de pouco mais de 1% sobre o resultado acumulado.

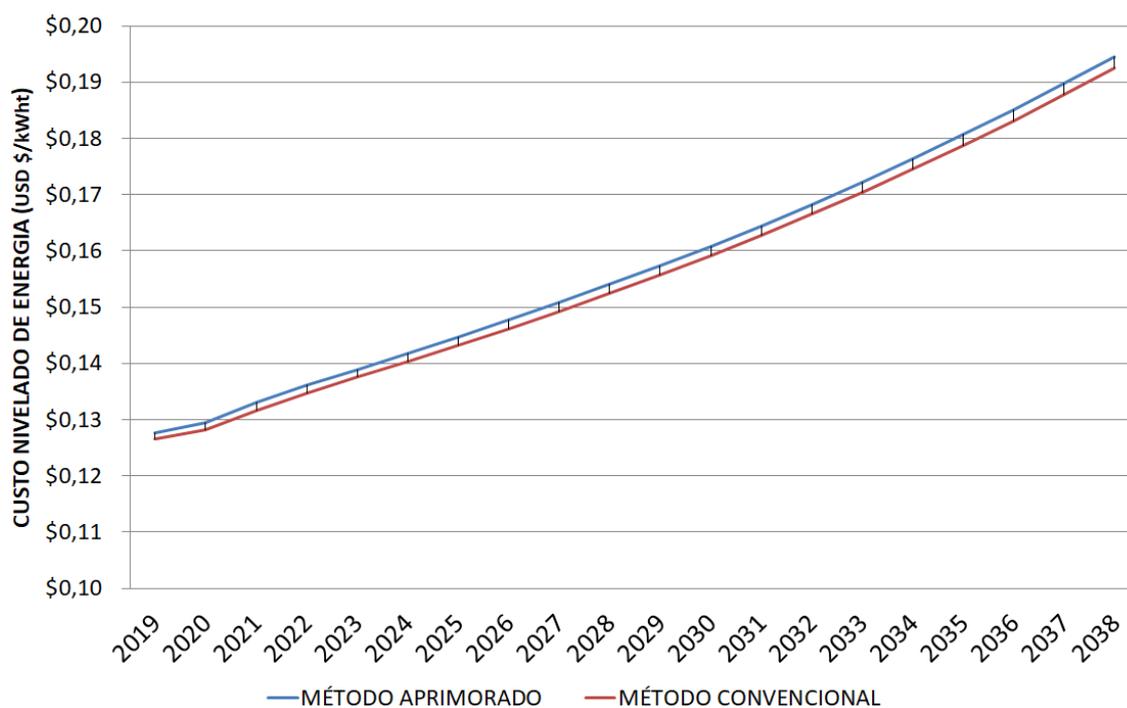


Figura 54 – Gastos com fonte de energia (Ft) para GLP por contato direto
 Fonte: autoria própria.

A equação do LCOH aprimorado para GLP via contato direto fez uso de diversos valores já utilizados no LCOH convencional: (i) taxa de desconto (r); (ii) tempo (t); (iii) geração de calor (E_t); (iv) manutenção e operação do sistema (M_t); e (vi) investimentos. A Tabela 20 apresenta outros valores ainda não citados que fizeram parte do cálculo para a obtenção do custo nivelado de energia. Entre tais valores, destacam-se o poder calorífico inferior da fonte de energia e o rendimento térmico do queimador de GLP. Vale ressaltar que, para esse caso, os valores se mantiveram iguais ao longo dos 20 anos, justamente porque não é o objetivo deste trabalho se adentrar nesses quesitos, e sim demonstrar a equação proposta.

Tabela 20 – Dados para obter o LCOH aprimorado para GLP por contato direto

Ano	It (x1000)	Mt (x1000)	Er (x1000)	PClfe	Prfe	Et (x1000)	ηqg
2019	\$ 117	\$ 8,9	67.852.508	46.046	\$0,58	8.153	94%
2020	\$ -	\$ 9,2	67.852.508	46.046	\$0,68	8.153	94%
2021	\$ -	\$ 9,5	67.852.508	46.046	\$0,72	8.153	94%
2022	\$ -	\$ 9,8	67.852.508	46.046	\$0,74	8.153	94%
2023	\$ -	\$ 10,1	67.852.508	46.046	\$0,76	8.153	94%
2024	\$ -	\$ 10,4	67.852.508	46.046	\$0,78	8.153	94%
2025	\$ -	\$ 10,7	67.852.508	46.046	\$0,81	8.153	94%
2026	\$ -	\$ 11,0	67.852.508	46.046	\$0,83	8.153	94%
2027	\$ -	\$ 11,3	67.852.508	46.046	\$0,86	8.153	94%
2028	\$ -	\$ 11,7	67.852.508	46.046	\$0,88	8.153	94%
2029	\$ -	\$ 12,0	67.852.508	46.046	\$0,91	8.153	94%
2030	\$ -	\$ 12,4	67.852.508	46.046	\$0,94	8.153	94%
2031	\$ -	\$ 12,7	67.852.508	46.046	\$0,96	8.153	94%
2032	\$ -	\$ 13,1	67.852.508	46.046	\$0,99	8.153	94%
2033	\$ -	\$ 13,5	67.852.508	46.046	\$1,02	8.153	94%
2034	\$ -	\$ 13,9	67.852.508	46.046	\$1,05	8.153	94%
2035	\$ -	\$ 14,3	67.852.508	46.046	\$1,09	8.153	94%
2036	\$ -	\$ 14,8	67.852.508	46.046	\$1,12	8.153	94%
2037	\$ -	\$ 15,2	67.852.508	46.046	\$1,15	8.153	94%
2038	\$ -	\$ 15,7	67.852.508	46.046	\$1,19	8.153	94%

Fonte: autoria própria.

O LCOH aprimorado para esse caso pode ser visto na Figura 55. O resultado apresentado é muito similar ao encontrado para o método convencional. Vale ressaltar que os dados de poder calorífico inferior, assim como os de eficiência do sistema, se mantiveram os mesmos ao longo dos 20 anos de estudo. Sabe-se que nenhum equipamento opera em eficiência plena todo o tempo, e que as fontes de energia estão sujeitas à variação de energia disponível. Apesar disso, não é o foco da presente tese entrar nessas questões.

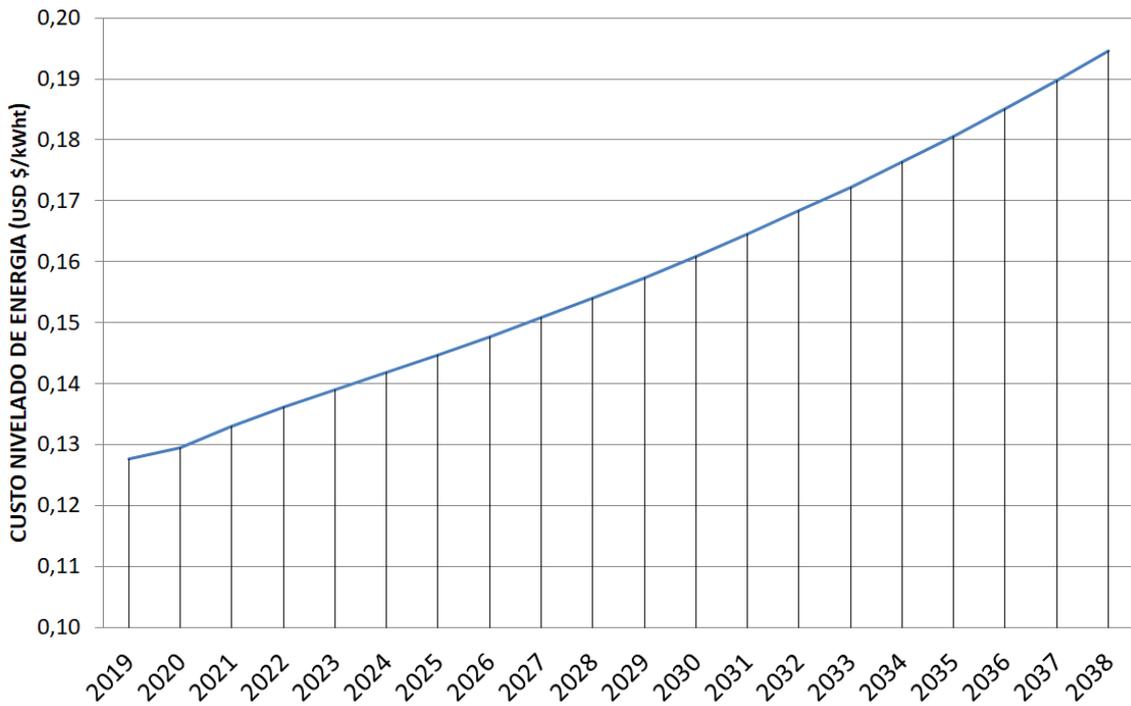


Figura 55 – LCOH aprimorado para GLP com troca térmica por contato direto
 Fonte: autoria própria.

Para ilustrar a similaridade dos resultados do método convencional e do método aprimorado do LCOH para GLP via contato direto, as respectivas curvas de resultados foram sobrepostas de forma gráfica. A Figura 56 mostra o comparativo entre ambos de forma clara. Os resultados acumulados dos custos nivelados foram: (i) LCOH convencional de 0,192 USD \$/kWh; e (ii) LCOH aprimorado de 0,195 USD \$/kWh. O LCOH aprimorado para o cenário estudado ficou 1% acima do LCOH convencional.

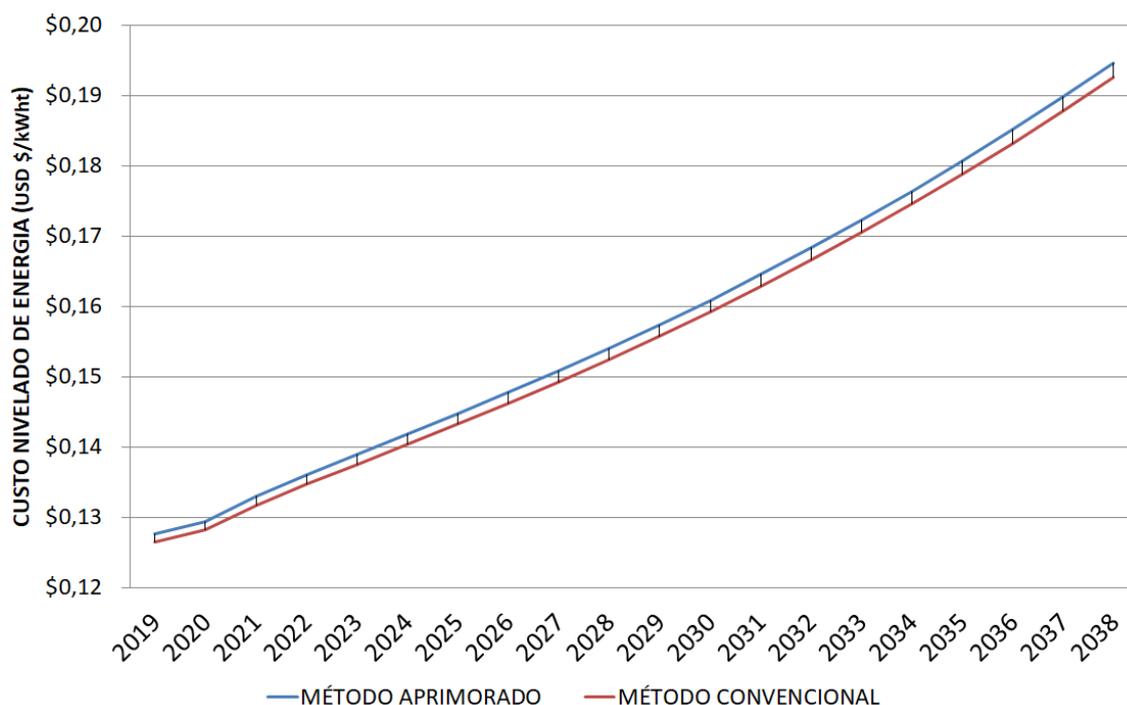


Figura 56 – Comparativo entre os métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado para o custo nivelado de energia para GLP via contato direto
 Fonte: autoria própria.

4.3.3. LCOH aprimorado com fonte de energia por gás natural via contato indireto

A principal variável calculada do método LCOH aprimorado diz respeito ao gasto com fonte de energia Ft. Assim como mencionado no LCOH aprimorado para o GLP via contato indireto, essa variável é dependente da eficiência do processo de troca térmica. Tal eficiência é uma metodologia da ASME para troca térmica entre fluidos em um trocador de calor. Para este estudo em questão, foi considerado um trocador de calor hermético, ou seja, a parcela da equação (A1) que se refere à taxa de vazamento entre os fluidos foi assumida como sendo igual à zero. Sendo assim, a Figura 57 mostra a evolução de tais custos ao longo de 20 anos, comparando-a aos resultados do método LCOH convencional também para o gás natural e via troca térmica indireta. O método aprimorado apresentou uma redução de 3,2% nesses 20 anos.

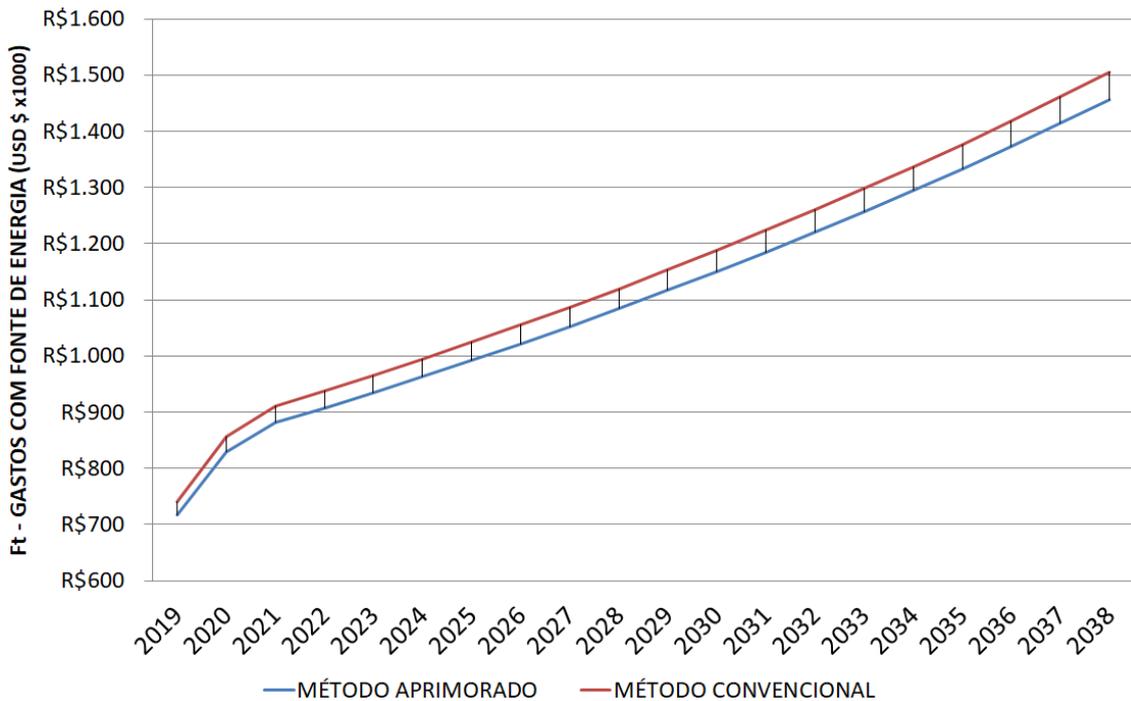


Figura 57 – Gastos com fonte de energia (Ft) para o gás natural por contato indireto
 Fonte: autoria própria.

O processo de cálculo para o gás natural é o mesmo do GLP. Por serem ambas as fontes de energia gasosa, os equipamentos também podem ser os mesmos. Sendo assim, são mantidos similares alguns valores que entram na equação principal do método LCOH, como: (i) custos de manutenção e operação (Mt); (ii) calor gerado (Et); (iii) taxa de retorno de capital (r); e (iv) tempo (t). Outra variável que aparece na nova equação de LCOH aprimorada e diz respeito à taxa de vazamento entre o ar atmosférico e os gases de combustão (Al) também foi considerada nula, ou seja, considerou-se um trocador de calor hermético, como já mencionado. A Tabela 21 mostra os dados utilizados na equação de LCOH aprimorado.

Tabela 21 – Dados para obter o LCOH aprimorado para o gás natural por contato indireto

Ano	It (x1000)	Er (x1000)	Teg	Tea	Tsg	Al	PClfe	PRfe
2019	\$ 138	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,35
2020	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,41
2021	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,43
2022	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,45
2023	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,46
2024	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,48
2025	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,49
2026	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,50
2027	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,52
2028	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,53
2029	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,55
2030	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,57
2031	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,58
2032	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,60
2033	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,62
2034	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,64
2035	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,66
2036	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,68
2037	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,70
2038	\$ -	67.852.508	950	25	90	0%	36.000	\$0,72

Fonte: autoria própria.

Com os dados incluídos na equação do método LCOH aprimorado, é possível então obter os valores de custo nivelado de energia. Os custos nivelados de energia para o horizonte de 20 anos utilizando-se do gás natural como fonte de energia e transferência de calor por contato indireto podem ser vistos na Figura 58. O comportamento evolutivo dos resultados se assemelha ao dos resultados já mostrados para o método convencional do LCOH. O custo nivelado de energia em 2019 é diferente do restante do perfil, quando foram encontrados valores crescentes; o motivo é a amortização do investimento no primeiro ano de operação.

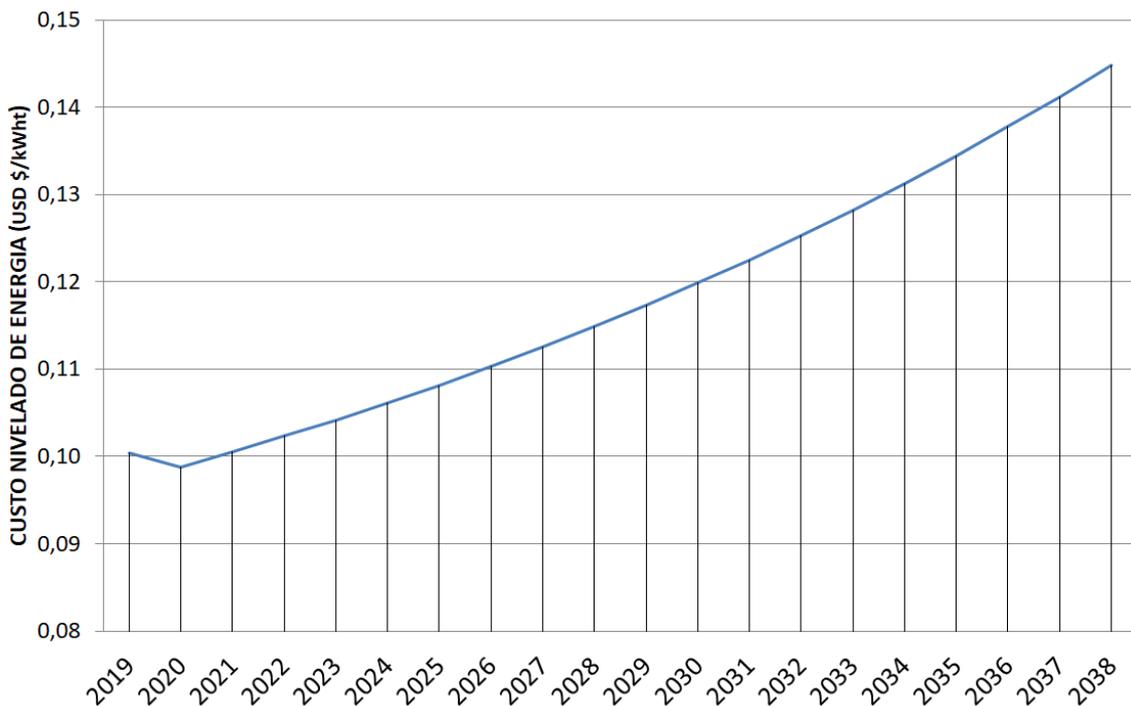


Figura 58 – LCOH aprimorado para o gás natural por contato indireto
 Fonte: autoria própria.

A comparação entre os resultados com gás natural para os métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado para transferência de calor por contato indireto pode ser vista na Figura 59. O método convencional apresentou um custo nivelado de energia, ao longo de 20 anos, de 0,149 USD \$/kWh, enquanto o método aprimorado obteve um custo de 0,145 USD \$/kWh, ou seja, uma redução de 3,2%. Da mesma forma ocorrida com o método aprimorado por contato indireto para GLP, a presente tese não detalhou as oscilações de eficiência do sistema e também da variação de energia sobre o gás natural que ocorrem na prática. Apesar dessa variação, os dados apresentam comportamentos similares.

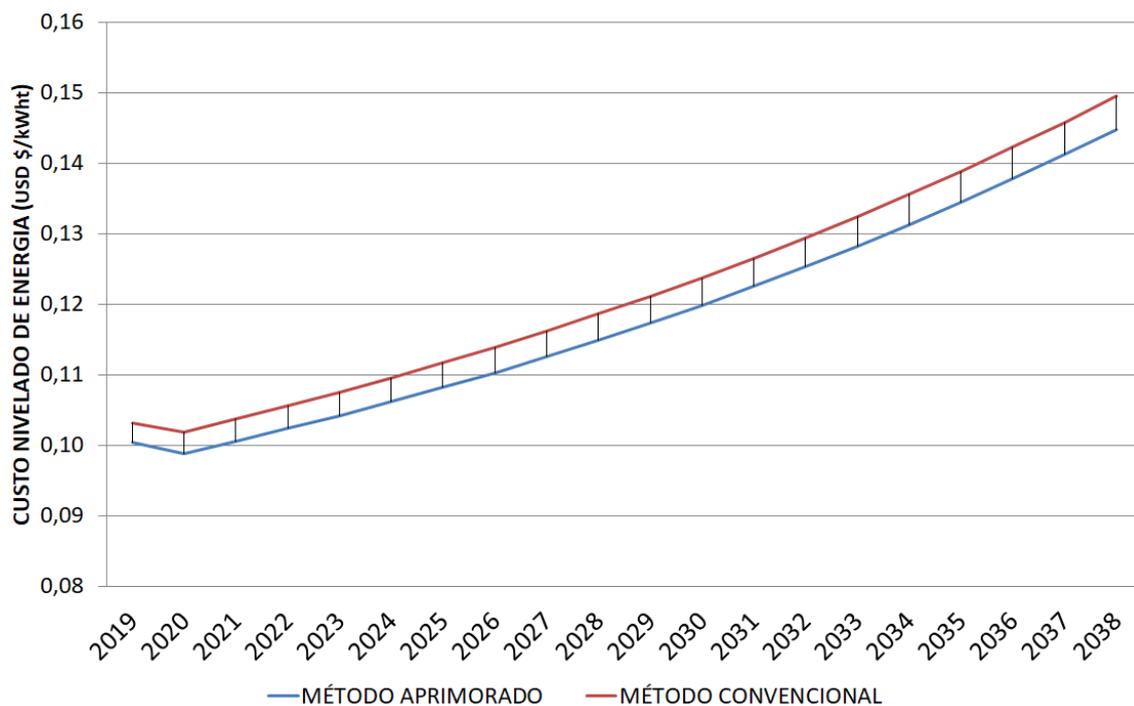


Figura 59 – LCOH convencional e aprimorado para o gás natural via contato indireto
 Fonte: autoria própria.

4.3.4. LCOH aprimorado com fonte de energia por gás natural via contato direto

O método LCOH aprimorado para transferência de calor por contato direto também é trabalhado nesta tese para o gás natural. Assim como ocorre para o GLP, a equação visa utilizar a energia requerida teórica para o sistema de secagem, e, com isso, também é possível calcular a eficiência do processo de maneira direta, caso necessário. Os cálculos são trabalhados principalmente para determinar o custo da fonte de energia necessária para suprir o sistema. A Tabela 22 apresenta os dados que foram utilizados de forma direta ou indireta para obter os resultados de gasto com fonte de energia (Ft) e LCOH aprimorado.

Tabela 22 – Dados para obter o LCOH aprimorado para o gás natural por contato direto

Ano	It (x1000)	Mt (x1000)	Er (x1000)	PClfe	Prfe	r	t	Et (x1000)	ηqg
2019	\$ 106	\$ 8,9	67.852.508	36.000	\$0,35	12%	20	8.153	94%
2020	\$ -	\$ 9,2	67.852.508	36.000	\$0,41	12%	19	8.153	94%
2021	\$ -	\$ 9,5	67.852.508	36.000	\$0,43	12%	18	8.153	94%
2022	\$ -	\$ 9,8	67.852.508	36.000	\$0,45	12%	17	8.153	94%
2023	\$ -	\$ 10,1	67.852.508	36.000	\$0,46	12%	16	8.153	94%
2024	\$ -	\$ 10,4	67.852.508	36.000	\$0,48	12%	15	8.153	94%
2025	\$ -	\$ 10,7	67.852.508	36.000	\$0,49	12%	14	8.153	94%
2026	\$ -	\$ 11,0	67.852.508	36.000	\$0,50	12%	13	8.153	94%
2027	\$ -	\$ 11,3	67.852.508	36.000	\$0,52	12%	12	8.153	94%
2028	\$ -	\$ 11,7	67.852.508	36.000	\$0,53	12%	11	8.153	94%
2029	\$ -	\$ 12,0	67.852.508	36.000	\$0,55	12%	10	8.153	94%
2030	\$ -	\$ 12,4	67.852.508	36.000	\$0,57	12%	9	8.153	94%
2031	\$ -	\$ 12,7	67.852.508	36.000	\$0,58	12%	8	8.153	94%
2032	\$ -	\$ 13,1	67.852.508	36.000	\$0,60	12%	7	8.153	94%
2033	\$ -	\$ 13,5	67.852.508	36.000	\$0,62	12%	6	8.153	94%
2034	\$ -	\$ 13,9	67.852.508	36.000	\$0,64	12%	5	8.153	94%
2035	\$ -	\$ 14,3	67.852.508	36.000	\$0,66	12%	4	8.153	94%
2036	\$ -	\$ 14,8	67.852.508	36.000	\$0,68	12%	3	8.153	94%
2037	\$ -	\$ 15,2	67.852.508	36.000	\$0,70	12%	2	8.153	94%
2038	\$ -	\$ 15,7	67.852.508	36.000	\$0,72	12%	1	8.153	94%

Fonte: autoria própria.

Por meio de cálculos a partir da Tabela 22, foi possível obter a evolução dos custos com a fonte de energia. Ao longo dos 20 anos de estudo, o método aprimorado demonstrou o mesmo perfil de gasto com fonte de energia, representando uma diferença acumulada maior em cerca de 1% frente aos gastos encontrados com o método convencional. Esse resultado demonstra uma variação praticamente desprezível para esse cenário, porém, se trabalhado de forma mais detalhada, sobretudo nas questões de eficiência térmica do sistema e energia disponível na fonte de energia, a diferença pode ser maior. A Figura 60 mostra o comparativo dos gastos com fontes de energia entre os dois métodos de LCOH.

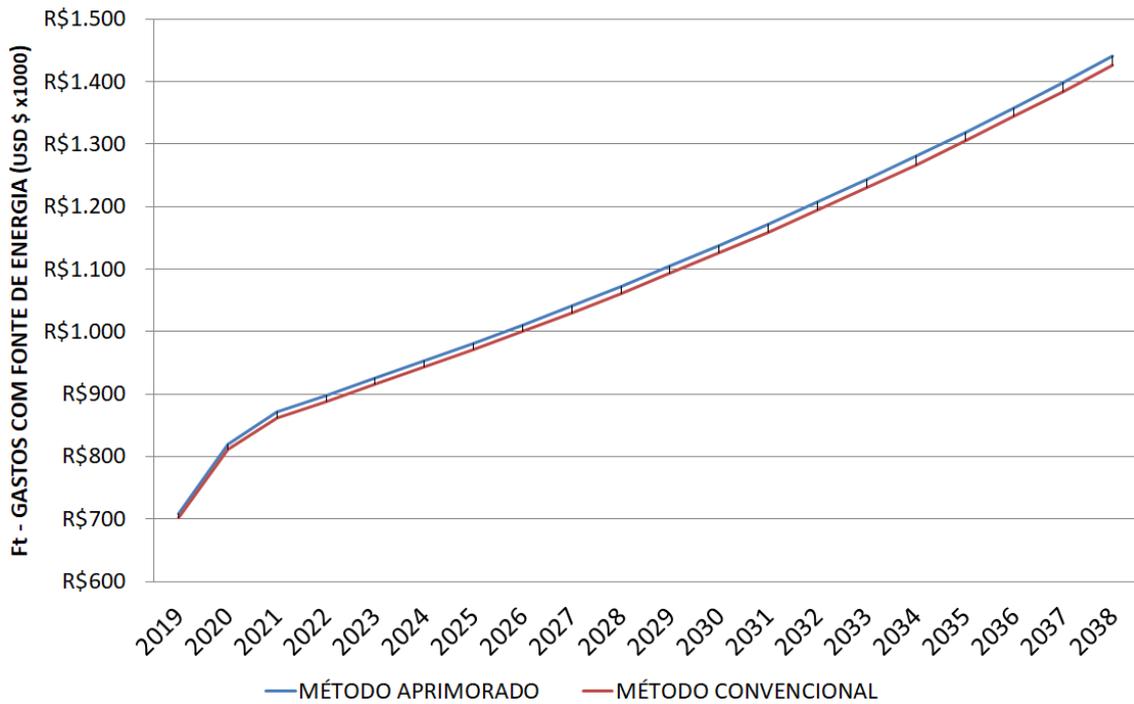


Figura 60 – Gastos com fonte de energia (Ft) para o gás natural por contato direto
 Fonte: autoria própria.

Com a definição do gasto com a fonte de energia (gás natural) e junto às outras variáveis já mostradas, pode-se obter o custo nivelado da energia. A Figura 61 mostra os resultados calculados expressos em um horizonte de 20 anos, de 2019 a 2038. A evolução do custo nivelado de energia mantém o mesmo perfil apresentado pelo método LCOH convencional para o gás natural, sendo ambos via transferência de calor por contato direto.

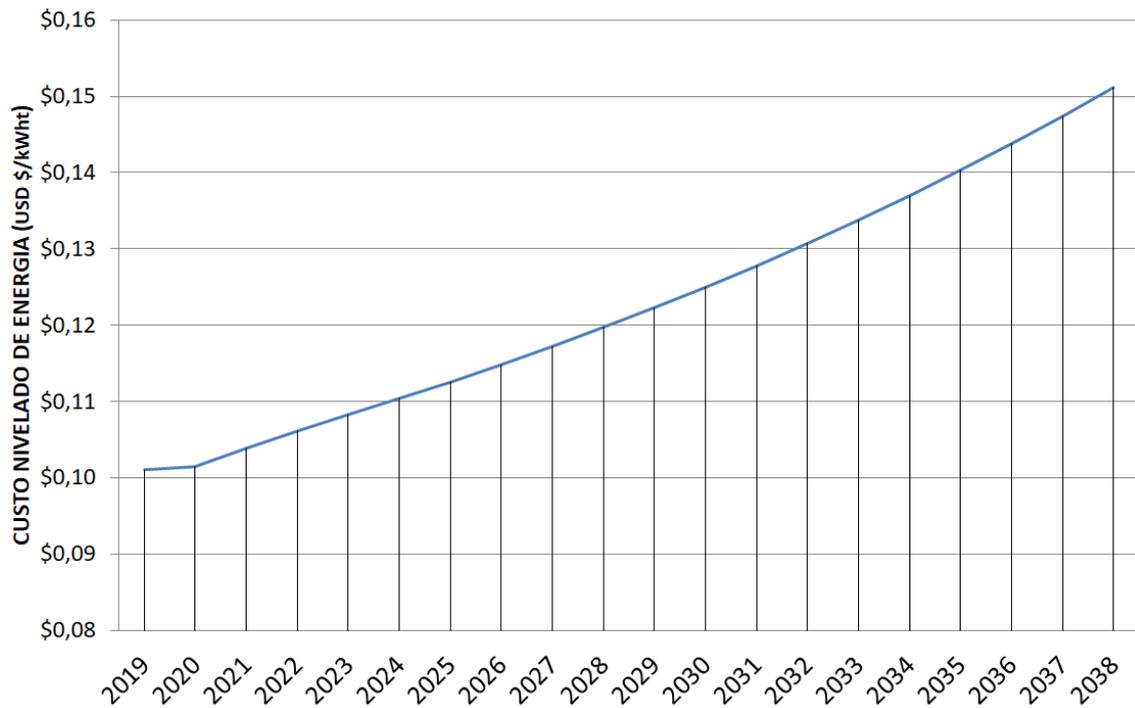


Figura 61 – LCOH aprimorado para o gás natural por contato direto
 Fonte: autoria própria.

O comparativo gráfico da evolução dos custos nivelados de energia para os métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado pode ser visto na Figura 62. Tais custos, ao longo de 20 anos, ficaram em: (i) 0,150 USD \$/kWh para o método convencional e (ii) 0,151 USD \$/kWh para o método aprimorado. Portanto, a diferença foi de pouco mais de 1% maior para o LCOH aprimorado frente ao LCOH convencional, para o período destacado.

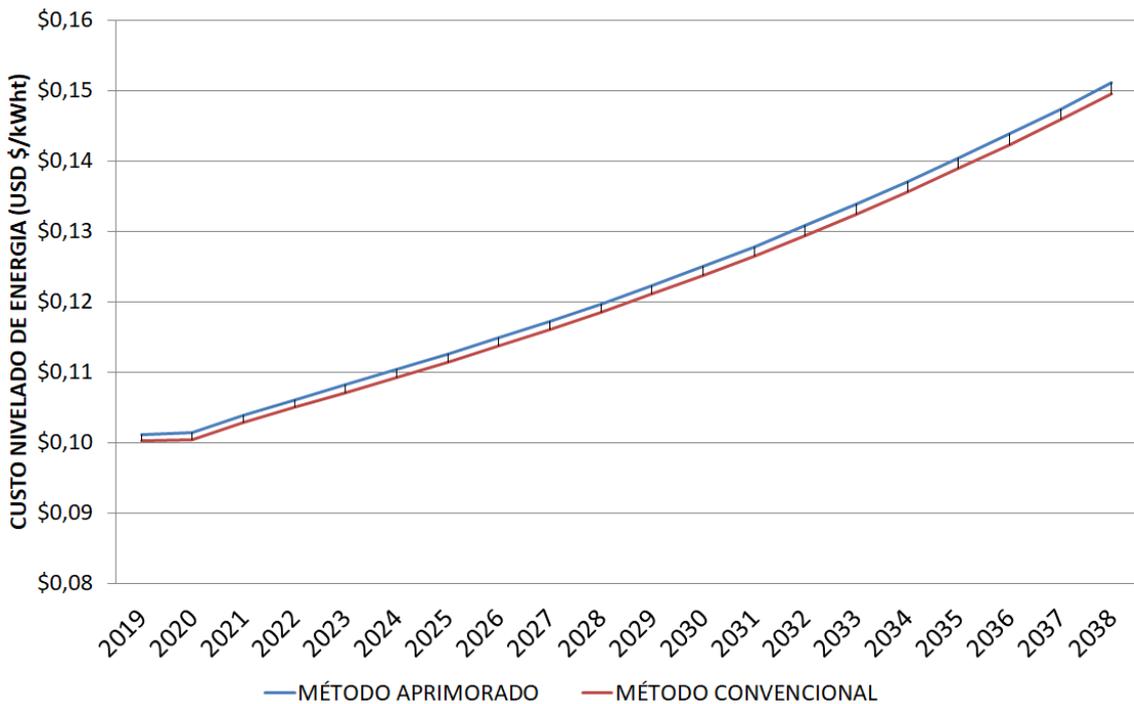


Figura 62 – LCOH convencional e aprimorado para o gás natural via contato direto
 Fonte: autoria própria.

4.3.5. LCOH aprimorado com fonte de energia por biomassa via caldeira a vapor

O método LCOH aprimorado para a fonte de energia por biomassa segue o mesmo conceito já demonstrado anteriormente para a obtenção dos gastos. O gasto com a fonte de energia (F_t) é calculado a partir de dados do processo que visam detalhar a função de eficiência térmica do sistema. Para o caso da caldeira a vapor, utilizaram-se as seguintes variáveis: (i) massa de vapor produzida no ano t ; (ii) entalpia do vapor; (iii) entalpia para a água de alimentação da caldeira; (iv) eficiência térmica do sistema caldeira de vapor mais trocador de calor vapor/ar atmosférico; (v) poder calorífico inferior da biomassa; e (vi) preço unitário da biomassa. Tais dados são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 – Dados para obter os gastos com energia (Ft) com uso de biomassa

Ano	mv (x1000)	hv	ha	η MD	PCl _{bio}	Pr _{bio}
2019	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 38,3
2020	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 49,8
2021	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 63,2
2022	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 77,1
2023	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 79,5
2024	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 81,8
2025	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 84,3
2026	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 86,8
2027	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 89,4
2028	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 92,1
2029	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 94,9
2030	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$ 97,7
2031	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$100,7
2032	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$103,7
2033	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$106,8
2034	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$110,0
2035	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$113,3
2036	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$116,7
2037	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$120,2
2038	33.660	2.920	356	86%	10.884	\$123,8

Fonte: autoria própria.

O gasto com a fonte de energia (Ft) para a biomassa pelo método LCOH aprimorado é comparado ao do método convencional na Figura 63. Graficamente, é possível verificar que ambos os métodos apresentam o mesmo perfil. O gasto de energia calculado pelo método aprimorado é cerca de 2% maior do que o gasto pelo método convencional ao longo dos 20 anos. A vantagem em se utilizar o LCOH aprimorado para a caldeira a vapor é o fato de conseguir aplicar na mesma equação dados de balanço de massa e energia.

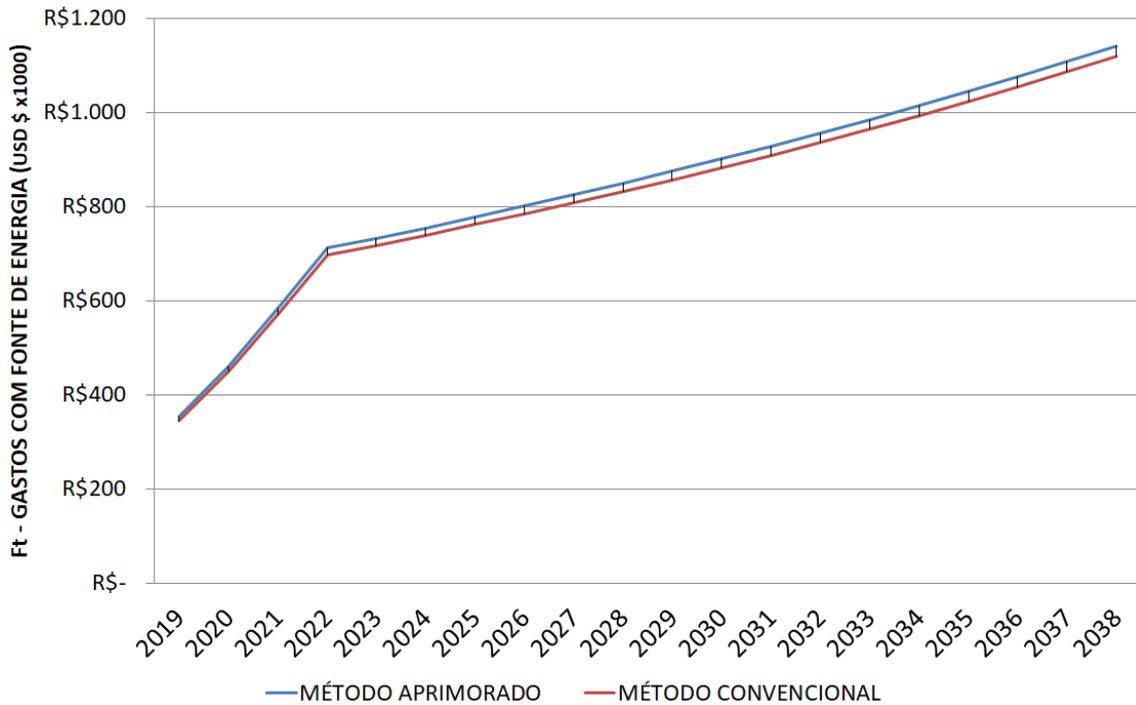


Figura 63 – Gastos com fonte de energia (Ft) para a biomassa utilizando caldeira
 Fonte: autoria própria.

A equação do método LCOH aprimorado para a caldeira a vapor com biomassa como fonte de energia recebe outras variáveis complementares, as mesmas já utilizadas anteriormente: (i) investimentos (I_t); (ii) custos de operação e manutenção do sistema (M_t); (iii) taxa de desconto (r); (iv) tempo de vida útil do sistema (t); e (v) calor gerado (E_t). Essas variáveis são demonstradas na Tabela 24.

Tabela 24 – Dados para obter o LCOH aprimorado para a caldeira com biomassa

Ano	Ft (x1000)	It (x1000)	Mt (x1000)	r	t	Et (x1000)
2019	\$ 353	\$ 2.234	\$ 588	12%	20	11.220
2020	\$ 459	\$ 532	\$ 606	12%	19	11.220
2021	\$ 583	\$ -	\$ 624	12%	18	11.220
2022	\$ 711	\$ -	\$ 642	12%	17	11.220
2023	\$ 733	\$ -	\$ 662	12%	16	11.220
2024	\$ 755	\$ -	\$ 682	12%	15	11.220
2025	\$ 777	\$ -	\$ 702	12%	14	11.220
2026	\$ 801	\$ -	\$ 723	12%	13	11.220
2027	\$ 825	\$ -	\$ 745	12%	12	11.220
2028	\$ 849	\$ -	\$ 767	12%	11	11.220
2029	\$ 875	\$ -	\$ 790	12%	10	11.220
2030	\$ 901	\$ -	\$ 814	12%	9	11.220
2031	\$ 928	\$ -	\$ 838	12%	8	11.220
2032	\$ 956	\$ -	\$ 863	12%	7	11.220
2033	\$ 985	\$ -	\$ 889	12%	6	11.220
2034	\$ 1.014	\$ -	\$ 916	12%	5	11.220
2035	\$ 1.045	\$ -	\$ 944	12%	4	11.220
2036	\$ 1.076	\$ -	\$ 972	12%	3	11.220
2037	\$ 1.108	\$ -	\$ 1.001	12%	2	11.220
2038	\$ 1.141	\$ -	\$ 1.031	12%	1	11.220

Fonte: autoria própria.

Com todos os dados compilados de forma organizada, o custo nivelado de energia é obtido. A Figura 64 mostra o resultado calculado do custo nivelado de energia aprimorado para a caldeira a vapor com utilização de biomassa. O perfil gráfico do LCOH aprimorado demonstrou alinhamento com o do método convencional. Nos dois primeiros anos é onde ocorre a amortização dos investimentos do sistema de geração de calor; dessa forma, o custo se inicia próximo a 0,28 USD \$/kWht em 2019, decaindo até 2024, onde se inicia uma rampa que vai até 2038 e atinge valores próximos a 0,17 USD \$/kWht.

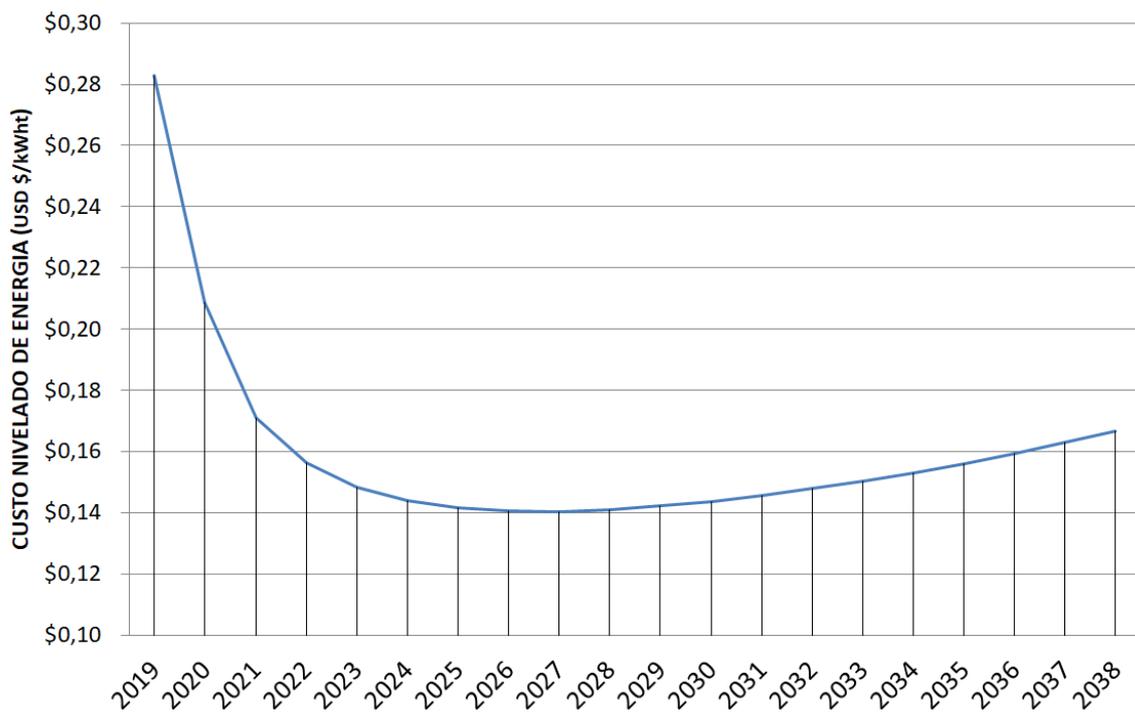


Figura 64 – LCOH aprimorado para a caldeira a vapor com biomassa
 Fonte: autoria própria.

O gráfico comparativo da evolução dos custos nivelados de energia para os métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado pode ser visto na Figura 65. Os custos nivelados ao longo de 20 anos ficaram em: (i) 0,165 USD \$/kWh para o método convencional e (ii) 0,167 USD \$/kWh para o método aprimorado. A diferença, portanto, foi de pouco mais de 1% maior para o LCOH aprimorado frente ao LCOH convencional, para o período destacado.

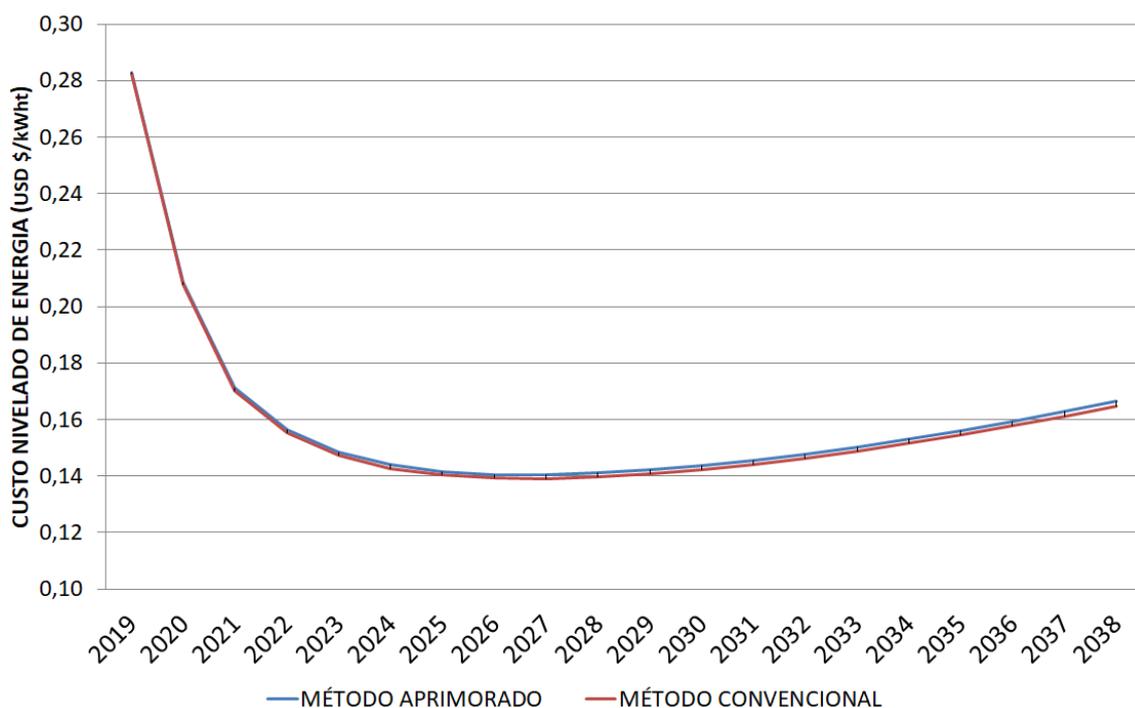


Figura 65 – LCOH convencional aprimorado para caldeira com biomassa
 Fonte: autoria própria.

4.3.6. LCOH aprimorado com fonte de energia por biomassa via gerador de gás quente com adicional de GLP no aquecimento final do ar atmosférico por contato direto

O método LCOH aprimorado para a fonte de energia biomassa com complemento em GLP possui algumas particularidades frente às equações mostradas anteriormente. O gasto com fonte de energia é calculado considerando dois processos de combustão independentes, ou seja, cada sistema com suas variáveis. Para isso, são necessários: (i) a eficiência do sistema gerador de gás quente e trocador de calor gás/ar; (ii) o poder calorífico inferior da biomassa; (iii) o preço unitário da biomassa; (iv) a eficiência do sistema de geração de calor com GLP; (v) o poder calorífico inferior do GLP; (vi) o preço unitário do GLP; (vii) a dosagem de cada fonte de energia no sistema global; e (viii) a energia teórica requerida pelo sistema consumidor. A Tabela 25 mostra esses dados de forma clara.

Tabela 25 – Dados para obter os gastos com energia (Ft) para gerador de gás quente à biomassa e complemento de calor em GLP

Ano	Dbio	η_{GC}	PCIbio	Prbio	Dglp	nglp	PClfe	PRfe	Er (x1000)
2019	71%	80%	10.884	\$ 38,3	0	1	46.046	\$ 0,58	67.852.508
2020	71%	80%	10.884	\$ 49,8	0	1	46.046	\$ 0,68	67.852.508
2021	71%	80%	10.884	\$ 63,2	0	1	46.046	\$ 0,72	67.852.508
2022	71%	80%	10.884	\$ 77,1	0	1	46.046	\$ 0,74	67.852.508
2023	71%	80%	10.884	\$ 79,5	0	1	46.046	\$ 0,76	67.852.508
2024	71%	80%	10.884	\$ 81,8	0	1	46.046	\$ 0,78	67.852.508
2025	71%	80%	10.884	\$ 84,3	0	1	46.046	\$ 0,81	67.852.508
2026	71%	80%	10.884	\$ 86,8	0	1	46.046	\$ 0,83	67.852.508
2027	71%	80%	10.884	\$ 89,4	0	1	46.046	\$ 0,86	67.852.508
2028	71%	80%	10.884	\$ 92,1	0	1	46.046	\$ 0,88	67.852.508
2029	71%	80%	10.884	\$ 94,9	0	1	46.046	\$ 0,91	67.852.508
2030	71%	80%	10.884	\$ 97,7	0	1	46.046	\$ 0,94	67.852.508
2031	71%	80%	10.884	\$ 100,7	0	1	46.046	\$ 0,96	67.852.508
2032	71%	80%	10.884	\$ 103,7	0	1	46.046	\$ 0,99	67.852.508
2033	71%	80%	10.884	\$ 106,8	0	1	46.046	\$ 1,02	67.852.508
2034	71%	80%	10.884	\$ 110,0	0	1	46.046	\$ 1,05	67.852.508
2035	71%	80%	10.884	\$ 113,3	0	1	46.046	\$ 1,09	67.852.508
2036	71%	80%	10.884	\$ 116,7	0	1	46.046	\$ 1,12	67.852.508
2037	71%	80%	10.884	\$ 120,2	0	1	46.046	\$ 1,15	67.852.508
2038	71%	80%	10.884	\$ 123,8	0	1	46.046	\$ 1,19	67.852.508

Fonte: autoria própria.

Com os dados compilados na equação do LCOH aprimorado, é possível gerar os valores dos gastos com a fonte de energia Ft. A Figura 66 mostra como se estabeleceu o comparativo de valores entre o método convencional e o método aprimorado. Embora haja uma diferença acumulada em cerca de 7%, graficamente eles apresentam o mesmo perfil ao longo dos 20 anos estudados. Essa diferença está relacionada às eficiências térmicas utilizadas em ambos os processos durante esse tempo.

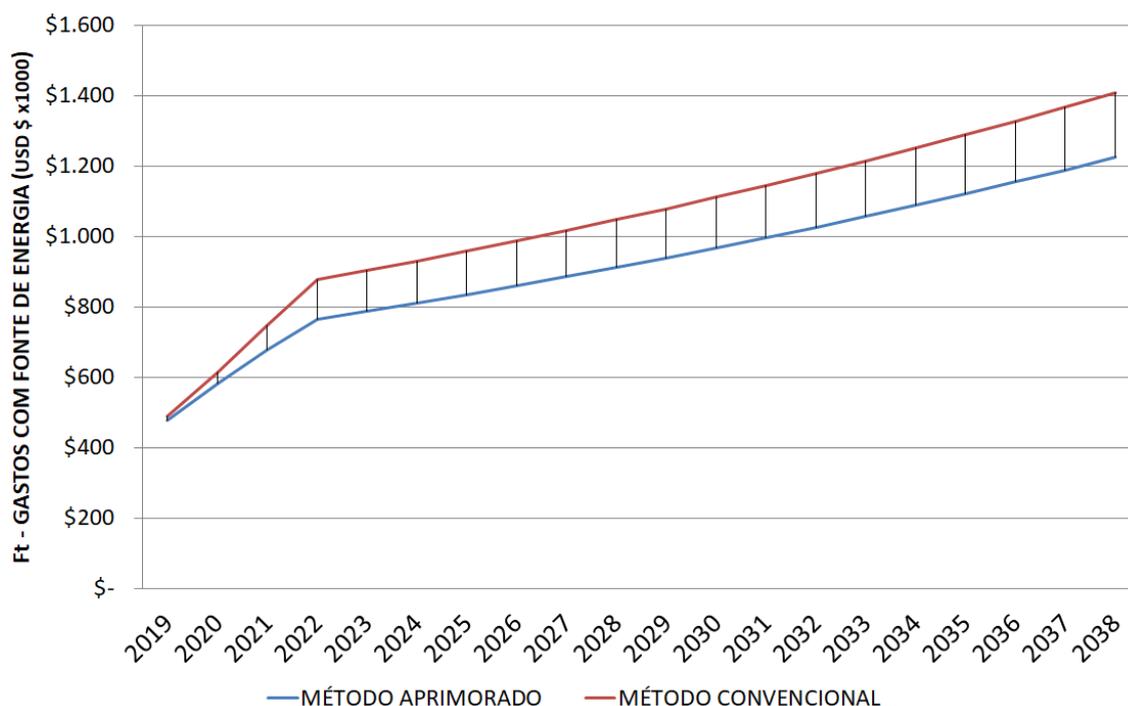


Figura 66 - Gastos com fonte de energia (Ft) para utilização de gerador de gás quente e complemento de calor via GLP por contato direto
 Fonte: autoria própria.

A equação do método LCOH aprimorado para o gerador de gás quente com complemento em GLP também recebe outras variáveis complementares às já informadas: (i) investimentos (It); (ii) custos de operação e manutenção do sistema (Mt); (iii) taxa de desconto (r); (iv) tempo de vida útil do sistema (t); e (v) calor gerado (Et). Essas variáveis são demonstradas na Tabela 26, juntamente com os gastos com a fonte de energia (Ft).

Tabela 26 – Dados para obter o LCOH aprimorado para o gerador de gás quente com biomassa e complemento de calor com GLP por contato direto

Ano	Ft (x1000)	It (x1000)	Mt (x1000)	r	t	Et (x1000)
2019	\$ 477	\$ 1.915	\$ 597	12%	20	10.206
2020	\$ 582	\$ 213	\$ 615	12%	19	10.206
2021	\$ 676	\$ -	\$ 633	12%	18	10.206
2022	\$ 763	\$ -	\$ 652	12%	17	10.206
2023	\$ 786	\$ -	\$ 672	12%	16	10.206
2024	\$ 809	\$ -	\$ 692	12%	15	10.206
2025	\$ 834	\$ -	\$ 713	12%	14	10.206
2026	\$ 859	\$ -	\$ 734	12%	13	10.206
2027	\$ 884	\$ -	\$ 756	12%	12	10.206
2028	\$ 911	\$ -	\$ 779	12%	11	10.206
2029	\$ 938	\$ -	\$ 802	12%	10	10.206
2030	\$ 967	\$ -	\$ 826	12%	9	10.206
2031	\$ 996	\$ -	\$ 851	12%	8	10.206
2032	\$ 1.025	\$ -	\$ 877	12%	7	10.206
2033	\$ 1.056	\$ -	\$ 903	12%	6	10.206
2034	\$ 1.088	\$ -	\$ 930	12%	5	10.206
2035	\$ 1.120	\$ -	\$ 958	12%	4	10.206
2036	\$ 1.154	\$ -	\$ 987	12%	3	10.206
2037	\$ 1.189	\$ -	\$ 1.016	12%	2	10.206
2038	\$ 1.224	\$ -	\$ 1.047	12%	1	10.206

Fonte: autoria própria.

Com todos os dados compilados de forma organizada, a Figura 67 mostra o resultado calculado do custo nivelado de energia aprimorado para o gerador de gás quente com utilização de biomassa, e seu complemento de calor através da combustão do GLP via transferência de calor por contato direto. O perfil gráfico do LCOH aprimorado demonstrou alinhamento com o do método convencional. Nos dois primeiros anos é onde ocorre a amortização dos investimentos do sistema de geração de calor; dessa forma, o custo se inicia próximo a 0,29 USD \$/kWh em 2019 e decai até 2024, onde se inicia uma rampa que vai até 2038 e atinge valores pouco acima de 0,19 USD \$/kWh.

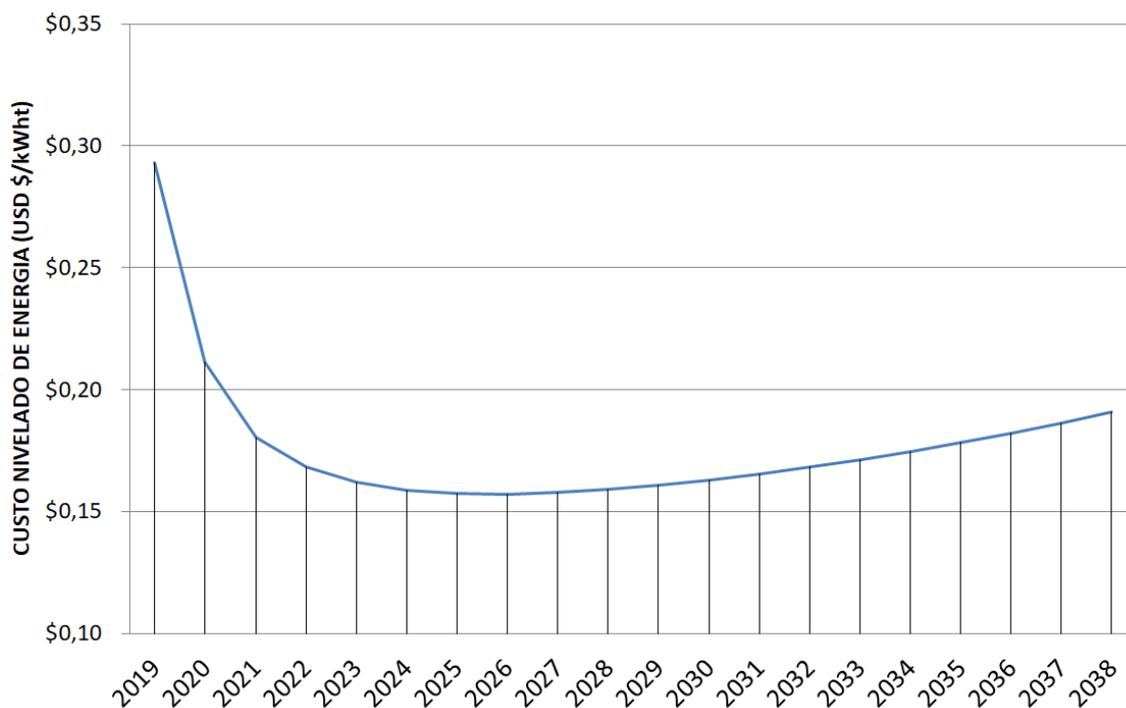


Figura 67 – LCOH aprimorado para gerador de gás quente com biomassa e complemento de GLP
 Fonte: autoria própria.

O gráfico comparativo da evolução dos custos nivelados de energia para os métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado pode ser visto na Figura 68. Esses custos ao longo de 20 anos ficaram em: (i) 0,205 USD \$/kWh para o método convencional e (ii) 0,191 USD \$/kWh para o método aprimorado. Portanto, o valor foi aproximadamente 7% menor para o LCOH aprimorado frente ao LCOH convencional, para o período destacado. Como mencionado, essa diferença surge devido aos valores de eficiência térmica usados para ambos os processos (biomassa e GLP).

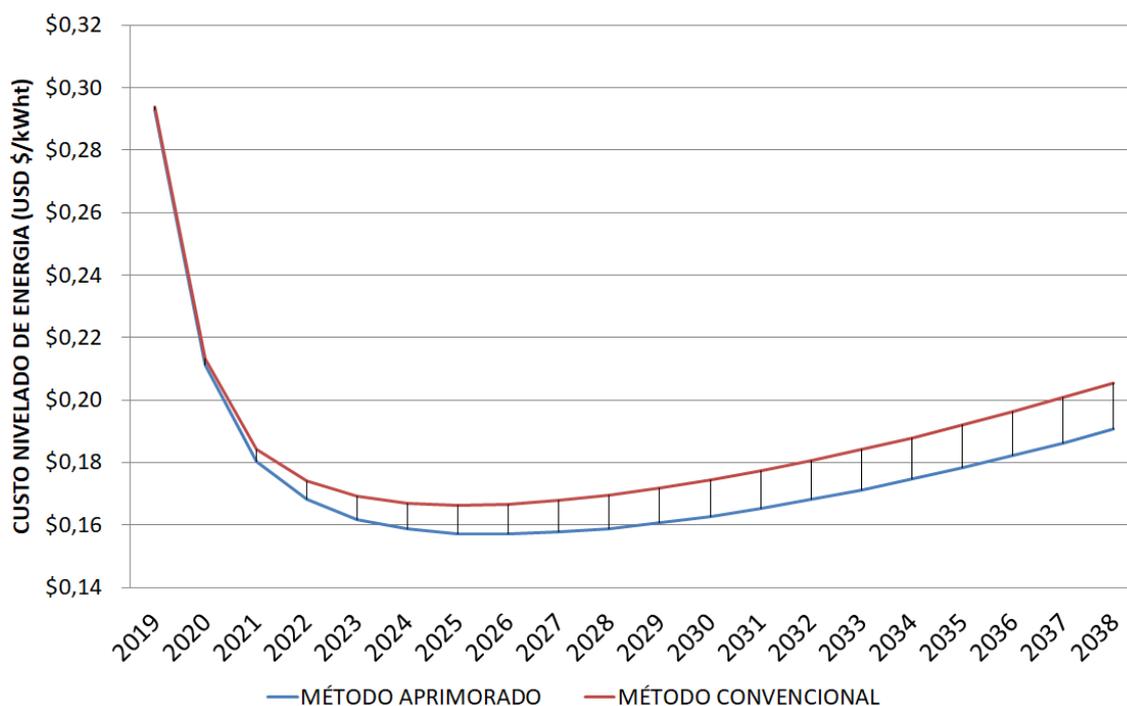


Figura 68 – LCOH convencional e aprimorado para gerador de gás quente com biomassa e complemento de GLP

Fonte: autoria própria.

4.4. Comparativos entre os métodos LCOH convencional e LCOH aprimorado

Inúmeros cálculos foram realizados para gerar os valores demonstrados para ambos os métodos de custo nivelado. Na sequência está a representação numérica dos valores calculados ao longo dos 20 anos de estudo para cada cenário, divididos entre LCOH convencional e LCOH aprimorado. A Tabela 27 resume as diferenças entre os dois métodos aplicados neste capítulo. Pode-se observar que, apesar das diferenças entre o método convencional e o método aprimorado, do ponto de vista de investimento a melhor escolha está em utilizar como fonte de energia o gás natural.

Tabela 27 – Resultados dos métodos LCOH convencional e aprimorado

Arquitetura	Método Convencional (USD \$/kWht)	Método Aprimorado (USD \$/kWht)	Diferença
GLP contato indireto	\$ 0,192	\$ 0,186	-3,2%
GLP contato direto	\$ 0,193	\$ 0,195	1,1%
Gás natural indireto	\$ 0,149	\$ 0,145	-3,2%
Gás natural direto	\$ 0,150	\$ 0,151	1,1%
Biomassa - caldeira	\$ 0,165	\$ 0,167	1,1%
Biomassa (gerador de gás quente) + GLP contato direto	\$ 0,205	\$ 0,191	-7,2%

Fonte: autoria própria.

A estrutura gráfica das curvas para todos os cenários estudados com o LCOH convencional pode ser visualizada na Figura 69. O gráfico mostra que o investimento para a arquitetura de equipamentos que utilizam biomassa é um dos obstáculos para a aplicação desse tipo de sistema para a secagem de sangue. Vale ressaltar que, mesmo após amortização do investimento, o elevado custo de operação e manutenção, aliado ao preço da matéria-prima, impede que se estabeleça um custo nivelado de energia menor do que o do gás natural.

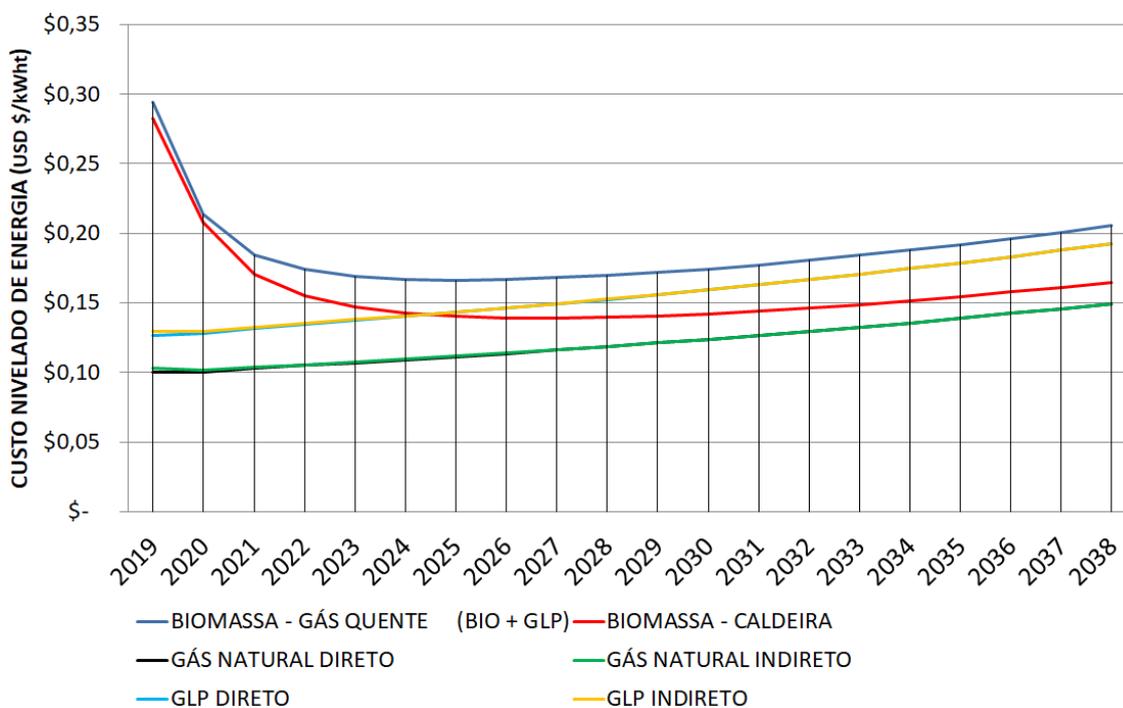


Figura 69 – Resultados para o método LCOH convencional

Fonte: autoria própria.

Da mesma forma apresentada para o LCOH convencional, a Figura 70 mostra o resumo gráfico de todas as arquiteturas estudadas e aplicadas com o LCOH aprimorado. Mesmo apresentando algumas diferenças de resultado entre ambos os métodos de LCOH, a conclusão se mantém: o melhor investimento está na utilização de gás natural com a fonte de energia para o processo de secagem do sangue de origem animal. Neste estudo, se reafirma a vantagem da arquitetura utilizando o gás natural como fonte de energia.

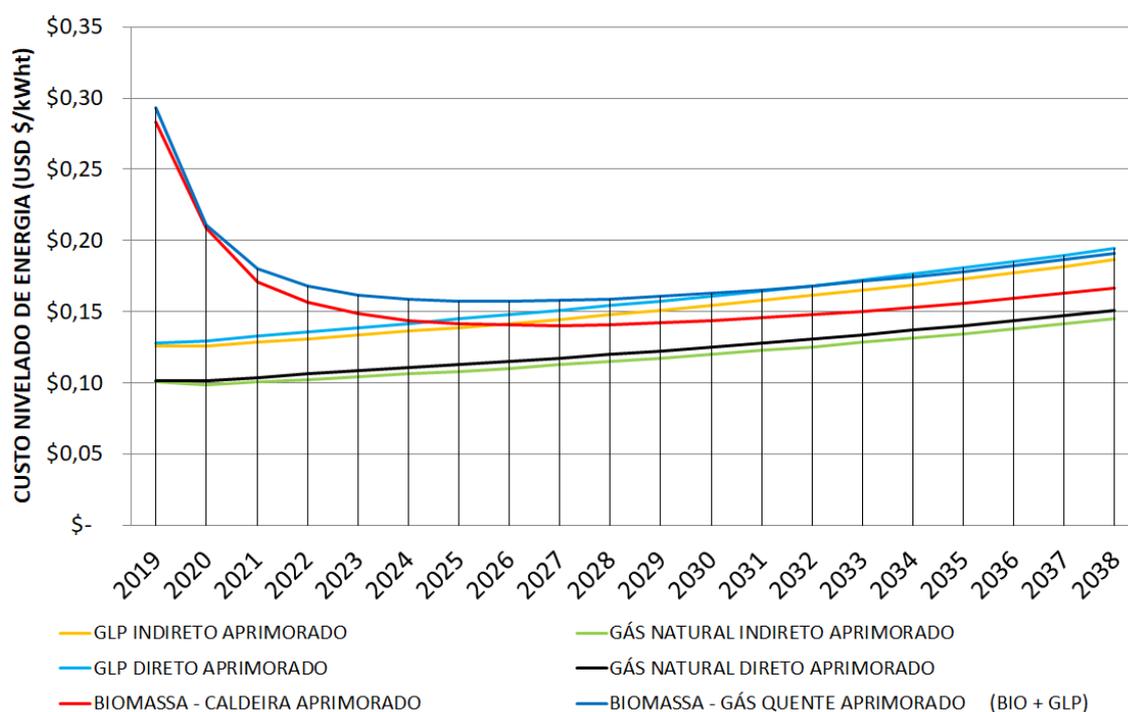


Figura 70 – Resultados para o método LCOH aprimorado
Fonte: autoria própria.

4.5. Considerações finais do Capítulo 4

Neste capítulo foram demonstrados os resultados obtidos através de cálculos comparativos entre os métodos de LCOH. Realizaram-se estudos baseados em diferentes arquiteturas de equipamento, a citar: (i) GLP por contato indireto; (ii) GLP por contato direto; (iii) gás natural por contato indireto; (iv) gás natural por contato direto; (v) caldeira a vapor com biomassa; e (vi) gerador de gás quente com biomassa mais complemento de calor com GLP via contato direto.

Além de demonstrar os resultados numéricos em forma de tabelas e gráficos, também foi possível concluir qual o melhor tipo de arquitetura a ser aplicado no processo de secagem de sangue de origem animal. Neste caso em específico, o melhor investimento é utilizar o gás natural como a fonte de energia na arquitetura com queimador de gás.

5. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Esta tese teve como objetivo principal analisar a aplicação do método LCOH em uma planta industrial do segmento alimentício para comparar diferentes tipos de fontes de energia e propor o melhor investimento. Aliado a esse objetivo, foi proposto um aprimoramento do método LCOH convencional, agregando características individuais das fontes de energia e arquiteturas de equipamentos que compõem o processo de geração de calor. Com base na análise realizada, procurou-se responder à questão central, se é ou não possível aplicar o método LCOH no segmento industrial alimentício, e, ainda, propor modificações que aprimorem esse método para trazer resultados superiores para a tomada de decisão de investimentos.

Para a realização deste objetivo, o trabalho foi subdividido em cinco capítulos. Conforme visto, foram apresentados os aspectos básicos para o LCOH, suas diversas aplicações e abrangência de diferentes fontes de energia. Junto a isso, foi demonstrado estatisticamente o quanto o tema vem sendo abordado ao longo dos anos e suas principais aplicações no que tange a fontes de energia e áreas de estudo.

Ademais, foi feito um breve histórico sobre a aplicação da metodologia do LCOH em diferentes fontes de energia. A partir desse histórico, tornou-se possível afirmar que o método LCOH é uma importante ferramenta de comparação de tecnologias e fontes de energia distintas, sobretudo quando a meta é identificar e tomar decisão sobre os melhores investimentos a serem realizados tanto em investimentos públicos quanto privados.

No Capítulo 3 foi detalhada toda a arquitetura dos processos de combustão analisados para o estudo de caso, assim como os motivos que levaram à escolha da planta e da região onde ocorreram os estudos. Ainda no terceiro capítulo foram expostas as equações do método LCOH aplicadas ao estudo de caso, bem como foi apresentado o detalhamento das equações com o objetivo de fornecer recursos técnicos para o aprimoramento da equação convencional. Além disso, as informações de custos, fontes de energia e necessidades técnicas que subsidiaram os cálculos da tese foram

detalhadas, destacando-se também as vantagens e desvantagens de cada arquitetura proposta.

A tese explorou quatro arquiteturas de processo para utilização das fontes de energia como GLP, gás natural e biomassa. Essas arquiteturas de processo de geração de calor foram identificadas como sendo as mais viáveis tecnicamente para suprir a demanda térmica do *spray dryer*, e foram organizadas como: (i) *queimador de gás (GLP e gás natural) com transferência de calor por contato indireto*; (ii) *queimador de gás (GLP e gás natural) com transferência de calor por contato direto*; (iii) *caldeira a vapor com utilização de biomassa*; e (iv) *gerador de gás quente com biomassa e complemento de calor via queimador de GLP com transferência de calor por contato direto*.

Os resultados apresentados no quarto capítulo foram organizados conforme tipo de arquitetura, fonte de energia e método de cálculo de LCOH, sendo convencional ou aprimorado. Os cálculos foram baseados nas informações mencionadas no terceiro capítulo conforme cada tipo de arquitetura proposta. Ao analisar todas as possibilidades estudadas, concluiu-se que:

- (i) A arquitetura (i) utilizada com *queimador de GLP e transferência de calor por contato indireto* ficou com o custo nivelado de 0,192 USD $$/kWh$ e 0,186 USD $$/kWh$ para o LCOH convencional e o LCOH aprimorado, respectivamente. Quando comparado às outras fontes de energia e arquiteturas estudadas nesta tese, essa opção ficou com valor final cerca de 32% maior em relação ao menor valor encontrado com todas as fontes de energia estudadas. Isso se deve principalmente ao elevado custo unitário do GLP. Outro aspecto importante a ser mencionado é que, tanto no método LCOH convencional quanto no LCOH aprimorado, a evolução dos custos se manteve com o mesmo perfil gráfico, e apresentaram uma pequena diferença de aproximadamente de 3,2% entre eles. Outro ponto chave é a facilidade em se aplicar essa arquitetura na prática;
- (ii) A arquitetura utilizada com *queimador de GLP e transferência por contato direto* acompanha o elevado custo da arquitetura anterior. O custo do calor gerado nessa arquitetura fica ainda mais elevado do que o da transferência de calor por contato indireto com GLP, em torno de 4% para o LCOH

aprimorado e menos de 1% para o LCOH convencional, com valores de 0,195 USD $\$/kWh$ e 0,193 USD $\$/kWh$, respectivamente. Também há facilidade em se aplicar na prática essa arquitetura;

- (iii) O gás natural na arquitetura de queimador e transferência de calor por contato indireto apresentou excelente resultado do custo nivelado, quando comparado com as outras fontes de energia, ficando com 0,149 USD $\$/kWh$ e 0,145 USD $\$/kWh$ para o LCOH convencional e o LCOH aprimorado, respectivamente. Foram os menores valores encontrados entre todas as fontes de energia e arquiteturas estudadas. Além disso, o método aprimorado também se mostrou eficaz nessa aplicação. Outro detalhe importante é a facilidade em se aplicar essa arquitetura técnica na prática;
- (iv) Com transferência de calor por contato direto, a arquitetura utilizando-se da fonte de energia proveniente do gás natural apresentou ótimos resultados. Os valores de custo nivelado apresentaram 0,150 USD $\$/kWh$ e 0,151 USD $\$/kWh$ para o LCOH convencional e o LCOH aprimorado, respectivamente. A diferença de resultado entre os dois métodos foi de apenas 1%, confirmando a equação do LCOH aprimorado. Do ponto de vista tecnológico, essa arquitetura é de fácil aplicação;
- (v) No caso da arquitetura de geração de calor com caldeira a vapor utilizando-se de biomassa juntamente com trocador de calor vapor/ar, embora a biomassa seja de certa forma ainda competitiva frente às fontes fósseis, o custo do investimento ficou muito superior. Outros fatores de elevado custo estão relacionados à manutenção e à grande necessidade de mão de obra para operação e seus custos correlatos. Assim, os valores apresentados para o custo nivelado foram de 0,165 USD $\$/kWh$ e 0,167 USD $\$/kWh$ para o LCOH convencional e o LCOH aprimorado, respectivamente, com uma diferença de aproximadamente 1% entre eles. Os resultados obtidos com a equação do LCOH aprimorado mostraram grande aderência frente ao método convencional. Na prática, esse sistema, apesar de já muito conhecido no meio industrial, apresenta dependência direta da operação, podendo também ser verificadas grandes oscilações devido à qualidade da fonte de energia;
- (vi) O gerador de gás quente utilizado com biomassa e trocador de calor gás/ar, aliado a um queimador de GLP com transferência de calor por contato

direto, foi a última arquitetura estudada. Essa arquitetura apresenta a composição de duas fontes de energia e, com isso, algumas particularidades técnicas foram observadas, como dificuldade em implantação do sistema, dependência direta da mão de obra na operação e oscilações de qualidade da biomassa. O fato de estar integrado ao sistema de GLP garante uniformidade da geração de calor final com um preço maior. Para essa arquitetura, os valores de custo nivelado ficaram em 0,205 USD $\$/kWh$ e 0,191 USD $\$/kWh$ para o LCOH convencional e o aprimorado, respectivamente. Foi a maior diferença entre os dois métodos apresentada nos estudos, de aproximadamente 7%. Ainda assim, por possuir elementos técnicos expostos na equação do método aprimorado do LCOH, o sistema se mostrou eficaz. Além disso, ambos apresentaram perfil gráfico similar.

De acordo com as conclusões acima expostas, fica claro que a melhor opção de investimento para o estudo de caso é utilizar o gás natural com sua fonte de energia. Não somente o custo de geração de calor é menor do que os demais, mas também há: (i) facilidade de operação; (ii) inexistência da dependência de transporte sobre rodas; (iii) inexistência de áreas de estocagem dentro da planta; (iv) inexistência de mão de obra adicional para operar o sistema de geração de calor; e (v) tempo de resposta do sistema em paradas, partidas e oscilações de processo.

Portanto, a utilização do método aprimorado do LCOH obteve resultados superiores. A principal vantagem em se aplicar o método aprimorado se deve ao fato de que ele já possui os elementos técnicos capazes de ser detalhados de acordo com o tipo de aplicação, região e fonte de energia. Isso faz com que os cálculos expressem a realidade do projeto a ser avaliado com maior precisão de resultados frente ao método convencional do LCOH. O método convencional, por sua vez, necessita que haja um conhecimento mais técnico por parte do usuário. Mais ainda: mesmo que, muitas vezes, tal conhecimento exista, abre-se um espaço para erro humano uma vez que os aspectos relativos aos gastos com a fonte de energia escolhida não estão explicitados no modelo convencional.

Como recomendação, sugere-se outros trabalhos focados na busca da melhoria do LCOH aprimorado através de maior nível de detalhamentos nos aspectos técnicos

das arquiteturas de combustão com diferentes aplicações, assim como das fontes de energia, incluindo sistemas híbridos que corroborem para obter resultados superiores. Esses aspectos técnicos referem-se: (i) a conhecer, sobretudo os níveis de perda de eficiência térmica para cada sistema ano a ano a serem expressos na equação; (ii) a inserir os custos de manutenção dos bens patrimoniais que os sistemas possuem como manutenção parcial e geral para queimadores, caldeiras, entre outros; (iii) a conhecer e expressar numericamente as possíveis sazonalidades das fontes de energia que afetem o poder calorífico inferior delas, principalmente da biomassa. De qualquer forma, entretanto, vale destacar que as modificações sugeridas por este estudo já representaram um avanço em relação à metodologia do LCOH convencional, levando a resultados superiores que poderão ser aplicados em outros estudos de caso para maior validação dos aprimoramentos aqui sugeridos.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, B. *et al.* **Experimental investigation of thermal management techniques for improving the efficiencies and levelized cost of energy of solar PV modules.** Case Studies in Thermal Engineering. 2022.

ABIA. **A indústria brasileira de alimentos e bebidas.** Disponível em: <https://www.abia.org.br/downloads/Infografico2022.pdf>. Acesso em: 27 de fev. de 2022

AIE. **Projected costs of generating electricity 2020.** Disponível em: <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>. Acesso em: 18 de ago. de 2021.

ASME. **Performance Test Code 4.3 Air Heaters.** 1968.

BARROSO, J.; BARRERAS, F.; AMAVEDA, H.; LOZANO, A. **On the optimization of boiler efficiency using bagasse as fuel.** Fuel, v. 82, p. 1451–1463, 2003.

BEN. **Balanco energético nacional 2021.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 15 de nov. de 2021.

BLAIR, N. *et al.* **System Advisor Model (SAM General Description (Version 2017.9.5)).** Technical Report. NREL. 2018.

BOGOSLAVSKA, O. **Comparative efficiency of using biofuels in heat supply systems by levelized cost of heat into account environmental taxes.** Systems, decision and control in energy II. Volume 346. 2021.

BORENSTEIN, S. **The Private and Public Economics of Renewable Electricity Generation.** Journal of Economic Perspectives. 2012.

BORGNACKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica.** 2. Ed. São Paulo. 2018.

BRIGHT, R.; DAVITIAN, H. **The marginal cost of electricity used as backup for solar hot water systems: A case study.** Energy. 1979.

CHANG, G. *et al.* **A comprehensive evaluation of factors affecting the levelized cost of wave energy conversion projects.** Renewable energy. 2018.

COBO, M. J.; HERRERA, A. G. L.; VIEDMA, E. H.; HERRERA, F. **SciMAT: A new science mapping analysis software tool.** Journal of the American Society for Information Science and Technology, v. 63, n. 8, p. 1609-1630. 2012.

CREUTZIG, F. *et al.* **Reconciling top-down and bottom-up modelling on future bioenergy deployment.** Nature Climate Change. 2012.

CUI, Y.; ZHU, J.; TWAHA, S.; CHU, J.; BAI, H.; HUANG, K.; CHEN, X.; ZORAS, S.; SOLEIMANI, Z. **Techno-economic assessment of the horizontal geothermal heat pump systems: A comprehensive review.** Energy Conversion and Management. 2019.

DESBROSSES, N. **Understanding the electrification of industrial energy consumption in Europe**. Leonardo Energy. Disponível em: <http://www.leonardoenergy.org/blog/understanding-electrification-industrialenergy-consumption-europe>. Acesso em: 26 abr. 2020.

EDENHOFER, O. *et al.* **On the economics of renewable energy sources**. Energy Economics. 2013.

EPE. **Balço energético nacional 2020**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 30 de nov. de 2021.

FRIEDMANN, J. *et al.* **Levelized cost of carbono abatement: An improved cost assessment methodology for a net-zero emissions world**. Center on global energy policy. 2020.

IBÁ. Relatório anual 2017. Disponível em: https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 15 de mai. de 2021.

IBÁ. Relatório anual 2020. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 21 de ago. de 2021.

IEA. **Electricity Security in Tomorrow's Power Systems**. Disponível em: <https://www.iea.org/%20articles/electricity-security-in-tomorrow-s-power-systems>. Acesso em: 7 de dez. de 2020.

ISLAM, M.T. *et al.* **A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends**. Renew. 2018.

JBS. Sobre a JBS S.A. Disponível em: <https://jbs.com.br/sobre/jbs/>. Acesso em 30 de set. de 2021.

KONG, R. *et al.* **Performance analysis of biomass boiler-organic Rankine cycle with assisted cascade heat pump for combined heat and power generation including exergy-costing**. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022.

KUMAR, L.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. **Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review**. Energy Convers Manage. 2019.

MCMHAN, A. C., **Design & Optimization of Organic Rankine Cycle Solar-Thermal Power plants**. Madison, WI: University of Wisconsin-Madison. Dissertação de mestrado. 2013.

MÜLLER, C.; RAU, C.; SCHRÜFER, F. **CSP in non-electrical application**. Brasília: Projeto Energia Heliotérmica. 2014.

MS. **Mapa do Estado de Mato Grosso do Sul**. Disponível em: <http://www.ms.gov.br/mapas>. Acesso em: 26 de fev de 2020.

MSGÁS. Rede de distribuição. Disponível em: <https://www.msgas.com.br/a-empresa/rede-de-distribuicao>. Acesso em 21 de out. de 2021.

NEVES, R. C. M. **Avaliação experimental de eficiência térmica de um recuperador de calor e caldeira em um sistema de cogeração.** 2014. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. FEB – Universidade Estadual Paulista.

NOGUEIRA, L. A. H.; ROCHA, C. R.; NOGUEIRA, F. J. H. **Eficiência Energética no Uso de Vapor.** Primeira edição. Eletrobrás, 2005.

OLASOLO, P.; JUÁREZ, M.C.; OLASOLO, J.; MORALES, M.P.; VALDANI, D. **Economic analysis of Enhanced Geothermal Systems (EGS). A review of software packages for estimating and simulating costs.** Applied Thermal Engineering. 2016.

RAVI, K.; CHAITANYA, K. N.V.V.; KUMAR, N. S. **Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation – A review.** Journal of Cleaner Production. 2021.

SINDIGAS. Panorama do setor de GLP em movimento. Disponível em: https://www.sindigas.org.br/Download/PANORAMAS/NOVO%20GLP%20EM%20MOVIMENTO_MARCO_2022.pdf. Acesso em 20 de jan. de 2022.

SPRAY PROCESS. Secagem por atomização. Disponível em: <https://www.sprayprocess.com.br/secagem-por-atomizacao>. Acesso em 21 de out. de 2021.

TAZI, N.; SAFAEI, F.; HNAIEN, F. **Assessment of the levelized cost of energy using a stochastic model.** Energy. 2021.

TESTER, J.W.; REBER, T.J.; BECKERS, K.F.; LUKAWSKI, M.Z. **Deep geothermal energy for district heating: lessons learned from the U.S. and beyond.** Woodhead Publishing. 2016.

TRAMA, C. P. *et al.* Cost–Benefit Analysis of Solar Thermal Plants with Storage in a Hydrothermal System. Energies. 2021.

UECKERDT, F. *et al.* **System LCOE: What are the costs of variable renewables?** Energy. 2013.

YANG, T.; LIU, W.; KRAMER, G. J.; SUN, Q. **Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021.