

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

**PROJETO E ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PRÉ-TRATAMENTO
DE CASCA DE CAFÉ PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES E APLICAÇÃO EM
BIOENERGIA**

AMANDA DE OLIVEIRA E SILVA

ITAJUBÁ

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

**PROJETO E ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PRÉ-TRATAMENTO
DE CASCA DE CAFÉ PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES E APLICAÇÃO EM
BIOENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Hugo Perazzini

ITAJUBÁ

2025

*Dedico este trabalho à memória do meu pai,
que mesmo tendo partido no meio desta minha caminhada,
permaneceu sempre comigo, em pensamento, inspiração, inteligência e força.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por me direcionar com sabedoria, me proteger e me dar forças nos momentos de dificuldades para alcançar este objetivo tão desejado em minha vida.

Aos meus pais, Guilherme Albano de Oliveira (*in memoriam*) e Rita Cássia Silva Oliveira, pelo apoio incondicional e por me ensinarem o valor do conhecimento, trabalho, honestidade e dedicação. Sou eternamente grata por tudo que fizeram por mim e esta conquista é nossa.

Ao meu namorado, Juliano Antunes Cintra Rosa, por tornar esta jornada mais leve com sua paciência, amor e companheirismo. Agradeço imensamente por sempre me auxiliar e incentivar, sendo meu porto seguro.

À minha prima, Paula Morais, por ser uma verdadeira irmã para mim. Obrigada por sempre me motivar e por estar presente, compartilhando desafios, conquistas e alegrias.

Às minhas tias, em especial Beatriz Faria e Benedita Silva, por me encorajarem e estarem ao meu lado nos momentos mais difíceis. Vocês são exemplos de coragem e amor.

À minha madrinha, Vanda Lúcia Silva, que, não importa a distância, permanece sempre perto do meu coração. Sua personalidade me inspira em muitos momentos da vida.

Ao meu orientador, Professor Hugo Perazzini, pela confiança em meu trabalho, compreensão, incentivo e valiosos ensinamentos compartilhados ao longo desses anos. Seu compromisso com a educação e sua dedicação são inspiradores, e levarei comigo muitos dos aprendizados que me transmitiu. Sou profundamente grata por todo seu apoio.

Ao Professor Ivan Felipe Silva dos Santos pelo suporte nos aspectos econômicos da dissertação e pela confiança no meu potencial, que desde o início do mestrado me motivou a continuar. Suas contribuições para este trabalho foram fundamentais.

Às Professoras Maria Luiza Grillo Renó e Maria Claudia Costa de Oliveira Botan pelas contribuições valiosas na avaliação desta dissertação. Agradeço sinceramente pela atenção e cuidado com cada detalhe.

Aos demais familiares e amigos que torceram por esta conquista.

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pela oportunidade de realização do mestrado.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

O Brasil, maior produtor e exportador mundial de café, gera quantidades substanciais de casca de café, principal resíduo sólido do processamento via úmida. Pesquisas recentes demonstram seu potencial energético. Entretanto, a alta umidade, baixa densidade e tamanho irregular das partículas requerem o pré-tratamento para conversão termoquímica eficiente. Este estudo teve como objetivo projetar e realizar a análise econômica de uma planta de pré-tratamento de cascas de café, incluindo etapas de secagem, cominuição e densificação, visando à produção de briquetes. Analisou-se também a viabilidade econômica da planta de bioenergia, ou seja, o pré-tratamento associado à combustão dos briquetes para geração de energia elétrica. Análises de sensibilidade das variáveis de projeto e econômicas foram realizadas, com foco na influência das condições operacionais de secagem. Avaliaram-se o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), $payback$ simples (P) e descontado (P_d). Foram calculados o Custo Nivelado de Produção por Massa de Briquete (LCM) para a planta de pré-tratamento, e o Custo Nivelado de Eletricidade ($LCOE$) para a planta de bioenergia. Os resultados demonstraram que a comercialização dos briquetes foi viável, com VPL na faixa de US\$ 38.635 a US\$ 192.046, TIR de 11,62% a 11,95%, $payback$ simples de 5,66 a 5,74 anos e descontado de 9,27 a 9,48 anos. O menor LCM de R\$ 602 t^{-1} (US\$ 0,115 kg^{-1}) ocorreu a partir de valores mais altos de temperatura do ar de secagem (120 °C), altura do leito (4 cm) e vazão de biomassa (1500 $kg h^{-1}$). Nestas condições, o preço (P_{briq}) e valor de venda (V_{briq}) mínimos do briquete foram R\$ 609 t^{-1} (US\$ 0,116 kg^{-1}) e R\$ 811 t^{-1} (US\$ 0,155 kg^{-1}), respectivamente, enquadrando-se nas faixas relatadas pela literatura e alguns anúncios do mercado brasileiro. Contudo, V_{briq} não foi atrativo quando comparado com a lenha, o que pode dificultar a aceitação do briquete de casca de café na prática, caso não haja incentivos fiscais. A planta de bioenergia foi inviável, com VPL médio de – US\$ 7,92 milhões, principalmente devido ao alto investimento da tecnologia de combustão (63,7% do investimento total) e altos custos de secagem (56,8% dos custos operacionais). O menor $LCOE$ (US\$ 198,58 MWh^{-1}) foi alcançado na maior temperatura do ar no cenário otimista ($C_{un} = US\$ 2.000 kW^{-1}$), mas acima da tarifa base (US\$ 67,32 MWh^{-1}). A temperatura do ar, seguida da altura do leito, foram as variáveis de secagem com maior influência na economia da planta de bioenergia, enquanto a velocidade do ar mostrou-se inelástica. O custo unitário da tecnologia de conversão (C_{un}) foi a variável econômica de maior impacto. Assim, além de considerar melhorias econômicas na secagem, é preciso ainda reduzir os custos de capital da combustão ou investigar tecnologias de conversão mais acessíveis. A planta de pré-tratamento apresenta-se, portanto, como a alternativa mais promissora para o aproveitamento da casca de café da via úmida.

Palavras-chave: Biocombustível sólido; Biomassa; Conversão termoquímica; Potencial energético; Resíduos agroindustriais; Secagem.

ABSTRACT

Brazil, the world's largest coffee producer and exporter, generates substantial amounts of coffee husks, the main solid residue from wet processing. Recent research has demonstrated its energy potential. However, the high moisture, low density and irregular particle size require pre-treatment for efficient thermochemical conversion. This study aimed to design and perform the economic analysis of a coffee husk pre-treatment plant, including drying, comminution and densification steps, for the production of briquettes. The economic feasibility of the bioenergy plant, i.e., the pre-treatment associated with the combustion of briquettes for electricity generation, was also analyzed. Sensitivity analyses of the design and economic variables were performed, focusing on the influence of the drying operating conditions. The Net Present Value (*NPV*), Internal Rate of Return (*IRR*), simple payback (*P*) and discounted payback (*P_d*) were evaluated. The Levelized Cost of Production per Briquette Mass (*LCM*) for the pre-treatment plant and the Levelized Cost of Electricity (*LCOE*) for the bioenergy plant were calculated. The results demonstrated that the commercialization of the briquettes was viable, with *NPV* in the range of US\$ 38,635 to US\$ 192,046, *IRR* of 11.62% to 11.95%, simple payback of 5.66 to 5.74 years and discounted payback of 9.27 to 9.48 years. The lowest *LCM* of R\$ 602 t⁻¹ (US\$ 0.115 kg⁻¹) occurred from higher values of drying air temperature (120 °C), bed height (4 cm) and biomass flow rate (1500 kg h⁻¹). Under these conditions, the minimum price (*P_{briq}*) and sales value (*V_{briq}*) of the briquette were R\$ 609 t⁻¹ (US\$ 0.116 kg⁻¹) and R\$ 811 t⁻¹ (US\$ 0.155 kg⁻¹), respectively, within the ranges reported in the literature and some advertisements in the Brazilian market. However, *V_{briq}* was not attractive when compared to firewood, which may make it difficult to accept coffee husk briquettes in practice, if there are no tax incentives. The bioenergy plant was unfeasible, with an average *NPV* of – US\$ 7.92 million, mainly due to the high investment in combustion technology (63.7% of the total investment) and high drying costs (56.8% of the operating costs). The lowest *LCOE* (US\$ 198.58 MWh⁻¹) was achieved at the highest air temperature in the optimistic scenario (*C_{un}* = US\$ 2,000 kW⁻¹), but above the base tariff (US\$ 67.32 MWh⁻¹). Air temperature, followed by bed height, were the drying variables with the greatest influence on the bioenergy plant economics, while air velocity was inelastic. The unitary cost of conversion technology (*C_{un}*) was the economic variable with the greatest impact. Therefore, in addition to considering economic improvements in drying, it is also necessary to reduce the capital costs of combustion or investigate more affordable conversion technologies. The pre-treatment plant thus emerges as the most promising alternative for the utilization of wet-processed coffee husks.

Keywords: Agro-industrial waste; Biomass; Drying; Energy potential; Solid biofuel; Thermochemical conversion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Consumo final no setor residencial 1970 – 2023.....	23
Figura 3.2 Consumo no setor industrial 1970 – 2023.....	25
Figura 3.3 Oferta interna de energia 2013 – 2023: derivados da cana, lenha e carvão vegetal, e carvão mineral e coque.	26
Figura 3.4 Partes que compõem o fruto do café.....	28
Figura 3.5 Etapas básicas da produção de café por via úmida e via seca.....	29
Figura 3.6 Esquema do pré-tratamento da biomassa bruta para produção de <i>pellets</i> ou briquetes e principais aplicações.	41
Figura 3.7 Esquema do secador rotativo direto.	43
Figura 3.8 Esquema do secador de esteira transportadora.....	45
Figura 3.9 Esquema do secador pneumático.	47
Figura 3.10 Principais países exportadores de briquetes de madeira em 2023 (mil toneladas).	61
Figura 3.11 Distribuição das indústrias brasileiras produtoras de <i>pellets</i> e briquetes (a) por região e (b) por estado.	65
Figura 4.1 Esquema da metodologia.	70
Figura 4.2 Esquema da planta de pré-tratamento da casca de café.	72
Figura 4.3 Fluxograma para a seleção do tipo de secador adequado para a casca de café.....	73
Figura 4.4 Esquema da planta de bioenergia, abrangendo as etapas de pré-tratamento e o processo de conversão termoquímica.	96
Figura 5.1 Custos da etapa de secagem: (a) custos totais de secagem (C_{td}) em função da altura do leito de biomassa (H) para diferentes temperaturas de entrada do ar (T_g^1), mantendo constante $F_s = 1000 \text{ kg h}^{-1}$, e $v = 1,0 \text{ m s}^{-1}$; (b) equipamentos (C_{eqd}), operacionais (C_{opd}) e totais de secagem (C_{td}) em função de T_g^1 para $F_s = 1000 \text{ kg h}^{-1}$, $H = 4 \text{ cm}$, e $v = 1,0 \text{ m s}^{-1}$	112
Figura 5.2 Custos da planta de pré-tratamento para $T_g^1 = 120 \text{ °C}$, $H = 4 \text{ cm}$, e $v = 1,0 \text{ m s}^{-1}$: (a) equipamentos (C_{eq}), operacionais (C_{opeq}), e custos totais das etapas (C_t) em função da vazão de biomassa seca (F_s); (b) investimento (I), custos operacionais (C_{opT}), receita (R) e lucro (S) em função de F_s	114
Figura 5.3 Influência das condições de secagem no custo nivelado de produção por massa de briquete (LCM): (a) LCM parametrizado na temperatura de entrada do ar (T_g^1) para	

diferentes valores de altura do leito de biomassa (H); (b) LCM parametrizado na velocidade do ar (v) para diferentes valores de H	116
Figura 5.4 Custo de produção por massa (C_{briq}), custo nivelado de produção por massa (LCM), preço (P_{briq}) e valor de venda do briquete (V_{briq}) em função da vazão de biomassa seca (F_s) para (a) níveis superior, e (b) inferior de secagem.....	117
Figura 5.5 Investimento e custos operacionais e de manutenção da planta de bioenergia considerando o cenário base: C_{un} = US\$ 3.000 kW ⁻¹ , F_s = 650 kg h ⁻¹ , T_g^1 = 100 °C, v = 0,80 m s ⁻¹ e H = 4 cm.	122
Figura 5.6 (a) VPL e (b) $LCOE$ em função do custo unitário otimista (US\$ 2.000 kW ⁻¹), base (US\$ 3.000 kW ⁻¹) e pessimista (US\$ 4.000 kW ⁻¹), considerando F_s = 650 kg h ⁻¹ , T_g^1 = 100 °C, v = 0,80 m s ⁻¹ e H = 4 cm.	125
Figura 5.7 VPL em função (a) da tarifa de venda de energia (T) (considerando F_s = 650 kg h ⁻¹), e (b) da vazão de biomassa seca (F_s) (considerando C_{un} = US\$ 3.000 kW ⁻¹), mantendo constantes para ambas as figuras as variáveis: T_g^1 = 120 °C, v = 0,80 m s ⁻¹ e H = 4 cm.....	127
Figura 5.8 Custos operacionais com consumo de vapor (C_{opeq}), custos operacionais totais (C_{opT}) e custos totais (C_T) em função do teor de umidade inicial da biomassa (X_{bu}^1), considerando o cenário base.	128
Figura 5.9 (a) $LCOE$ e (b) VPL em função do teor de umidade inicial da biomassa (X_{bu}^1) para alturas do leito (H) de 3, 4 e 5 cm, mantendo constantes: C_{un} = US\$ 3.000 kW ⁻¹ , F_s = 650 kg h ⁻¹ , v = 0,80 m s ⁻¹ e T_g^1 = 100 °C.....	129
Figura 5.10 (a) VPL e (b) $LCOE$ em função da temperatura de entrada do ar no secador (T_g^1) para os cenários otimista, base e pessimista, mantendo constantes as variáveis operacionais: F_s = 650 kg h ⁻¹ , v = 0,80 m s ⁻¹ e H = 4 cm.....	131
Figura 5.11 $LCOE$ em função da vazão de biomassa seca (F_s), mantendo constantes as variáveis: C_{un} = US\$ 3.000 kW ⁻¹ , T_g^1 = 120 °C, v = 0,80 m s ⁻¹ e H = 4 cm.	132
Figura 5.12 Análise de sensibilidade das condições de secagem e dos parâmetros econômicos e resposta do VPL	133
Figura 5.13 Análise de sensibilidade das condições de secagem e dos parâmetros econômicos e resposta do $LCOE$	134
Figura 5.14 Análise de sensibilidade das condições de secagem e dos parâmetros econômicos e resposta dos custos totais (C_T).....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Caracterização físico-química da casca de café (% em base seca).....	32
Tabela 3.2 Principais vantagens e desvantagens dos secadores de biomassa.....	48
Tabela 3.3 Faixas típicas de parâmetros de projeto dos secadores de biomassa.	49
Tabela 3.4 Objetivos principais de estudos anteriores sobre briquetes feitos de casca de café.	58
Tabela 3.5 Desafios do mercado brasileiro de briquetes de biomassa e algumas recomendações.	67
Tabela 4.1 Variáveis de entrada utilizadas no projeto e análise econômica da planta de pré- tratamento de casca de café.	82
Tabela 4.2 Variáveis de entrada utilizadas no projeto do cenário base da planta de bioenergia.	83
Tabela 4.3 Fatores de Lang considerados nos cálculos de C_f e C_p	85
Tabela 4.4 Custos operacionais fixos da planta de pré-tratamento.....	89
Tabela 4.5 Cenário base dos parâmetros técnicos e econômicos e intervalo considerado na análise de sensibilidade.	106
Tabela 5.1 Área colhida (A_c), quantidade de resíduos gerados (m_r) e possibilidades de capacidade de processamento de casca de café (F_s) para o Brasil e as cinco principais regiões em 2024.....	108
Tabela 5.2 Estimativa de geração de energia elétrica (E_T) a partir do briquete de casca de café para o Brasil e as cinco principais regiões em 2024.....	108
Tabela 5.3 Resultados do dimensionamento da etapa de secagem: níveis inferior e superior de secagem.	110
Tabela 5.4 Índices econômicos da planta de pré-tratamento: níveis inferior e superior de secagem.	115
Tabela 5.5 Resultados de custo de produção (C_{briq}), custo nivelado (LCM), preço (P_{briq}) e valor de venda do briquete (V_{briq}), para capacidades variando de 500 a 1500 kg h ⁻¹ , considerando o melhor cenário de secagem, convertidos para R\$ t ⁻¹ e comparados aos valores da literatura.	120
Tabela 5.6 Resultados econômicos da planta de bioenergia: cenário base.....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABE	Acetona-Butanol-Etanol
ABIB	Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável
AIE	Agência Internacional de Energia
BCB	Banco Central do Brasil
CAGR	Taxa de Crescimento Anual Composta
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEPCI	<i>Chemical Engineering Plant Cost Index</i>
CFA	Assistência Financeira Central
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
DTG	Termogravimetria Derivada
EIA	<i>U.S. Energy Information Administration</i>
ER	Razão de Equivalência
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LCM	Custo Nivelado de Produção por Massa de Briquete
LCOE	Custo Nivelado de Eletricidade
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
M&S Index	<i>Marshall and Swift Index</i>
P	<i>Payback</i> simples
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PLIM	Modelo de Programação Linear Inteira Mista
SF	Razão vapor-combustível
TGA	Análise Termogravimétrica
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
VPL	Valor Presente Líquido

NOMENCLATURA

SÍMBOLOS

a_c	Constante de custo para moinho de facas [-]
A_c	Área colhida de café [ha ano ⁻¹]
A_d	Área de transferência de calor do secador [m ²]
A_h	Área de transferência de calor do trocador de calor [m ²]
b_c	Constante de custo para moinho de facas [-]
c_{ps}	Calor específico do sólido [kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
c_{pv}	Calor específico do vapor d'água [kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
c_{pw}	Calor específico da água [kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
C_1	Constante de custo 1 para o secador [-]
C_2	Constante de custo 2 para o secador [-]
$C(t)$	Custo anual [US\$ ano ⁻¹]
C_{briq}	Custo de produção por massa de briquete [US\$ kg ⁻¹]
C_e	Custo da energia elétrica [US\$ kWh ⁻¹]
C_{eq}	Custos de investimento dos equipamentos da planta de pré-tratamento [US\$]
C_{eqb}	Custos de investimento dos equipamentos da etapa de briquetagem [US\$]
C_{eqb}^1	Custos de investimento conhecidos da briquetadeira 1 com determinada capacidade de processamento [US\$]
C_{eqb}^2	Custos de investimento conhecidos da briquetadeira 2 com determinada capacidade de processamento [US\$]
C_{eqc}	Custos de investimento dos equipamentos da etapa de cominuição [US\$]
C_{eqd}	Custos de investimento dos equipamentos da etapa de secagem [US\$]
C_{eql}	Custos de investimento dos equipamentos da etapa de logística [US\$]
C_f	Custo fixo total da planta de pré-tratamento [US\$]
C_{fuel}	Custo do combustível [US\$ m ⁻³]
C_m	Custos de manutenção dos equipamentos de pré-tratamento [US\$ ano ⁻¹]
C_{md}	Custos de manutenção da etapa de secagem [US\$ ano ⁻¹]
C_{ol}	Custo da mão de obra operacional [US\$ ano ⁻¹]
C_{op}	Custos operacionais totais da planta de pré-tratamento [US\$ ano ⁻¹]
C'_{op}	Custos operacionais do pré-tratamento da planta de bioenergia [US\$ ano ⁻¹]
C_{opb}	Custos operacionais da etapa de briquetagem [US\$ ano ⁻¹]

C_{opc}	Custos operacionais da etapa de cominuição [US\$ ano ⁻¹]
C_{opd}	Custos operacionais da etapa de secagem [US\$ ano ⁻¹]
C_{ope}	Custos operacionais da etapa de conversão termoquímica [US\$ ano ⁻¹]
C_{opeq}	Custos operacionais dos equipamentos da planta de pré-tratamento [US\$ ano ⁻¹]
C'_{opeq}	Custos operacionais dos equipamentos de pré-tratamento da planta de bioenergia [US\$ ano ⁻¹]
C_{opf}	Custos operacionais fixos da planta de pré-tratamento [US\$ ano ⁻¹]
C'_{opf}	Custos operacionais fixos do pré-tratamento da planta de bioenergia [US\$ ano ⁻¹]
C_{opT}	Custos totais de operação e manutenção da planta de bioenergia [US\$ ano ⁻¹]
C_{opv}	Custos operacionais variáveis da planta de pré-tratamento [US\$ ano ⁻¹]
C_p	Custo total da planta física de pré-tratamento [US\$]
C_s	Custo do silo [US\$]
C_t	Custos totais anuais dos equipamentos de pré-tratamento [US\$ ano ⁻¹]
C_T	Custos totais anuais da planta de bioenergia [US\$ ano ⁻¹]
C_{td}	Custos totais anuais da etapa de secagem [US\$ ano ⁻¹]
C_{tpt}	Custos totais anuais da planta de pré-tratamento [US\$ ano ⁻¹]
C_{un}	Custo unitário da tecnologia de conversão termoquímica [US\$ kW ⁻¹]
C_v	Custo do vapor d'água [US\$ kg ⁻¹]
C_{ve}	Fator referente aos custos operacionais variáveis da etapa de conversão termoquímica [US\$ MWh ⁻¹]
C_w	Capital de giro da planta de pré-tratamento [US\$]
d_{p1}	Diâmetro médio das partículas de biomassa <i>in natura</i> [cm]
d_{p2}	Diâmetro médio das partículas de biomassa fragmentada [cm]
D	Diâmetro da tubulação [m]
e	Parâmetro de recuperação de capital [%]
E	Energia elétrica disponível da planta de bioenergia [MWh ano ⁻¹]
E_b	Energia elétrica consumida pela máquina de briquetagem [kWh kg ⁻¹]
E_c	Potência necessária para fragmentar a biomassa [kW]
E_d	Potência necessária para movimentar a esteira do secador [kW]
E_m	Potência necessária para o trabalho mecânico do compressor centrífugo [kW]
E_u	Energia elétrica utilizada no funcionamento dos equipamentos de pré-tratamento [MWh ano ⁻¹]
E_T	Energia elétrica total produzida pela planta de bioenergia [MWh ano ⁻¹]
f	Fator de atrito de Fanning [-]

f_n	Fator de custo do Método Fatorial de Lang [-]
F_b	Vazão mássica de briquetes de casca de café produzidos [kg h^{-1}]
F_c	Vazão mássica de biomassa seca [t h^{-1}]
F_g	Vazão mássica de ar [kg h^{-1}]
F_s	Vazão mássica de biomassa seca [kg h^{-1}]
F_s^1	Vazão mássica de biomassa seca da briquetadeira 1 [kg h^{-1}]
F_s^2	Vazão mássica de biomassa seca da briquetadeira 2 [kg h^{-1}]
F_u	Vazão mássica de biomassa úmida [t h^{-1}]
F_v	Vazão mássica de vapor d'água [kg h^{-1}]
FC	Fator de capacidade [%]
g	Aceleração da gravidade [m s^{-2}]
H	Altura do leito de biomassa [m]
HHV_f	Poder calorífico do combustível [kcal m^{-3}]
H_v	Entalpia de vapor [kcal kg^{-1}]
i	Taxa de juros [%]
I	Investimento inicial da planta de geração de energia [US\$]
I_e	Investimento da etapa de conversão termoquímica [US\$]
I_{pt}	Investimento inicial da planta de pré-tratamento [US\$]
IP	Impostos incidentes sobre vendas [%]
k	Constante de ajuste do tempo de hora para segundos [s h^{-1}]
k_1	Constante de ajuste do tempo de hora para uma semana [h semana^{-1}]
k_2	Constante de ajuste do tempo de hora para mês [h mês^{-1}]
l_t	Vida útil dos equipamentos de pré-tratamento [ano]
L	Comprimento da esteira do secador [m]
L_t	Comprimento da tubulação [m]
LCM	Custo Nivelado de Produção por Massa de Briquete [US\$ kg^{-1}]
LCOE	Custo Nivelado de Eletricidade [US\$ MWh^{-1}]
m_r	Quantidade de casca de café gerada pelo método via úmida [t ano^{-1}]
m_t	Quantidade total de café em grão produzida [t ano^{-1}]
m_w	Vazão mássica de água evaporada [kg h^{-1}]
m_{wc}	Quantidade de café em grão produzida pelo método via úmida [t ano^{-1}]
M	Quantidade de briquetes de casca de café produzidos por ano [kg ano^{-1}]
ML	Margem de lucro pela venda dos briquetes de casca de café [%]
MR	Razão de umidade [-]

n	Vida útil da planta de pré-tratamento [ano]
n _e	Vida útil da planta de bioenergia [ano]
n _c	Índice de custo para moinho de facas [-]
N _{op}	Número de operadores necessários para fornecer o total de turnos por ano [-]
N _{os}	Número de operadores por turno [-]
NUT	Número de unidades de transferência de calor [-]
p	Porcentagem de casca de café gerada no beneficiamento agrícola [%]
p _f	Porcentagem referente aos custos operacionais fixos da etapa de conversão termoquímica [%]
P	<i>Payback</i> simples [ano]
P _{briq}	Preço por massa de briquete [US\$ kg ⁻¹]
P _d	<i>Payback</i> descontado [ano]
P _l	Preço da lenha [R\$ kg ⁻¹]
P _r	Produtividade média de café [t ha ⁻¹]
Pot _d	Potência teórica disponível da planta de bioenergia [MW]
Pot _{el}	Potência elétrica gerada pela planta de bioenergia [MW]
PCI	Poder calorífico inferior do briquete de casca de café [MJ kg ⁻¹]
PCI _l	Poder calorífico inferior da lenha [MJ kg ⁻¹]
Q ₁	Energia requerida para evaporar a água da biomassa [kJ h ⁻¹]
Q ₂	Energia utilizada para aquecer o vapor d'água da temperatura do bulbo úmido para a temperatura de saída do ar de secagem [kJ h ⁻¹]
Q ₃	Energia utilizada para aquecer a água presente na biomassa a partir da temperatura ambiente até a temperatura de bulbo úmido [kJ h ⁻¹]
Q ₄	Energia utilizada para aquecer os sólidos no secador [kJ h ⁻¹]
Q ₅	Energia utilizada para aquecer a água remanescente na biomassa [kJ h ⁻¹]
Q _s	Quantidade de silos [-]
Q _t	Energia térmica total requerida no processo de secagem [W]
R	Receita pela venda dos briquetes de casca de café produzidos [US\$ ano ⁻¹]
R _e	Receita pela venda de energia elétrica [US\$ ano ⁻¹]
Re	Número de Reynolds [-]
S	Lucro líquido da planta de pré-tratamento [US\$ ano ⁻¹]
S _a	Salário anual operacional [US\$ ano ⁻¹]
S _e	Lucro líquido da planta de bioenergia [US\$ ano ⁻¹]
t	Período de tempo [ano]

t_c	Tempo característico de secagem [s]
t_{op}	Tempo de operação anual [h ano ⁻¹]
T	Tarifa de venda de energia elétrica [US\$ MWh ⁻¹]
T_a	Temperatura do ar ambiente [°C]
T_g^1	Temperatura de entrada do ar de secagem [°C]
T_g^2	Temperatura de saída do ar de secagem [°C]
T_s^1	Temperatura do sólido na entrada do secador [°C]
T_s^2	Temperatura do sólido na saída do secador [°C]
T_v	Temperatura do vapor d'água [°C]
T_w	Temperatura de bulbo úmido [°C]
TIR	Taxa Interna de Retorno [%]
u	Velocidade da esteira transportadora [cm s ⁻¹]
U	Coefficiente global de transferência de calor [W m ⁻² °C ⁻¹]
v	Velocidade do ar de secagem [m s ⁻¹]
\dot{V}_1	Vazão volumétrica de ar [m ³ h ⁻¹]
V_{briq}	Valor de venda do briquete no mercado [US\$ kg ⁻¹]
V_f	Volume consumido de combustível [m ³ mês ⁻¹]
V_s	Volume do silo específico para <i>pellet</i> de biomassa [m ³]
VPL	Valor Presente Líquido da planta de bioenergia [US\$]
VPL _{pt}	Valor Presente Líquido da planta de pré-tratamento [US\$]
w	Porcentagem de café produzido pelo método via úmida no Brasil [%]
w_i	<i>Working index</i> [-]
W	Largura do secador [m]
X_{bs}^1	Teor de umidade da casca de café na entrada do secador (base seca) [(kg H ₂ O) (kg material seco) ⁻¹]
X_{bs}^2	Teor de umidade da casca de café na saída do secador (base seca) [(kg H ₂ O) (kg material seco) ⁻¹]
X_{bu}^1	Teor de umidade da casca de café na entrada do secador (base úmida) [(kg H ₂ O) (kg material úmido) ⁻¹]
X_{eq}	Teor de umidade gás-sólido de equilíbrio dinâmico (base seca) [(kg H ₂ O) (kg material seco) ⁻¹]

SÍMBOLOS GREGOS

α	Fator de escala dos custos de investimento da etapa de briquetagem [-]
β	Fator de perdas de calor do sistema de secagem [%]
δ	Fator de perdas de calor e ineficiências do sistema de aquecimento [%]
ΔH_v	Calor latente de vaporização da água [kJ kg^{-1}]
ΔP_d	Queda de pressão no secador [Pa]
ΔP_h	Queda de pressão no sistema de aquecimento [Pa]
ΔP_t	Queda de pressão nas tubulações [Pa]
ΔP_T	Queda de pressão total no sistema [Pa]
ΔT_{ln}	Diferença de temperatura média logarítmica [$^{\circ}\text{C}$]
η	Eficiência do motor e pás do compressor centrífugo [%]
η_{el}	Eficiência do ciclo termodinâmico Rankine [%]
η_v	Eficiência da caldeira [%]
μ	Viscosidade do ar [N s m^{-2}]
ρ_b	Massa específica aparente da casca de café [kg m^{-3}]
ρ_{briq}	Massa específica aparente do briquete de casca de café [kg m^{-3}]
ρ_g	Massa específica do ar avaliada na temperatura de entrada do secador [kg m^{-3}]
τ	Tempo de residência no secador [h]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	OBJETIVOS.....	21
2.1	Objetivo geral	21
2.2	Objetivos específicos.....	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1	Histórico e situação atual do uso de biocombustíveis sólidos no Brasil	22
3.2	Biomassa de casca de café.....	27
3.3	Aplicações da casca de café.....	30
3.3.1	Aplicações energéticas.....	32
3.4	Importância do pré-tratamento dos resíduos para aplicações energéticas.....	36
3.5	Principais tecnologias de secagem de biomassa.....	42
3.5.1	Secador rotativo.....	42
3.5.2	Secador de esteira transportadora	45
3.5.3	Secador pneumático.....	46
3.5.4	Comparações entre as diferentes tecnologias de secagem de biomassa.....	48
3.6	Aspectos econômicos da secagem de biomassa	49
3.7	Briquetes de casca de café.....	53
3.8	Mercado internacional de briquetes de biomassa.....	58
3.9	Mercado de briquetes de biomassa no Brasil	62
3.10	Desafios do mercado de briquetes de biomassa no Brasil.....	65
3.11	Perspectivas futuras do mercado internacional de briquetes de biomassa	67
4	METODOLOGIA.....	70
4.1	Estimativa da capacidade de processamento	71
4.2	Projeto e especificação das etapas de pré-tratamento de casca de café.....	72
4.2.1	Projeto da etapa de secagem.....	74
4.2.2	Projeto da etapa de cominuição	80
4.2.3	Variáveis de entrada de projeto.....	81
4.3	Estimativa de custos da planta de pré-tratamento de casca de café.....	83

4.3.1 Investimento	84
4.3.2 Custos operacionais	88
4.3.3 Lucro líquido proveniente da comercialização dos briquetes	93
4.4 Energia elétrica gerada pela planta de bioenergia	95
4.5 Estimativa de custos da planta de bioenergia	97
4.5.1 Investimento	98
4.5.2 Custos operacionais	99
4.5.3 Lucro líquido proveniente da venda de energia elétrica	100
4.6 Análise de viabilidade econômica	101
4.6.1 Valor Presente Líquido	101
4.6.2 Taxa Interna de Retorno.....	102
4.6.3 <i>Payback</i> simples	102
4.6.4 <i>Payback</i> descontado	103
4.6.5 Custo Nivelado de Eletricidade	103
4.6.6 Custo Nivelado de Produção por Massa de Briquete	104
4.7 Análise de sensibilidade aos parâmetros técnicos e econômicos da planta de bioenergia	105
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	107
5.1 Potencial de geração de energia elétrica a partir da casca de café no Brasil	107
5.2 Planta de pré-tratamento da casca de café	109
5.2.1 Resultados de projeto e análise econômica	109
5.2.2 Custo nivelado de produção por massa de briquete	115
5.2.3 Custo de produção por massa, preço e valor de venda do briquete.....	118
5.3 Planta de bioenergia.....	121
5.3.1 Análise econômica do cenário base	121
5.3.2 Análise de sensibilidade aos parâmetros econômicos	124
5.3.3 Análise de sensibilidade aos parâmetros técnicos	127
5.3.4 Análise de sensibilidade aos parâmetros técnicos e econômicos	132
6 CONCLUSÕES	137
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	141
REFERÊNCIAS	142

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo energético mundial está associado ao desenvolvimento econômico e tecnológico e ao crescimento populacional. Segundo dados da Agência Internacional de Energia (AIE), até 2050, estima-se um aumento de quase 50% na demanda de energia global, em comparação com 2020 (IEA, 2021). Entretanto, em 2022, cerca de 85,7% da matriz energética mundial era composta por fontes não renováveis de energia, principalmente petróleo e derivados (IEA, 2023). Desse modo, o constante aumento da demanda energética aliado aos impactos das mudanças climáticas motivam a busca por fontes renováveis de energia. Até 2050, espera-se que a demanda por energias renováveis triplique, reduzindo a participação dos combustíveis fósseis no consumo total de energia de 80% em 2023 para 58% (IEA, 2024).

A biomassa tem sido reconhecida como uma fonte alternativa de energia com grande potencial para contribuir significativamente com as necessidades energéticas mundiais de maneira sustentável. O uso da biomassa para bioenergia apresenta diversas vantagens, como ampla disponibilidade, baixo custo, neutralidade de carbono, contribuição para a gestão de resíduos, diversificação da matriz energética do país, capacidade de reduzir a dependência petrolífera e diminuir as emissões de gases de efeito estufa. Diferente de fontes de energia intermitentes, como solar e eólica, a biomassa pode ser utilizada continuamente, conforme a demanda. Inúmeros resíduos, como agrícolas, florestais, agroindustriais e urbanos podem ser utilizados para a produção de bioenergia por rotas bioquímicas ou termoquímicas.

Em 2023, a biomassa foi a terceira maior fonte na matriz elétrica do Brasil, respondendo por 8,0%, atrás das fontes hidráulica (58,9%) e eólica (13,2%) (EPE, 2024a). Apesar do crescimento de 3,8% em relação a 2022, comparada à fonte hidráulica, sua contribuição ainda é baixa. A ampliação do uso da biomassa pode desempenhar um papel estratégico no setor energético, especialmente em períodos de estiagem, quando a geração hidrelétrica é reduzida e precisa ser compensada por outra fonte, preferencialmente renovável. Do total da participação da biomassa, 5,1% foram referentes ao bagaço de cana-de-açúcar. Cerca de 2,1% corresponderam ao licor negro e 0,8% à lenha, biodiesel e outras renováveis (EPE, 2024a). Desse modo, a maior parte da biomassa utilizada no país é proveniente do bagaço de cana e do licor negro, reflexo da expressiva produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar e da forte presença da indústria de papel e celulose no Brasil. Contudo, há diversos outros resíduos agroindustriais com notável potencial energético, capazes de contribuir para a diversificação da matriz elétrica brasileira e aumentar a participação da biomassa, mas que ainda não são utilizados em larga escala.

1 INTRODUÇÃO

Alguns estudos destacaram o potencial energético associado à significativa geração de resíduos agrícolas e agrofloretais no Brasil. De Souza et al. (2021) apontam que, devido às condições climáticas únicas do país, foram geradas 404.760.030 toneladas de resíduos agrofloretais em 2018, com projeção de 929.522.001 toneladas para 2050. O potencial técnico-econômico estimado para 2050 é de 1596,40 PJ, fornecendo 63.348,95 MW. Assim, a demanda energética prevista de 5428,80 PJ em 2050 (EPE, 2020) poderia ser suprida em 29,40% por processos termoquímicos desses resíduos. De acordo com Da Costa et al. (2022), além do bagaço de cana, resíduos agrícolas como casca de arroz, palha de cana e casca de café têm demonstrado potencial significativo para geração de energia. Juntos, podem gerar até 15 GW (105,1 TWh ano⁻¹) via combustão direta. Diante desse cenário, a casca de café destaca-se como um dos resíduos com considerável potencial para diversificar a matriz elétrica do país, indo além da predominância do bagaço de cana.

O Brasil se enquadra como o maior produtor e exportador mundial de café, sendo responsável por cerca de um terço da produção global na safra de 2024/25 (EMBRAPA, 2024). Entretanto, apesar do cenário positivo da produção, a casca de café consiste no principal resíduo sólido gerado durante o processamento pós-colheita do fruto, que pode ser por via seca ou via úmida. Anualmente no país, estimam-se que são descartadas quase 1 milhão de toneladas de casca de café proveniente da via úmida (IBGE, 2025; CONAB, 2025). A utilização como fonte renovável de energia é uma oportunidade vantajosa para a gestão deste resíduo. Poyilil, Palatel e Chandrasekharan (2021) encontraram um poder calorífico superior (PCS) da casca de café igual a 19,67 MJ kg⁻¹, que foi relativamente maior do que outras biomassas, como a serragem, casca de arroz, fibra e casca de coco, e bagaço de cana. Segundo Setter et al. (2020a), a casca de café apresenta teores de matéria volátil, carbono fixo e cinzas iguais a 77,09%, 19,36% e 3,55%, respectivamente, sendo adequados para processos de conversão termoquímica.

No entanto, as principais desvantagens para a aplicação energética da casca de café úmida são a baixa representatividade do processamento por via úmida no Brasil, responsável por apenas cerca de 25% da produção (SILVA, 2012), e sua elevada umidade, em torno de 80% (base úmida) (JIAMJARIYATAM et al., 2022). A alta umidade reflete em dificuldades de manuseio e armazenamento e em baixa eficiência energética do processo de conversão termoquímica, visto que o poder calorífico é reduzido. Assim, a secagem é uma etapa essencial no pré-tratamento da biomassa, pois reduz sua umidade até níveis adequados para aplicações energéticas. Para uma combustão eficiente, a umidade final da biomassa deve estar entre 15% e 25% (base úmida) (PANG, 2015). Já a produção de *pellets* ou briquetes de qualidade exige uma umidade entre 8% e 15% (base úmida) (KALIYAN; MOREY, 2009; PRADHAN;

1 INTRODUÇÃO

MAHAJANI; ARORA, 2018). A secagem da biomassa proporciona uma série de benefícios, que, no entanto, devem ser equilibrados com o aumento dos custos de capital e operacionais. O projeto adequado do secador é fundamental para obtenção de uma biomassa seca de qualidade e para minimizar os custos totais de secagem.

Além da umidade, outro parâmetro que afeta a qualidade do briquete produzido é o tamanho da partícula de biomassa. Geralmente, a redução do tamanho permite obter melhores propriedades físico-mecânicas do briquete, como maior densidade energética e resistência. Dessa forma, após a secagem, a etapa de cominuição é fundamental para homogeneizar o tamanho das partículas para a briquetagem. Esse método de densificação é amplamente empregado para mitigar os problemas associados à baixa densidade aparente e tamanhos irregulares da biomassa, transformando-a em blocos compactos de tamanho uniforme. A briquetagem do resíduo melhora sua densidade aparente, tempo de queima e poder calorífico, e reduz seu volume. Essas melhorias facilitam o armazenamento, transporte, manuseio e alimentação nas caldeiras, e aumentam a eficiência energética.

Os briquetes possuem diversas aplicações, que vão desde o uso residencial até a geração de energia elétrica em sistemas apropriados. Em uso doméstico, são uma excelente alternativa para aquecimento em lareiras ou para cozinhar em fogões, especialmente em áreas rurais ou onde o acesso à lenha tradicional é limitado ou caro. Os briquetes oferecem uma queima mais eficiente, produzindo menos fumaça e fuligem, se comparados à lenha convencional. Os comércios, como padarias, confeitarias, pousadas e hotéis, principalmente em regiões frias, também podem utilizá-los para substituir ou complementar o uso de lenha. Em operações industriais, apresentam potencial de reduzir a pegada de carbono. Além disso, são uma alternativa eficiente de biocombustível sólido para uso em usinas termelétricas.

Os aspectos econômicos das etapas de pré-tratamento, juntamente com a tecnologia de conversão termoquímica do briquete, são fundamentais para avaliar a viabilidade do uso da casca de café para geração de bioenergia em larga escala. Diante deste contexto, o propósito do presente trabalho foi projetar uma planta de pré-tratamento de casca de café proveniente da via úmida, incluindo as etapas de secagem, cominuição e densificação. A viabilidade econômica foi analisada considerando dois cenários. No primeiro, a planta operava exclusivamente com o pré-tratamento, tendo os briquetes de casca de café como produto final comercializado. No segundo, a planta de bioenergia integrava o pré-tratamento à combustão dos briquetes para a geração e venda de energia elétrica. Uma ênfase foi dada ao processo de secagem e à influência de suas variáveis operacionais nos resultados econômicos. O estudo buscou aliar a produção de energia renovável à destinação ambientalmente correta do resíduo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo geral analisar a viabilidade técnica e econômica da produção de briquetes de casca de café, descartada no beneficiamento via úmida no Brasil, tanto para sua comercialização quanto para produção de energia elétrica. Portanto, este trabalho visou avaliar uma forma de aproveitamento da casca de café como fonte alternativa de energia, a fim de contribuir para a expansão da bioenergia no Brasil e para a gestão ambientalmente correta do resíduo cafeeiro.

2.2 Objetivos específicos

Especificamente, o presente trabalho pretendeu:

- i. Elaborar o projeto e especificação do pré-tratamento da casca de café gerada no método via úmida, considerando as etapas de secagem, cominuição e densificação, com foco no processo de secagem, uma vez que esta é a operação mais complexa da cadeia produtiva do briquete.
- ii. Estimar o investimento, custos operacionais e de manutenção, e custos totais anuais da planta de pré-tratamento para avaliar a viabilidade econômica, considerando a comercialização dos briquetes. Em seguida, identificar a condição operacional ótima capaz de equilibrar os custos do processo com as características desejadas da biomassa pré-tratada.
- iii. Estudar a viabilidade econômica de uma planta de geração de energia elétrica a partir da combustão direta em *stoker boiler* do briquete de casca de café, incluindo suas etapas de pré-tratamento. Objetivou-se realizar análises de sensibilidade aos parâmetros econômicos e de projeto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica, buscou-se abordar o histórico e a situação atual dos biocombustíveis sólidos no Brasil, demonstrar as potencialidades da casca de café e enfatizar a importância do pré-tratamento da biomassa para uma aplicação energética eficiente. Devido à relevância do processo de secagem da casca de café úmida, procurou-se descrever as principais tecnologias de secagem utilizadas para biomassas, bem como seus aspectos econômicos. Além disso, uma subseção foi dedicada à revisão de estudos anteriores sobre briquetes de casca de café, com foco na lacuna existente e na contribuição deste trabalho para a área. Também se discutiram os mercados internacional e nacional de briquetes de biomassa. Adicionalmente, foram apresentados os principais desafios enfrentados para a consolidação desse setor no Brasil, assim como as perspectivas futuras para o país e o mundo.

3.1 Histórico e situação atual do uso de biocombustíveis sólidos no Brasil

Biocombustíveis sólidos, como a lenha, o carvão vegetal e o bagaço de cana-de-açúcar, são tradicionais no Brasil e apresentam participações consideráveis na matriz energética do país. A lenha é utilizada desde os primórdios da humanidade para aquecimento e cocção, sendo o principal recurso energético para uso doméstico no mundo antigo (GUO; SONG; BUHAIN, 2015). No Brasil, sempre foi usada amplamente para geração de energia térmica nos setores residencial e industrial. Historicamente, o consumo residencial de lenha decresceu drasticamente a partir de 1970, simultâneo ao crescimento do gás liquefeito de petróleo (GLP) e da eletricidade. Em 1996, o consumo dessas três fontes de energia quase se igualou. De acordo com Coelho et al. (2018), essa transição energética foi resultado da urbanização do país, da intervenção governamental baseada na regulação de preços e subsídios do GLP e de políticas sociais.

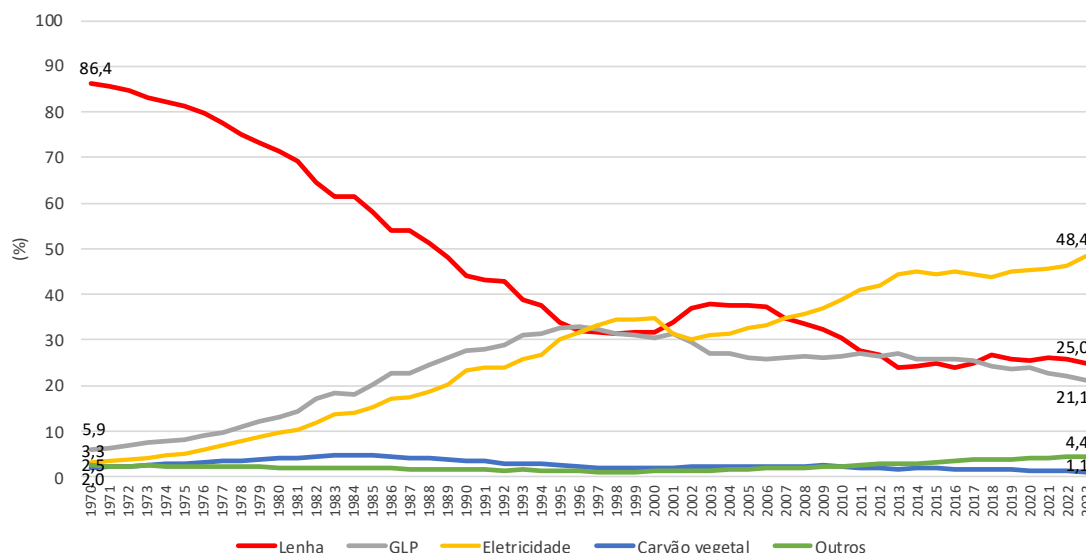
A Figura 3.1 mostra a evolução histórica do uso da lenha e outras fontes no setor residencial brasileiro no período de 1970 a 2023, segundo dados disponibilizados pela EPE (2024b). A categoria “outros” refere-se à solar térmica, gás natural, querosene e gás canalizado. Em 1970, a lenha era de longe o combustível mais utilizado em residências, respondendo por 86,4% do consumo doméstico. No período analisado, seu consumo caiu cerca de 71,1%, o que é ambientalmente positivo, pois apesar de ser considerada uma fonte de energia renovável, o impacto decorrente da queima de lenha proveniente de florestas nativas não deve ser subestimado. Essa prática gera emissões de gases poluentes; pode resultar na diminuição das reservas de vegetação nativa e está associada a doenças decorrentes da poluição do ar em

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ambientes internos (CARVALHO; JENSEN; TARELHO, 2016). Nos últimos 10 anos, a eletricidade vem apresentando um crescimento acelerado, enquanto o GLP e a lenha demonstram participações semelhantes.

Atualmente, a lenha ainda possui presença significativa no setor residencial, aproximadamente 25,0% em 2023, sendo a segunda fonte mais empregada no consumo doméstico, atrás da eletricidade. Contudo, sua participação vem decrescendo ao longo das décadas (EPE, 2024c). Segundo Coelho et al. (2018), a substituição da lenha pelo GLP nos domicílios brasileiros é vulnerável às mudanças econômicas, especialmente quando os preços do GLP aumentam. Além disso, concluíram que há uma relação direta do uso de lenha com regiões caracterizadas por baixos índices de desenvolvimento humano e alta desigualdade. A disponibilidade da lenha para coleta manual, sem custos diretos para o usuário, faz dela a fonte de combustível primária para muitas famílias de baixa renda. Entretanto, a lenha é ineficiente termicamente, necessitando de maior quantidade para fornecer a mesma quantidade de energia útil, o que também explica sua maior participação. Como exemplo, os fogões a lenha apresentam eficiência de cerca de um décimo das de fogões a gás (EPE, 2024c).

Figura 3.1 Consumo final no setor residencial 1970 – 2023.



Fonte: Adaptado de EPE (2024b).

O carvão vegetal, um biocombustível sólido obtido da carbonização da madeira e outros materiais vegetais, também é usado para fins domésticos, correspondendo por 1,1% do setor em 2023, conforme observado na Figura 3.1. Sua participação vem decrescendo gradualmente ao longo dos anos, sendo que era 2,0% em 1970 (EPE, 2024b). No Brasil, as famílias de baixa

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

renda utilizam simultaneamente diferentes combustíveis para cozinhar, como lenha, carvão e GLP. O GLP é predominantemente empregado para preparos rápidos, enquanto a lenha é usada para cozinhar refeições completas. O carvão, que não é gratuito como a lenha, é usado para cozinhar principalmente durante as estações chuvosas, substituindo a lenha úmida. Esse padrão de diversificação no uso de combustíveis também é observado em outros países em desenvolvimento (COELHO et al., 2018).

Historicamente, o carvão vegetal desempenha um papel significativo como fonte de calor e carbono nas indústrias siderúrgicas no Brasil. O país é o maior produtor mundial desse biocombustível, atingindo 6,7 milhões de toneladas produzidas em 2023, com quase toda a produção destinada ao mercado interno (IBÁ, 2024). A utilização do carvão vegetal, em vez do coque derivado do carvão mineral, oferece benefícios ambientais, incluindo a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e de enxofre (BAILIS et al., 2013). Entretanto, a forma de obtenção da matéria-prima e o processo produtivo do carvão vegetal podem impactar negativamente o ambiente (MANZONI; BARROS, 2021). Apesar de ser uma tendência decrescente, significativas quantidades de carvão vegetal ainda são provenientes das florestas naturais do Brasil, especialmente da área conhecida como Amazônia Legal, o que contribui para o desmatamento (BAILIS et al., 2013; SONTER et al., 2015).

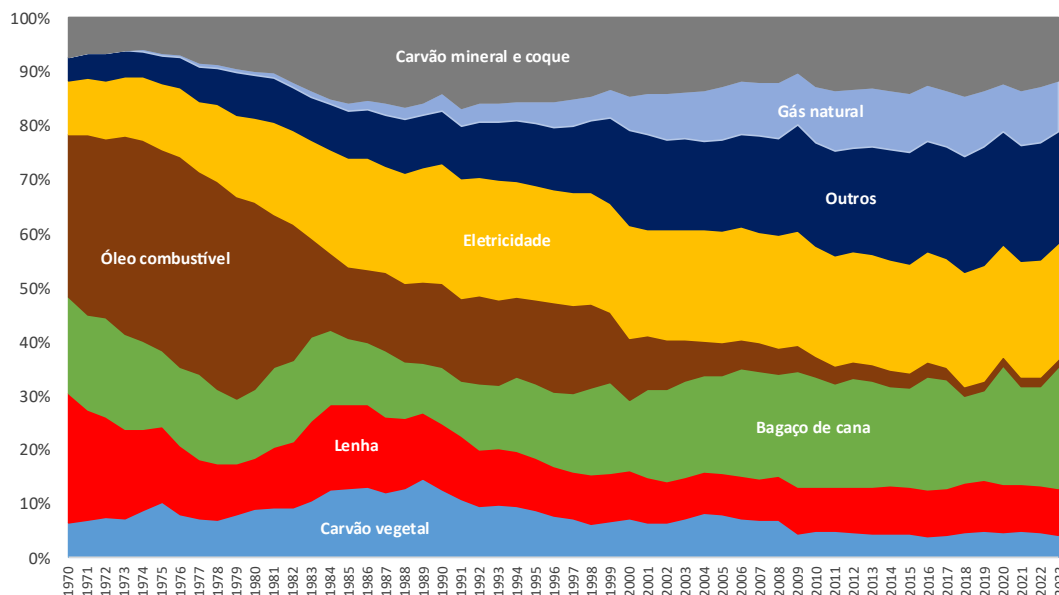
O consumo das fontes de energias renováveis e não renováveis no setor industrial no período entre 1970 e 2023 é mostrado na Figura 3.2. O consumo de lenha decresceu de 24,0% em 1970 para 8,8% no ano 2000, devido ao crescimento de outras fontes, como o bagaço de cana-de-açúcar, eletricidade e gás natural. A partir de 2000, o consumo de carvão vegetal e lenha tem se mantido constante (EPE, 2007 e 2013). Em 2023, a participação do carvão vegetal nesse setor correspondeu a 4,2% e a lenha foi responsável por 8,6% (EPE, 2024b).

O bagaço de cana-de-açúcar, subproduto da produção de etanol e açúcar no Brasil, também é considerado um biocombustível sólido. É utilizado nas próprias indústrias sucroalcooleiras para cogeração de energia, isto é, produção de eletricidade e energia térmica utilizável. O uso dessa fonte em sistemas a vapor reduz o consumo de combustível fóssil. Dessa forma, o setor sucroenergético é reconhecido por produzir energia renovável em larga escala (SILVA et al., 2014).

Ao longo dos anos, a participação do bagaço de cana no setor industrial cresceu, principalmente no período de 1975 e 1985, devido à criação do Programa Nacional do Alcool (ProAlcool), elaborado para incentivar a produção e uso do etanol como combustível automotivo (EPE, 2007). Porém, ainda se observa um aumento dessa fonte, visto que o país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e sua produção tende a aumentar anualmente

(CONAB, 2024). No ano de 2023, o bagaço de cana correspondeu a 22,4% do setor industrial, um crescimento de 72,3% em relação a 2000 (EPE, 2024b).

Figura 3.2 Consumo no setor industrial 1970 – 2023.



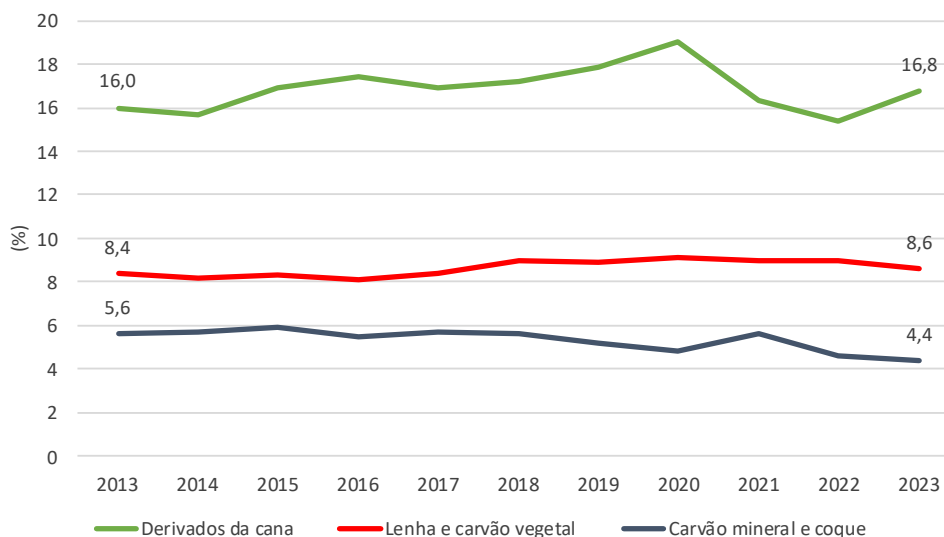
Fonte: Adaptado de EPE (2024b).

Quando analisada a participação da lenha e carvão vegetal na oferta interna de energia ao longo dos anos, observa-se que esses números têm se mantido praticamente constantes, como apresenta a Figura 3.3. Houve um ligeiro aumento de 2017 para 2018, de 8,4% para 9,0%, valor que se manteve até 2022 e apresentou uma ligeira queda para 8,6% em 2023 (EPE, 2024a). Os derivados da cana apresentaram picos de maior participação, mas no ano de 2023 a contribuição na oferta de energia permaneceu muito próxima de 8 anos atrás. Contudo, é importante salientar que os derivados incluem também o etanol, no setor de transportes, sendo a porcentagem do bagaço de cana menor que os valores apresentados. Já a participação do carvão mineral e coque também foi aproximadamente constante, com quedas mais pronunciadas em 2020 e 2023. Desse modo, verifica-se que os biocombustíveis sólidos tradicionais têm se mostrado estáveis na matriz energética brasileira.

Conforme dados divulgados na revisão energética brasileira de ano base 2023 (EPE, 2024a), 49,1% da oferta interna energética nacional foi proveniente de fontes renováveis. Esse valor foi significativamente superior à matriz energética mundial, composta por 14,7% por fontes renováveis (EPE, 2024c). Nesse contexto, a lenha e o carvão vegetal representaram 8,6% da matriz energética brasileira, enquanto os subprodutos da cana-de-açúcar contribuíram com 16,8%. Esses biocombustíveis apresentaram contribuições mais significativas na matriz

energética do país se comparados com o carvão mineral e coque, que representaram 4,4% (EPE, 2024a), o que é importante para a renovabilidade da matriz.

Figura 3.3 Oferta interna de energia 2013 – 2023: derivados da cana, lenha e carvão vegetal, e carvão mineral e coque.



Fonte: Adaptado de EPE (2013 e 2024a).

Com relação à matriz elétrica brasileira, a biomassa foi a terceira maior fonte em 2023, respondendo por 8,0%, sendo o bagaço de cana responsável pela maior participação (5,1%) (EPE, 2024a). A geração de energia a partir do bagaço é altamente viável economicamente no Brasil, uma vez que atende plenamente às demandas energéticas envolvidas nos processos de fabricação de etanol e açúcar, gerando ainda um excedente de eletricidade que é comercializado na rede elétrica. Além disso, sob uma perspectiva ambiental, essa abordagem confere um propósito sustentável ao resíduo do processo industrial (SILVA et al., 2014).

O Brasil possui um vasto potencial territorial e uma grande disponibilidade de matérias-primas para a geração de energia a partir da biomassa. Esse potencial vai além das fontes tradicionais, como bagaço de cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal. Em 2022, estima-se que foram gerados cerca de 775.371 mil resíduos agrossilvopastoris, sendo 642.550 mil provenientes da agricultura, ou seja, cerca de 83% (BRASIL, 2022). Como um dos líderes globais na produção e exportação de produtos agrícolas, o país gera uma quantidade significativa de resíduos com valor energético. Entre as principais culturas cultivadas no Brasil, além da cana-de-açúcar, destacam-se a soja, milho, café e arroz. A valorização dos resíduos dessas culturas por meio da produção de *pellets* e briquetes para geração de bioenergia pode diversificar a matriz energética brasileira.

Em comparação com a lenha, a biomassa densificada apresenta diversas vantagens, tais como: poder calorífico até 2,5 vezes superior, o que resulta em melhor eficiência energética no processo de conversão; maior densidade aparente; formatos regulares e compactos; economia de combustível e regularidade térmica. A umidade dos briquetes (cerca de 10%), relativamente mais baixa que a da lenha (até 50%), proporciona uma queima mais eficiente e, conseqüentemente, reduz a geração de fumaça e fuligem. Além disso, trata-se de uma fonte energética proveniente de resíduos, contribuindo para o aproveitamento sustentável (DIAS et al., 2012; DONATO, 2020). Como mencionado anteriormente, a lenha muitas vezes é extraída de forma insustentável, o que tem acelerado a destruição das florestas e ecossistemas (GIODA, 2019). Ademais, a biomassa densificada oferece benefícios substanciais ao substituir o carvão mineral em usos como aquecimento residencial e geração de energia em usinas termelétricas, sem provocar um impacto no efeito estufa (DE MORAES et al., 2017).

3.2 Biomassa de casca de café

Atualmente, o comércio de café ocupa economicamente o segundo lugar no ranking mundial, depois do petróleo (MELESE; KOLECH, 2021). É a segunda bebida mais consumida no mundo, atrás apenas da água (MAPA, 2023a). Para a safra de 2024/25, a produção mundial de café foi estimada em 176,2 milhões de sacas de 60 kg, um total de aproximadamente 10,57 milhões de toneladas de grãos, sendo um aumento de 4,1% em relação à safra de 2023/24 (CBP&D/CAFÉ, 2024).

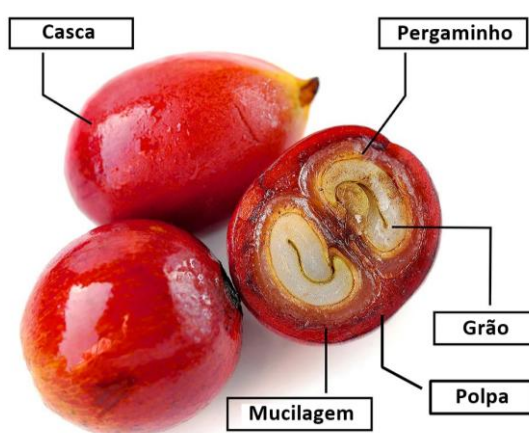
No Brasil, a cafeicultura desempenha um papel fundamental na economia e na cultura. Além de ser o maior produtor e exportador mundial de café, é o segundo maior consumidor, atrás somente dos Estados Unidos da América (MAPA, 2023a). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), em 2024, a produção nacional foi de 54.215,1 mil sacas de café beneficiadas ou aproximadamente 3,25 milhões de toneladas de grãos beneficiados, representando um acréscimo de 6,5% em relação à safra de 2022 (CONAB, 2023 e 2025). O Brasil exportou 50,5 milhões de sacas de café ou 3,03 milhões de toneladas de grãos em 2024, estabelecendo um novo recorde, com um crescimento de 28,8% em comparação ao ano anterior. No mesmo ano, a receita foi estimada em US\$ 12,3 bilhões, com alta de 52,6% em relação a 2023 (CONAB, 2025).

Os frutos do café, denominados de café cereja quando maduros, são formados pela casca externa lisa e resistente (exocarpo), que apresenta coloração verde em frutos imaturos e avermelhada em café cereja, pela polpa (mesocarpo externo), pela mucilagem (mesocarpo), a

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

qual é uma camada incolor, fina, viscosa e altamente hidratada, pelo pergaminho de cor amarelada (endocarpo) e pelo grão de café (endosperma), sendo essas partes ilustradas na Figura 3.4. Após o beneficiamento do grão pode ser visualizada ainda uma película prateada (perisperma), situada entre o pergaminho e o grão, a qual não está destacada na imagem (ESQUIVEL; JIMÉNEZ, 2012; DURÁN et al., 2017). O café é comercializado internacionalmente como café verde, que consiste no grão de café cru, antes da torrefação, coberto ou não com a película prateada (ESQUIVEL; JIMÉNEZ, 2012).

Figura 3.4 Partes que compõem o fruto do café.



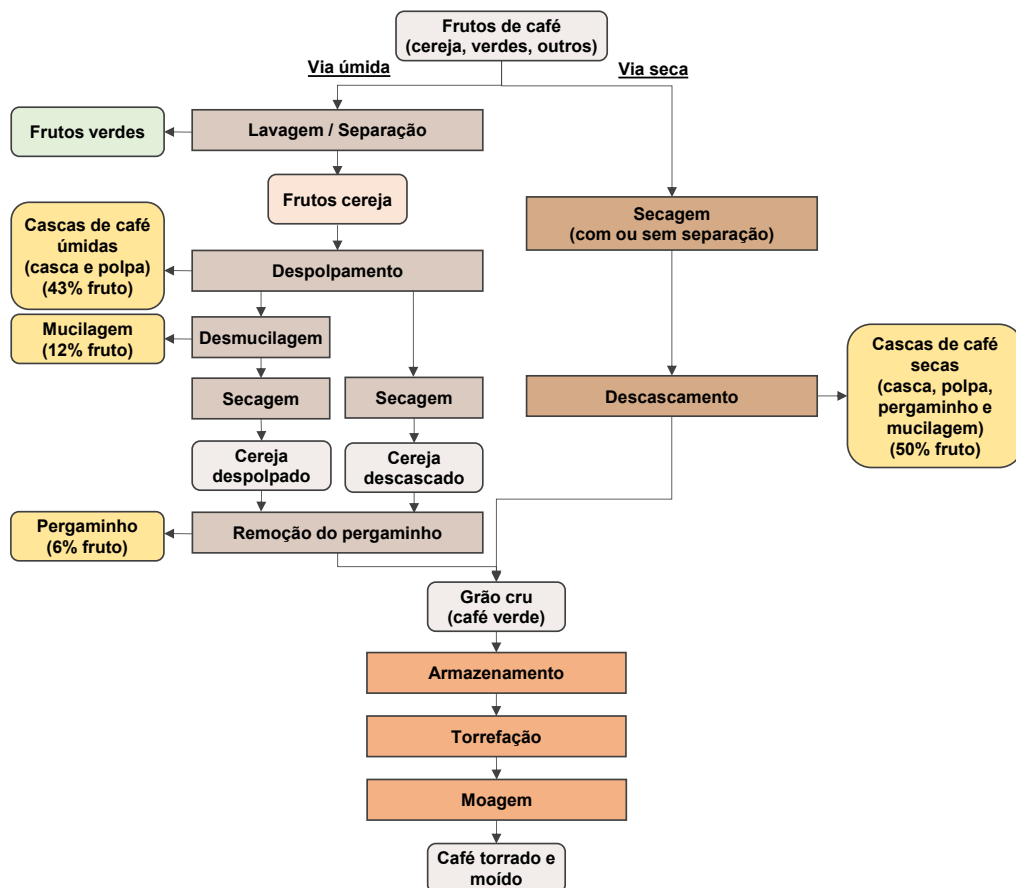
Fonte: Adaptado de Caficultores Alto Cajamarca (2023).

Em razão da produção expressiva de café no Brasil, há a geração de uma quantidade significativa de resíduos sólidos durante o beneficiamento dos grãos, com destaque para a casca de café. Existem dois métodos principais diferentes para processar os frutos do café: via seca e via úmida, conforme mostra a Figura 3.5. Independente do processamento, sabe-se que os frutos do café são colhidos em diferentes estágios de maturação. Os grãos dos frutos imaturos ou verdes não estão fisiologicamente bem desenvolvidos, sendo menores que os cerejas. Durante a lavagem, os frutos maduros são separados dos frutos verdes e danificados por flutuação, onde os frutos maduros afundam (ESQUIVEL; JIMÉNEZ, 2012; DURÁN et al., 2017). No método por via seca, os frutos de café, separados ou não, são secos integralmente em terreiro exposto ao sol ou em secador mecânico e, em seguida, descascados mecanicamente. Os grãos produzidos são denominados de café verde ou café não lavado, no caso da via seca. A casca de café representa 40 – 50% da fruta seca. Assim, em média, para cada tonelada de grãos de café produzidos, uma tonelada de cascas secas é gerada (GEMECHU, 2020). Neste caso, o resíduo denominado casca de café engloba a casca, polpa, mucilagem e pergaminho, todos removidos em uma única fração (ESQUIVEL; JIMÉNEZ, 2012).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No método por via úmida, posteriormente à etapa de lavagem, os frutos cereja são despulpados mecanicamente em contato direto com água, gerando a casca de café com alto teor de umidade, que consiste na casca e na polpa (43,2% p/p) em uma fração (CHALA; OECHSNER; MÜLLER, 2019). Ao contrário do processamento a seco, este método exige que os frutos estejam em perfeito estado de maturação (GEMECHU, 2020). Após o despulpamento, os grãos podem ser submetidos à desmucilagem, processo em que é removida a mucilagem do fruto (11,8% p/p) por fermentação, seguido da secagem, originando o café cereja despulpado. Ou pode seguir direto para o processo de secagem, produzindo o café cereja descascado. Em seguida, é removido o pergaminho (6,1% p/p), gerando o café verde ou comumente chamado de café lavado. A casca, também denominada de polpa, descartada durante o método úmido, corresponde por aproximadamente 43% do peso total do fruto de café, enquanto o grão representa apenas 39% (ESQUIVEL; JIMÉNEZ, 2012; CHALA; OECHSNER; MÜLLER, 2019). Ou seja, o resíduo ocupa um volume maior do fruto que o próprio grão de café. O café verde proveniente de ambos os métodos é então armazenado para depois ser submetido às etapas de torrefação e moagem, produzindo o café torrado e moído.

Figura 3.5 Etapas básicas da produção de café por via úmida e via seca.



Fonte: Autora (2025).

No Brasil, estima-se que cerca de 75% do café é processado pela via seca (SILVA, 2012). Isso se deve a alguns fatores: tradição; clima quente e seco, que favorece a secagem em ambiente externo, e requer menos investimento em infraestrutura. No entanto, embora o processamento por via úmida exija água em abundância e equipamentos técnicos específicos, geralmente permite a produção de cafés de maior qualidade e maior valor econômico. Isso ocorre principalmente porque, na via úmida, os frutos maduros são rigorosamente separados dos frutos verdes e defeituosos, garantindo que apenas aqueles em perfeito estado de maturação sigam para a etapa de despulpamento, o que resulta em um café mais uniforme. No processamento via seca, essa separação não é obrigatória, e frutos em diferentes estágios de maturação podem ser misturados e secar juntos. Por isso, o principal produto desse processo também é conhecido como café não lavado (GEMECHU, 2020).

Os microrganismos estão naturalmente presentes em todas as etapas da produção do café, desde a colheita até o processamento e armazenamento, influenciando diretamente a qualidade da bebida. Eles podem degradar compostos presentes nos grãos ou produzir metabólitos que alteram o sabor final. O risco de contaminação microbiana é maior quando há colheita de frutos em diferentes estágios de maturação, especialmente quando o processamento via seca é utilizado. Nesse método, os grãos permanecem mais tempo em contato com a polpa e a umidade, favorecendo fermentações descontroladas e o crescimento de fungos. Por outro lado, o processamento via úmida, quando bem conduzido, tende a resultar em cafés de melhor qualidade. Isso ocorre porque ele utiliza apenas frutos maduros e remove rapidamente a mucilagem, eliminando o ambiente favorável à fermentação indesejada. Dessa forma, esse método reduz a formação de defeitos no café (CHALFOUN; FERNANDES, 2013).

Embora a produção de café pelo método úmido seja minoria no Brasil, devido a grande proporção do setor cafeeiro no país, expressiva quantidade de casca de café úmida também é gerada anualmente. De acordo com os dados da safra de 2024 disponibilizados pela CONAB (2025), pode-se estimar que aproximadamente 903 mil toneladas de cascas foram produzidas pela via úmida no país, sem destino ambientalmente correto.

3.3 Aplicações da casca de café

Grande parte da casca de café é descartada em aterros sanitários ou terras agricultáveis, geralmente sem métodos adequados para seu destino, especialmente em países em desenvolvimento (HOSEINI et al., 2021). Os usos tradicionais desse resíduo incluem sua utilização como fertilizante e a incorporação à ração animal (LEE et al., 2023). Contudo,

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

diversos estudos indicam que a casca de café apresenta compostos orgânicos tóxicos, como cafeína, taninos e polifenóis, que limitam sua aplicação direta no solo agrícola e na alimentação animal, sendo antifisiológico e antinutricional (PANDEY et al., 2000; MURTHY; NAIDU, 2012a; HOSEINI et al., 2021). Isso não só afeta a saúde animal, como também diminui a palatabilidade das dietas e a aceitação da casca pelos animais (WOGDERESS, 2016).

Os resíduos de café podem prejudicar a qualidade do solo, causar citotoxicidade, dificultar a atividade microbiana durante processos biotecnológicos, provocar alterações fisiológicas no sistema nervoso central de bovinos e peixes, e induzir carcinogenicidade em animais quando utilizados como componente na ração animal (ARYA; RAO, 2007; RALLIS; CODLIN; BÄHLER, 2013; RODRIGUEZ et al., 2014). Sendo assim, uma grande quantidade do resíduo cafeeiro gerado atualmente é subutilizada, o que causa sérios impactos ambientais, problemas de saúde e a liberação de compostos fenólicos tóxicos (SUGEBO, 2022).

Considerando as elevadas quantidades de resíduo gerado, ainda há necessidade de encontrar outras alternativas de uso para a casca de café. Esse subproduto foi utilizado com sucesso como substrato no cultivo de cogumelos comestíveis (MURTHY; NAIDU, 2012a), como substituto parcial da madeira (até 50%) na produção de painéis aglomerados (BEKALO; REINHARDT, 2010; NUAMSRINUAN et al., 2019) e como matéria-prima para produção de adsorventes de alta superfície específica e porosidade a fim de utilizá-los para reduzir custos de carvão ativado no tratamento de águas residuais (ANASTOPOULOS et al., 2017). A casca de café também pode ser empregada na obtenção de produtos por fermentação (HOSEINI et al., 2021). Exemplos desses produtos são ácidos orgânicos, como ácidos cítrico (SHANKARANAND; LONSANE, 1994) e giberélico (MACHADO et al., 2000); enzimas, como pectinase (NGO; PHAN; NGUYEN, 2016), xilanase (MURTHY; NAIDU, 2012b) e tanase (BATTESTIN; MACEDO, 2007); e compostos bioativos, como compostos fenólicos, com ação antibiótica, anti-inflamatória, hepatoprotetora, antioxidante e capacidade de melhora cognitiva (JANISSEN; HUYNH, 2018).

As cinzas resultantes da combustão da casca de café são ricas em metais alcalinos e alcalino-terrosos, o que as torna potenciais substitutos dos feldspatos, que são escassos e caros, tradicionalmente usados como fundentes em formulações cerâmicas à base de argila (ACCHAR; DULTRA; SEGADÃES, 2013). A casca também pode ser usada para a produção de aromatizante usando fungos do gênero *Ceratocystis*, após o tratamento com vapor para remover a cafeína e ácidos clorogênicos (SOARES et al., 2000). Além disso, se submetida previamente a processos de desintoxicação, pode-se empregá-la na compostagem e vermicompostagem (JANISSEN; HUYNH, 2018; HOSEINI et al., 2021).

3.3.1 Aplicações energéticas

Uma oportunidade promissora para o uso da casca de café é como matéria-prima para produção de biocombustíveis (SUGEBO, 2022), devido às características físico-químicas favoráveis, apresentadas na Tabela 3.1. Segundo Dal-Bó et al. (2019) a casca de café gerada na via úmida possui poder calorífico inferior (PCI) igual a $16,60 \text{ MJ kg}^{-1}$, valor próximo e superior ao PCI de outras biomassas já utilizadas, como o bagaço de cana-de-açúcar ($16,00 \text{ MJ kg}^{-1}$) (MARAFON et al., 2021) e a casca de arroz ($13,39 \text{ MJ kg}^{-1}$) (MAYER; HOFFMANN; RUPPENTHAL, 2006). Além disso, apresenta alto teor de voláteis, baixo teor de cinzas e considerável teor de carbono, sendo adequado para processos de conversão termoquímica (SETTER et al., 2020a).

Alguns estudos investigaram o desempenho da pirólise da casca de café, a qual é uma tecnologia eficiente para a conversão da biomassa em produtos líquidos (bio-óleo), sólidos (*biochar*) e gasosos (gás de síntese). Os rendimentos desses compostos dependem da composição química da biomassa e dos parâmetros operacionais utilizados na pirólise (SETTER et al., 2020a). O líquido pode ser armazenado e transportado mais facilmente, utilizado para fins energéticos ou obtenção de produtos químicos de alto valor agregado. O *biochar* possui alto teor energético e pode ser utilizado como combustível sólido ou comercializado como fertilizante, sequestrador de carbono ou adsorvente. Já os produtos gasosos são reintroduzidos no processo de pirólise como fonte de calor (BRIDGWATER, 2012).

Tabela 3.1 Caracterização físico-química da casca de café (% em base seca).

Propriedades	
Poder calorífico superior (PCS)	$18,50 \text{ MJ kg}^{-1}$
Poder calorífico inferior (PCI)	$16,60 \text{ MJ kg}^{-1}$
Análise aproximada	
Umidade	9,06%
Teor de cinzas	3,55%
Teor de voláteis	77,09%
Carbono fixo	19,36%
Análise final	
Carbono	46,41%
Hidrogênio	6,33%
Enxofre	0,09%
Nitrogênio	2,66%
Oxigênio	44,51%
Propriedades físicas	
Calor específico (c_{ps})	$1,62 \text{ kJ (kg K)}^{-1}$
Massa específica do leito (ρ_b)	480 kg m^{-3}
Porosidade (ϵ)	0,41

Fonte: Adaptado de Andrade (2011); Dal-Bó et al. (2019); Ruiz, Gordillo e Mohamad (2019); Setter e Oliveira (2022); Setter et al. (2020a).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tibola et al. (2017) realizaram a caracterização das cascas de café e investigaram a viabilidade da aplicação de pirólise rápida. Concluíram que o subproduto pode ser utilizado para gerar compostos de alto valor agregado: 1,3 pentadieno, limoneno e ácido n-hexadecanóico. Considerando o uso do bio-óleo da casca de café como combustível, os resultados indicaram que ele possui um alto poder calorífico, acidez significativa e menores aumentos de viscosidade e peso molecular em comparação com o bio-óleo de outros materiais lignocelulósicos.

Setter et al. (2020a) analisaram a cinética da biomassa e determinaram a influência da temperatura na qualidade dos produtos da pirólise lenta de briquetes de casca de café. Os autores concluíram que o conteúdo energético do *biochar* não diferiu com o aumento da temperatura, mas o carbono fixo foi um pouco maior em alta temperatura. Com relação ao bio-óleo, as altas temperaturas finais de pirólise melhoraram sua qualidade, apresentando menores quantidades de compostos ácidos. Além disso, o bio-óleo é desejável para seu uso como combustível e contém numerosos compostos químicos que podem ser extraídos e utilizados em produtos químicos de valor agregado.

Setter et al. (2020b) caracterizaram os produtos finais da pirólise lenta de *pellets* de casca de café e realizaram o teste de combustão dos *pellets*. A pirólise foi realizada em três temperaturas finais: 400 °C, 450 °C e 500 °C. O rendimento do *biochar* diminuiu com o aumento das temperaturas e o rendimento máximo de bio-óleo foi obtido a 450 °C. Já o máximo rendimento do gás foi a 500 °C. O teste de combustão permitiu determinar o perfil de combustão dos *pellets*, no qual foram obtidas altas temperaturas e queima uniforme. Os autores certificaram que o processo de peletização da casca de café é uma alternativa eficaz para alcançar maior eficiência energética. Ademais, pelas propriedades energéticas do *biochar*, a casca de café tem potencial para ser utilizada como combustível.

A gaseificação é outro processo termoquímico que se apresenta como uma solução promissora para o aproveitamento energético da casca de café. Esse processo permite a produção de um gás inflamável por meio de uma incineração parcial realizada a temperaturas elevadas e com taxas de aquecimento moderadas. O gás gerado é uma mistura de CO, H₂, CH₄, CO₂ e N₂, sendo a temperatura um fator crucial para aumentar a qualidade do gás produzido (HOSEINI et al., 2021). Além da geração de energia e calor, o gás de síntese pode ser aplicado na produção de hidrocarbonetos líquidos (como diesel e gasolina), metanol e amônia (HAVILAH et al., 2022).

A seleção da temperatura e pressão ideais depende do agente de gaseificação usado (ar, oxigênio, vapor ou suas misturas) e do tipo de gaseificador. A faixa de temperatura na qual a

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

gaseificação é geralmente conduzida varia de 700 a 1200 °C, embora a maioria das pesquisas sobre gaseificação de biomassa tenha selecionado as temperaturas entre 800 e 1000 °C, devido ao equilíbrio ideal entre aspectos operacionais e reativos. Isto é, temperaturas acima dessa faixa aumentam o risco de fusão das cinzas, uma vez que a biomassa apresenta baixo ponto de fusão das cinzas, o que pode levar à formação de escórias e comprometer a operação do reator. Além disso, nessa faixa, o *biochar* resultante apresenta alta reatividade, favorecendo reações importantes do processo e contribuindo para maior eficiência na conversão da biomassa em gás de síntese. O processo é comumente realizado à pressão atmosférica, mas pode ocorrer também sob pressões mais elevadas, como a 80 bar (HAVILAH et al., 2022; CORTAZAR et al., 2023).

Miito e Banadda (2017) investigaram a transformação das cascas de café em gás de síntese através da gaseificação a fim de reduzir a elevada dependência da Uganda pelo compossível lenhoso (91%). Os autores certificaram que 46,6 milhões de toneladas de casca de café por ano, com poder calorífico de $18,34 \text{ MJ kg}^{-1}$, são capazes de gerar 24 GWh de energia, o que corresponde a 0,7% da energia total consumida no país. Esse resultado diminuiria o desmatamento e a degradação ambiental no país. Essa aplicação também pode ser viável em países produtores e processadores de café, especialmente onde há uma abundância de casca de café.

Bonilla e Gordillo (2017) estudaram a gaseificação de casca de café, utilizando misturas ar-vapor para oxidação parcial em um gaseificador de leito fixo de 10 kW. Foram realizados estudos paramétricos de razão de equivalência (ER) ($1,53 < ER < 6,11$) e relação vapor-combustível (SF) ($0,23 < SF < 0,89$). Os resultados mostraram que o aumento de SF e ER resultou em um gás de síntese rico em CH_4 e H_2 , mas pobre em CO. O alto PCS do gás de síntese variou de $3.112 \text{ kJ SATPm}^{-3}$ a $5.085 \text{ kJ SATPm}^{-3}$ e seu valor máximo foi obtido em $SF = 0,87$ e $ER = 4,09$. Esses valores foram semelhantes aos relatados em estudos anteriores de gaseificação.

Bonilla, Gordillo e Cantor (2019) apresentaram resultados de um processo de gaseificação em leito fixo em contracorrente da casca de café, utilizando misturas de oxigênio e vapor como agentes oxidantes. A pesquisa explorou diferentes ER e SF, cujas faixas foram 1,6 – 5,6 e 0,4 – 0,8, respectivamente. Foi demonstrado que o aumento do vapor melhora a razão molar H_2/CO e o poder calorífico do gás de síntese, que variou entre 7.714 kJ m^{-3} em $ER = 1,6$ e $SF = 0,4$ e 8.841 kJ m^{-3} em $ER = 3,2$ e $SF = 0,8$. Comparado com a gaseificação utilizando misturas ar-vapor, o uso de oxigênio aumentou o PCS do gás de síntese. Os autores destacaram que a gaseificação em pequena escala é apropriada para gerar gás de síntese de baixo custo para muitas fazendas.

Nam, Ngoc e Bay (2021) investigaram a gaseificação da casca de café em CO₂, H₂O e atmosferas mistas. Os resultados mostraram que a casca do café tinha um alto teor de matéria volátil de 69,8% e PCS de 18,3 MJ kg⁻¹, comparável à biomassa lenhosa. Os resultados da Análise Termogravimétrica (TGA) e Termogravimetria Derivada (DTG) indicaram que a degradação da casca de café começou a 245 °C e atingiu a taxa máxima de perda de peso a 310 °C. A gaseificação sob 20% H₂O foi cerca de 2 vezes mais rápida do que sob 20% de CO₂. Em particular, foi observado um efeito inibitório entre CO₂ e H₂O na reatividade durante a gaseificação na atmosfera mista. As informações desse estudo são úteis para o projeto ou modelagem de gaseificador eficiente de casca de café.

Os métodos convencionais de queima da biomassa da casca de café resultam diretamente em altos níveis de poluição do ar e eficiência térmica muito baixa. Estas questões são atenuadas, as despesas de transporte e armazenamento são reduzidas e a produção de energia é melhorada através do aumento do seu poder calorífico quando são transformadas em briquetes (TESFAYE; TIBESSO; ALIYI, 2023). Diversas pesquisas têm estudado o potencial energético do resíduo cafeeiro para processos de densificação, como a produção de briquetes (LUBWAMA; YIGA, 2018; TEFAYE; WORKIE; KUMAR, 2022) e *pellets* (JEGUIRIM; LIMOUSYA; FOSSARD, 2016), utilizados como substitutos de combustíveis sólidos tradicionais. Estudos sobre briquetes de casca de café são detalhados na Seção 3.7.

Manrique et al. (2019) estudaram detalhadamente a combustão de *pellets* de casca de café para projetar um queimador de alta eficiência para produzir energia para a secagem do café. Os autores transformaram o resíduo em *pellets* devido aos desafios enfrentados pela biomassa *in natura*, como formatos irregulares e baixa densidade aparente, que dificultam sua utilização nos queimadores atuais. Os valores de densidade de energia encontrados foram 0,789 MW m⁻³ e 0,007 MW m⁻², que poderão ser utilizados para projetar a câmara de combustão. Manrique et al. (2020) desenvolveram um sistema híbrido solar-biomassa para secagem de grãos de café, combinando a combustão de *pellets* de casca de café com um sistema fotovoltaico-térmico. A utilização da luz solar para o pré-aquecimento do ar de combustão reduziu o consumo de energia. No geral, o sistema proposto proporcionou uma redução de 80% nos custos operacionais e o uso de casca de café resultou em menores emissões de CO₂.

A casca de café também pode ser submetida a processos bioquímicos. Gouvêa et al. (2009) certificaram a viabilidade da produção de etanol pela fermentação da casca de café por *Saccharomyces cerevisiae*. A produção de etanol alcançada foi de 8,49 ± 0,29 g/100 g (base seca) (13,6 ± 0,5 g etanol L⁻¹), valor comparável aos dados da literatura para outros resíduos como talos de milho, palha de cevada e vinhaça hidrolisada de trigo (5 –11 g etanol L⁻¹). De

maneira semelhante, de Almeida et al. (2024) e Morales-Martínez et al. (2021) confirmaram o potencial do resíduo cafeeiro como matéria-prima para etanol de segunda geração, possuindo alto teor de lignina de 42%.

Estudos semelhantes sobre a viabilidade da casca de café para produção de biogás e biodiesel produziram resultados promissores. Du et al. (2020) avaliaram a possibilidade de utilizar o resíduo cafeeiro para produção de biogás através da digestão anaeróbia, sendo a produção máxima de biogás e metano igual a 3.359,6 mL e 2.127,30 mL, respectivamente. As características físico-químicas da casca revelaram alto teor de matéria orgânica e baixo teor de enxofre, o que favoreceu a geração de biogás. De forma similar, Czekala et al. (2023) determinaram o teor de matéria orgânica da casca de café igual a 93,34%, e a eficiência do biogás em termos de matéria fresca foi de 329,50 m³ Mg⁻¹. Paes et al. (2023) investigaram o resíduo como co-digestor de esterco bovino na digestão anaeróbica e confirmaram a possibilidade de produção de biogás, desde que a casca seja pré-tratada mecanicamente com moagem. Emma, Alangar e Yadav (2022) produziram biodiesel a partir da transesterificação da casca de café, com características comparáveis ao diesel, e afirmaram que a mistura biodiesel-diesel pode ser utilizada em um motor de combustão interna sem quaisquer modificações. As emissões de gases de escape foram reduzidas para todas as misturas testadas.

A literatura buscou muitos usos para a casca de café, com destaque para a produção de biocombustíveis sólidos, como briquetes e *pellets*, que são utilizados na geração de energia térmica devido ao seu alto poder calorífico e sustentabilidade ambiental. Além disso, o resíduo cafeeiro também foi estudado para a produção de *biochar*, bio-óleo, gás de síntese, etanol, biogás e biodiesel, ampliando as possibilidades de aproveitamento energético e contribuindo para a valorização de resíduos agrícolas.

3.4 Importância do pré-tratamento dos resíduos para aplicações energéticas

Devido às suas características edafoclimáticas favoráveis e ao extenso território, o Brasil fortalece os setores de agronegócio e silvicultura, resultando em uma geração significativa de resíduos. Entretanto, a forma e tamanho irregulares, a alta umidade e baixa densidade aparente dos resíduos *in natura* são grandes desafios para a aplicação direta como biocombustíveis. Esses fatores dificultam o manuseio, transporte e armazenamento do material, e reduzem a eficiência energética da conversão termoquímica (KALIYAN; MOREY, 2009). Desse modo, o processo de pré-tratamento da biomassa contribui para a obtenção de produtos densificados de alta qualidade, destinados a diversas aplicações finais.

Silva et al. (2023) realizaram o projeto e análise econômica do pré-tratamento de cascas de café, geradas com alta umidade no processamento pós-colheita dos frutos pelo método via úmida. O estudo incluiu etapas de secagem, cominuição e densificação das cascas de café para produção de briquetes direcionados a aplicações de bioenergia. Experimentos de cinética de secagem foram conduzidos em escala laboratorial para estimar o tempo de secagem para o projeto do secador. Os autores destacaram a importância do pré-tratamento para aplicação energética eficiente do resíduo cafeeiro, bem como a definição de uma condição operacional ótima de secagem, capaz de equilibrar os custos do processo com as características desejadas da biomassa pré-tratada.

Devido à elevada umidade inicial, uma quantidade significativa do potencial de biomassas disponível permanece inutilizada (ULBRICH et al., 2017). A maioria das biomassas de resíduos agroindustriais possui umidade que geralmente excede 50% (base úmida). (SVOBODA et al., 2009). A casca de café após a processamento via úmida, por exemplo, possui cerca de 80% (base úmida) de umidade (TRAN et al., 2020; JIAMJARIYATAM et al., 2022). O caroço de açaí é gerado no beneficiamento com cerca de 70% (base úmida) (ITAI et al., 2014). Outro exemplo é o bagaço de cana-de-açúcar, que possui umidade de cerca de 53% (base úmida) (DE ALMEIDA; SOLA; BEHAINNE, 2017). A alta umidade inicial de um resíduo reduz a eficiência do processo de conversão termoquímica, uma vez que parte da energia necessária para a queima é utilizada para evaporar a água excedente, diminuindo o poder calorífico (PERAZZINI; PERAZZINI, 2022). Com o uso da biomassa úmida, maiores quantidades de excesso de ar são exigidas para a combustão, há maior consumo de combustível, os custos de transporte são mais altos e o armazenamento é complicado (STENSTRÖM, 2017). Como exemplo, de acordo com Oliveira et al. (2015), o PCI do briquete de casca de café é cerca de 20,01 MJ kg⁻¹, o que é maior que o PCI da casca de café bruta (15,56 MJ kg⁻¹), devido à diferença de umidade.

Os processos de gaseificação e pirólise exigem que a umidade residual da biomassa seja de 10 a 15% (base úmida) e 5 a 10% (base úmida), respectivamente. Já o processo de combustão não é tão restritivo quanto à umidade, mas pode ser mais eficiente se a umidade da biomassa se situar entre 15 a 25% (base úmida) (PANG, 2015). A produção de *pellets* ou briquetes de qualidade requerem a biomassa seca entre 8 a 12% (base úmida) segundo Kaliyan e Morey (2009), ou entre 10 a 15% (base úmida) de acordo com Pradhan, Mahajani e Arora (2018). Alguns poucos resíduos, como a serragem, a casca de café após o processamento via seca, e a casca de arroz são gerados com baixa umidade, cerca de 9,1%, 13,1% e 11,4% (base úmida), respectivamente (FELFLI et al., 2011). Assim, a casca de café gerada no método via úmida

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

exige o processo de secagem para produção de briquetes, devido à alta umidade inicial, diferentemente da casca gerada no método via seca. Dessa forma, o processo de secagem é essencial como primeira etapa do pré-tratamento para reduzir a umidade inicial de determinados resíduos. Com o uso da secagem, além do aprimoramento nos atributos de qualidade do material, há a diminuição dos custos de armazenamento e transporte, melhoria da eficiência da conversão termoquímica e prolongamento da via útil do material, visto que evita sua deterioração microbiana (MARTINS et al., 2020).

O tamanho da partícula que compõe a biomassa é outro parâmetro que afeta a qualidade do briquete ou *pellet* produzido. Estudos indicam que a redução do tamanho está associada à melhoria das propriedades físico-mecânicas do biocombustível sólido, como maior densidade energética, resistência e durabilidade. Além disso, aumenta a área de superfície total e, assim, promove a ligação entre as partículas durante a densificação. Dependendo do resíduo, pode-se cortar, moer ou triturar (BAJWA et al., 2018; PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). No geral, partículas menores resultam em produtos compactados mais densos e resistentes (BRAND et al. 2017). Assim, uma certa porcentagem de partículas finas a médias tende a melhorar a eficiência da densificação e reduzir o custo (TUMULURU et al., 2011). No entanto, não há uma norma técnica obrigatória para definir a faixa ideal de tamanho das partículas para densificação (HEYA et al., 2022).

Como exemplo, Ajimotokan et al. (2019) investigaram as variações nos parâmetros de processo de densificação nas propriedades físico-mecânicas de briquetes compostos de misturas de sabugo de milho e casca de arroz. Um desses parâmetros foi o tamanho de partícula, variada em 0,25; 1,00 e 1,75 mm. No geral, observou-se que os briquetes feitos a partir das partículas de 0,25 mm apresentaram melhores propriedades físico-mecânicas se comparados àqueles confeccionados com 1,75 mm, resultando em melhor eficiência logística e maior confiabilidade no desempenho energético. A diminuição do diâmetro de partícula acarretou em maiores resistência à compressão, densidade verde, densidade relaxada, durabilidade e resistência à água, e menor proporção de relaxamento, o que indica que briquetes produzidos com 0,25 mm são mais estáveis. Partículas menores possuem melhor ligação intermolecular devido ao menor espaço entre poros, resultando em alta força adesiva entre as partículas, que melhora a durabilidade e a resistência.

Setter et al. (2021), por exemplo, usaram um sistema de densificação a 120 °C e 15 MPa para investigar a influência do tamanho de partícula nas propriedades físico-mecânicas e energéticas dos briquetes produzidos com casca de café. Foram obtidas três frações de tamanho de partícula: partículas maiores que 1,8 mm, na faixa de 1,8 – 1,2 mm e menores que 1,2 mm.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os autores certificaram que, em geral, os briquetes feitos com partículas menores que 1,2 mm apresentaram melhores características, como maior densidade aparente, o que melhora a durabilidade do material devido ao aumento da área de contato entre as partículas; maiores resistência à compressão e densidade energética. Isso ocorreu, pois, a menor granulometria promoveu uma melhor acomodação das partículas durante a compactação. Briquetes com alta resistência são desejáveis, pois reduzem o risco de finos e rachaduras durante o manuseio e transporte. Desse modo, após a secagem, a etapa de cominuição pode ser essencial para homogeneizar o tamanho das partículas para o processo de densificação.

Os métodos de densificação amplamente utilizados são a briquetagem e a peletização. A briquetagem consiste basicamente na compactação mecânica da biomassa sob alta pressão, em prensas de pistão (hidráulicas ou mecânicas) ou de rolos, transformando-a em blocos densos de formato e tamanho regulares (TUMULURU et al., 2011). A biomassa é submetida a pressões mais altas durante a produção, se comparada à produção dos *pellets* (CUERVO; ROSAS; ROMANELLI, 2024). Esse processo pode ser feito com ou sem aglutinante, dependendo do equipamento e material utilizados. Diferentes tipos de aglutinantes, como amido comercial, pó de arroz, amido de mandioca, resíduos de papel e argila, podem ser misturados à biomassa em várias proporções (TESFAYE; WORKIE; KUMAR, 2022). A partir de estudos revisados por Obi, Pecenka e Clifford (2022), constatou-se que as porcentagens de aglutinante usadas na fabricação de briquetes de biomassa geralmente variam entre 3% e 30% do peso total da mistura, dependendo do tipo de biomassa, aglutinante e propriedades desejadas para os briquetes. Contudo, para resíduos lignocelulósicos, a própria pressão exercida durante a produção do briquete provoca um aumento na temperatura do material, o que resulta na plastificação da lignina. Essa substância atua como aglomerante das partículas durante a compactação, juntamente com as proteínas, amidos, gorduras e carboidratos solúveis. Portanto, não é necessária a mistura deste tipo de resíduo com aglutinante (KORZENOWSKI et al., 2023).

A peletização é realizada em uma peletizadora. O processo envolve a compressão da biomassa sob alta pressão, por meio de rolos, em uma matriz composta por uma série de orifícios, com tamanho e formato desejados dos *pellets*. Desse modo, a matéria-prima é forçada a passar pelos orifícios. Essa compressão faz o material aquecer, o que também ajuda na compactação. Geralmente, os *pellets* não necessitam de aglutinantes adicionais, mas os mais usados são amido, lignosulfonato e bentonita. Em seguida, o produto densificado é resfriado para evitar que deformem ou quebrem, antes de serem embalados (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018).

Além dos processos de produção serem distintos, os *pellets* e briquetes diferem-se principalmente pelas suas dimensões. Os briquetes são blocos com superfície mais rugosa e possuem diferentes geometrias de seção transversal (hexagonal, cilíndrica ou cuboide), com diâmetro de 50 a 100 mm, e comprimento variando de 60 mm a 200 mm. Por outro lado, os *pellets* possuem formato cilíndrico, superfície lisa e faixas típicas de 6 a 8 mm de diâmetro e 18 a 24 mm de comprimento (BAJWA et al., 2018). A peletização é um processo mais exigente que a briquetagem e é mais seletivo com os resíduos (SMARTFIRE, 2020). Os briquetes podem ser produzidos a partir de uma variedade de materiais residuais, como serragem de madeira, folhas, cascas de arroz, bagaço, e resíduos agrícolas em geral. Já os *pellets* são geralmente feitos de serragem de madeira, gramíneas e resíduos de culturas energéticas (BONASSA et al., 2018).

Os *pellets*, pequenos cilindros, destacam-se por sua alta densidade energética, baixa umidade e facilidade no armazenamento e transporte (CUERVO; ROSAS; ROMANELLI, 2024). A granulometria diminuta possibilita um melhor aproveitamento das estruturas logísticas graneleiras e facilita sua manipulação (TAVARES; TAVARES, 2015). Entretanto, apresentam um custo inicial mais elevado, devido ao maior grau de processamento e exigência de equipamentos mais sofisticados. Já os briquetes, blocos compactos, oferecem maior versatilidade em termos de matéria-prima, são mais resistentes e menos suscetíveis a danos durante o transporte. No entanto, sua umidade é geralmente mais alta que a dos *pellets* e seu armazenamento e manuseio são menos práticos devido ao maior tamanho e peso, requerendo maior espaço (CUERVO; ROSAS; ROMANELLI, 2024). A umidade final dos *pellets* geralmente é abaixo de 10% (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2013) ou 9% (ECOPELL, 2025) e dos briquetes situa-se entre 8 – 15% (GENTIL, 2008).

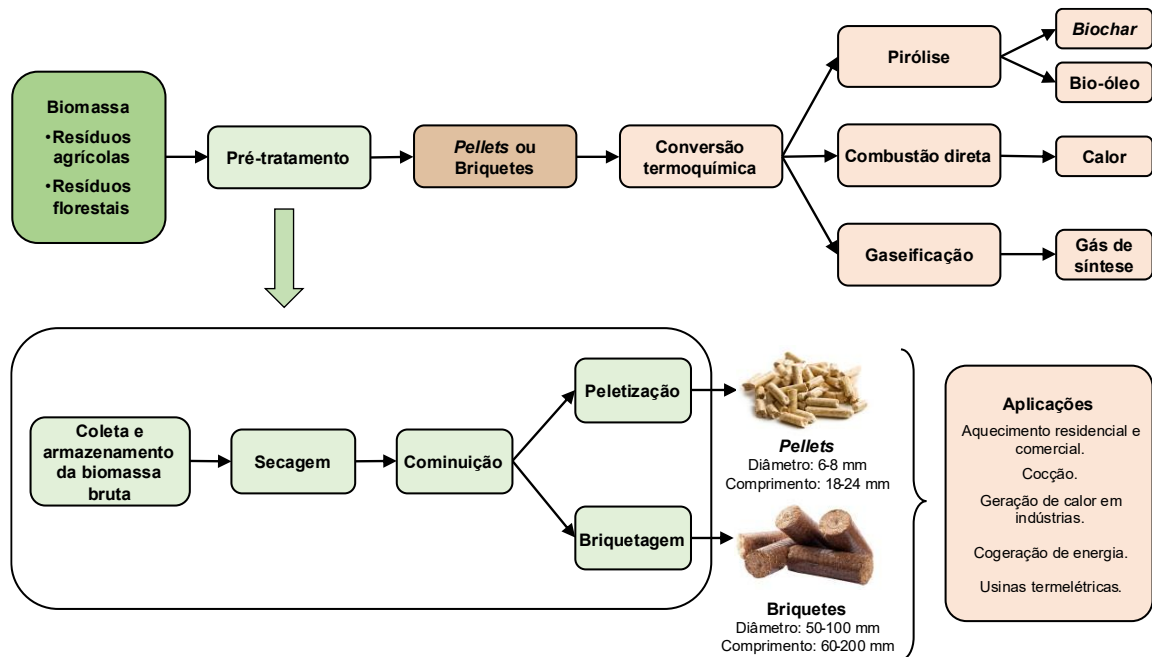
Em termos de aplicações, os *pellets* e briquetes podem ser empregados para fins semelhantes (VAISH; SHARMA; KAUR, 2022). Contudo, no geral, os *pellets* são mais utilizados em aplicações de baixa demanda, como cozinhar, geração de calor em pequena escala e outras necessidades domésticas (BRIQUETTE MACHINE, 2024a), principalmente pelo tamanho uniforme e dimensões menores. Desse modo, são comumente usados em dispositivos pequenos e automatizados, como fogões de aquecimento doméstico, caldeiras de aquecimento, pequenos gaseificadores, entre outros. No entanto, também podem ser empregados em larga escala, como em usinas termelétricas para geração de energia elétrica, especialmente em sistemas baseados em co-combustão. Já os briquetes são geralmente utilizados em aplicações térmicas industriais de média e grande escala, como caldeiras industriais, secadores e fornos (BAJWA et al., 2018; PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). Além disso, são usados em atividades domésticas, como cozinhar e aquecer ambientes, principalmente em sistemas não

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

automatizados (BRIQUETTE MACHINE, 2024a). Ambos podem ser utilizados em estabelecimentos comerciais a fim de substituir a lenha, como em padarias, pizzarias e lojas (BONASSA et al., 2018).

As tecnologias de conversão termoquímica dos *pellets* e briquetes consistem em combustão direta para geração de calor, gaseificação produzindo gás de síntese, utilizado para geração de calor ou eletricidade, e pirólise, a qual produz bio-óleo, que pode ser empregado como combustível de transporte, e *biochar* para geração de calor (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). O esquema de produção dos *pellets* e briquetes, bem como suas principais aplicações são mostrados na Figura 3.6.

Figura 3.6 Esquema do pré-tratamento da biomassa bruta para produção de *pellets* ou briquetes e principais aplicações.



Fonte: Autora (2025).

Os briquetes e *pellets* de biomassa proporcionam inúmeros benefícios, como a redução do volume de resíduos, o que facilita o manuseio, transporte e armazenamento; aumento da densidade de energia e melhoria da combustibilidade, refletindo em maior eficiência energética; menores emissões de particulados; densidade e qualidade uniformes (KALIYAN; MOREY, 2009; BRAND et al., 2017). A densificação aumenta a densidade aparente da biomassa da faixa de $80 - 200 \text{ kg m}^{-3}$ para cerca de $800 - 1.400 \text{ kg m}^{-3}$ (TUMULURU et al., 2011). Como exemplo, a densidade aparente dos briquetes de casca de café ($1130 - 1260 \text{ kg m}^{-3}$) é

significativamente maior que da casca de café *in natura* (256 – 482 kg m⁻³), segundo Setter et al. (2021). Esse é um fator importante, pois impacta a densidade de energia, os custos de transporte e a capacidade de armazenamento; logo, quanto maior a densidade aparente, melhor (OBERNBERGER; THEK, 2004).

Além disso, Heya et al. (2022) verificaram que a transformação física de resíduos de pericarpo de noz-pecã em briquetes melhorou consideravelmente seu poder calorífico. Portanto, os biocombustíveis sólidos alternativos são uma forma eficaz de converter os resíduos em produção eficiente de energia renovável, minimizando o descarte inadequado e contribuindo para a diversificação da matriz energética. Conforme mencionado anteriormente, a secagem da biomassa é o processo inicial e crucial para a produção de *pellets* e briquetes eficientes energeticamente. Por isso, são discutidas as principais tecnologias de secagem de biomassa na Seção 3.5.

3.5 Principais tecnologias de secagem de biomassa

Existem diversos tipos de secadores e a escolha da tecnologia mais adequada de secagem varia para cada biomassa, devido à variedade dos resíduos e suas características próprias. Não há uma metodologia de seleção específica para secadores de biomassa. Contudo, as propriedades físicas e químicas do material juntamente com dados experimentais de cinética de secagem podem auxiliar na escolha do secador mais apropriado (MUJUMDAR, 2015).

Dentre as diferentes tecnologias, os secadores convectivos são os mais empregados na secagem de biomassa em usinas de conversão termoquímica (YI et al., 2020). O meio de secagem pode ser gás de combustão, ar quente ou vapor superaquecido. Entretanto, ar quente é mais utilizado para a secagem de biomassa (GIUDICE et al., 2019). Embora outros tipos de secadores possam ser utilizados na secagem industrial de biomassa, três modelos são comumente usados: secador rotativo, secador de esteira transportadora e secador pneumático ou *flash* (PANG; MUJUMDAR, 2010; LI et al., 2012; YI et al., 2020), os quais serão detalhados a seguir.

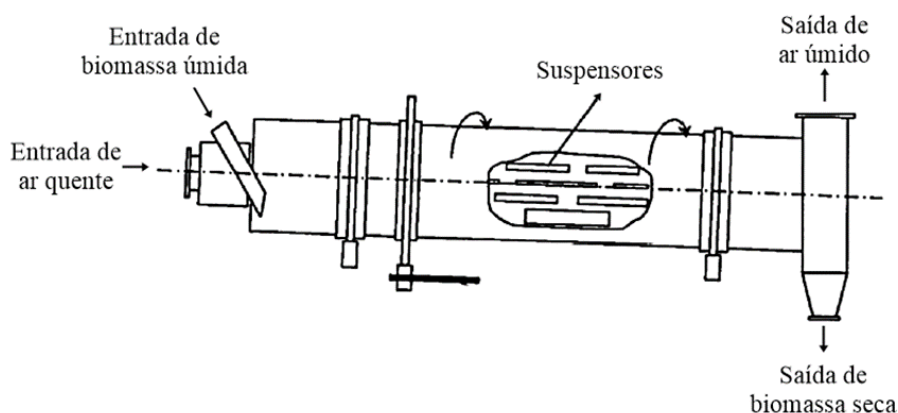
3.5.1 Secador rotativo

O secador rotativo é o tipo mais usado em aplicações de biomassa, principalmente biomassa lenhosa e resíduos agrícolas (LI et al., 2012; YI et al., 2020; REZAEI; SOKHANSANJ, 2021). A Figura 3.7 apresenta o esquema de um secador rotativo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Basicamente, é composto por um tambor cilíndrico metálico oco, levemente inclinado, que gira em torno de seu eixo. Em seu interior, há uma série de suspensores que transportam o material particulado para favorecer seu contato com a corrente de ar quente, e também ao longo do tambor, levando à uniformidade da umidade final das partículas. Enquanto o tambor gira, o material desce lentamente dentro do cilindro devido à gravidade. A temperatura e a vazão do gás de secagem bem como a taxa de rotação e a inclinação do secador influenciam o tempo de residência e a umidade final da biomassa (YI et al., 2020).

Figura 3.7 Esquema do secador rotativo direto.



Fonte: Adaptado de Pang e Mujumdar (2010).

O diâmetro típico do tambor de secagem varia entre 0,5 a 5 m e o comprimento entre 1 e 6 m (ACAR; DINCER; MUJUMDAR, 2020). Neste tambor, de passagem única ou passagem múltipla, o meio de aquecimento, o qual pode ser gás de combustão, ar quente ou vapor, flui na direção concorrente ou contracorrente à alimentação de biomassa (DELELE; WEIGLER; MELLMANN, 2015). Levando em consideração o tipo de aquecimento, os secadores rotativos são classificados como diretos, indiretos-diretos, indiretos e tipos especiais (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015). O secador rotativo direto é de longe o tipo mais empregado em usinas de bioenergia de grande escala existentes. O contato direto entre o material a ser seco e o meio de secagem, geralmente ar quente, proporciona bom desempenho da transferência de calor e massa (FAGERNÄS et al., 2010; PANG, 2015; YI et al., 2020).

Este equipamento possui várias vantagens, como grande capacidade de processamento, menor sensibilidade ao tamanho das partículas, podendo lidar com uma vasta gama de materiais, e construção simples e robusta (LI et al., 2012; YI et al., 2020). Além disso, operam em altas temperaturas, com faixa típica de 300 a 600 °C, o que maximiza a taxa de evaporação

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

de umidade na superfície do material e reduz o tempo de residência da biomassa (REZAEI; SOKHANSANJ, 2021).

O secador rotativo, geralmente, consome mais energia que outros tipos de secadores. Contudo, pode ser mais eficiente em condições operacionais adequadas por atingir taxas de evaporação mais altas. Este secador também é capaz de operar com partículas de tamanhos grandes. Logo, muitas vezes, não é necessária uma etapa de moagem da biomassa, o que aumentaria a energia consumida no pré-tratamento (PERAZZINI et al., 2021). Perazzini et al. (2021) constataram que o secador rotativo é adequado para secagem de material heterogêneo, constituído por partículas de diferentes formas, tamanhos e massa específica, uma vez que foi satisfatório para a secagem de resíduos cítricos sem alterações em suas características físicas. Delele, Weigler e Mellmann (2015) também afirmaram que uma das principais vantagens do uso do secador rotativo é sua capacidade de trabalhar com partículas sólidas não uniformes.

Entretanto, antes da seleção do secador rotativo, deve-se levar em consideração questões ambientais e de segurança. A alta temperatura do ar neste tipo de secador, muitas vezes, ocasiona a queima precoce da biomassa, aumenta as emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs) e eleva a incidência de incêndios (REZAEI; SOKHANSANJ, 2021). Os COVs são definidos como qualquer composto a base de carbono, excluindo monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbônico, carbonetos ou carbonatos metálicos e carbonato de amônio, os quais participam de reações fotoquímicas na atmosfera. Como exemplos têm-se álcoois, aldeídos, alcenos, compostos aromáticos e halogenados, e cetonas (CORDEIRO, 2022). Os COVs são naturalmente emitidos da biomassa à temperatura ambiente, devido à elevada pressão de vapor, sendo caracterizados pelo baixo ponto de ebulição. Contudo, a taxa de emissão desses compostos aumenta significativamente com a temperatura, principalmente acima de 100 °C, como as usadas na secagem industrial. Abaixo dessa temperatura, as emissões são baixas (PANG, 2015).

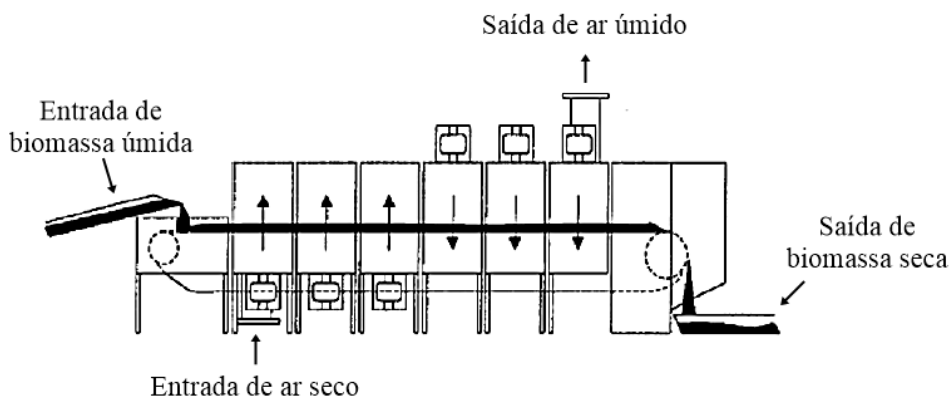
A grande maioria dos COVs é fotoquimicamente reativa e contribui para a formação do ozônio troposférico (O₃) na presença de óxidos de nitrogênio (NO_x) (JUMAH; MUJUMDAR, 2015; DONZELLI; SUAREZ-VARELA, 2024). O ozônio troposférico é um poluente atmosférico conhecido por seus efeitos nocivos à saúde humana — especialmente aos sistemas respiratório e cardiovascular — e ao meio ambiente (DONZELLI; SUAREZ-VARELA, 2024). Além disso, alguns COVs são tóxicos e possuem atividade cancerígena, tanto à exposição de curto quanto de longo prazo, podendo ocasionar efeitos adversos à saúde (JUMAH; MUJUMDAR, 2015; CORDEIRO, 2022). Dessa forma, as emissões gasosas precisam ser altamente controladas no secador rotativo e a recuperação do calor é difícil (LI et al., 2012).

Ademais, devido à alta agitação das partículas, o transporte inevitável de material particulado nos gases de exaustão torna os ciclones essenciais na saída desse tipo de tecnologia (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015).

3.5.2 Secador de esteira transportadora

O secador de esteira transportadora também consiste em um dos secadores mais versáteis e mais utilizados para secagem de biomassa (PANG, 2015; MYLLYMAA; HOLMBERG; AHTILA, 2019). Seu conceito é simples, basicamente o material é transportado pelo secador em esteiras e o ar quente é forçado através do leito (POIRIER, 2015). O esquema representativo de um secador de esteira transportadora é apresentado na Figura 3.8. Neste equipamento, o transporte do material sólido é feito por uma esteira, normalmente composta por placas metálicas perfuradas a fim de permitir a passagem do ar quente, o qual percola o leito estático em direção paralela ou perpendicular. O ar de secagem pode deslocar-se em sentido ascendente ou descendente, dependendo do material a ser seco. A esteira passa pela câmara de secagem, retangular ou cilíndrica, que possui sistemas de aquecimento, ventilação, recirculação e exaustão (MYLLYMAA; HOLMBERG; AHTILA, 2019).

Figura 3.8 Esquema do secador de esteira transportadora.



Fonte: Adaptado de Pang e Mujumdar (2010).

Em relação aos materiais, o secador de esteira transportadora não é adequado para secagem de materiais laminados ou pastas. Geralmente, a faixa adequada de diâmetro do sistema particulado varia entre 1 a 50 mm, podendo ser empilhado na esteira, desde que não haja aderência ou aglomeração excessiva. Este empilhamento eleva a altura do leito de sólidos, o que resulta em uma secagem mais efetiva, com menos tempo de retenção (POIRIER, 2015).

A altura típica do leito situa-se entre 2 e 30 cm, dependendo do tipo de biomassa (ALAMIA; STRÖM; THUNMAN, 2015).

O tempo típico de secagem varia entre 5 a 240 min, faixa relativamente maior que os demais tipos de secadores devido à menor taxa de secagem. Por isso, geralmente o secador de esteira ocupa muito espaço. Quanto maior o tempo de residência, maior a dimensão do equipamento e, conseqüentemente, requer alto custo de investimento e maior área de instalação (POIRIER, 2015). Já a velocidade do ar deve ser baixa, entre 0,5 e 2 m s⁻¹, para evitar o arraste das partículas e manter o leito de material estático (VAN'T LAND, 2012).

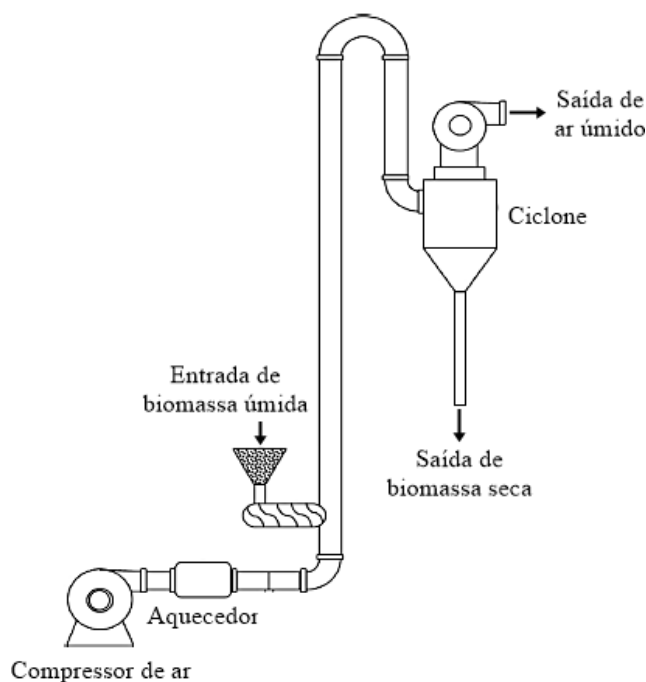
Este equipamento opera em temperaturas relativamente baixas, até 200 °C. Assim, é possível economizar energia, recuperar o calor residual, reduzir as emissões de COVs e evitar o risco de incêndio, uma vez que a temperatura do ar de secagem é inferior à temperatura de autoignição da biomassa (LI et al., 2012). Contudo, a desvantagem refere-se à secagem desigual do material ao longo do comprimento do secador (PANG, 2015). Entretanto, Zhang et al. (2021) propuseram um método não convencional para resolver esse problema e melhorar a eficiência da secagem. Os resultados encontrados mostraram que o empilhamento específico da matéria-prima, denominado empilhamento serrilhado vertical, com ângulo de 30° e intervalo de 43 mm pode ajudar a melhorar o desempenho da secagem.

3.5.3 Secador pneumático

O secador pneumático, também conhecido como secador *flash*, é utilizado na secagem de matérias sólidos e pastosos, principalmente aqueles com alta umidade livre. Esta tecnologia é amplamente empregada para secagem de biomassa em plantas de produção de briquetes e *pellets*, especialmente de serragem e outras biomassas lenhosas (YI et al., 2020).

A Figura 3.9 apresenta o esquema de um secador pneumático. Neste equipamento, a fase fluida previamente aquecida transporta em alta velocidade (acima de 16 m s⁻¹) as partículas de biomassa presentes em uma longa tubulação, disposta geralmente na posição vertical. O ar quente, produzido por aquecimento indireto ou queima direta, consiste no meio de secagem mais comum desse secador. O fluxo de ar fornece o calor necessário para a secagem, carregando consigo a umidade evaporada. As partículas de biomassa seca são separadas do meio de secagem em um ciclone situado na saída (HAQUE; SOMERVILLE, 2013; LEVY; BORDE, 2015).

Figura 3.9 Esquema do secador pneumático.



Fonte: Adaptado de Banooni, Hajidavalloo e Dorfeshan (2018).

O secador pneumático requer tamanhos de partículas menores para poder suspender e transportar a biomassa por meio do fluxo de fluido (LI et al., 2012). Os diâmetros das partículas encontram-se na faixa usual de 10 a 500 μm . O material particulado permanece em contato direto com o ar quente, proporcionando altos coeficientes de transferência de calor e massa por convecção. Logo, esse tipo de secagem é caracterizado pela alta taxa de secagem, que ocorre em um tempo de residência relativamente curto, entre 0,5 a 30 s (LAW; MUJUMDAR, 2015; LEVY; BORDE, 2015). Como consequência, o material permanece com temperaturas relativamente baixas durante o período de secagem, sendo possível secar materiais sensíveis ao calor (LEVY; BORDE, 2015).

A temperatura do ar de secagem tende a ser mais baixa que dos secadores rotativos, com faixa típica de 150 a 280 $^{\circ}\text{C}$ (LI et al., 2012). As principais vantagens dessa tecnologia são: simplicidade na construção, pouco espaço requerido para instalação, moderada emissão de COVs, menor risco de incêndio, baixo custo de capital e manutenção em comparação com outros tipos de secadores (YI et al., 2020) e maior taxa de remoção de umidade da partícula sólida (CHAN; DYAH; KAMARUDDIN, 2015).

Por outro lado, é importante mencionar suas desvantagens. Por requerer um tamanho de partícula pequeno, quando necessária, a operação de redução do tamanho do material demanda um uso intensivo de energia, o que pode aumentar os custos gerais dessa tecnologia de secagem

(LI et al., 2012). Além disso, possui baixa capacidade de processamento e exige um sistema de limpeza do ar de exaustão com alta eficiência para separar mecanicamente a biomassa seca do meio de secagem (LEVY; BORDE, 2015).

O curto tempo de residência pode ser uma vantagem e também uma complicação. O secador pneumático é bastante sensível a pequenas mudanças. Logo, não é viável aumentar nem minimamente o tempo de residência para melhorar a retenção de sólidos. Uma ligeira variação na taxa de alimentação pode alterar repentinamente o equilíbrio de calor e massa no tubo e fornecer condições de saída muito variadas. Além disso, a velocidade do gás deve ser sempre mantida constante para transportar as partículas (BANOONI; HAJIDAVALLOO; DORFESHAN, 2018). Portanto, a modelagem e o projeto desse secador devem ser precisos para fornecer resultados confiáveis e obter um bom desempenho de secagem.

3.5.4 Comparações entre as diferentes tecnologias de secagem de biomassa

Em face do exposto, as principais vantagens e desvantagens dos secadores convectivos de biomassa foram sintetizadas na Tabela 3.2. O secador rotativo apresenta alta produtividade, confiabilidade e é capaz de lidar com materiais heterogêneos e de difícil escoamento, porém possui altas emissões de COVs e riscos de incêndio, que devem ser tratados com atenção. Por outro lado, o secador de esteira possui maior segurança operacional e menor emissão de gases nocivos, mas pode exigir tempos de secagem mais longos para taxas de secagem mais baixas e ocorrer problemas de desigualdade da umidade final da biomassa. Já os secadores pneumáticos são capazes de secar a biomassa rapidamente, requerem pouco espaço e apresentam moderadas emissões de COVs, porém são muito sensíveis a mudanças, exigem que a biomassa seja triturada, quando necessário, possuem baixa capacidade e alta demanda de eletricidade.

Tabela 3.2 Principais vantagens e desvantagens dos secadores de biomassa.

Tipo de secador	Vantagens	Desvantagens
Rotativo	Adequado para uma vasta gama de materiais, garante a uniformidade da umidade final, alta capacidade e eficiência térmica.	Maiores emissões de poluentes e alto risco de incêndio.
Esteira	Maior segurança operacional, não necessita de limpeza do ar, menores emissões de poluentes e baixo risco de incêndio.	Ocupa muito espaço, secagem desigual do material e maior tempo de residência.
Pneumático	Estrutura simples, ocupa pouco espaço, adequado para biomassa sensível à alta temperatura e tempo de residência curto.	Baixa capacidade, maior sensibilidade a mudanças, alta demanda de energia e exige tamanhos de partículas pequenos.

Fonte: Adaptado de Levy e Borde (2015); Li et al. (2012); Mujumdar (2015); Pang (2015); Perazzini et al. (2021); Poirier (2015); Rezaei e Sokhansanj (2021); Yi et al. (2020).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As faixas típicas de parâmetros de projeto dos secadores e outras considerações importantes foram compiladas na Tabela 3.3 para melhor visualização das diferentes condições operacionais das tecnologias. A capacidade refere-se à capacidade de processamento, em termos de vazão mássica. Por falta de dados quantitativos sobre esses valores na literatura, classificou-se como alta, média e baixa, sendo o secador rotativo o único capaz de suportar altas vazões, como 10 t h^{-1} (BIOBRAX, 2025). A recuperação de calor residual é complicada em secadores rotativos e pneumáticos, uma vez que o sólido é transportado junto com o ar quente, limitando o aproveitamento térmico direto do ar de exaustão.

Tabela 3.3 Faixas típicas de parâmetros de projeto dos secadores de biomassa.

Parâmetros	Tipo de secador		
	Rotativo	Esteira	Pneumático
Tempo de residência	$\leq 60 \text{ min}$	5 – 240 min	0,5 – 30 s
Velocidade do ar	$0,5 - 3 \text{ m s}^{-1}$	$0,5 - 2 \text{ m s}^{-1}$	$\geq 16 \text{ m s}^{-1}$
Temperatura de entrada do ar de secagem	300 – 600 °C	30 – 200 °C	150 – 280 °C
Tamanho de partícula	19 – 125 mm	1 – 50 mm	10 – 500 μm
Taxa de evaporação	$30 - 80 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-3}$	$0,5 - 40 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-3}$	$5 - 100 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-3}$
Consumo energético	$4000 - 10000 \text{ kJ kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$	$4000 - 6000 \text{ kJ kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$	$4500 - 9000 \text{ kJ kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$
Capacidade	Alta	Média	Baixa
Recuperação de calor	Difícil	Fácil	Difícil

Fonte: Adaptado de Haque e Somerville (2013); Law e Mujumdar (2015); Levy e Borde (2015); Li et al. (2012); Mujumdar (2015); Pang (2015); Perazzini et al. (2021); Poirier (2015); Rezaei e Sokhansanj (2021); van't Land (2012).

3.6 Aspectos econômicos da secagem de biomassa

Os aspectos econômicos da operação de secagem são um fator essencial para a viabilidade de uma usina de geração de energia a partir da biomassa, visto que a secagem é um processo intensivo em energia e capital. Segundo Mujumdar (2015), o processo de secagem compete com a destilação como a operação unitária mais intensiva em energia devido ao alto calor latente de vaporização e à ineficiência inerente ao usar ar quente como o meio de secagem. Os diversos parâmetros técnicos de cada tipo de secador podem influenciar nos custos de investimento e custos operacionais. Sendo assim, a otimização do processo de secagem é importante para determinação da configuração ótima do secador que minimize os custos totais no processo produtivo de *pellets* ou briquetes.

Diversos estudos estimaram os custos de secagem de biomassa a fim de minimizá-los. A secagem em vários estágios é uma maneira de melhorar a eficiência energética e reduzir os custos operacionais, pois o calor residual do primeiro estágio pode ser reaproveitado nos

estágios seguintes. Holmberg e Ahtila (2004) compararam os custos de secagem de resíduos de madeira em multiestágio e estágio único com aquecimento em vários estágios, ambas usando secadores de esteira de fluxo contracorrente contínuo com ar sendo o meio de secagem, aquecido em trocadores de calor indiretos. O alto teor de umidade da biomassa, que varia entre 50 a 63% (base úmida), diminui consideravelmente a produção de energia da usina, necessitando de secagem. Os resultados mostraram que a secagem multiestágio foi mais econômica quando o tempo de amortização foi maior. A utilização de calor secundário de baixo custo foi facilmente maximizada neste processo, diminuindo os custos de operação. Por outro lado, se o tempo de amortização for curto, a secagem de estágio único mostrou-se uma forma mais econômica.

Frodeson, Berghel e Renström (2013) estudaram como aumentar a capacidade de secagem e melhorar a eficiência energética da secagem de serragem, que contém teor de umidade de 50 a 55% (base úmida), para produção de *pellets* de madeira. Para isso, desenvolveram um sistema de secagem em duas etapas, composto de um secador de esteira de baixa temperatura juntamente com um secador pneumático. Comparado com o secador de esteira de estágio único, a capacidade de secagem do sistema de secagem em duas etapas aumentou em 22% e o consumo de energia térmica diminuiu aproximadamente 7% por tonelada de serragem seca, reduzindo os custos operacionais.

A integração da operação de secagem a outros processos também melhora sua eficiência e economia, uma vez que se aproveitam fontes potenciais de calor para a secagem da biomassa. Li et al. (2012) estudaram a integração da secagem de cavacos de madeira de pinho-branco usando duas fontes de calor residual de uma central elétrica: água quente a 90 °C e gases de combustão a 250 – 450 °C. Compararam economicamente dois secadores de esteira, um utilizando gases de combustão e outro vapor superaquecido (gerado a partir da água de resfriamento quente). O uso de gases de combustão resultou em custos de capital mais baixos, mas questões ambientais, como emissões de poluentes, devem ser consideradas. O vapor superaquecido apresentou tempos de secagem curtos, boa recuperação de calor e proteção ambiental, mas acarretou em maiores custos de capital.

Isaksson, Åsblad e Berntsson (2013) analisaram a influência de secadores distintos em um ciclo combinado de gaseificação de biomassa integrado a uma fábrica de papel e celulose. Assim, utilizando o calor residual da planta de bioenergia, foi estudada a secagem de biomassa com ar quente, gases de combustão e vapor superaquecido. Os autores concluíram que o secador de ar de baixa temperatura foi a alternativa mais atrativa e o secador a vapor superaquecido foi menos lucrativo.

Holmberg, Isaksson e Lahdelma (2014) minimizaram os custos de secagem, incluindo custos de capital e operacionais, de um secador esteira de biomassa, usando um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) aplicado a uma indústria de papel e celulose. Foram avaliadas três fontes de calor diferentes disponíveis para o aquecimento do ar de secagem: água quente a 60 °C, água quente a 80 °C e vapor a 0,4 MPa. Os autores concluíram que o calor residual da água à baixa temperatura foi a fonte de calor mais econômica na maioria dos casos, com custos operacionais de € 64.500 ano⁻¹, e o custo do secador de 146 m² foi igual a € 477.000. Os autores também mencionaram a importância de estudar a influência de parâmetros técnicos no projeto da configuração ideal do secador esteira.

Outros estudos avaliaram a influência da variação de determinadas condições de operação, como a temperatura do ar de entrada, ou características da biomassa nos custos de secagem. Segundo Myllymaa et al. (2015), os secadores devem ser projetados de forma que os custos de capital e operacionais sejam os mais baixos possíveis. Gebreegziabher, Oyedun e Hui (2013) desenvolveram um modelo matemático de secagem em secador rotativo direto para otimizar o lucro anual do processo variando o tamanho dos cavacos de madeira e outros parâmetros. O custo do secador aumentou de US\$ 19.891 (6 m³) para US\$ 1.700.822 (16.495 m³) e os custos operacionais de US\$ 357.563 ano⁻¹ para US\$ 766.027 ano⁻¹ com o aumento do tamanho de 0,0005 para 0,05 m, ambos com teor de umidade final de 17%. Isso ocorreu, pois, os cavacos de madeira maiores exigiram um tempo de secagem mais longo, um secador de maior volume e maiores custos com energia. Os autores verificaram que o lucro máximo foi obtido em 0,0005 m. Isto é, o lucro foi otimizado no cenário de menores custos de equipamento e energia. No caso em que o teor de umidade final da biomassa alcançou 43%, o lucro para 0,05 m foi maior que todos os outros cenários, mas queimar biocombustível de alta umidade e baixo PCI pode causar problemas ambientais e/ou operacionais.

Krokida, Marinos-Kouris e Mujumdar (2015) alteraram a temperatura e velocidade do ar de entrada na secagem de torta de bagaço de azeitona em um secador rotativo industrial. À medida que a temperatura do ar aumentou, o custo operacional também aumentou, enquanto o tamanho do secador e, conseqüentemente, o custo do equipamento diminuíram. Os custos totais também reduziram com o aumento da temperatura, indicando que, do ponto de vista econômico, é favorável operar a uma temperatura mais alta. Por outro lado, a velocidade do ar não apresentou impacto significativo no custo total unitário a partir de uma temperatura do ar de 600 °C. Nas condições de 650 °C e 2,4 m s⁻¹, o investimento do secador de 54 m³ de volume foi igual a US\$ 55.619 e os custos operacionais de US\$ 112.891 ano⁻¹.

Myllymaa, Holmberg e Ahtila (2019) analisaram a influência dos principais parâmetros de projeto de um secador de esteira nos custos de secagem de três resíduos diferentes: cavacos e cascas de madeira e mistura de serragem e lodo de fuligem. O custo do secador foi obtido por uma correlação em função da área, que pode variar entre € 24.946 a € 2.802.240 para 1 e 480 m². Os resultados demonstraram que o aumento da temperatura do ar proporcionou menores custos de secagem. Com exceção da mistura de serragem e lodo, elevar a altura do leito também diminuiu os custos, podendo alcançar uma economia de até 56% no caso da secagem de cavacos. Isso indica que a altura de leito ideal depende do material. Em contrapartida, aumentar a velocidade do ar não melhorou necessariamente o fenômeno de secagem e não reduziu os custos. Os autores mostraram a importância da análise dos principais parâmetros de projeto a fim de otimizar os custos.

Myllymaa, Holmberg e Ahtila (2020) realizaram a análise econômica da secagem da mistura de lodo de fuligem e serragem em um secador de esteira. O custo de investimento, custo operacional e a área do secador reduziram de € 535.131 para € 219.992, € 156.238 para € 153.745 e de 39 m² para 13 m², respectivamente, com o aumento da temperatura do ar de 40 a 120 °C. No entanto, não houve razão para escolher uma temperatura do ar superior a 80 °C, pois os *paybacks* dos cenários de 80 a 120 °C foram da mesma magnitude: 1,2; 1,1 e 1,0 ano. Os autores concluíram que a secagem da mistura desses materiais em um secador de esteira a 80 °C é um método econômico para transformar o fluxo de lodo de fuligem em combustível.

Han, Choi e Kim (2020) desenvolveram um modelo de otimização, integrando avaliações econômicas, para determinar as condições ótimas de secagem de cachos de frutos. Estes são um subproduto da produção de óleo de palma, gerado com teor de umidade de 60 – 70%, o qual é considerado muito alto para uso como combustível em combustão direta. Nos casos analisados, o custo do secador rotativo direto e seu volume variou de US\$ 16.035 a US\$ 32.892 e 0,27 m³ a 1,52 m³, respectivamente. Nas condições ótimas de secagem encontradas, com taxa de recirculação de vapor de 0,25, tempo de secagem de 23 min e teor de umidade final de 9,91%, os custos totais foram reduzidos em 5,48% em relação ao cenário base, sem a utilização da secagem. Isso indica a importância da secagem e sua otimização para a combustão eficiente e econômica da biomassa.

Perazzini et al. (2021) avaliaram os custos da secagem de resíduos cítricos em um secador rotativo semi-industrial para encontrar a condição operacional que equilibre os custos com a qualidade da biomassa seca. O custo do secador, de 0,43 m³ de volume, foi estimado em US\$ 60.862 para todos os cenários analisados. Já os custos totais aumentaram ligeiramente de US\$ 240.320 ano⁻¹ para US\$ 249.380 ano⁻¹ com o aumento da temperatura de 135 para 155

°C, velocidade do ar de 1 para 2 m s⁻¹ e vazão mássica de biomassa seca de 0,2 kg min⁻¹ para 0,4 kg min⁻¹, uma vez que a demanda de energia foi maior. Para a vazão de biomassa dos experimentos, o lucro líquido anual foi negativo, mostrando a necessidade de otimizar o processo. A elevação da vazão de biomassa para 0,9 kg min⁻¹ proporcionou uma lucratividade positiva, juntamente com menores temperatura (135 °C) e velocidade do ar (1 m s⁻¹), tornando o processo atraente para a valorização dos resíduos cítricos nessa condição operacional ótima. Os autores concluíram que o secador rotativo apresentou custos de processo e capital dentro da faixa encontrada na literatura para secagem de biomassa.

Independentemente do tipo de aplicação, a secagem é um processo que consome muita energia, sendo responsável por 10 a 25% do uso total de energia industrial na maioria dos países industrializados (MUJUMDAR, 2015). Conseqüentemente, os custos operacionais são elevados. Por esse motivo, diversos estudos tiveram como objetivo minimizar os custos de secagem. Uma maneira é a integração da operação de secagem com outras plantas de processamento de biomassa, de modo que seja possível recuperar o calor residual. Outra alternativa consiste na secagem multiestágio para economizar energia. Além disso, a identificação da condição operacional ótima do secador é um fator chave para reduzir consideravelmente os custos, os quais podem variar consideravelmente de acordo com as características da biomassa que se deseja secar, parâmetros de projeto e consumo de energia. Visto que a secagem é fundamental no processo produtivo do briquete, estudar maneiras de minimizar os custos dessa operação é importante para viabilidade econômica da planta de geração de energia a partir da biomassa pré-tratada.

3.7 Briquetes de casca de café

A casca de café proveniente do método via úmida necessita de pré-tratamento para a produção de briquetes, com destaque para o processo de secagem. Os briquetes produzidos possuem grande potencial como fonte de energia renovável, podendo substituir a lenha e o carvão, o que resultaria em várias vantagens, como redução do desmatamento, menores emissões de CO₂ e gestão correta do resíduo cafeeiro. Ao todo, foram encontrados 16 artigos na literatura que investigaram briquetes produzidos a partir da casca de café, os quais serão revisados a seguir.

Suarez e Luengo (2003) estudaram a densificação da casca de café e sua combustão em fornos de panificação. A eficiência térmica encontrada foi de 64% e 64,9% para o briquete de casca de café e lenha, respectivamente. Os resultados experimentais demonstraram que os

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

briquetes de casca de café podem ser utilizados como combustível renovável, com características de combustão muito semelhantes à lenha.

Okello, Kasisira e Okure (2011) realizaram a otimização das condições de densificação dos briquetes de casca de café utilizando a metodologia de superfície de resposta. Os pesquisadores identificaram os valores ótimos de pressão da matriz, teor de umidade e teor de melação aglutinante, os quais foram: 14,91 MPa, 8% (base úmida) e de 45% (base úmida), respectivamente. Nessas condições, o briquete produzido tinha densidade aparente de 718,09 kg m⁻³, durabilidade de 80,77% e estabilidade de 14,98%. Os resultados demonstraram que a partir da otimização foi possível alcançar briquetes de maior qualidade e que podem ser utilizados como fonte de energia.

De maneira semelhante, Raudah e Zulkifili (2018) estudaram a otimização das condições da conversão de casca de café em briquete, usando amido como aglutinante, por meio da metodologia de superfície de resposta. O estudo visou melhorar as propriedades físicas dos briquetes, como densidade e resistência mecânica. Os resultados indicaram uma combinação de tamanho de partícula de 34,71 mesh, tempo de pirólise de 110,93 min e concentração de amido de 8%. O PCS e a densidade do combustível foram iguais a 5644,66 cal g⁻¹ e 0,7069 g cm⁻³, respectivamente. Os autores sugeriram a necessidade de mais pesquisas visando melhorar a densidade dos briquetes.

Protásio et al. (2012) compararam os briquetes de casca de café *in natura*, carbonizados e torreficados quanto à composição elementar, PCS, densidade aparente e energética e resistência à compressão. Os briquetes carbonizados apresentaram maior potencial energético devido aos elevados teores de carbono fixo (69%) e elementar (70,42%) e PCS (29 MJ kg⁻¹), porém baixa resistência mecânica (0,39 MPa). Os briquetes torreficados apresentaram características e propriedades energéticas semelhantes, mas densidade energética inferior (20,3 GJ m⁻³) em relação aos briquetes carbonizados (22,8 GJ m⁻³) e *in natura* (23,5 GJ m⁻³). Os briquetes *in natura* tiveram a maior densidade aparente (1292 kg m⁻³) e maior resistência (1,18 MPa), porém o menor PCS (18 MJ kg⁻¹).

Zerbinatti et al. (2014) realizaram a caracterização física, química e energética de briquetes feitos de casca de café, galhos e folhas, e combinações de casca de café com galhos e folhas. Os resultados indicaram que os briquetes produzidos com a casca de café, bem como galhos e folhas de forma isolada ou a mistura de casca de café com 50% ou mais de galhos e folhas são recomendados como fonte energética para uso doméstico e industrial, com PCS em torno de 4000 kcal kg⁻¹. Além disso, os briquetes apresentaram baixos teores de enxofre (<0,1%) e nitrogênio (1,32%), o que reduz a emissão de poluentes atmosféricos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cubero-Abarca et al. (2014) investigaram o potencial da casca de café, denominada no artigo de polpa de café, para produção de briquetes e *pellets*. O estudo incluiu a secagem da polpa (usando métodos de ar, solar e ar quente), a produção de briquetes e *pellets*, e a avaliação de suas propriedades energéticas, físicas e mecânicas. Os autores concluíram que a secagem ao ar quente é a melhor opção para polpa de café, devido ao menor tempo de secagem. As propriedades físicas dos *pellets* e briquetes atenderam à maioria dos padrões estabelecidos para esses produtos. No entanto, o poder calorífico encontrado foi menor do que os padrões, sendo 12.501 kJ kg⁻¹ e 11.591 kJ kg⁻¹ para briquetes e *pellets*, respectivamente.

Suryaningsih et al. (2017) caracterizaram e analisaram as propriedades físico-químicas de briquetes feitos a partir de casca de coco, serragem, casca de arroz e casca de café. Os resultados de PCI e densidade aparente foram iguais a 5267, 4247, 4045 e 3350 cal g⁻¹ e 0,76; 0,89; 0,71; 0,68 g cm⁻³ para a casca de coco, serragem, cascas de café e arroz, respectivamente. Apesar dos briquetes de casca de café não possuírem os maiores valores de PCI e densidade aparente, apresentaram o menor teor de cinzas (0,60%), maior teor de material volátil (58,20%) e foram mais atrativos que os briquetes de casca de arroz.

Lubwama e Yiga (2018) investigaram as características de briquetes feitos de cascas de arroz e café para aplicações de cozimento doméstico em Uganda. Utilizaram como aglutinantes a argila e amido de mandioca. Os valores de PCS para briquetes com amido de mandioca variaram de 21,9 a 23,5 MJ kg⁻¹ para casca de café e 15,9 a 16,6 MJ kg⁻¹ para casca de arroz. Para briquetes de casca de café e casca de arroz com argila, os PCS variaram de 13,0 a 19,5 MJ kg⁻¹ e 9,5 a 13,8 MJ kg⁻¹, respectivamente. Os briquetes de casca de café apresentaram maiores PCS e menor teor de cinzas, independente do aglutinante empregado. Além disso, o menor tempo de ignição e fervura foi observado para o briquete de casca de café com 60g de amido de mandioca, indicando que esse biocombustível pode ser econômico no uso doméstico.

Yiga e Lubwama (2019) realizaram a Análise Termogravimétrica (TGA) de briquetes carbonizados de casca de amendoim, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e casca de café, com aglutinante de amido de mandioca, a fim de estudar o comportamento de combustão. Os resultados da TGA mostraram que a inclusão do ligante reduziu a quantidade de carbono fixo presente nos briquetes, reduzindo assim ligeiramente os seus valores calóricos. Os briquetes de casca de café tiveram a maior perda de peso devido à sua baixa composição de cinzas e maior teor de matéria volátil. Além disso, atingiram maiores taxas de queima. Em geral, os briquetes desenvolvidos apresentaram propriedades de combustão suficientes para aplicações domésticas e industriais.

Eshete (2019) produziu e caracterizou briquetes de casca de café e serragem com diferentes tipos e proporções de aglutinantes, os quais foram casca de batata, resíduos de papel e melaço. Os resultados mostraram que a densidade aparente, teor de material volátil, carbono fixo e PCS aumentaram com o acréscimo de material aglutinante, variando entre 0,21 – 0,71 g cm⁻³, 60,87 – 71,05%, 20,87 – 28,73% e 30,07 – 31,80 MJ kg⁻¹, respectivamente. O autor concluiu que o briquete com 25% de melaço e 75% de casca de café carbonizada apresentou a maior densidade e o menor teor de umidade. Dentre os briquetes de casca de café, o maior PCS (31,30 MJ kg⁻¹) foi observado para aquele feito com 25% de casca de batata.

Alchalil et al. (2021) examinaram o efeito da pressão de densificação nas propriedades físicas e de combustão de briquetes sem ligantes feitos de casca de arroz e casca de café. Antes do processo de briquetagem, a casca de café foi seca ao sol, moída e peneirada, enquanto a casca de arroz foi seca e carbonizada antes da moagem e peneiramento. Os resultados mostraram que o poder calorífico do briquete 100% de casca de café foi de 4764 cal g⁻¹ contendo 16,5% de umidade. Nenhuma mudança significativa foi observada na taxa de combustão ao aumentar a pressão de briquetagem. Os autores concluíram que os resíduos agrícolas podem ser usados como matéria-prima para a produção de combustível de biomassa sólida.

Tesfaye, Workie e Kumar (2022) abordaram a produção e caracterização físico-química de briquetes de casca de café como uma fonte renovável de energia. O estudo incluiu a secagem e carbonização das cascas de café, moagem e briquetagem dos finos de carvão, utilizando argila como aglutinante, em concentração menor que 15%. Os resultados mostraram que os briquetes apresentaram propriedades positivas, como alta densidade (970 kg m⁻³), teor de umidade adequado (10,03%), bom PCS (30,54 MJ kg⁻¹), alto teor de carbono fixo (81%) e baixo teor de cinzas (5,15%). Concluiu-se que os briquetes têm potencial como uma fonte alternativa, principalmente para residências, restaurantes e pequenas empresas, e podem contribuir para a redução do uso de combustíveis fósseis.

Setter e Oliveira (2022) apresentaram uma análise das propriedades dos briquetes de casca de café com adição de lignina kraft para produção de co-produtos com maior valor energético por meio da pirólise lenta. Os resultados mostraram que a adição de lignina de 10% para 50% proporcionou o aumento do PCS da casca de café (18,50 – 21,37 MJ kg⁻¹) e da densidade aparente dos briquetes (0,92 – 1,13 g cm⁻³). Observou-se que o rendimento do *biochar* foi maximizado usando o briquete com maior teor de lignina. Por outro lado, a produção de bio-óleo foi favorecida a partir do briquete com o menor teor. Os autores

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

concluíram que essa combinação de resíduos agroindustriais são uma alternativa viável e promissora para o cenário energético.

Anggono et al. (2023) investigaram o potencial das cascas de café como matéria-prima para briquetes. Os parâmetros de fabricação foram variados e incluíram o tamanho das partículas, a relação entre biomassa e aglutinante e a pressão da prensa. Os briquetes produzidos foram analisados com base no PCS e nas características comuns de combustão. O maior PCS foi encontrado nos briquetes de casca de café sem aglutinante, com $3.811 \text{ kcal kg}^{-1}$, sendo viável sua produção com 100% de biomassa. O teste de características de combustão mostrou que briquetes com a menor granulometria (60 mesh) e a maior pressão de prensa (2 MPa) apresentam as características mais desejadas, como maior temperatura de chama, tempo de ignição e duração da combustão.

Tesfaye, Tibesso e Aliyi (2023) avaliaram briquetes produzidos com diferentes proporções de casca de café carbonizada e argila como aglutinante. Analisaram a capacidade da máquina, propriedades físicas e mecânicas e características térmicas dos briquetes. Aumentar a proporção de ligante aumentou a porcentagem do conteúdo de cinzas, diminuiu a porcentagem de carbono fixo e o poder calorífico. Os poderes caloríficos mínimo e máximo, carbono fixo e teor de cinzas foram $3856,89 \text{ cal g}^{-1}$, 12,5%, 24% e $5.001,78 \text{ cal g}^{-1}$, 30% e 36%, respectivamente. O teor de argila de 5% apresentou o melhor poder calorífico de $4848,39 \text{ cal g}^{-1}$ com o menor teor de cinzas.

Silva et al. (2023) realizaram o projeto e análise econômica do pré-tratamento de cascas de café visando a produção de briquetes. As etapas consideradas foram a secagem, cominuição e densificação. Analisaram-se a influência de diferentes condições operacionais de secagem nos resultados econômicos a fim de encontrar a condição que minimize os custos. Os autores concluíram que o projeto foi economicamente viável, indicando ser uma boa alternativa para o aproveitamento energético das cascas de café.

A Tabela 3.4 apresenta os estudos revisados, destacando seus objetivos principais. Com exceção do trabalho de Silva et al. (2023), constatou-se que as pesquisas focaram em determinar as características fundamentais dos briquetes de casca de café, por meio de análises químicas elementar e imediata, poder calorífico e propriedades físicas. Além disso, investigaram a influência de diferentes tipos e proporções de aglutinantes nas características dos briquetes e qual combinação era mais vantajosa. Observou-se que os briquetes de casca de café possuem baixo teor de cinzas, alto teor de voláteis e poderes caloríficos adequados para substituição de combustíveis fósseis. Desse modo, suas propriedades são satisfatórias para aplicações domésticas e industriais. No entanto, a maioria dos estudos não analisou os aspectos

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

econômicos desse biocombustível sólido nem trataram sobre a geração de energia elétrica a partir dos briquetes, indicando a falta desse assunto na literatura.

Tabela 3.4 Objetivos principais de estudos anteriores sobre briquetes feitos de casca de café.

Referência	Objetivos
Suarez e Luengo (2003)	Determinação da eficiência de combustão do briquete em comparação com a lenha em fornos de panificação.
Okello, Kasisira e Okure (2011)	Otimização das condições de densificação dos briquetes de casca de café.
Protásio et al. (2012)	Comparação das propriedades físico-químicas e energéticas dos briquetes de casca de café <i>in natura</i> , carbonizados e torrificados.
Zerbinatti et al. (2014)	Caracterização físico-química e energética de briquetes de casca de café com galhos e folhas.
Cubero-Abarca et al. (2014)	Estudo da secagem da casca de café usando diferentes métodos e avaliação das propriedades energéticas, físicas e mecânicas de briquetes e <i>pellets</i> produzidos a partir deste resíduo.
Suryaningsih et al. (2017)	Caracterização físico-química de briquetes feitos de casca de coco, serragem, cascas de arroz e de café.
Lubwama e Yiga (2018)	Caracterização dos briquetes feitos de cascas de arroz e café para aplicações de cozimento doméstico em Uganda.
Raudah e Zulkifili (2018)	Otimização das condições de densificação dos briquetes de casca de café.
Yiga e Lubwama (2019)	Análise termogravimétrica de briquetes carbonizados de casca de amendoim, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e casca de café, com aglutinante de amido de mandioca.
Eshete (2019)	Caracterização físico-química dos briquetes de casca de café e serragem com diferentes tipos e proporções de aglutinantes (casca de batata, resíduos de papel e melão).
Alchalil et al. (2021)	Investigação do efeito da pressão de densificação nas propriedades físicas e de combustão de briquetes sem ligantes feitos de cascas de arroz e de café.
Tesfaye, Workie e Kumar (2022)	Produção e caracterização físico-química dos briquetes de casca de café carbonizada como uma fonte renovável de energia.
Setter e Oliveira (2022)	Análise de propriedades dos briquetes de casca de café com adição de lignina kraft para produção de co-produtos (<i>biochar</i> e bio-óleo) por meio da pirólise lenta.
Anggono et al. (2023)	Análise do PCS e das características de combustão de briquetes de casca de café.
Tesfaye, Tibesso e Aliyi (2023)	Caracterização físico-química de briquetes com diferentes proporções de casca de café carbonizada e argila como aglutinante.
Silva et al. (2023)	Projeto e análise econômica do pré-tratamento de cascas de café visando a produção de briquetes.

Fonte: Autora (2025).

3.8 Mercado internacional de briquetes de biomassa

Os briquetes de biomassa atenuam o impacto ambiental do descarte de resíduos e reduzem a dependência de combustíveis fósseis (COGNITIVE MARKET RESEARCH, 2024). O mercado internacional desse biocombustível se expandiu significativamente ao longo dos últimos anos devido às crescentes preocupações ambientais pela progressiva poluição mundial

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

(SPHERICAL INSIGHTS, 2024) e às iniciativas governamentais para conter os problemas, como subsídios, regulamentações e metas de energia renovável (COGNITIVE MARKET RESEARCH, 2024). A transição para fontes de energia renováveis está sendo estimulada também pela instabilidade dos preços dos combustíveis fósseis (TAIWAN NEWS, 2024) e pelas crescentes preocupações relacionadas à segurança energética (MARKET RESEARCH INTELLECT, 2025). Além disso, o crescimento do mercado é favorecido pela ampla disponibilidade de matérias-primas de baixo custo e pelos benefícios proporcionados pelos briquetes de biomassa, como combustão uniforme com alta densidade energética e menores emissões de GEE (SPHERICAL INSIGHTS, 2024; MARKWIDE RESEARCH, 2024). Adicionalmente, os avanços tecnológicos nos processos de produção de briquetes estão melhorando a eficiência e a qualidade (TAIWAN NEWS, 2024). Apesar do cenário positivo do mercado internacional, não foram encontrados dados quantitativos da produção mundial de briquetes de biomassa disponíveis na literatura. Com relação aos *pellets*, de acordo com a Bioenergy Europe (2024), a produção global foi de 48,8 milhões de toneladas em 2023, com crescimento nos últimos anos.

A produção e consumo de briquetes estão principalmente concentradas na Europa e América do Norte, enquanto a região Ásia-Pacífico está crescendo na maior taxa de crescimento anual composta (CAGR) dos últimos anos (24CHEMICAL RESEARCH, 2022). As principais empresas do setor estão predominantemente localizadas na União Europeia (BRIQUETTE MACHINE, 2024b). Em 2023, o mercado global de briquetes de biomassa foi avaliado em US\$ 896,67 milhões (SPHERICAL INSIGHTS, 2024). A América do Norte deteve a maior parcela do mercado, representando em torno de 40% da receita global, seguida pela Europa, com aproximadamente 30%. A Ásia-Pacífico deteve cerca de 23% da receita global, enquanto a América do Sul foi responsável por aproximadamente 5%. O Oriente Médio e a África corresponderam a cerca de 2% da receita mundial (COGNITIVE MARKET RESEARCH, 2024).

A Europa é líder global no consumo desse biocombustível sólido, com destaque para países como Alemanha, Suécia e Áustria (ALLIED MARKET RESEARCH, 2024). Com base na região, o continente foi o principal gerador de receitas em 2022 (ZION MARKET RESEARCH, 2023) e apresentou uma participação no mercado de consumo de quase 49% em 2024 (VALUATES REPORTS, 2024). Os briquetes possuem um papel fundamental no cumprimento das metas de energia renovável da União Europeia, sendo amplamente utilizados em sistemas de aquecimento para residências, escolas e grandes instalações. O foco da região em soluções energéticas sustentáveis, aliado à ampla disponibilidade de recursos de biomassa,

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

contribui para a sua adoção em larga escala (ALLIED MARKET RESEARCH, 2024). Os países europeus possuem o maior domínio da produção de biomassa densificada, principalmente das matérias-primas de madeira, carvão e turfa. Isso foi devido à falta de outra fonte de energia renovável, como é o caso das hidrelétricas no Brasil, e ao inverno rigoroso dessa região (GENTIL, 2008).

Na América do Norte, países como Estados Unidos e Canadá têm registrado uma adoção crescente de briquetes de biomassa, sendo o segundo maior local de consumo, com uma participação de 32% em 2024 (VALUATES REPORTS, 2024). Esses biocombustíveis são amplamente utilizados para aquecimento, especialmente nos setores residencial e comercial, além de serem empregados em aplicações industriais. O foco na redução das emissões de carbono tem desempenhado um papel importante no estímulo ao seu uso na região. De acordo com a U.S. Energy Information Administration (EIA), em 2024, a produção total de biomassa densificada nos Estados Unidos atingiu 13,17 milhões de toneladas, empregando 2.443 funcionários (ALLIED MARKET RESEARCH, 2024). Em 2019, essa produção foi estimada em cerca de 11,84 milhões de toneladas, representando um crescimento de 11,23% em 5 anos (FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2024).

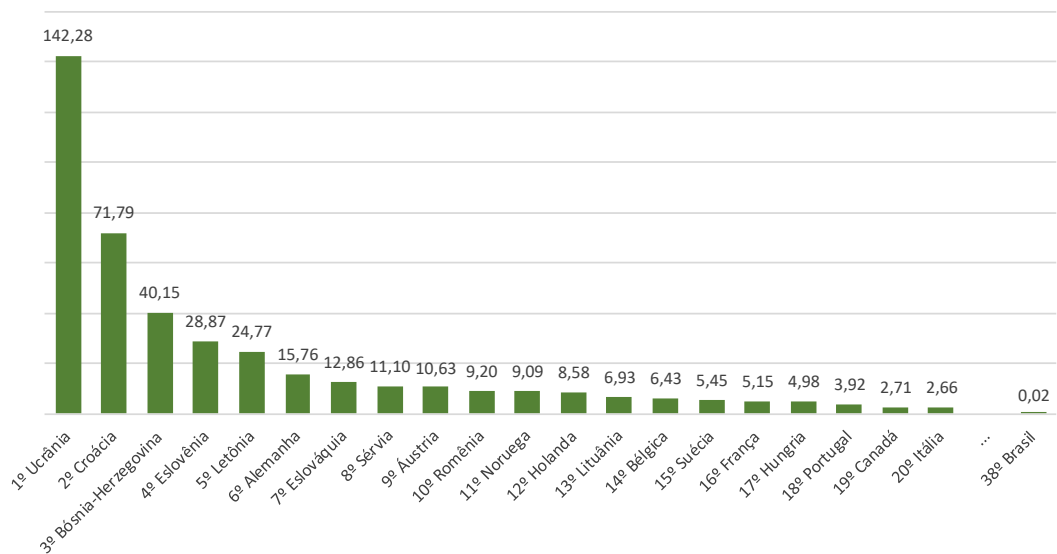
A região da Ásia-Pacífico tem se destacado como uma das áreas de maior crescimento no mercado de briquetes de biomassa, como parte de suas estratégias para promover energia renovável, juntamente com os abundantes recursos de biomassa da região. A crescente demanda energética em setores como geração de eletricidade e aplicações térmicas tem acelerado a adoção dos briquetes (UNIVDATOS, 2024). Índia e China são os principais participantes no crescimento desse biocombustível na região (FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2024). Como exemplo, em 2020, o governo chinês anunciou planos para substituir o carvão por briquetes de biomassa em milhares de caldeiras industriais, impulsionando o crescimento do mercado na região (UNIVDATOS, 2024). Neste país, os briquetes de biomassa são amplamente adotados em setores industriais e residenciais, refletindo um forte compromisso com a redução das emissões de GEE. Na Índia, os briquetes de biomassa também são uma alternativa ao carvão, apoiados por políticas governamentais que incentivam a energia renovável (ENERGYNEWS, 2024), como o Ministério de Energia Nova e Renovável que oferece a iniciativa de Assistência Financeira Central (CFA) para ajudar empresas a estabelecer unidades de fabricação de briquetes/*pellets* (SPHERICAL INSIGHTS, 2024). Além disso, o governo indiano determinou que todas as usinas termelétricas do país usem entre 5 –10% de biomassa junto com carvão para produzir energia (ALLIED MARKET RESEARCH, 2024).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com relação à América do Sul, o Brasil é considerado o principal produtor de briquetes de biomassa (SPHERICAL INSIGHTS, 2024; COGNITIVE MARKET RESEARCH, 2024), destacando-se pelo uso de bagaço de cana-de-açúcar, além de resíduos florestais (ABIB, 2019). O uso de resíduos agrícolas é particularmente prevalente em países em desenvolvimento, onde a agricultura é uma atividade econômica importante (DATAINTELO, 2024). O país também é considerado o maior produtor de *pellets* de biomassa da América do Sul (BIOENERGY EUROPE, 2024).

Entretanto, comparado ao restante do mundo, o Brasil ainda apresenta pequena produção de briquetes de biomassa. Como exemplo, o país enquadra-se no 38º lugar do ranking de principais países exportadores de briquetes de madeira, representando apenas 0,005% da exportação global. Alguns desafios devem ser superados para a consolidação do Brasil no mercado internacional de biocombustíveis sólidos densificados. No total, foram contabilizados 54 países. A Figura 3.10 apresenta os principais países exportadores do biocombustível e a posição do Brasil em 2023, segundo dados disponibilizados pela United Nations Commodities Trade (UN COMTRADE, 2025) da exportação de briquetes de madeira (sob a classificação do código 440132). Observa-se que, com exceção do Canadá, os maiores países exportadores estão localizados na Europa, reafirmando a importância do mercado nessa região. Apenas a Ucrânia foi responsável por 32,94% da exportação mundial.

Figura 3.10 Principais países exportadores de briquetes de madeira em 2023 (mil toneladas).



Fonte: Adaptado de UN Comtrade (2025).

Quanto à matéria-prima, o segmento de briquetes derivados de resíduos de madeira ocupa uma posição de destaque no mercado global (ENERGYNEWS, 2024; DATAINTELO, 2024). A disponibilidade de resíduos de serrarias e instalações de processamento de madeira torna essa matéria-prima uma opção viável (DATAINTELO, 2024). Além disso, o aumento no número de regulamentações rigorosas relacionadas à geração e ao descarte de resíduos pelas indústrias de processamento de madeira incentiva o crescimento de soluções alternativas (ZION MARKET RESEARCH, 2023). Esses resíduos são gerados substancialmente por ano. A título de exemplificação, em 2018, foram produzidas cerca de 1,1977 bilhões de toneladas de resíduos florestais no mundo todo (YU et al., 2021), sendo a produção de briquetes uma alternativa sustentável. Resíduos agrícolas representam outro segmento significativo de matéria-prima no mercado de briquetes de biomassa, exemplos são cascas de arroz, palha de trigo, talos de milho e bagaço de cana-de-açúcar (DATAINTELO, 2024).

Os segmentos baseados na aplicação incluem geração de energia elétrica, produção de energia térmica e outros usos. A maior demanda global concentra-se na geração de energia elétrica devido ao crescente foco na redução da dependência de combustíveis convencionais (ZION MARKET RESEARCH, 2023; SPHERICAL INSIGHTS, 2024). Os briquetes de biomassa servem como um combustível confiável e sustentável para usinas de geração de energia de pequena e média escala, principalmente em co-queima com carvão (GLOBE NEWSWIRE, 2023; DATAINTELO, 2024).

3.9 Mercado de briquetes de biomassa no Brasil

A densificação da biomassa para posterior utilização como biocombustível não é um processo recente. Como exemplo, a técnica de briquetagem foi adotada pela Ford Motor Company em Kingsford, Michigan, no ano de 1924. Nessa época, as carrocerias dos automóveis eram construídas com madeira, e os resíduos da produção eram transformados em briquetes, semelhantes aos que são vendidos atualmente (GENTIL, 2008). No entanto, no Brasil e no mundo, a densificação da biomassa tornou-se um processo comercial e de maior escala na segunda metade do século XX, a fim de utilizá-la para a geração de energia e também na alimentação animal (STELTE et al., 2012). O crescimento desse setor ganhou impulso a partir da crise do petróleo em 1973 com o objetivo de substituir o combustível fóssil (ABIMCI, 2022). Além disso, desde a Conferência de Estocolmo, ocorrida em 1972, os países buscam a meta de reduzir suas emissões de GEE ao diminuir o consumo de combustíveis fósseis (TAVARES; TAVARES, 2015).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Políticas energéticas para fomentar especificamente o uso de biocombustíveis sólidos, como *pellets* e briquetes, não foram implementadas no Brasil (FELFLI et al., 2011). O investimento nesse setor surgiu de iniciativas privadas. Em 1985, uma empresa brasileira da cidade de São Leopoldo, RS, começou a fabricar máquinas para a produção de briquetes, a BIOMAX Indústria de Máquinas Ltda., marcando o início da produção nacional. Anteriormente, as briquetadeiras eram importadas (TAVARES; TAVARES, 2014). Segundo Paiva (2022), os equipamentos utilizados no processo de produção dos briquetes no país são, em sua maioria, de fabricantes nacionais, como a BIOMAX e a Lippel, de Santa Catarina.

Dessa forma, entre *pellets* e briquetes, o biocombustível que mais se desenvolveu no mercado interno brasileiro foi o briquete. Comumente, os briquetes são utilizados em países em desenvolvimento, onde predominam os dispositivos mais rústicos e de alimentação manual, em que os briquetes substituem diretamente a lenha, principalmente para aquecimento e cocção, como em fogões e lareiras. Já os *pellets* geralmente são mais usados nos países desenvolvidos, onde geralmente os sistemas são automatizados, como fornos e caldeiras de alta eficiência (DIAS, 2002; SAMSON et al., 2005). Na Europa e Estados Unidos, também devido às suas dimensões reduzidas, há a possibilidade de abastecimento residencial através de tubos flexíveis que conectam diretamente caminhões-tanque aos silos alimentadores de caldeiras de baixa pressão (EMBRAPA, 2012). Desse modo, os *pellets* são comercializados amplamente no mercado externo, sendo esses países os principais destinos de venda (BIOENERGY EUROPE, 2024).

No Brasil, não existem estatísticas governamentais oficiais sobre a produção e venda de briquetes e *pellets*. A Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável (ABIB), uma entidade privada que apoia as indústrias brasileiras de biomassa e bioenergia, publica constantemente anuários sobre o mercado nacional desses dois biocombustíveis sólidos. O mais recente denomina-se “anuário players produtores briquete e *pellets* madeira Brasil” (EDITORA BRASIL BIOMASSA, 2024). No entanto, o acesso a esses documentos é restrito e requer pagamento, limitando a obtenção de dados recentes.

Em 2019, a produção de briquetes de biomassa no país atingiu cerca de 1,2 milhão de toneladas e a tendência era de crescimento nos anos posteriores (ABRACE, 2020 apud LIMA et al., 2024). Para fins de comparação, no mesmo ano, a produção brasileira de *pellets* foi equivalente a 850 mil toneladas, segundo o Relatório Estatístico da Bioenergy Europe (2020). Em 2021, a produção nacional de *pellets* foi estimada em 1,31 milhão de toneladas, um crescimento de 17% em relação a 2020 (BIOENERGY EUROPE, 2022). O crescimento considerável da produção é justificado pelo maior volume de *pellets* destinados à exportação

(ABIMCI, 2022). Assim, espera-se que a produção de briquetes também tenha evoluído nos últimos anos. De acordo com o relatório da 6WResearch (2025), o mercado brasileiro de briquetes vem se consolidando como uma alternativa sustentável aos combustíveis tradicionais, destacando-se como uma solução ecológica para aplicações industriais e sistemas de aquecimento. Esse crescimento é impulsionado por preocupações ambientais e pela crescente demanda por opções de combustível que ofereçam uma boa relação entre custo e benefício.

Segundo De Moraes et al. (2017), existem 73 empresas brasileiras que produzem biocombustíveis sólidos densificados (*pellets* e briquetes). Com relação às matérias-primas de biomassa, há forte predominância do uso de madeira (eucalipto e/ou pinus) para a produção, cerca de 87%. Aproximadamente 9% utilizam bagaço de cana-de-açúcar e 4% capim elefante. A maioria dos produtores de briquetes está associada com serrarias (ORELLANA, 2019). Sendo assim, a escolha da matéria-prima está diretamente ligada à disponibilidade de biomassa agroflorestal residual nas proximidades da planta de densificação. Os resíduos mais comuns são subprodutos das indústrias madeireiras locais. Devido à baixa densidade a granel e à alta umidade da maioria dos materiais lignocelulósicos, os custos de transporte tornam-se elevados, o que pode inviabilizar o projeto caso a matéria-prima esteja localizada a mais de 200 km da indústria de densificação (GARCIA et al., 2022). Apesar da expressiva quantidade de resíduos agrícolas e agroindustriais gerados no país, os *pellets* e briquetes produzidos a partir desses resíduos não possuem uma participação significativa. Esse fato reforça o potencial de resíduos não aproveitados no Brasil como fonte renovável de energia e demonstra a importância da diversificação da matriz energética brasileira.

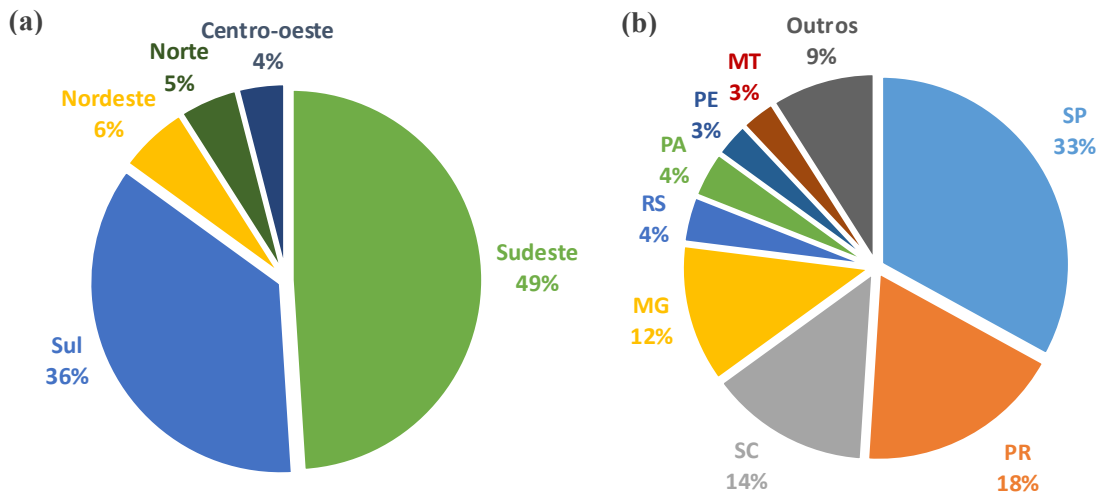
As indústrias produtoras estão localizadas principalmente nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Essas regiões são mais desenvolvidas no setor, abrigando 85% das empresas. Do total, 49% estão situadas na região Sudeste, enquanto 36% estão na região Sul, conforme mostra a Figura 3.11(a). Dentre os estados, 34% das indústrias produtoras estão localizadas em São Paulo, seguido do Paraná (18%), Santa Catarina (13%) e Minas Gerais (12%). A Figura 3.11(b) apresenta a participação dos demais estados. Além disso, grande parte são empresas de pequeno porte (DE MORAES et al., 2017). Orellana (2019) também afirmou que são poucos os fabricantes de *pellets* e briquetes no país, sendo a maioria instalada nas regiões Sul e Sudeste.

Os produtores brasileiros de briquetes e *pellets* comercializam seus produtos no mercado interno principalmente para geração de energia térmica em restaurantes, padarias, pizzarias, aviários, hotéis e hospitais (GARCIA et al., 2022). Em escala industrial, vendem para indústrias que utilizam combustíveis fósseis, como carvão mineral, gás natural e óleo combustível, e querem substituí-los (ABIB, 2019). Além disso, comercializam para indústrias de uso intensivo

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

de energia que usam lenha em seus processos, como fábricas de tijolos e cimento (ASAMOA et al., 2016). As plantas brasileiras de briquetes de biomassa concentram suas vendas no mercado interno e apenas algumas empresas são voltadas para exportação, principalmente para a Europa e Estados Unidos (WOOD PELLET MILL, 2024).

Figura 3.11 Distribuição das indústrias brasileiras produtoras de *pellets* e briquetes (a) por região e (b) por estado.



Fonte: Adaptado de De Moraes et al. (2017).

3.10 Desafios do mercado de briquetes de biomassa no Brasil

Existem desafios que contribuem para a pequena participação da biomassa densificada brasileira na composição da matriz energética e no mercado internacional. Um dos principais é a concorrência com combustíveis tradicionais, como lenha e carvão. Embora os briquetes apresentem vantagens ambientais, fatores como os hábitos de consumo e as infraestruturas energéticas já consolidadas dificultam sua ampla adoção (6WRESEARCH, 2025). Além disso, o alto investimento inicial para implementar instalações de produção de briquetes e a falta de conscientização pública contribuem para o ritmo lento de crescimento do mercado (6WRESEARCH, 2025; MARKWIDE RESEARCH, 2024). Briquetes e seus benefícios são desconhecidos para muitos potenciais consumidores e empresários (ASAMOA et al., 2016). Superar esses desafios exige suporte político e colaboração em toda a indústria para promover os benefícios dos briquetes (6WRESEARCH, 2025).

Outro obstáculo refere-se à competição com outras fontes renováveis de energia, principalmente energia solar e eólica, as quais ganharam força substancial devido à sua disponibilidade abundante e custos decrescentes (ALLIED MARKET RESEARCH, 2024;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

DATAINTELO, 2024; MARKWIDE RESEARCH, 2024). Essas fontes alternativas de energia recebem mais atenção e financiamento de governos e investidores, limitando os recursos disponíveis para o desenvolvimento de briquetes de biomassa (ALLIED MARKET RESEARCH, 2024; DATAINTELO, 2024). A falta de políticas favoráveis que promovam a produção e utilização desse biocombustível sólido dificulta o crescimento do mercado (DATAM INTELLIGENCE, 2024). Como exemplo, a biomassa densificada não foi incluída em nenhum programa de governo no Brasil, diferentemente dos biocombustíveis líquidos. Segundo Santos et al. (2015), a ausência de incentivos e ações governamentais focadas na valorização da produção de briquetes no país tem levado ao desperdício anual de uma grande quantidade de biomassa residual, uma situação que permanece após uma década.

A disponibilidade inconsistente da matéria-prima de biomassa representa outra limitação (MARKWIDE RESEARCH, 2024). Isto é, o fornecimento da matéria-prima, que pode incluir resíduos agrícolas e resíduos florestais, está sujeito a diversos fatores, como variações sazonais, condições climáticas e usos concorrentes. Desse modo, a falta de consistência na disponibilidade pode causar interrupções na cadeia de suprimentos, impactando a produção e distribuição dos briquetes. Além disso, pode afetar a estabilidade dos preços, dificultando que os produtores de briquetes compitam efetivamente com outras fontes de energia. Adotar estratégias aprimoradas de gerenciamento e diversificação de recursos é essencial para expandir o mercado (COGNITIVE MARKET RESEARCH, 2024). É imprescindível investir em infraestrutura e logística adequadas para assegurar uma cadeia de suprimentos estável e econômica para os briquetes (TAIWAN NEWS, 2024).

Outro obstáculo, é a heterogeneidade da matéria-prima (TAVARES; TAVARES, 2014). As biomassas apresentam uma diversidade muito grande quanto às suas características, como teor de cinzas, umidade, densidade, dentre outros, o que exige tratamentos diferenciados para cada tipo (DE MORAES et al., 2017). Controlar as características da biomassa, como umidade e tamanho de partícula, para condições ideais é um desafio adicional na indústria que lida com a produção de briquetes (ZION MARKET RESEARCH, 2023). Assim, há dificuldade em estabelecer padrões de qualidade uniformes para os biocombustíveis sólidos (DATAINTELO, 2024). Isso pode elevar o investimento e os custos operacionais do projeto, pela necessidade dos processos de pré-tratamento da biomassa, por exemplo.

Os altos custos com logística também são responsáveis pelo lento desenvolvimento desse setor no Brasil. O grande volume e alta umidade inicial dos resíduos refletem na dificuldade de transporte, fatores que elevam os custos. Uma solução para isso seria a produção e utilização do biocombustível sólido na própria indústria geradora de resíduos. Outra

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

alternativa consiste em incentivar os agricultores a fornecerem os resíduos moídos e secos ao sol a fim de ser possível transportar grandes quantidades e reduzir custos de pré-tratamento (ASAMOAH et al., 2016). Além disso, o custo elevado da energia elétrica encarece o preço do produto final, e os altos custos com transporte rodoviário podem inviabilizar a comercialização a longas distâncias (GARCIA, 2017).

A Tabela 3.5 sumariza os principais desafios atrelados ao setor de biomassa densificada no Brasil e quais são as recomendações. Superar esses obstáculos são de extrema importância para a expansão dos briquetes na matriz energética brasileira e para a consolidação do país no mercado externo. Somente assim, os briquetes se tornarão competitivos em relação às fontes tradicionais de energia.

Tabela 3.5 Desafios do mercado brasileiro de briquetes de biomassa e algumas recomendações.

Desafios	Recomendações
Competição com combustíveis tradicionais, principalmente lenha e carvão, e fontes de energia renovável, como solar e eólica. Alto investimento inicial. Falta de conscientização dos potenciais consumidores. Falta de políticas favoráveis.	Investir em políticas públicas, como a criação de um programa de governo para fomentar a produção e consumo de briquetes a partir de resíduos agrícolas.
Disponibilidade inconsistente da matéria-prima de biomassa.	Adotar estratégias aprimoradas de gerenciamento e diversificação de recursos.
Desafios logísticos: dificuldade de transporte da biomassa <i>in natura</i> e altos custos com transporte rodoviário.	Produção e utilização do biocombustível sólido na própria indústria geradora de resíduos ou incentivar os agricultores a fornecerem os resíduos moídos e secos.
Heterogeneidade da matéria-prima.	Pré-tratamento dos resíduos.

Fonte: Adaptado de 6WResearch (2024); Allied Market Research (2024); Asamoah et al. (2016); Cognitive Market Research (2024); DataM Intelligence (2024); Garcia (2017); Markwide Research (2024).

3.11 Perspectivas futuras do mercado internacional de briquetes de biomassa

A expectativa do mercado global de briquetes de biomassa é um crescimento expressivo, com projeções de atingir 1,9 bilhão de dólares até 2033. Em 2023, o valor desse setor foi estimado em 0,9 bilhão de dólares, e espera-se que ele apresente uma CAGR de 7,9% entre 2024 e 2033 (ALLIED MARKET RESEARCH, 2024). Esse avanço é impulsionado principalmente pelo aumento do interesse em fontes de energia renováveis e por políticas públicas focadas na redução das emissões de GEE (ENERGYNEWS, 2024).

Em relação à análise regional, a Ásia-Pacífico se destacou como uma das áreas de crescimento mais acelerado no mercado de briquetes de biomassa nos últimos anos, e deverá registrar a expansão mais significativa entre as regiões no período de 2023 e 2033 (GLOBE

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

NEWSWIRE, 2022; UNIVDATOS, 2024; SPHERICAL INSIGHTS, 2024), com a maior CAGR de 10,0% entre 2024 a 2031 (COGNITIVE MARKET RESEARCH, 2024). Os avanços tecnológicos da China na produção de combustível de biomassa, juntamente com os esforços do governo indiano para promover o uso de briquetes como fonte energética, devem impulsionar o crescimento regional (ZION MARKET RESEARCH, 2023). Além disso, a rápida industrialização, o crescimento populacional e o aumento da demanda por energia incentivam o mercado de briquetes na região (MARKWIDE RESEARCH, 2024).

Espera-se que a Europa lidere o mercado de briquetes de biomassa no período de 2023 a 2033, devido à crescente adoção de energia renovável, aos esforços para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e às regulamentações rigorosas de emissões (SPHERICAL INSIGHTS, 2024; MARKWIDE RESEARCH, 2024). A região abriga um grande número de fabricantes de briquetes, e o combustível por eles produzido é amplamente empregado em projetos de geração de energia em larga escala (SPHERICAL INSIGHTS, 2024). A Europa está prevista para ser responsável por mais de 49% da participação de mercado até 2027 (24CHEMICAL RESEARCH, 2022). Com relação à América do Norte, espera-se que testemunhe um crescimento sustentável no mercado de briquetes, atribuído à crescente adoção do produto na produção de energia térmica (BRIQUETTE MACHINE, 2024b), a conscientização ambiental em expansão e as iniciativas governamentais favoráveis (MARKWIDE RESEARCH, 2024).

De acordo com a Cognitive Market Research (2024), o mercado latino-americano representará mais de 5% da receita global e crescerá a uma CAGR de 7,4% de 2024 a 2031. Especificamente, o mercado de combustível de briquete de biomassa do Brasil está projetado para crescer a uma CAGR de 8,0% durante o mesmo período. O país se destaca como maior produtor da América Latina e há várias expectativas quanto ao seu mercado (COGNITIVE MARKET RESEARCH, 2024). O Brasil possui matérias-primas abundantes, o que o torna promissor para a adoção de briquetes de biomassa (DATAINTELO, 2024). De acordo com as Projeções do Agronegócio Brasileiro 2022/23 a 2032/33, elaborado pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2023b), espera-se um acréscimo de 24,1% sobre a safra atual de grãos, aumento de 15,4% sobre a produção atual de café e um crescimento médio de 22,3% na produção de frutas. Isso aumenta a geração de resíduos agrícolas e agroindustriais, ampliando a biomassa disponível para *pellets* e briquetes e diversificando as fontes de matéria-prima.

Prevê-se que a madeira permaneça como a principal matéria-prima para produção de briquetes ao longo do período de 2024 a 2033, devido ao baixo custo e operação viável (PR NEWSWIRE, 2024; FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2024). No entanto, estima-se que os

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

resíduos agrícolas apresentem um crescimento significativo até 2032 (DATAINTELO, 2024). Em vez de depender apenas de fontes de madeira, a necessidade de matéria-prima de origem responsável está encorajando os fabricantes a usar resíduos agrícolas, como cascas de arroz e de coco. Isso contribui para a gestão de resíduos e reduz a pressão sobre os recursos florestais (VERIFIED MARKET REPORTS, 2025).

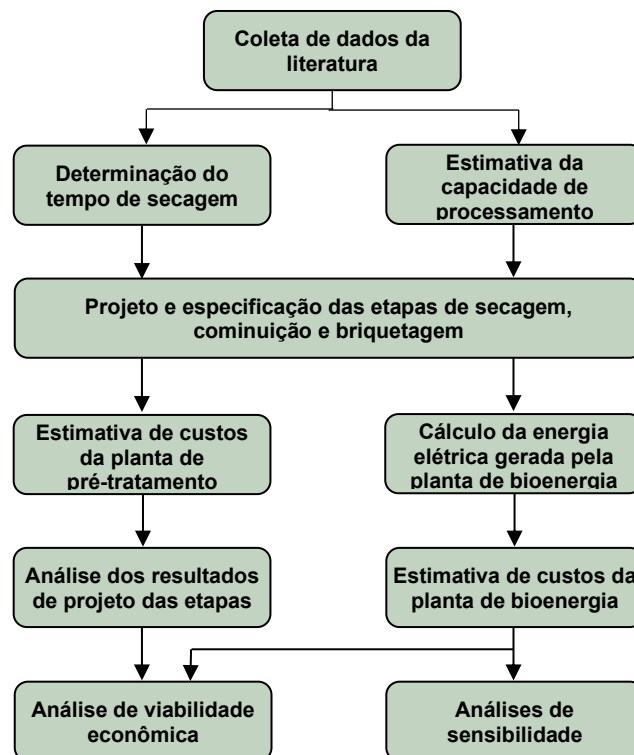
Com base nas aplicações, o mercado de briquetes de biomassa é segmentado em geração de energia, produção de energia térmica e outros usos. Dentre estes, a geração de energia deve crescer a uma taxa considerável até 2028, por ser uma alternativa renovável ao carvão e outros combustíveis fósseis (GLOBE NEWSWIRE, 2022). O uso crescente de briquetes de biomassa em co-queima com carvão em usinas de energia é apontado como uma oportunidade no mercado. Essa prática representa um potencial significativo para o setor de briquetes, particularmente em meio à transição global para práticas energéticas mais sustentáveis, sem a necessidade de revisões substanciais da infraestrutura atual (ALLIED MARKET RESEARCH, 2024).

4 METODOLOGIA

A metodologia envolveu a formulação de um modelo para projeto das etapas de secagem e cominuição, e especificação da etapa de densificação. A análise econômica considerou dois cenários diferentes: a receita pela comercialização dos briquetes de casca de café (planta de pré-tratamento) e a receita pela venda de energia elétrica gerada a partir da combustão direta dos briquetes (planta de bioenergia). Optou-se pela produção de briquetes em vez de *pellets*, pois, além de ser historicamente o biocombustível densificado mais difundido no Brasil, o fabricante de briquetadeiras estava mais acessível para a coleta de informações importantes para o estudo.

Esta seção foi dividida em sete subseções principais: estimativa da capacidade de processamento, projeto e especificação das etapas de pré-tratamento de casca de café, estimativa de custos da planta de pré-tratamento de casca de café, energia elétrica gerada pela planta de bioenergia, estimativa de custos da planta de bioenergia, análise de viabilidade econômica e análise de sensibilidade aos parâmetros técnicos e econômicos da planta de bioenergia. A Figura 4.1 apresenta o esquema da metodologia adotada.

Figura 4.1 Esquema da metodologia.



Fonte: Autora (2025).

4.1 Estimativa da capacidade de processamento

A viabilidade da planta de bioenergia está associada, principalmente, com a quantidade de biomassa a ser processada. O primeiro passo consiste em determinar a vazão de biomassa seca (F_s), a qual é uma variável operacional importante baseada na capacidade de processamento disponível, ou seja, estimada a partir da quantidade de casca de café total gerada no beneficiamento dos frutos. A vazão mássica de biomassa seca foi determinada pela Equação (4.1). O procedimento de cálculos para obtenção da capacidade foi baseado em Silva et al. (2023).

$$F_s = 1000(F_u - F_u X_{bu}^1) \quad (4.1)$$

Sendo F_s dado em kg h^{-1} , X_{bu}^1 o teor de umidade da casca de café na entrada do secador (base úmida), considerada igual a 80% (base úmida) (TRAN et al., 2020; JIAMJARIYATAM et al., 2022), e F_u a vazão mássica de biomassa úmida [t h^{-1}], a qual foi calculada por meio da Equação (4.2).

$$F_u = \frac{m_r}{t_{op}} \quad (4.2)$$

Sendo t_{op} o tempo de operação anual da planta, igual a 80% de horas totais de um ano (DE SOUZA et al., 2021), isto é, 7008 h ano^{-1} , e m_r a quantidade de casca de café gerada pelo método via úmida [t ano^{-1}], estimada segundo a Equação (4.3).

$$m_r = m_{wc}p \quad (4.3)$$

Sendo p a porcentagem de casca de café gerada no beneficiamento via úmida, igual a aproximadamente 111%. Esta é a razão entre a porcentagem de casca de café (43,2%) e a porcentagem do grão de café (38,9%) com relação ao fruto inteiro (ESQUIVEL; JIMÉNEZ, 2012). O café é comercializado em grãos, após o beneficiamento. Assim, estima-se que a quantidade de casca gerada seja superior à de grãos produzidos, pois a casca representa uma parcela maior do fruto em comparação ao grão. m_{wc} refere-se à quantidade de café em grão produzida por meio da via úmida (m_{wc}) [t ano^{-1}], determinada de acordo com a Equação (4.4).

$$m_{wc} = m_t w \quad (4.4)$$

Sendo w a porcentagem de café produzido pelo método via úmida no Brasil, cerca de 25% (SILVA, 2012), e m_t a quantidade total de café em grão produzida em cada uma das cinco regiões do Brasil [$t \text{ ano}^{-1}$], calculada por meio da Equação (4.5).

$$m_t = A_c P_r \quad (4.5)$$

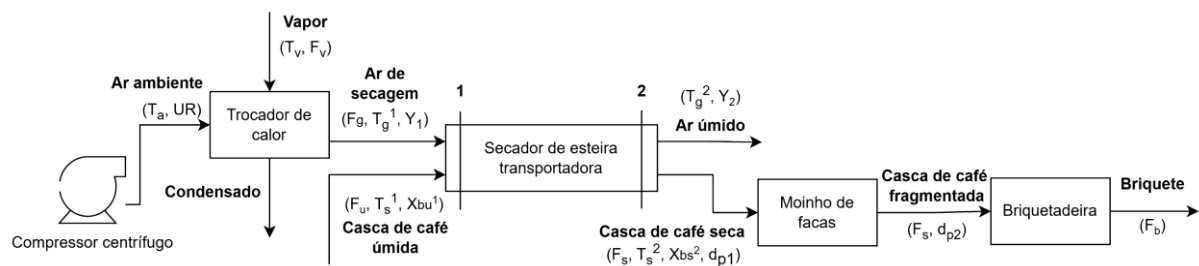
Sendo A_c a área colhida de café [ha ano^{-1}] e P_r a produtividade média de café [$t \text{ ha}^{-1}$].

Os cálculos de capacidade de processamento descritos foram realizados para cada uma das cinco regiões do Brasil: Sudeste, Nordeste, Norte, Sul e Centro-Oeste. A área colhida e a produtividade média utilizadas foram obtidas com base em dados de 2024 disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025).

4.2 Projeto e especificação das etapas de pré-tratamento de casca de café

O pré-tratamento de casca de café, proveniente do processamento úmido, compreende a etapa de secagem, que inclui um trocador de calor, para aquecimento do ar ambiente até a temperatura de secagem (selecionada posteriormente na Seção 4.2.3), um secador tipo esteira transportadora e um compressor centrífugo para transporte de ar através do aquecedor e secador. Posteriormente, as cascas de café secas são submetidas à etapa de cominuição, que consiste em um moinho de facas, recomendado para fragmentação de biomassas leves e flexíveis. A última etapa corresponde à densificação, na qual é utilizada uma máquina de briquetagem ou briquetadeira para formar o briquete de casca de café, produto final desejado. A Figura 4.2 ilustra os equipamentos do pré-tratamento e as variáveis envolvidas nos processos.

Figura 4.2 Esquema da planta de pré-tratamento da casca de café.

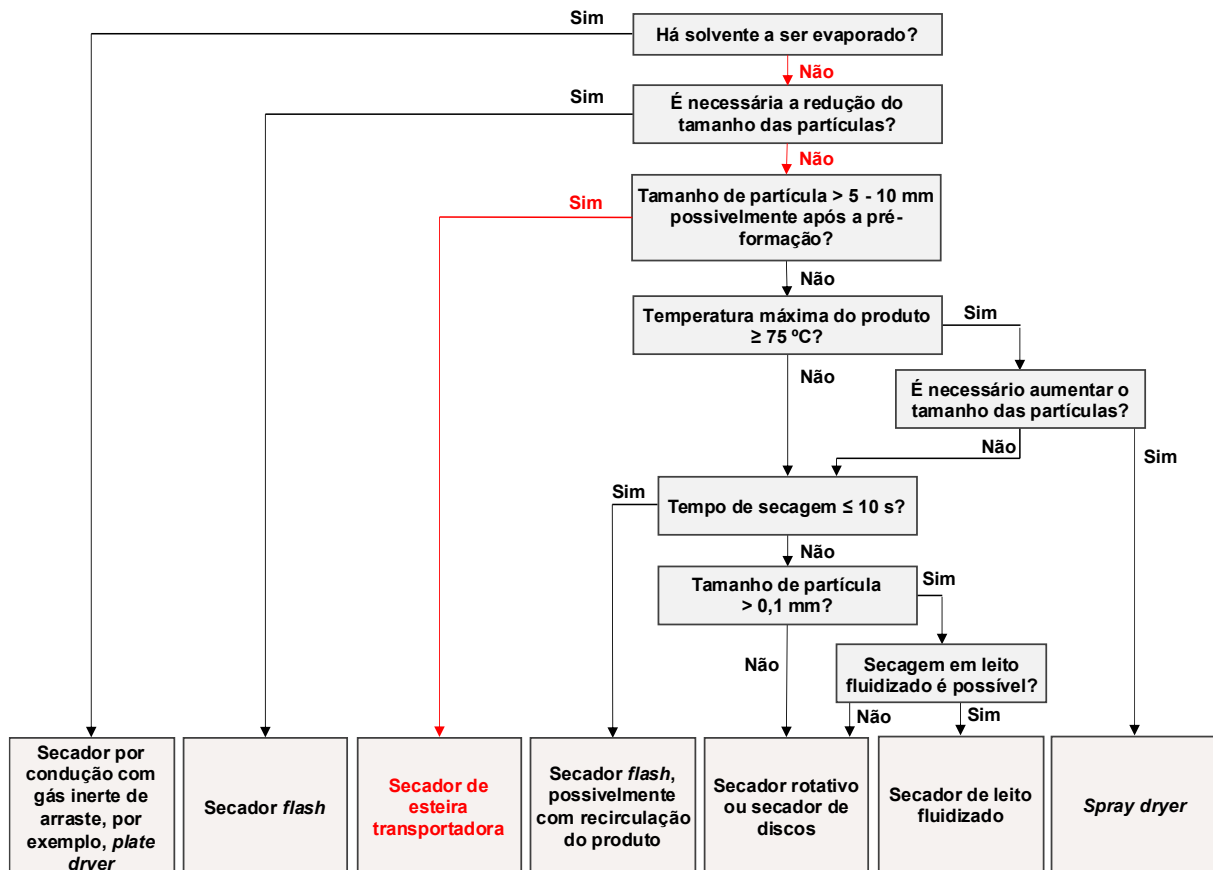


Fonte: Autora (2025).

4 METODOLOGIA

A seleção do secador de esteira transportadora seguiu o método descrito por van't Land (2012) para secadores contínuos, o qual se baseia principalmente nas características físicas do material particulado. A Figura 4.3 apresenta o fluxograma utilizado para decisão do tipo de secador. As respostas que levaram ao secador de esteira para a casca de café foram representadas em fonte vermelha. Neste caso, não houve solvente a ser evaporado e não teve necessidade de reduzir as partículas do material antes da secagem. Assim, como o tamanho de partícula da casca de café é geralmente maior que 5 mm (entre 5 a 15 mm) (MORENO-RAMÓN; QUIZEMBE; IBÁÑEZ-ASENSIO, 2014), o secador de esteira transportadora foi selecionado.

Figura 4.3 Fluxograma para a seleção do tipo de secador adequado para a casca de café.



Fonte: Adaptado de van't Land (2012).

O trocador de calor foi necessário, pois o secador de esteira transportadora opera a temperaturas mais baixas que outros secadores (como o rotativo), sendo controladas até 200 °C (LI et al., 2012). O trocador de calor permite o aquecimento do ar ambiente, utilizando vapor d'água produzido na caldeira, até a temperatura adequada do ar na entrada da câmara de secagem.

Assim, o ar de secagem consiste no ar ambiente aquecido. Foi selecionado o compressor centrífugo para transporte do ar ambiente através do trocador de calor e secador. O compressor foi analisado separadamente do secador a fim de avaliar a potência requerida e o impacto do seu consumo energético no custo final do briquete. A escolha por esse tipo de compressor, em detrimento de um soprador, deve-se à sua capacidade de fornecer vazões de ar com pressões mais altas de forma contínua e estável, o que é desejável no processo de secagem para garantir uniformidade térmica e eficiência operacional. Os sopradores, embora mais simples e econômicos, geralmente operam com pressões mais baixas e podem não atender adequadamente à necessidade de manter uma boa transferência de calor no trocador, especialmente quando há quedas de pressão no sistema.

O projeto da planta de pré-tratamento de casca de café está relacionado a duas operações principais, as etapas de secagem e cominuição, já que para a etapa de densificação utilizando uma briquetadeira é necessário apenas especificar a capacidade necessária. Assim, o projeto das etapas de secagem e cominuição será apresentado com mais detalhes nas Seções 4.2.1 e 4.2.2.

4.2.1 Projeto da etapa de secagem

O dimensionamento do secador consistiu em estimar a área de transferência de calor (A_d) [m^2] e o comprimento da esteira (L) [m]. A área foi calculada conforme a Equação (4.6), que relaciona a vazão de biomassa seca (F_s), a massa específica aparente da casca de café (ρ_b) [$kg\ m^{-3}$], a altura do leito de sólidos (H) [m] e o tempo de secagem (τ) [h], que representa o tempo de residência das partículas no secador (SOUZA et al., 2021). O fator de correção (1,42) foi aplicado para considerar os efeitos do aumento de escala do secador (VAN'T LAND, 2012), tendo em vista que os dados de cinética de secagem utilizados para estimar τ foram obtidos a partir de experimentos em escala laboratorial. Assim, busca-se evitar imprecisões no dimensionamento do secador relacionadas à limitação da escala experimental. Com o fator de correção, o projeto do secador deixa de ser estritamente baseado nas condições experimentais, passando a ser mais adequado para aplicações em escala industrial.

$$A_d = 1,42 \left(\frac{F_s \tau}{H \rho_b} \right) \quad (4.6)$$

O tempo de secagem (τ) [s] foi obtido pela Equação (4.7), de acordo com Silva et al. (2023), os quais realizaram experimentos de cinética de secagem da casca de café proveniente

4 METODOLOGIA

da via úmida em secador de camada delgada em escala laboratorial. Os autores utilizaram as seguintes condições operacionais: temperatura do ar de 90 a 113,53 °C, velocidade do ar de 1,00 a 2,18 m s⁻¹, e espessura do leito de biomassa de 0,32 a 1 cm.

$$\tau = -t_c \ln \left(\frac{X_{bs}^2 - X_{eq}}{X_{bs}^1 - X_{eq}} \right) = -t_c \ln(MR) \quad (4.7)$$

Onde t_c é o tempo característico [s], X_{bs}^2 é o teor de umidade da casca de café na saída do secador (base seca), X_{eq} é o teor de umidade gás-sólido de equilíbrio dinâmico (base seca), X_{bs}^1 é o teor de umidade da casca de café na entrada do secador (base seca) e MR a razão de umidade [adimensional].

A equação algébrica para determinar o tempo característico levou em consideração a espessura do leito de biomassa (H) [cm], a temperatura de entrada do ar de secagem (T_g^1) [°C] e a velocidade do ar (v) [m s⁻¹] (Equação 4.8) (SILVA et al., 2023).

$$t_c = 2568,115 - 15,82T_g^1 - 133,4925v - 102,193H \quad (4.8)$$

O comprimento da esteira foi obtido em função da área de transferência de calor (A_d) [m²] e da largura do secador (W) [m] (Equação (4.9)).

$$L = \frac{A_d}{W} \quad (4.9)$$

A velocidade da esteira transportadora (u), em cm s⁻¹, foi obtida de acordo com a Equação (4.10).

$$u = \frac{100L}{3600\tau} \quad (4.10)$$

A potência necessária para movimentar a esteira (E_d) [kW] foi estimada pela Equação (4.11) (MAROULIS; SARAVACOS; MUJUMDAR, 2015).

$$E_d = 2LF_c(1 + X_{bs}^1) \quad (4.11)$$

4 METODOLOGIA

Sendo F_c a vazão mássica de biomassa seca [$t\ h^{-1}$].

O projeto do sistema de aquecimento do ar de secagem consistiu na determinação da área de transferência de calor do trocador de calor (A_h) (Equação (4.12)). Foi considerado um trocador de calor casco e tubo contracorrente 1-1 ideal, sem perdas de energia para o meio ambiente. Esse tipo de trocador de calor foi selecionado, visto que é, de longe, o mais utilizado em processos industriais para uma ampla gama de aplicações, especialmente em sistemas de aquecimento de gases por meio de vapor d'água, em contato indireto. Uma das principais vantagens do trocador de calor casco e tubo é a sua configuração, capaz de proporcionar uma grande área de superfície de contato em um pequeno volume, além de ter procedimentos de projeto bem estabelecidos (TOWLER; SINNOTT, 2022).

$$A_h = \frac{Q_t}{U\Delta T_{ln}} \quad (4.12)$$

Sendo U o coeficiente global de transferência de calor [$W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$], ΔT_{ln} a diferença de temperatura média logarítmica [$^\circ C$] e Q_t a energia térmica total requerida no processo de secagem [W], conforme mostrado pela Equação (4.13) (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015).

$$Q_t = \frac{1000}{3600} (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5)(1 + \beta) \quad (4.13)$$

O parâmetro β representa um fator adimensional associado às perdas de calor devido à condução entre a superfície externa do secador e o ar atmosférico e, principalmente, à radiação (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015). Neste trabalho, adotou-se uma análise de segurança (conservativa), considerando $\beta = 5\%$, com o objetivo de assegurar o fornecimento adequado de energia térmica ao processo de secagem. Ressalta-se que, na prática, essa porcentagem de perda pode ser até mesmo inferior.

A energia requerida para evaporar a água da biomassa (Q_1) [$kJ\ h^{-1}$] foi calculada pela Equação (4.14) (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015).

$$Q_1 = m_w \Delta H_v \quad (4.14)$$

4 METODOLOGIA

Em que ΔH_v refere-se ao calor latente de vaporização da água, igual a 2350 kJ kg^{-1} , e m_w à vazão mássica de água evaporada [kg h^{-1}], obtida pelo balanço de massa por meio da Equação (4.15).

$$m_w = F_s(1 + X_{bs}^1) - F_s(1 + X_{bs}^2) \quad (4.15)$$

A energia utilizada para aquecer o vapor d'água da temperatura de bulbo úmido para a temperatura de saída do ar de secagem (Q_2) [kJ h^{-1}] foi calculada pela Equação (4.16) (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015).

$$Q_2 = m_w c_{pv} (T_g^2 - T_w) \quad (4.16)$$

Sendo T_w a temperatura de bulbo úmido [$^{\circ}\text{C}$], T_g^2 a temperatura de saída do ar de secagem [$^{\circ}\text{C}$] e c_{pv} o calor específico do vapor d'água, igual a $1,88 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. T_w foi avaliada na condição de entrada do secador, de acordo com a metodologia proposta por van't Land (2012). T_g^2 foi estimada de acordo com a Equação (4.17) (VAN'T LAND, 2012).

$$NUT = \ln \left(\frac{T_w - T_g^1}{T_w - T_g^2} \right) \quad (4.17)$$

Em que NUT é o número de unidades de transferência de calor, igual a 0,5 para um secador de esteira transportadora (KEEY, 1978), e T_g^1 a temperatura de entrada do ar de secagem [$^{\circ}\text{C}$].

A energia usada para aquecer a água presente na biomassa a partir da temperatura ambiente até a temperatura de bulbo úmido (Q_3) [kJ h^{-1}] foi obtida pela Equação (4.18) (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015).

$$Q_3 = m_w c_{pw} (T_w - T_s^1) \quad (4.18)$$

Sendo c_{pw} o calor específico da água, igual a $4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, e T_s^1 a temperatura do sólido na entrada do secador, considerada usualmente igual a temperatura ambiente de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

A energia necessária para aquecer os sólidos no secador (Q_4) [kJ h^{-1}] foi determinada pela Equação (4.19) (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015).

4 METODOLOGIA

$$Q_4 = F_s c_{ps} (T_s^2 - T_s^1) \quad (4.19)$$

Sendo c_{ps} o calor específico do sólido [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$] e T_s^2 a temperatura do sólido na saída do secador [$^\circ\text{C}$], a qual foi considerada igual à T_g^2 .

A energia utilizada para aquecer a água remanescente na biomassa (Q_5) [kJ h^{-1}] foi obtida de acordo com a Equação (4.20) (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015).

$$Q_5 = F_s X_{bs}^2 c_{pw} (T_s^2 - T_s^1) \quad (4.20)$$

A diferença de temperatura média logarítmica foi calculada de acordo com a Equação (4.21), considerando a condensação do vapor d'água (TOWLER; SINNOTT, 2022).

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_v - T_a) - (T_v - T_g^1)}{\ln \left[\frac{(T_v - T_a)}{(T_v - T_g^1)} \right]} \quad (4.21)$$

Onde T_a é a temperatura do ar ambiente [$^\circ\text{C}$] e T_v é a temperatura do vapor d'água [$^\circ\text{C}$].

O projeto do sistema de transporte do ar foi baseado na estimativa da potência necessária para o trabalho mecânico do compressor centrífugo (E_m) [kW], determinada conforme a Equação (4.22) (VAN'T LAND, 2012; MYLLYMAA; HOLMBERG; AHTILA, 2020).

$$E_m = \frac{\Delta P_T \dot{V}_1}{3600 \eta 1000} \quad (4.22)$$

Sendo η a eficiência do motor e pás que, por análise conservadora, foi considerada igual a 50% (VAN'T LAND, 2012), ΔP_T a queda de pressão total no sistema [Pa] e \dot{V}_1 a vazão volumétrica de ar [$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$], calculada conforme a Equação (4.23).

$$\dot{V}_1 = \frac{F_g}{\rho_g} \quad (4.23)$$

4 METODOLOGIA

Sendo ρ_g a massa específica do ar avaliada na temperatura de entrada do secador, igual a $0,95 \text{ kg m}^{-3}$, e F_g a vazão mássica de ar fornecida ao sistema [kg h^{-1}], determinada pela Equação (4.24).

$$F_g = 3600v\rho_g A_d \quad (4.24)$$

A queda de pressão total no sistema (ΔP_T) considerou a soma da queda de pressão nas tubulações (ΔP_t), no sistema de aquecimento (ΔP_h) e no secador (ΔP_d), como mostra a Equação (4.25) (VAN'T LAND, 2012).

$$\Delta P_T = \Delta P_t + \Delta P_h + \Delta P_d \quad (4.25)$$

A queda de pressão nas tubulações (ΔP_t) [Pa] foi estimada por meio da Equação (4.26) (VAN'T LAND, 2012).

$$\Delta P_t = f\rho_g \frac{v^2}{2} \left(\frac{L_t}{D} \right) \quad (4.26)$$

Sendo L_t o comprimento da tubulação [m], D o diâmetro da tubulação [m] e f o fator de atrito de Fanning, determinado de acordo com a correlação de Blasius (Equação (4.27)).

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} = \frac{0,316}{\left(\frac{\rho_g D v}{\mu} \right)^{0,25}} \quad (4.27)$$

Em que Re é o número de Reynolds e μ a viscosidade do ar, igual a $2.0 \times 10^{-5} \text{ N s m}^{-2}$.

A queda de pressão no sistema de aquecimento de ar (ΔP_h), utilizando vapor como fluido de serviço no trocador de calor, foi adotada como 400 Pa. Esse valor foi baseado nos trabalhos de Myllymaa, Holmberg e Ahtila (2019 e 2020), os quais também utilizaram secador tipo esteira transportadora.

A queda de pressão no leito de biomassa do secador (ΔP_d) [Pa] foi estimada de acordo com a Equação (4.28) (VAN'T LAND, 2012).

$$\Delta P_d = H\rho_b g \quad (4.28)$$

Sendo g a aceleração da gravidade, igual a $9,8 \text{ m s}^{-2}$.

4.2.2 Projeto da etapa de cominuição

O equipamento de cominuição escolhido para a moagem da casca de café foi o moinho de facas. Para determinar a potência necessária para fragmentar o material (E_c) [kW] foi utilizado o método de Bond, conforme mostra a Equação (4.29) (SILVA et al., 2023).

$$E_c = 0,1F_c w_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_{p2}}} - \frac{1}{\sqrt{d_{p1}}} \right) \quad (4.29)$$

Sendo d_{p2} e d_{p1} os diâmetros médios das partículas de biomassa fragmentada e *in natura* [cm], respectivamente, e w_i o *working index* [adimensional].

O *working index* consiste em um índice adimensional que expressa a resistência do material à moagem, sendo utilizado para estimar a energia necessária para reduzir sua granulometria. Quanto maior o valor do *working index*, maior a resistência do material à cominuição e, conseqüentemente, maior o consumo de energia. É dependente da natureza do sólido e determinado empiricamente por uma série de ensaios padronizados. Contudo, este valor não é muito conhecido de forma concisa para biomassa. O valor médio estimado pela literatura, a partir de testes feitos por Bond, para moagem por via úmida é igual a 13,81. Neste trabalho, esse número foi multiplicado por 1,34 a fim de considerar a operação de moagem por via seca (GUPTA; YAN, 2016; SILVA et al., 2023).

d_{p1} foi considerado como o valor médio do diâmetro da partícula de casca de café, o qual varia entre 0,5 a 1,5 cm (MORENO-RAMÓN; QUIZEMBE; IBÁÑEZ-ASENSIO, 2014) e d_{p2} foi adotado como sendo igual a 0,35 mm. Tamanhos menores de partículas melhoram as propriedades físico-mecânicas da briquete, incluindo densidade de energia e resistência (BAJWA et al., 2018).

4.2.3 Variáveis de entrada de projeto

As variáveis de entrada das etapas consideradas no pré-tratamento estão resumidas na Tabela 4.1. A vazão de biomassa seca (F_s), temperatura (T_g^1) e velocidade do ar de entrada (v), e a altura do leito de biomassa (H) foram variados a fim de avaliar o impacto na viabilidade econômica do projeto, o qual considera a comercialização dos briquetes de casca de café. F_s variou de 500 a 1500 kg h⁻¹, faixa comumente adotada em plantas de pré-tratamento de biomassa. Como referência, Silva et al. (2023) utilizaram o intervalo de 600 a 1500 kg h⁻¹. Os valores de T_g^1 de 90 a 120 °C foram estimados segundo a faixa típica de temperatura do ar em secador de esteira (PERAZZINI et al., 2021). Além disso, foram consideradas as limitações da equação algébrica utilizada para determinar o tempo característico de secagem (Equação 4.8), uma vez que ela foi desenvolvida com base em dados experimentais de temperatura do ar variando entre 90 e 113,53 °C. Sendo assim, temperaturas consideravelmente superiores a esse intervalo extrapolariam a equação, podendo gerar resultados imprecisos.

A espessura H foi escolhida dentro do intervalo de 2,5 a 4 cm, alinhando-se com a faixa utilizada no secador de esteira, que varia de 2 a 15 cm. A preferência por manter a camada mais fina visou reduzir a perda de pressão do ar durante o processo de secagem, favorecendo uma maior eficiência (VAN'T LAND, 2012). Ademais, como os dados experimentais utilizados para a determinação do tempo foram obtidos com espessuras variando de 0,32 a 1 cm (SILVA et al., 2023), não foi viável considerar espessuras significativamente maiores no projeto.

Segundo van't Land (2012), as velocidades práticas do ar de secagem no secador de esteira variam entre 0,5 e 2 m s⁻¹, com 1 m s⁻¹ sendo o valor mais comum. Por outro lado, Myllymaa, Holmberg e Ahtila (2019 e 2020) adotaram os intervalos de 0,3 – 0,9 m s⁻¹ e 0,75 – 0,9 m s⁻¹, respectivamente. Assim, estipulou-se v entre 0,7 e 1,0 m s⁻¹, a fim de englobar os intervalos indicados pela literatura e se aproximar do valor mais usual.

A profundidade da esteira (W) foi estimada dentro do intervalo comumente empregado de 0,5 a 3 m (VAN'T LAND, 2012). Optou-se pela maior largura possível, de 3 m, a fim de diminuir o comprimento necessário da esteira e, conseqüentemente, a potência para movimentá-la. A umidade de saída da casca de café foi definida em 12% (base úmida), por ser um valor médio do intervalo de umidade final exigido para produção de briquetes de biomassa de qualidade. Kaliyan e Morey (2009) relataram que, para o processo de densificação, o teor de umidade da biomassa deve estar entre 8 a 12% (base úmida), Pradhan, Mahajani e Arora (2018) indicaram um intervalo entre 10 a 15% (base úmida) como ideal para um processo típico de peletização de biomassa, Saccol et al. (2020) recomendaram a faixa de teor de umidade entre 8

4 METODOLOGIA

a 15% para produção de briquetes, e Carvalho et al. (2021) reportaram o intervalo de 10 a 12% para a fabricação de briquetes ou *pellets*.

Tabela 4.1 Variáveis de entrada utilizadas no projeto e análise econômica da planta de pré-tratamento de casca de café.

Variáveis	Valores	Literatura
Biomassa		
Vazão de biomassa seca (F_s)	500 – 1500 kg h ⁻¹	Silva et al. (2023)
Teor de umidade na entrada do secador (X_{bs}^1)	4,00 (kg H ₂ O) (kg material seco) ⁻¹ (80% base úmida)	Tran et al. (2020); Jiamjariyatam et al. (2022) 8 – 12% (base úmida) (KALIYAN; MOREY; 2009) 10 – 15% (base úmida)
Teor de umidade na saída do secador (X_{bs}^2)	0,14 (kg H ₂ O) (kg material seco) ⁻¹ (12% base úmida)	(PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018) 8 – 15% (base úmida) (SACCOL et al., 2020) 10 – 12% (base úmida) (CARVALHO et al., 2021)
Teor de umidade gás-sólido de equilíbrio (X_{eq})	0,07 (kg H ₂ O) (kg material seco) ⁻¹	Silva et al. (2023)
Calor específico (c_{ps})	1,621 kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹	Ruiz, Gordillo e Mohamad (2019)
Massa específica bulk (ρ_b)	480 kg m ⁻³	Setter e Oliveira (2022)
Temperatura de entrada (T_s^1)	25 °C	–
Ar de secagem		
		30 – 120 °C (LI et al., 2012) 80 – 120 °C (PERAZZINI et al., 2021)
Temperatura de entrada do ar (T_g^1)	90 – 120 °C	30 – 110 °C (MYLLYMAA; HOLMBERG; AHTILA, 2019) 40 – 120 °C (MYLLYMAA; HOLMBERG; AHTILA, 2020) 0,5 – 2 m s ⁻¹ (VAN'T LAND, 2012)
Velocidade do ar (v)	0,7 – 1,0 m s ⁻¹	0,3 – 0,9 m s ⁻¹ (MYLLYMAA; HOLMBERG; AHTILA, 2019) 0,75 – 0,9 m s ⁻¹ (MYLLYMAA; HOLMBERG; AHTILA, 2020)
Temperatura de bulbo úmido (T_w)	30,62 – 36,59 °C	–
Ar ambiente		
Temperatura ambiente (T_a)	25 °C	–
Secador		
Altura do leito de biomassa (H)	2,5 – 4 cm	2 – 15 cm (VAN'T LAND, 2012)
Profundidade da esteira (W)	3 m	0,5 – 3 m (VAN'T LAND, 2012)
Trocador de calor		
Coefficiente global de transferência de calor (U)	165 W m ⁻² °C ⁻¹	Green e Perry (2007)
Temperatura do vapor (T_v)	180 °C	–
Dados da tubulação		
Diâmetro (D)	0,25 m	–
Comprimento (L_t)	3 m	–
Cominuição		
Diâmetro da partícula (d_{p1})	1 cm	0,5 – 1,5 cm (MORENO-RAMÓN; QUIZEMBE; IBÁÑEZ-ASENSIO, 2014)

Fonte: Autora (2025).

4 METODOLOGIA

No cenário base da análise econômica da planta de bioenergia, que inclui as etapas de pré-tratamento e combustão dos briquetes, foi necessário definir as condições operacionais de secagem, cujos valores adotados estão apresentados na Tabela 4.2. Os demais parâmetros utilizados foram iguais aos mostrados na Tabela 4.1. No geral, as variáveis de entrada do cenário base foram pensadas para que suas variações na análise de sensibilidade, descritas na Seção 4.7, ficassem dentro dos intervalos comuns da literatura.

A vazão de biomassa seca (F_s) usada foi de 650 kg h^{-1} . Não foi selecionado um valor mais alto de vazão no cenário base para evitar o aumento considerável das potências para movimentar a esteira e do compressor centrífugo. Para conseguir adotar uma vazão mássica mais alta, seria necessário aumentar a temperatura de entrada do ar de secagem (T_g^1) no cenário base a fim de obter uma secagem mais efetiva, resultando em menores dimensões do secador e baixas potências. Contudo, T_g^1 foi estimada como o valor médio da faixa típica em secador de esteira, que varia entre 80 e $120 \text{ }^\circ\text{C}$, segundo Perazzini et al. (2021). No cenário base, não foi possível adotar uma temperatura mais elevada, como $120 \text{ }^\circ\text{C}$, pois, conforme explicado anteriormente, isso inviabilizaria a realização da análise de sensibilidade a partir desse valor, devido às limitações dos dados experimentais.

A espessura do leito de biomassa (H) foi escolhida como 4 cm , valor dentro da faixa mais comumente empregada, que varia de 4 a 6 cm (VAN'T LAND, 2012). A velocidade do ar de secagem (v) selecionada de $0,8 \text{ m s}^{-1}$ englobou os intervalos relatados na literatura (VAN'T LAND, 2012; MYLLYMAA; HOLMBERG; AHTILA, 2019 e 2020), de modo que ao variar na análise de sensibilidade, se aproximasse do valor usual de 1 m s^{-1} .

Tabela 4.2 Variáveis de entrada utilizadas no projeto do cenário base da planta de bioenergia.

Variáveis	Valores
Vazão de biomassa seca (F_s)	650 kg h^{-1}
Temperatura de entrada do ar (T_g^1)	$100 \text{ }^\circ\text{C}$
Velocidade do ar (v)	$0,8 \text{ m s}^{-1}$
Temperatura de bulbo úmido (T_w)	$32,78 \text{ }^\circ\text{C}$
Altura do leito de biomassa (H)	4 cm

Fonte: Autora (2025).

4.3 Estimativa de custos da planta de pré-tratamento de casca de café

A estimativa de custos da planta de pré-tratamento envolveu o investimento, custos operacionais e de manutenção para avaliar a viabilidade econômica considerando a comercialização dos briquetes de casca de café. A partir desses resultados será identificada a

4 METODOLOGIA

condição operacional ótima capaz de equilibrar os custos do processo com as características desejadas da biomassa pré-tratada.

Neste trabalho, considerou-se que a planta de pré-tratamento estivesse situada no mesmo local do beneficiamento do café por via úmida, onde é gerada a casca de café. Por essa razão, não foi necessário incluir os custos relacionados ao transporte desse resíduo. Optou-se por essa abordagem devido à complexidade dos cálculos logísticos envolvidos no transporte de biomassa com alta umidade, que dependem de diversas variáveis.

4.3.1 Investimento

O investimento inicial da planta de pré-tratamento (I_{pt}) [US\$], considerando as etapas de secagem, moagem e briquetagem, foi calculado segundo a Equação (4.30).

$$I_{pt} = C_f + C_w \quad (4.30)$$

Sendo C_f o custo fixo total da planta [US\$] e C_w o capital de giro, considerando 5% do C_f (TOWLER; SINNOTT, 2022).

Para determinar C_f , foi utilizado o Método Fatorial de Lang, que considera diversos fatores de custo individualmente (f_n) para obter uma estimativa mais precisa do investimento (Equação (4.31)). Seu conceito foi descrito em Towler e Sinnott (2022), sendo frequentemente utilizado para estimativas preliminares de custos de capital nos estágios iniciais de projeto, principalmente na área de Engenharia Química.

$$C_f = C_p(1 + f_{10} + f_{12}) \quad (4.31)$$

Onde f_{10} e f_{12} são os fatores de custos do método de Lang que levam em conta os custos indiretos, nomeadamente, projeto e engenharia, e custos de contingência para enfrentar imprevistos ou emergências. C_p corresponde ao custo total da planta física de pré-tratamento [US\$], dado pela Equação (4.32), levando em consideração os itens de custos diretos que são incorridos na construção de uma planta (TOWLER; SINNOTT, 2022).

$$C_p = C_{eq}(1 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7) \quad (4.32)$$

4 METODOLOGIA

Onde f_1 a f_7 são os fatores de Lang, cujos valores e descrições estão resumidos na Tabela 4.3 para o processo envolvendo sólidos, e C_{eq} corresponde aos custos de investimento dos equipamentos da planta de pré-tratamento [US\$].

Tabela 4.3 Fatores de Lang considerados nos cálculos de C_f e C_p .

Fatores	Descrição	Sólidos
f_1	Montagem de equipamentos, trabalho mecânico, incluindo fundações e pequenas estruturas	0,60
f_2	Projeto e instalação de tubulações	0,20
f_3	Instrumentação e controle	0,20
f_4	Instalações elétricas, energia e iluminação	0,15
f_5	Obras civis, incluindo trabalhos relacionados ao solo e infraestrutura básica da planta	0,20
f_6	Estruturas e edificações, incluindo galpões, áreas de armazenamento, escritórios e demais estruturas verticais	0,10
f_7	Aplicações de isolamento térmico e pintura industrial	0,05
f_{10}	Projeto, engenharia e supervisão	0,20
f_{12}	Contingências	0,10

Fonte: Adaptado de Towler e Sinnott (2022).

Foram considerados apenas os fatores de Lang pertinentes à concepção da planta de pré-tratamento. A inclusão dos fatores de 1 a 7 resultou em um aumento de 150% nos custos de investimento dos equipamentos (C_{eq}). Já a consideração dos fatores 10 e 12 elevou o custo total da planta física (C_p) em 30%. A escolha por esse método teve como principal objetivo adotar uma análise conservativa, proporcionando uma margem de segurança para a análise econômica do projeto. Embora seja provável que o custo real de investimento seja inferior ao estimado, a consideração desses fatores permite uma avaliação financeira completa ao cobrir todos os possíveis custos. Caso os fatores fossem desconsiderados e apenas os custos de capital dos equipamentos fossem considerados como investimento da planta, o projeto poderia ser viável em termos teóricos, mas tornar-se inviável quando colocado em prática.

C_{eq} foi dado como a soma dos custos de investimento dos equipamentos das etapas de secagem (C_{eqd}), cominuição (C_{eqc}), briquetagem (C_{eqb}) e logística (C_{eql}), conforme mostra a Equação (4.33).

$$C_{eq} = C_{eqd} + C_{eqc} + C_{eqb} + C_{eql} \quad (4.33)$$

Os custos de investimento da etapa de secagem (C_{eqd}) [US\$], incluindo o secador de esteira transportadora, compressor centrífugo e trocador de calor a vapor, foram estimados de

4 METODOLOGIA

acordo com a correlação proposta por Kudra (2015), em função da área de superfície de transferência de calor (A_d) [m^2] (Equação (4.34)).

$$C_{eq_d} = (M\&S\ Index) C_1 A_d^{C_2} \quad (4.34)$$

O M&S Index (*Marshall and Swift Index*) de 2024 pode ser aproximado pelos valores de CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*) de 2016 e 2024, segundo a relação apresentada na Equação (4.35).

$$(M\&S\ Index) = \frac{(CEPCI)_{2024}}{(CEPCI)_{2016}} (M\&S\ Index)_{2016} \quad (4.35)$$

Sendo $(CEPCI)_{2024} = 798,8$, $(CEPCI)_{2016} = 541,7$ (TOWERING SKILLS, 2024) e $(M\&S\ Index)_{2016} = 1582$ (TURTON et al., 2018). Considerando o secador de correia transportadora de aço inoxidável AISI 304 como o secador ideal, as constantes de custo C_1 e C_2 são iguais a 21 e 0,59, respectivamente (KUDRA, 2015).

Os custos de investimento dos equipamentos da etapa de cominuição consistiram no custo do moinho de facas (C_{eq_c}) [US\$], o qual foi estimado pela Equação (4.36) (TOWLER; SINNOTT, 2022).

$$C_{eq_c} = a_c + b_c F_c^{n_c} \quad (4.36)$$

Sendo a_c a constante de custo igual a 68.400, b_c a constante de custo igual a 730, e n_c o índice de custo igual a 1,0 (TOWLER; SINNOTT, 2022).

Para determinar o fator de escala (α) dos custos de investimento da etapa de briquetagem, utilizou-se a Equação (4.37), a qual considera a variação do custo da briquetadeira em relação à capacidade de processamento da planta (TOWLER; SINNOTT, 2022).

$$C_{eq_b}^1 = C_{eq_b}^2 \left(\frac{F_s^1}{F_s^2} \right)^\alpha \quad (4.37)$$

Sendo $C_{eq_b}^1$ o custo de aquisição conhecido da briquetadeira [US\$] com capacidade de processamento F_s^1 [$kg\ h^{-1}$], $C_{eq_b}^2$ o custo de aquisição conhecido de uma segunda briquetadeira

4 METODOLOGIA

com capacidade de processamento F_s^2 [kg h^{-1}], e α o fator de escala dos custos da etapa de briquetagem [adimensional].

Para determinar α , foram utilizados dados de custos de briquetadeiras, em duas capacidades diferentes, coletados do relatório do fabricante BIOMAX (BIOMAX, 2025), incluindo frete, instalação e silo aéreo. Para a capacidade de 600 kg h^{-1} de casca de café, o custo total foi igual a R\$ 464.000 ou US\$ 88.484, considerando a taxa de câmbio de R\$ 5,2439 US\$⁻¹ (média de janeiro a setembro de 2024) (IPEA, 2024). Para a capacidade de 800 kg h^{-1} , o custo foi de R\$ 530.000 ou US\$ 101.070. Assim, o valor de α encontrado foi igual a 0,462. Desse modo, a Equação (4.37) pode ser reescrita na Equação (4.38) para determinar os custos de investimento da etapa de briquetagem (C_{eq_b}) [US\$] na capacidade de processamento da planta em estudo (F_s).

$$C_{eq_b} = 101.070 \left(\frac{F_s}{800} \right)^{0,462} \quad (4.38)$$

A etapa de logística refere-se ao armazenamento do produto final, ou seja, os briquetes. A quantidade de silos necessária (Q_s) foi estimada a partir da Equação (4.39), considerando o tempo de uma semana para armazenamento.

$$Q_s = \frac{F_b k_1}{\rho_{briq} V_s} \quad (4.39)$$

Sendo k_1 a constante de ajuste do tempo de hora para uma semana, igual a $120 \text{ h semana}^{-1}$, V_s o volume do silo específico para *pellet* de biomassa, igual a $43,48 \text{ m}^3$ (MYRIAD, 2024), ρ_{briq} a massa específica aparente do briquete de casca de café, considerada a média dos valores obtidos experimentalmente por Setter et al. (2021), sendo igual a 1180 kg m^{-3} , e F_b a vazão mássica de briquetes de casca de café produzidos [kg h^{-1}], calculada pela Equação (4.40). Para tal, assumiu-se a eficiência de 94% na produção de briquetes a partir da casca de café seca, segundo relatório do fabricante BIOMAX (BIOMAX, 2025).

$$F_b = 0,94F_s \quad (4.40)$$

Os custos de investimento dos equipamentos da etapa de logística (C_{eq_l}) [US\$], que se referem aos silos, foram calculados pela Equação (4.41).

$$C_{eq_t} = C_s Q_s \quad (4.41)$$

Sendo C_s o custo do silo de 43,48 m³ igual a US\$ 8.415,95 (MYRIAD, 2024), considerando a taxa de câmbio de US\$ 1,2769 £⁻¹ (média de janeiro a setembro de 2024) (INVESTING.COM, 2024).

4.3.2 Custos operacionais

Os custos operacionais totais da planta de pré-tratamento (C_{op}) [US\$ ano⁻¹] englobaram os custos fixos (C_{op_f}) e variáveis (C_{op_v}), conforme mostra a Equação (4.42).

$$C_{op} = C_{op_f} + C_{op_v} \quad (4.42)$$

Onde C_{op_v} foi admitido como a soma dos custos operacionais dos equipamentos ($C_{op_{eq}}$), os quais foram estimados pela Equação (4.44), com 10% dos custos de manutenção (SINNOTT, 2005). C_{op_f} foi dividido em diversos custos, que foram resumidos na Tabela 4.4.

A manutenção é um custo fixo, pois a planta deve ser mantida em bom estado de conservação, independentemente do nível de produção. Os custos de manutenção incluem o custo de substituição ou reparo de peças e equipamentos, bem como o custo da mão de obra necessária para realizar o trabalho de manutenção. Os salários pagos aos operadores e supervisores da planta também foram tratados como um custo fixo de produção, uma vez que a operação exige experiência e treinamento, não sendo prático aumentar e diminuir a força de trabalho com mudanças de curto prazo na demanda (TOWLER; SINNOTT, 2022).

As despesas gerais da planta englobaram custos de pesquisa e desenvolvimento, custos de vendas e marketing, e custos gerais e administrativos. Os encargos de capital representam o custo de oportunidade ou o custo financeiro associado ao investimento realizado no projeto. Eles refletem a remuneração que o capital investido deve gerar ao longo do tempo, seja por meio do pagamento de juros, no caso de financiamentos, ou do retorno esperado em outras formas de aplicação. Impostos locais referem-se aos impostos sobre propriedade de terrenos. Já o seguro é para cobrir responsabilidade civil de terceiros, bem como potenciais danos à planta (SINNOTT, 2005; TOWLER; SINNOTT, 2022).

Tabela 4.4 Custos operacionais fixos da planta de pré-tratamento.

Custos fixos (C_{opf})	Valores adotados
Manutenção	3% do custo fixo (C_f)
Custo do trabalho operacional (C_{ol})	Estimado pela Equação (4.43)
Supervisão	20% do custo do trabalho operacional (C_{ol})
Despesas gerais da planta	50% do custo do trabalho operacional (C_{ol})
Encargos de capital	10% do custo fixo (C_f)
Impostos locais	1% do custo fixo (C_f)
Seguro	1% do custo fixo (C_f)

Fonte: Adaptado de Sinnott (2005); Towler e Sinnott (2022).

O custo da mão de obra operacional (C_{ol}) [US\$ ano⁻¹], determinado pela Equação (4.43), considerou o produto entre o salário anual operacional (S_a) [US\$ ano⁻¹], o número de operadores por turno (N_{os}) e o número de operadores necessários para fornecer o número total de turnos por ano (N_{op}).

$$C_{ol} = S_a N_{os} N_{op} \quad (4.43)$$

O número de operadores por turno (N_{os}) foi estimado conforme metodologia proposta por Peters, Timmerhaus e West (2002), em que ½ empregado foi adotado para a planta de pré-tratamento e mais ½ para a etapa de logística, totalizando 1 operador. Geralmente, um operador trabalha em média 49 semanas por ano (considerando três semanas de folga para férias e licença médica) e cinco turnos de 8 horas por semana, o que equivale a 245 turnos por operador por ano. Como o tempo de operação anual foi considerado de 7008 horas e cada turno igual a 8 horas, a planta necessita de 876 turnos por ano. Portanto, N_{op} são cerca de 3,6. Desse modo, o número total de empregados foi aproximado para 4. Para o cálculo de S_a , o salário médio de um operador de máquinas no Brasil foi estimado em R\$ 2.109,23 (SALÁRIO, 2024), somando 40% desse valor referente a encargos trabalhistas. Assim, o salário operacional anual foi estimado em US\$ 6.757,39, considerando a taxa de câmbio de R\$ 5,2439 US\$⁻¹ (IPEA, 2024).

Para estimar C_{op_v} foi necessária a determinação dos custos operacionais dos equipamentos da planta de pré-tratamento (C_{opeq}) [US\$ ano⁻¹], conforme mostra a Equação (4.44). Para isso, são apresentados separadamente os cálculos para as etapas de secagem, cominuição e densificação, relacionados a gastos com utilidades.

$$C_{opeq} = C_{op_d} + C_{op_c} + C_{op_b} \quad (4.44)$$

4 METODOLOGIA

Sendo C_{op_d} , C_{op_c} e C_{op_b} , os custos operacionais das etapas de secagem, cominuição e briquetagem, respectivamente [US\$ ano⁻¹].

Os custos operacionais anuais da etapa de secagem (C_{op_d}) [US\$ ano⁻¹], conforme mostra a Equação (4.45), englobaram os custos relacionados ao fluxo de ar para o trocador de calor e, em seguida, para o secador. Isso inclui a energia elétrica necessária para o funcionamento do compressor, responsável pelo trabalho mecânico. Além disso, foram considerados os custos operacionais do secador, que envolvem a energia elétrica requerida para o movimento da correia transportadora, e os custos de aquecimento do ar ambiente, dado pelo consumo de vapor suprido ao processo.

$$C_{op_d} = C_e E_d t_{op} + C_e E_m t_{op} + C_v F_v t_{op} \quad (4.45)$$

Sendo C_e o custo da energia elétrica [US\$ kWh⁻¹], C_v o custo do vapor d'água [US\$ kg⁻¹] e F_v a vazão mássica de vapor d'água [kg h⁻¹]. A tarifa de energia elétrica foi estimada inicialmente em R\$ 0,8352 kWh⁻¹ (CEMIG, 2024), que corresponde à média aritmética das bandeiras tarifárias referentes ao grupo B3, o qual inclui o setor industrial, aplicadas pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), responsável pelo fornecimento de energia elétrica ao estado maior produtor de café do Brasil (CONAB, 2025). A tarifa em dólares norte-americanos foi igual a US\$ 0,1593 kWh⁻¹, considerando R\$ 5,2439 US\$⁻¹ (IPEA, 2024).

O consumo de vapor (F_v) foi estimado pela Equação (4.46) (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015).

$$F_v = \frac{3600}{1000} \frac{Q_t}{\Delta H_v} (1 + \delta) \quad (4.46)$$

Em que δ consiste em um fator de correção que, por análise conservativa, considera possíveis ineficiências do sistema de aquecimento. Alguns exemplos de ineficiências são perdas térmicas para o ambiente, incrustações que reduzem a eficiência da troca térmica, e variações operacionais, como na pressão do vapor ou na vazão de ar. Neste trabalho, estimou-se uma porcentagem de 10% ($\delta = 10\%$) como margem de segurança nos cálculos de vapor.

O custo do vapor (C_v) foi estimado pela Equação (4.47).

4 METODOLOGIA

$$C_v = \frac{C_{fuel}H_v}{HHV_f\eta_v} \quad (4.47)$$

Sendo H_v a entalpia de vapor igual a aproximadamente 646 kcal kg⁻¹ (GEANKOPLIS, 1993), HHV_f o poder calorífico do combustível, igual a 9.400 kcal m⁻³ para o gás natural (à pressão de 1 atm e temperatura de 20 °C) (COMGÁS, 2024b), η_v a eficiência da caldeira, estimada em 80%, e C_{fuel} o custo do combustível [US\$ m⁻³] estimado pela Equação (4.48). Este custo considerou a tarifa TUSD de gás natural em segmento industrial com consumo de cerca de 175.000 a 750.000 m³ mês⁻¹ (COMGÁS, 2024a) e a taxa de câmbio de R\$ 5,2439 US\$⁻¹ (IPEA, 2024).

$$C_{fuel} = 1,29 \times 10^{-13}V_f^2 - 1,58 \times 10^{-7}V_f + 0,1257 \quad (4.48)$$

Sendo V_f o volume consumido de combustível [m³ mês⁻¹] calculado pela Equação (4.49).

$$V_f = \frac{F_v H_v k_2}{HHV_f} \quad (4.49)$$

Sendo k_2 a constante de ajuste do tempo de hora para mês, igual a 720 h mês⁻¹.

Os custos totais anuais da etapa de secagem (C_{td}) [US\$ ano⁻¹] foram estimados pela Equação (4.50) (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015).

$$C_{td} = eC_{eqd} + C_{opa} + C_{md} \quad (4.50)$$

Sendo C_{md} os custos de manutenção de secagem, estimados como 3% de C_{eqd} (TOWLER; SINNOTT, 2022), e e o parâmetro de recuperação de capital [%], o qual consiste em um fator de correção que leva em consideração a vida útil, em anos, dos equipamentos de pré-tratamento (l_t), adotada como 10 anos, e a taxa de juros (i) [%] (Equação (4.51)) (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015; PERAZZINI et al., 2021).

$$e = \frac{i(1+i)^{l_t}}{(1+i)^{l_t} - 1} \quad (4.51)$$

4 METODOLOGIA

A taxa adotada neste projeto foi de 10,86% a.a., valor referente à média da taxa Selic do mês de janeiro a setembro de 2024, definida pelo Banco Central do Brasil (BCB, 2024). A taxa Selic é a taxa básica de juros da economia e uma das principais ferramentas utilizadas pelo Banco Central para o controle da inflação. Neste trabalho, optou-se por adotá-la com o objetivo de tornar os cenários mais conservadores, uma vez que incorpora a inflação. Caso fosse utilizada uma taxa de juros inferior, o cenário seria mais otimista.

Os custos operacionais do moinho de facas (C_{opc}) [US\$ ano⁻¹] consideraram a energia elétrica consumida na fragmentação do material (E_c), conforme mostra a Equação (4.52).

$$C_{opc} = E_c C_e t_{op} \quad (4.52)$$

Os custos operacionais da etapa de briquetagem (C_{opb}) [US\$ ano⁻¹] foram determinados pela Equação (4.53) e incluiu o consumo de energia elétrica da operação.

$$C_{opb} = F_s t_{op} E_b C_e \quad (4.53)$$

Sendo E_b a energia elétrica consumida pela máquina de briquetagem [kWh kg⁻¹]. Segundo o fabricante BIOMAX (BIOMAX, 2025), E_b é função da capacidade de processamento da planta. A partir do relatório da empresa para briquetadeiras específicas para casca de café, com capacidades que variavam entre 450 a 800 kg h⁻¹, adotou-se um consumo energético médio da briquetadeira (E_b) de 0,04 kWh kg⁻¹ de casca de café seca.

Os custos totais anuais dos equipamentos de pré-tratamento (C_t) [US\$ ano⁻¹] foram estimados pela Equação (4.54).

$$C_t = eC_{eq} + C_{opeq} + C_m \quad (4.54)$$

Sendo C_m os custos de manutenção dos equipamentos de pré-tratamento, estimados como 3% de C_{eq} (TOWLER; SINNOTT, 2022).

4.3.3 Lucro líquido proveniente da comercialização dos briquetes

O lucro líquido da planta de pré-tratamento (S) [US\$ ano⁻¹] foi dado pela receita obtida da venda dos briquetes de casca de café produzidos subtraída dos custos operacionais totais da planta, conforme mostra a Equação (4.55).

$$S = R - C_{op} \quad (4.55)$$

Sendo a receita [US\$ ano⁻¹] calculada pela Equação (4.56).

$$R = M P_{briq} \quad (4.56)$$

Em que P_{briq} corresponde ao preço por massa de briquete [US\$ kg⁻¹] e M a quantidade em massa de briquetes de casca de café produzidos por ano [kg ano⁻¹], estimada conforme a Equação (4.57).

$$M = F_b t_{op} \quad (4.57)$$

O preço por massa de briquete (P_{briq}) foi calculado pela Equação (4.58), baseado na metodologia dominante para formação de preços, denominada *mark-up* ou taxa de marcação, que consiste na aplicação de um percentual sobre o custo mensurado para produzir o produto (LORENTZ, 2021). Assim, esse método busca uma abordagem interna, determinando o preço com base em um acréscimo ao custo de produção (CREPALDI; CREPALDI, 2023). Segundo Lorentz (2021), o preço definido pela empresa industrial deve gerar receitas suficientes para cobrir os custos operacionais e, ainda, oferecer um lucro para recompensar os investidores.

Como o objetivo do trabalho é uma análise técnico-econômica da planta de pré-tratamento, o preço do briquete para geração da receita (R) e, conseqüentemente, lucro (S), foi calculado com base apenas nos custos de produção (C_{briq}), considerando uma margem de lucro (ML). Desse modo, não foram considerados ainda os aspectos comerciais, como impostos sobre vendas, comissões de vendedores ou distribuidores, e logística de entrega, se necessários.

$$P_{briq} = C_{briq} \frac{100}{(100 - ML)} \quad (4.58)$$

4 METODOLOGIA

Sendo C_{briq} o custo de produção por massa de briquete [US\$ kg⁻¹] e ML a margem de lucro, a qual foi definida em 13%. Esse percentual correspondeu ao mínimo necessário para garantir viabilidade econômica do projeto e, ao mesmo tempo, manter um preço competitivo. Como o mercado de briquetes ainda é incipiente e não há uma padronização de preços, não se elevou muito a ML a fim de evitar um aumento significativo no preço do briquete. Dessa forma, entende-se que P_{briq} é um valor manipulável, uma vez que a margem de lucro pode ser ajustada. Uma ML mais elevada resultará em um P_{briq} maior. No entanto, deve-se atentar à tendência dos preços do produto no mercado para não definir um preço de briquete muito acima ou abaixo da concorrência, o que poderia comprometer a viabilidade da planta.

C_{briq} foi definido conforme a Equação (4.59), que considera os custos totais anuais da planta de pré-tratamento ($C_{t_{pt}}$) e a produção anual (M), levando em conta a umidade final do briquete (X_{bs}^2) (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2015). Observa-se que, um produto com menor umidade, possui um custo de produção mais alto, o que é esperado devido à necessidade do processo de secagem, que é dispendioso.

$$C_{briq} = \frac{C_{t_{pt}}}{M(1 + X_{bs}^2)} \quad (4.59)$$

$C_{t_{pt}}$ [US\$ ano⁻¹] incluiu o investimento inicial da planta de pré-tratamento (I_{pt}), levando em conta o parâmetro de recuperação de capital (e), e custos operacionais totais (C_{op}), conforme apresenta a Equação (4.60). Desse modo, como $C_{t_{pt}}$ considera o parâmetro de recuperação de capital, consequentemente, C_{briq} e P_{briq} consideram também a taxa de juros (i).

$$C_{t_{pt}} = eI_{pt} + C_{op} \quad (4.60)$$

I_{pt} , C_{op} e e foram mostrados nas Equações (4.30), (4.42) e (4.51), respectivamente.

Para comparação com alguns preços de mercado, além do preço do briquete (P_{briq}), foi definido o valor de venda do briquete (V_{briq}), o qual considera variáveis comerciais. Ou seja, estimou-se o valor final do briquete no mercado, o qual incluiu, além da margem de lucro, os tributos incidentes sobre vendas no Brasil, conforme mostra a Equação (4.61). Neste projeto, para a formação do valor de venda, não foram considerados demais percentuais eventualmente inclusos no *mark-up*, como comissões e despesas fixas administrativas (LORENTZ, 2021).

4 METODOLOGIA

Essas despesas já foram contabilizadas em “despesas gerais da planta” nos custos operacionais fixos, descritos anteriormente na Tabela 4.4. Além disso, considerou-se que a empresa vende diretamente para os clientes (como indústrias ou usinas que usam os briquetes como combustível), não havendo intermediários para comissões.

$$V_{briq} = C_{briq} \frac{100}{[100 - (IP + ML)]} \quad (4.61)$$

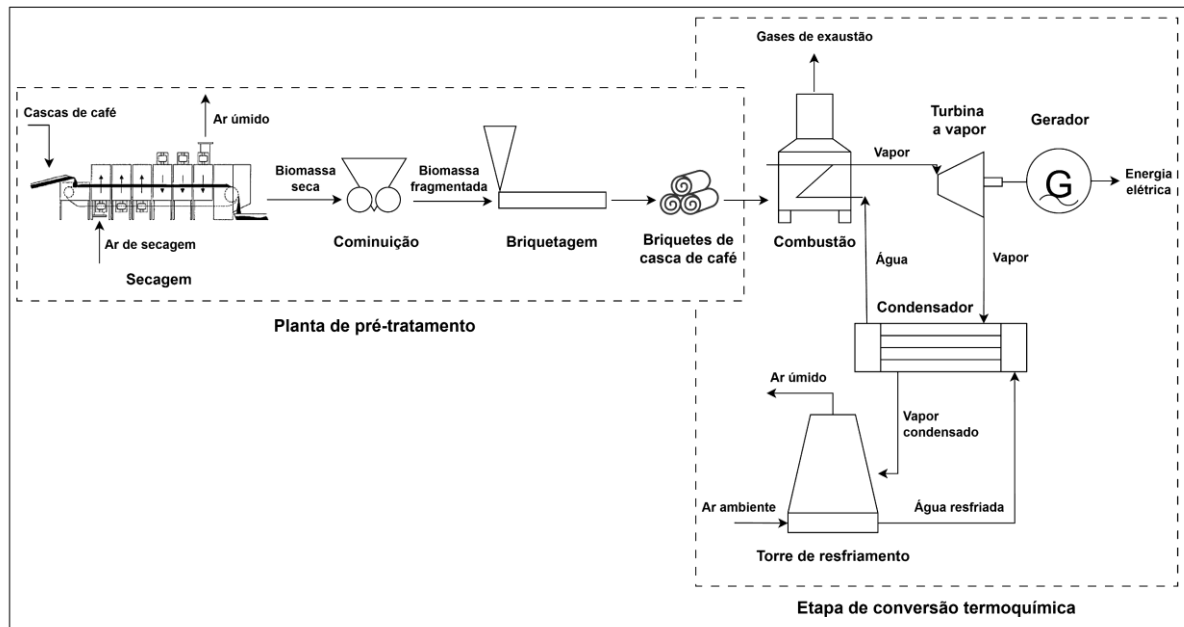
Sendo IP os impostos (ICMS, PIS/COFINS) (LORENTZ, 2021). Para o cálculo de IP , foram adotados a alíquota geral de ICMS de 18%, considerando estados como Minas Gerais e São Paulo (SIMTAX, 2025), PIS/COFINS de 3,65% para receitas operacionais em regime cumulativo (FERNANDES, 2025), totalizando 21,65%. Neste regime, considera-se que a empresa calcula PIS/COFINS diretamente sobre sua receita bruta, sem direito a descontar créditos sobre aquisições. ML foi mantida em 13%.

Sendo assim, definiu-se P_{briq} como um valor monetário estipulado para a venda do produto, sendo este fixado pelo produtor. Já V_{briq} correspondeu ao valor efetivamente praticado no mercado, considerando aspectos comerciais.

4.4 Energia elétrica gerada pela planta de bioenergia

Conforme mencionado anteriormente, além da análise econômica da comercialização dos briquetes de casca de café da via úmida, também foi simulada a análise da venda de energia elétrica proveniente da combustão direta dos briquetes. Neste último caso, a planta englobou as etapas de pré-tratamento juntamente com a tecnologia de conversão termoquímica da biomassa. A Figura 4.4 apresenta o esquema da planta de bioenergia. Após as etapas de pré-tratamento e produção dos briquetes, eles são encaminhados para a combustão. O calor dos gases quentes gerados pelo processo é transferido para a água na caldeira. O vapor produzido é direcionado para uma turbina a vapor, onde se expande e movimenta as pás. A turbina é conectada ao gerador, que converte a energia mecânica rotacional em energia elétrica. Após a passagem pela turbina, o vapor é condensado ao trocar calor com a água da torre de resfriamento, sendo então recirculado (IRENA, 2012).

Figura 4.4 Esquema da planta de bioenergia, abrangendo as etapas de pré-tratamento e o processo de conversão termoquímica.



Planta de bioenergia

Fonte: Autora (2025).

A energia elétrica disponível da planta de bioenergia (E) [MWh ano^{-1}] foi estimada pela Equação (4.62), a qual consistiu na energia elétrica total produzida (E_T) subtraída da energia consumida nos processos de pré-tratamento (E_u), a qual foi calculada pela Equação (4.63).

$$E = E_T - E_u \quad (4.62)$$

$$E_u = \frac{(E_d + E_m + E_c + E_b F_s) t_{op}}{1000} \quad (4.63)$$

O fator 1000 foi utilizado para converter a unidade de kWh ano^{-1} para MWh ano^{-1} .

A energia elétrica total gerada pela planta de bioenergia (E_T) [MWh ano^{-1}] foi determinada pela Equação (4.64) (SILVA et al., 2021). Este cálculo foi realizado para cada região do Brasil a fim de escolher aquela com maior potencial de implementação da planta para produção de bioenergia.

$$E_T = Pot_{el} t_{op} FC \quad (4.64)$$

4 METODOLOGIA

Sendo FC o fator de capacidade estimado em 70%, considerando a média de FC para projetos de geração de energia a partir de resíduos agrícolas (IRENA, 2022), e Pot_{el} a potência elétrica gerada [MW], estimada segundo a Equação (4.65) (SILVA et al., 2021).

$$Pot_{el} = \eta_{el} Pot_d \quad (4.65)$$

Sendo η_{el} o coeficiente de eficiência do ciclo termodinâmico Rankine, igual a 30% (IRENA, 2022), e Pot_d a potência teórica disponível [MW], determinada de acordo com a Equação (4.66) (SILVA et al., 2021).

$$Pot_d = \frac{F_b PCI}{k} \quad (4.66)$$

Sendo PCI o poder calorífico inferior do briquete de casca de café, igual a 20,01 MJ kg⁻¹ (OLIVEIRA et al., 2015), e k a constante de ajuste de tempo de hora para segundos, igual a 3600 s h⁻¹.

4.5 Estimativa de custos da planta de bioenergia

A estimativa de custos da planta de bioenergia abrangeu o investimento inicial, os custos operacionais e de manutenção das etapas de pré-tratamento, assim como da tecnologia de conversão termoquímica, com o intuito de avaliar a viabilidade econômica, considerando a receita proveniente da venda de energia elétrica gerada pela combustão direta dos briquetes de casca de café pré-tratada.

Assim como na estimativa de custos da planta de pré-tratamento apresentada na Seção 4.3, também foi adotado, para a planta de bioenergia, um cenário ideal. Nesse cenário, considerou-se que a usina geradora de energia elétrica estivesse localizada no mesmo local da produção da casca de café e das etapas de pré-tratamento. Dessa forma, não foram incluídos os custos relacionados ao transporte dessa matéria-prima até a usina. A inclusão dessas questões logísticas tornaria o estudo significativamente mais complexo, uma vez que envolveria variáveis como influência da umidade da biomassa, custos com mão de obra e consumo de combustível.

4.5.1 Investimento

O investimento inicial da planta de bioenergia (I) [US\$], que envolveu as etapas de pré-tratamento e a tecnologia de geração de energia a partir da biomassa pré-tratada, foi determinado pela Equação (4.67).

$$I = I_{pt} + I_e \quad (4.67)$$

Sendo I_e o investimento da etapa de conversão termoquímica [US\$], estimado pela Equação (4.68). Para isso, foi considerado um sistema de combustão direta em *stoker boiler*, uma tecnologia madura e amplamente utilizada em vários países. O *stoker boiler* funciona alimentando continuamente combustível sólido em uma grelha onde ocorre a combustão. O ar é fornecido por baixo e acima da grelha para garantir a queima eficiente do combustível e dos gases voláteis liberados. As cinzas resultantes são removidas continuamente pela grelha fixa ou móvel (IRENA, 2012).

$$I_e = Pot_{el} C_{un} \quad (4.68)$$

Em que C_{un} corresponde ao custo unitário da tecnologia de conversão termoquímica [US\$ kW⁻¹], incluindo todos os equipamentos (combustor, caldeira, bombas, compressores, turbina a vapor, gerador, condensador, torre de resfriamento, controles de emissões e controles do sistema), maquinaria de manuseamento, preparação do combustível, custos de engenharia, construção e planejamento, e capital de giro. Segundo IRENA (2012), o custo total instalado da tecnologia *stoker boiler* varia entre US\$ 1.880 kW⁻¹ e US\$ 4.260 kW⁻¹, com média de US\$ 3.070 kW⁻¹. Por outro lado, de acordo com WBDG (2016), usinas elétricas de biomassa de pequena escala possuem custos instalados de US\$ 3.000 kW⁻¹ a US\$ 4.000 kW⁻¹. Para englobar as duas faixas, o cenário base foi adotado como US\$ 3.000 kW⁻¹. Para complementar o estudo, foram analisados outros dois cenários na análise de sensibilidade: um otimista, em que o custo unitário era menor, de US\$ 2.000 kW⁻¹, e um pessimista, com custo unitário maior, igual a US\$ 4.000 kW⁻¹, a fim de verificar a influência desse parâmetro nos resultados econômicos da planta.

4 METODOLOGIA

4.5.2 Custos operacionais

Os custos totais de operação e manutenção da planta de bioenergia (C_{opT}) [US\$ ano⁻¹] consideraram os custos operacionais do pré-tratamento (C'_{op}) e da etapa de conversão termoquímica (C_{ope}), como apresentado na Equação (4.69).

$$C_{opT} = C'_{op} + C_{ope} \quad (4.69)$$

Os custos de operação e manutenção da tecnologia de conversão termoquímica (C_{ope}) consistiram na soma dos custos fixos e variáveis, conforme mostra a Equação (4.70). Os custos operacionais fixos referem-se à uma porcentagem (p_f) do investimento da etapa de conversão (I_e) e incluem mão de obra, manutenção programada, substituição de rotina de componentes e/ou equipamentos, seguros e outros. Os custos operacionais variáveis dependem da energia elétrica gerada (E_T) multiplicada pelo fator C_{ve} [US\$ MWh⁻¹]. Estes custos variáveis incluem custos de combustíveis não provenientes da biomassa, eliminação de cinzas, manutenção não planejada, substituição de equipamento e custos incrementais de manutenção (IRENA, 2012).

$$C_{ope} = p_f I_e + C_{ve} E_T \quad (4.70)$$

A porcentagem (p_f), segundo IRENA (2012), varia entre 3 a 6% do investimento, considerando a tecnologia *stoker boiler*. Já o custo variável (C_{ve}) situa-se na faixa de 3,8 a 4,7 US\$ MWh⁻¹. No cenário base, foram utilizadas as médias desses valores. Ou seja, os custos fixos referiram-se a uma porcentagem de 4,5% do investimento (I_e) e C_{ve} foi equivalente a US\$ 4,25 MWh⁻¹. Para o cenário otimista, p_f e C_{ve} adotados foram 3% e US\$ 3,8 MWh⁻¹, respectivamente, sendo os menores valores. No cenário pessimista, p_f e C_{ve} foram iguais a 6% e US\$ 4,7 MWh⁻¹, respectivamente.

Os custos operacionais do pré-tratamento da planta de bioenergia (C'_{op}) [US\$ ano⁻¹], assim como na Equação (4.40), incluíram os custos fixos (C'_{opf}) e variáveis (C_{opv}) (Equação (4.71)).

$$C'_{op} = C'_{opf} + C_{opv} \quad (4.71)$$

4 METODOLOGIA

O cálculo de C'_{op_f} envolveu o somatório de diversos custos, iguais aos que foram apresentados na Tabela 4.4, com exceção dos custos operacionais dos equipamentos de pré-tratamento ($C'_{op_{eq}}$), os quais são diferentes para a planta de bioenergia. Neste caso, $C'_{op_{eq}}$ se resumem aos custos operacionais da etapa de secagem, os quais incluíram os custos de aquecimento do ar de secagem, dado pelo consumo de vapor suprido ao processo (Equação (4.72)). Os custos dos outros equipamentos, como moinho e briquetadeira, bem como a energia para movimentar a esteira de sólidos, não foram considerados para a planta de bioenergia, pois seus custos seriam com energia elétrica, a qual já foi descontada da energia gerada pela planta, conforme foi mostrado na Equação (4.63).

$$C'_{op_{eq}} = C_v F_v t_{op} \quad (4.72)$$

Os custos totais anuais da planta de bioenergia (C_T), que considera o pré-tratamento e combustão dos briquetes, foram estimados pela Equação (4.73).

$$C_T = eI + C_{op_T} \quad (4.73)$$

4.5.3 Lucro líquido proveniente da venda de energia elétrica

O lucro líquido da planta de bioenergia (S_e) [US\$ ano⁻¹] correspondeu à receita pela venda de energia elétrica gerada a partir da combustão direta dos briquetes de casca de café subtraída dos custos operacionais totais da planta, conforme apresentado na Equação (4.74).

$$S_e = R_e - C_{op_T} \quad (4.74)$$

Sendo R_e a receita [US\$ ano⁻¹] dada pela Equação (4.75).

$$R_e = E T \quad (4.75)$$

Sendo T a tarifa de venda de energia elétrica [US\$ MWh⁻¹], adotada como US\$ 67,32 MWh⁻¹ no cenário base, baseada no preço-teto definido na Licitação Governamental de Geração A-5 de setembro de 2022 para termelétrica à biomassa (ANEEL, 2022), levando em consideração a taxa de câmbio de R\$ 5,2439 US\$⁻¹ (IPEA, 2024). Além disso, foram analisados um cenário

4 METODOLOGIA

otimista, com tarifa igual a US\$ 269,27 MWh⁻¹ (4× a tarifa base), e um cenário médio, com tarifa igual à média dos cenários base e otimista (US\$ 168,29 MWh⁻¹).

4.6 Análise de viabilidade econômica

Os critérios de decisão econômica utilizados para a análise de viabilidade da planta de pré-tratamento foram: Valor Presente Líquido (*VPL*), para uma dada Taxa Mínima de Atratividade (*TMA*), Taxa Interna de Retorno (*TIR*), *payback* simples (*P*), *payback* descontado (*P_d*) e Custo Nivelado de Produção por Massa de Briquete (*LCM*). Os índices econômicos selecionados para análise de viabilidade da planta de bioenergia, a qual considera as etapas de pré-tratamento e combustão dos briquetes, foram: *VPL* e Custo Nivelado de Eletricidade (*LCOE*).

4.6.1 Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido (*VPL*) [US\$] consiste em um método que determina o valor presente de pagamentos futuros, descontados à taxa mínima de atratividade, menos o custo de investimento inicial, conforme mostra a Equação (4.76) para a planta de pré-tratamento. Se o *VPL* for positivo o projeto é economicamente viável, isto é, o valor investido será recuperado e haverá ganho. Caso o *VPL* seja igual a zero, é indiferente investir ou não. O projeto é inviável se o *VPL* for negativo, pois o valor resgatado é menor que o investimento (SVIECH; MANTOVAN, 2013).

$$VPL_{pt} = \sum_{t=1}^n \frac{S}{(1+i)^t} - I_{pt} \quad (4.76)$$

Sendo *i* a *TMA*, adotada igual a 10,86% (BCB, 2024), conforme foi definido na Seção 4.3.2. *t* corresponde ao período [ano] e *n* à vida útil da planta de pré-tratamento, igual a 10 anos, segundo Perazzini et al. (2021) e Silva et al. (2023). *S* e *I_{pt}* referem-se ao lucro líquido e investimento inicial da planta de pré-tratamento, os quais foram apresentados nas Equações (4.55) e (4.30), respectivamente.

Para o cálculo do *VPL* da planta de bioenergia foi considerada a Equação (4.77).

$$VPL = \sum_{t=1}^{n_e} \frac{S_e}{(1+i)^t} - I \quad (4.77)$$

Sendo n_e a vida útil da planta, igual a 20 anos (SOKRETHYA et al., 2023). Importante destacar que no 10º ano do fluxo de caixa, foi considerada novamente a compra dos equipamentos das etapas de pré-tratamento, uma vez que a vida útil das máquinas foi adotada como 10 anos e a planta de bioenergia foi projetada com 20 anos. Ou seja, na Equação (4.73), em $t = 10$, foram descontados do lucro obtido (S_e) os custos de capital dos equipamentos de secagem (C_{eqd}), cominuição (C_{eqc}) e briquetagem (C_{eqb}).

4.6.2 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR) [%], determinada pela Equação (4.78), corresponde à taxa de desconto na qual o VPL é nulo, indicando nenhum prejuízo ou lucro (SVIECH; MANTOVAN, 2013).

$$\sum_{t=1}^n \frac{S}{(1+TIR)^t} - I_{pt} = 0 \quad (4.78)$$

A TIR foi comparada com a TMA para a tomada de decisão do investimento da planta de pré-tratamento. Neste caso, a TMA selecionada foi igual a 10,86% (BCB, 2024), a fim de manter esta taxa de juros em todo o trabalho. Assim, o projeto será considerado viável se a TIR for maior que o custo de oportunidade dos recursos para a sua implantação, ou seja, se for maior que a TMA . Entre duas alternativas com TIR diferentes, a que apresenta maior taxa representa o investimento que proporciona o maior retorno (SVIECH; MANTOVAN, 2013).

4.6.3 Payback simples

Neste trabalho, o *payback* simples (P) [ano] foi utilizado como indicador complementar dos critérios econômicos de VPL e TIR na análise da planta de pré-tratamento. Basicamente, indica o número de períodos necessários para recuperar o investimento realizado (Equação (4.79)). Desse modo, quanto menor o *payback* de um projeto, menor o risco do investimento. Entretanto, apresenta diversas limitações, como: não considera o valor do dinheiro no tempo,

não considera todos os fluxos de caixa e independe dos fluxos de caixa após o *payback* (DE LIMA et al., 2013).

$$P = \frac{I_{pt}}{S} \quad (4.79)$$

4.6.4 *Payback* descontado

O *payback* descontado (P_d) [ano] consiste em um indicador que calcula o tempo necessário para que o fluxo de caixa de um investimento, ajustado pelo valor do dinheiro no tempo, recupere o investimento inicial. Esta é a principal diferença entre os *paybacks* simples e descontado. Ao ignorar o efeito do dinheiro no tempo, o *payback* simples apresenta geralmente um resultado menor ao valor correto, associando-se um risco menor ao que provavelmente está sujeito o projeto de investimento. Para encontrar o período de *payback* descontado, determina-se o valor presente dos fluxos de caixa acumulados para cada período t até que ele se iguale ao valor do investimento inicial, conforme mostra a Equação (4.80). Quanto menor P_d , menor o risco do investimento (DE LIMA et al., 2013).

$$\sum_{t=1}^{P_d} \frac{S}{(1+i)^t} = I_{pt} \quad (4.80)$$

4.6.5 Custo Nivelado de Eletricidade

O Custo Nivelado de Eletricidade (*LCOE*) representa o custo unitário de energia, em unidades monetárias descontadas, da construção e operação de uma planta geradora ao longo de todo seu ciclo de vida útil econômico (GUIMARÃES, 2019). O valor encontrado de *LCOE* corresponde à tarifa mínima de venda de energia necessário para alcançar a viabilidade econômica do investimento analisado. Assim, se a tarifa de venda de energia (T) for superior ao valor de *LCOE*, o projeto de investimento será viável economicamente. Caso a tarifa seja igual ao valor de *LCOE*, não haverá lucro ou prejuízo. Se for inferior ao *LCOE*, o investimento não será economicamente viável (MENSAH et al., 2021). O *LCOE* [US\$ MWh⁻¹] pode ser determinado por meio da Equação (4.81) (BRANKER; PATHAK; PEARCE, 2011).

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{n_e} \frac{C(t)}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^{n_e} \frac{E}{(1+i)^t}} \quad (4.81)$$

Sendo $C(t)$ o custo anual [US\$ ano⁻¹], igual ao investimento inicial (I), quando $t = 0$, e igual aos custos operacionais e de manutenção da planta de bioenergia (C_{opT}), quando $t > 0$. No 10º ano do fluxo de caixa foram considerados novamente os custos de investimento dos equipamentos de pré-tratamento, devido à vida útil. Isto é, em $t = 10$, $C(t)$ foi igual a soma de C_{opT} com C_{eqa} , C_{eqc} e C_{eqb} .

4.6.6 Custo Nivelado de Produção por Massa de Briquete

O Custo Nivelado de Produção por Massa de Briquete (LCM) [US\$ kg⁻¹] corresponde ao custo unitário, em unidades monetárias ajustadas ao valor presente, para a construção e operação da planta de pré-tratamento durante todo o seu ciclo de vida econômico, sendo fundamentado no conceito do $LCOE$. É um complemento dos índices econômicos e uma medida interessante para indicar a competitividade de diferentes cenários de processo. Existem duas razões principais para calcular o LCM . A primeira está relacionada aos casos em que não há diferença significativa nos valores de *payback*. A segunda razão é que o VPL apresenta valores positivos, indicando que o projeto é viável, mas independente da combinação das variáveis operacionais (SILVA et al., 2023). Assim, o LCM pode mostrar qual combinação das condições operacionais é capaz de proporcionar o menor custo de venda de briquetes para garantir a viabilidade do processo e uma maior lucratividade.

O LCM pode ser determinado por meio da Equação (4.82). O valor encontrado define o preço que teria que ser cobrado por unidade de produção para atingir um VPL de zero para o investimento (SILVA et al., 2023). Portanto, se o preço do briquete (P_{briq}) for maior que o LCM , o projeto será economicamente viável. Se o preço de venda for igual ao LCM , o projeto se equilibra, sem gerar lucro ou prejuízo. No entanto, se P_{briq} for inferior ao LCM , o investimento não será viável do ponto de vista econômico.

$$LCM = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{C(t)}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{M}{(1+i)^t}} \quad (4.82)$$

4 METODOLOGIA

Onde $C(t)$ o custo anual [US\$ ano⁻¹], igual ao investimento da planta de pré-tratamento (I_{pt}), quando $t = 0$, e igual aos custos operacionais totais (C_{op}), quando $t > 0$.

Importante ressaltar que o LCM deve ser comparado ao P_{briq} e não ao valor de venda do briquete (V_{briq}), uma vez que o cálculo de LCM se baseia no investimento (I_{pt}) e custos operacionais totais da planta (C_{op}), de modo nivelado. Já o V_{briq} , considera também os impostos incidentes sobre vendas no Brasil, os quais não foram contabilizados nos custos operacionais e, conseqüentemente, não fazem parte da determinação do lucro da planta. Assim, mesmo V_{briq} sendo maior que LCM , pode não haver viabilidade econômica, caso a margem de lucro (ML) estimada não atinja o mínimo necessário para que P_{briq} seja maior que LCM .

4.7 Análise de sensibilidade aos parâmetros técnicos e econômicos da planta de bioenergia

A análise de sensibilidade é uma ferramenta útil para lidar com possíveis riscos relacionados a um projeto de investimento. Por meio dessa análise, investidores podem avaliar a influência de variações em parâmetros econômicos e de projeto na atratividade da planta de geração de bioenergia. Os parâmetros econômicos avaliados foram: o custo unitário da tecnologia de geração de bioenergia (C_{un}), a tarifa de venda de energia (T) e a taxa de juros (i). Na prática, esses valores podem se alterar ao longo do tempo e, por isso, foram variados para analisar se suas influências são significativas nos cálculos econômicos da planta.

Já os parâmetros técnicos consistiram nas condições operacionais da etapa de secagem, que incluíram: a temperatura de entrada do ar (T_g^1), a velocidade (v), altura do leito de sólidos (H) e a capacidade de processamento da planta (F_s), a qual também é uma condição das demais etapas de pré-tratamento. Esses parâmetros de projeto foram selecionados para analisar como a etapa de secagem pode impactar nos resultados econômicos da usina geradora. A Tabela 4.5 apresenta os valores adotados no cenário base e os intervalos correspondentes a cada variável analisada, os quais foram definidos a partir de uma variação de $\pm 20\%$ com relação ao cenário base. Esse intervalo foi escolhido, pois os parâmetros variados continuariam dentro dos intervalos relatados na literatura, conforme discutido na Seção 4.2.3. Em seguida, foi avaliado o efeito dessas variações no VPL , $LCOE$ e C_T .

Tabela 4.5 Cenário base dos parâmetros técnicos e econômicos e intervalo considerado na análise de sensibilidade.

Variável	Cenário base	Intervalo ($\pm 20\%$ base)
Custo unitário (C_{un})	US\$ 3.000 kW ⁻¹	2.400 – 3.600 US\$ kW ⁻¹
Tarifa de venda de energia (T)	US\$ 67,32 MWh ⁻¹	53,85 – 80,78 US\$ MWh ⁻¹
Taxa de juros (i)	10,86% a.a.	8,69 – 13,03% a.a.
Vazão de biomassa seca (F_s)	650 kg h ⁻¹	520 – 780 kg h ⁻¹
Temperatura do ar (T_g^1)	100 °C	80 – 120 °C
Altura do leito de biomassa (H)	4 cm	3,20 – 4,80 cm
Velocidade do ar (v)	0,80 m s ⁻¹	0,64 – 0,96 m s ⁻¹

Fonte: Autora (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos resultados e discussões, apresentam-se as estimativas da capacidade de processamento da planta de pré-tratamento, bem como o potencial de geração de energia elétrica a partir da combustão direta dos briquetes de casca de café no Brasil. Os resultados de projeto e da análise econômica da planta de pré-tratamento da casca de café são expostos e discutidos, com ênfase no impacto das variáveis operacionais de secagem sobre os custos e no Custo Nivelado de Produção por Massa de Briquete (*LCM*). Também são analisados os valores mínimos do custo de produção por massa (C_{briq}), do preço (P_{briq}) e do valor de venda do briquete (V_{briq}). No que se refere à planta de bioenergia, são apresentadas a análise econômica do cenário base e análises de sensibilidade. O foco dirigiu-se à influência de variáveis da etapa de secagem, denominados parâmetros técnicos, e de parâmetros econômicos nos resultados do Valor Presente Líquido (*VPL*) e do Custo Nivelado de Eletricidade (*LCOE*).

5.1 Potencial de geração de energia elétrica a partir da casca de café no Brasil

Na Tabela 5.1 são mostradas a área colhida de café (A_c), a quantidade total de grãos de café beneficiados (m_t), os grãos de café produzidos por via úmida (m_{wc}), a quantidade de casca de café gerada neste método (m_r) e a possibilidade de capacidade de processamento de biomassa seca (F_s) para o Brasil e as cinco principais regiões em 2024. A região Sudeste foi responsável por cerca de 85,57% da produção nacional de café em grão e cascas geradas, concentrando a maior capacidade de processamento do país. Este fato pode ser atribuído à longa tradição da cafeicultura nesta região e à vasta área cultivada em 2024. Esta predominância torna o Sudeste uma região promissora, indicando uma maior chance de viabilidade econômica para a instalação de plantas de pré-tratamento de casca de café, devido à possibilidade de processar grandes volumes conforme necessário. Segundo Silva et al. (2021), regiões com alta capacidade de processamento de biomassa tendem a ter maior potencial de geração de energia elétrica.

Com base nos resultados apresentados, pode-se inferir que as vazões de biomassa seca utilizadas nos cenários (500 – 1500 kg h⁻¹) correspondem a cerca de 2,15 a 6,46% do total de resíduos gerados na região Sudeste, o que equivale a uma área aproximada de 37.282 a 111.845 ha. Assim, o intervalo de capacidade de processamento selecionado é razoável para a produção de briquetes nesta região, enquadrando-se na quantidade total gerada de até 23,22 t h⁻¹, com possibilidade de aumento caso preciso. Além disso, pode-se comparar a quantidade de cascas de café geradas na região Sudeste (813.570 t ano⁻¹) com a biomassa necessária para suprir a

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

planta em um ano. Considerando o tempo operacional de 7008 h ano⁻¹, são consumidas de 3504 a 10512 t ano⁻¹, que correspondem a 0,43 – 1,29% de cascas geradas na região.

Tabela 5.1 Área colhida (A_c), quantidade de resíduos gerados (m_r) e possibilidades de capacidade de processamento de casca de café (F_s) para o Brasil e as cinco principais regiões em 2024.

Região	A_c [ha ano ⁻¹]	m_t [t ano ⁻¹]	m_{wc} [t ano ⁻¹]	m_r [t ano ⁻¹]	F_s [t h ⁻¹]
Sudeste	1.731.235	2.930.360	732.590	813.570	23,22
Nordeste	132.255	249.876	62.469	69.374	1,98
Norte	50.070	174.294	43.573	48.390	1,38
Sul	25.200	40.396	10.099	11.215	0,32
Centro-Oeste	16.376	29.693	7.423	8.244	0,24
Brasil	1.955.136	3.424.619	856.155	950.794	27,13

Fonte: Autora (2025).

A Tabela 5.2 mostra os dados de capacidade de produção de briquetes (F_b), potência teórica disponível (Pot_d), potência elétrica (Pot_{el}) e energia elétrica gerada por ano (E_T) nas cinco diferentes regiões do Brasil em 2024. Para isso, foi considerada a eficiência de 94% na transformação física da casca de café em briquetes. A região Sudeste, por ser a principal produtora de café do país, destacou-se na geração de energia elétrica, que pode atingir até 178.532,34 MWh ano⁻¹. Se toda a casca de café for aproveitada para esse fim, tem-se uma produção substancial de 21,83 t h⁻¹ de briquetes na região Sudeste. Isso reforça a possibilidade de viabilidade econômica para a instalação da planta de bioenergia a partir da casca de café nesta região. Além de comercializada, a energia gerada pode ser utilizada no próprio processamento do café, atendendo a demanda energética onde esse resíduo foi gerado. Em contraste, as outras regiões apresentaram capacidade de geração de energia bem menor, com o Nordeste tendo a segunda maior potência elétrica, mas ainda assim substancialmente abaixo do Sudeste. Existe uma disparidade regional significativa na capacidade de processamento de casca de café e produção de energia no Brasil.

Tabela 5.2 Estimativa de geração de energia elétrica (E_T) a partir do briquete de casca de café para o Brasil e as cinco principais regiões em 2024.

Região	F_b [t h ⁻¹]	Pot_d [MW]	Pot_{el} [MW]	E_T [MWh ano ⁻¹]
Sudeste	21,83	121,31	36,39	178.532,34
Nordeste	1,86	10,34	3,10	15.223,71
Norte	1,30	7,22	2,16	10.618,85
Sul	0,30	1,67	0,50	2.461,10
Centro-Oeste	0,22	1,23	0,37	1.809,07
Brasil	25,51	141,77	42,53	208.645,07

Fonte: Autora (2025).

5.2 Planta de pré-tratamento da casca de café

Nesta seção são apresentados os resultados de projeto e econômicos da planta de pré-tratamento, incluindo as etapas de secagem, cominuição, briquetagem e logística, considerando a comercialização dos briquetes produzidos a partir da casca de café gerada pelo método via úmida. Dessa forma, nesta seção não foi considerada a tecnologia de conversão termoquímica.

5.2.1 Resultados de projeto e análise econômica

Para a análise econômica e de projeto da planta de pré-tratamento foram estudados um total de 37 cenários, combinando as seguintes variáveis operacionais: vazão de biomassa seca (F_s), altura do leito de biomassa (H), temperatura de entrada do ar de secagem (T_g^1), e velocidade do ar de secagem (v), em que H , T_g^1 , e v são as variáveis de processo exclusivas da secagem, e F_s a condição operacional para todas as etapas: secagem, cominuição e densificação. Por uma questão de concisão, os dados de projeto e análise econômica são apresentados para dois diferentes níveis de secagem, resultantes da combinação das variáveis operacionais. Foi definido um nível inferior de secagem para os valores mais baixos de H , T_g^1 , e v , e um nível superior para os valores mais elevados de H , T_g^1 , e v , considerando diferentes níveis de F_s , pois esta variável afeta todas as operações unitárias da planta.

A Tabela 5.3 apresenta a influência de F_s nas variáveis de projeto da operação de secagem (A_d , L_d , e A_h), na potência necessária para o trabalho mecânico do compressor centrífugo (E_m) e na potência requerida para movimentar a esteira (E_d), considerando os cenários superior ($H = 4$ cm, $T_g^1 = 120$ °C e $v = 1,0$ m s⁻¹) e inferior ($H = 2,5$ cm, $T_g^1 = 90$ °C e $v = 0,7$ m s⁻¹) da combinação das variáveis de entrada. Observa-se que, no geral, o aumento da capacidade de processamento exigiu maior área superficial do secador e comprimento da esteira, potências mais elevadas para o compressor centrífugo e esteira, bem como maior área de transferência de calor do trocador de calor, os quais foram resultados teoricamente esperados.

No entanto, para o nível inferior de secagem, mesmo considerando a menor vazão de biomassa seca (500 kg h⁻¹), as dimensões dos equipamentos foram exageradas. Para capacidades acima de 750 kg h⁻¹, os equipamentos parecem inviáveis na prática, exigindo muito espaço e potências altas. Isso ocorreu, pois o processo de secagem foi menos efetivo considerando os menores valores de H , T_g^1 e v . A redução de H impactou inversamente a área superficial do secador, exigindo maiores dimensões do equipamento para acomodar toda a vazão de biomassa. As menores T_g^1 e v demandaram um tempo de secagem mais longo, o que

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

resultou no aumento da área do secador. Com o equipamento de maior porte, as potências necessárias também foram superiores. Apenas os resultados de área de transferência de calor do trocador de calor foram menores para o nível inferior de secagem. Isso aconteceu, pois, a menor T_g^1 (90 °C) resultou em maior diferença de temperatura média logarítmica (ΔT_{ln}) e menor energia térmica total requerida no processo de secagem (Q_t), levando à redução de A_h .

Para o nível superior de secagem, ou seja, para valores maiores de H , T_g^1 e v , nota-se que o tamanho dos equipamentos foi mais adequado e praticável. A área do secador, comprimento e potência para movimentar a esteira foram reduzidos em torno de 90%. Embora as variáveis de projeto também aumentaram com o aumento da vazão de sólidos, as dimensões foram notavelmente menores para esse cenário. As potências requeridas pelo compressor centrífugo também foram adequadas, permanecendo abaixo de 19 kW. Entretanto, observa-se que a maior capacidade de processamento e maior comprimento da esteira resultaram em uma potência relativamente alta para movimentá-la, especialmente para vazões superiores a 1250 kg h⁻¹, onde a potência demandada (E_d) ultrapassou 55 kW. Portanto, operar com uma maior vazão exige atenção ao aumento do consumo energético na secagem e, conseqüentemente, dos custos operacionais. Tais resultados demonstram a importância da escolha da condição operacional ideal para a etapa de secagem. Para as análises a seguir foi definida uma vazão média de biomassa de 1000 kg h⁻¹ e considerado o nível superior de secagem ($H = 4$ cm, $T_g^1 = 120$ °C e $v = 1,0$ m s⁻¹), quando não foi variado algum parâmetro operacional.

Tabela 5.3 Resultados do dimensionamento da etapa de secagem: níveis inferior e superior de secagem.

Nível inferior de secagem (pior cenário)					
Parâmetros	500 kg h⁻¹	750 kg h⁻¹	1000 kg h⁻¹	1250 kg h⁻¹	1500 kg h⁻¹
A_d [m ²]	53,4	80,0	106,7	133,4	160,1
L_d [m]	17,8	26,7	35,6	44,5	53,4
E_d [kW]	88,9	200,1	355,7	555,7	800,3
E_m [kW]	38,7	58,0	77,3	96,7	116,0
A_h [m ²]	70,4	105,6	140,8	176,0	211,2
Nível superior de secagem (melhor cenário)					
Parâmetros	500 kg h⁻¹	750 kg h⁻¹	1000 kg h⁻¹	1250 kg h⁻¹	1500 kg h⁻¹
A_d [m ²]	5,3	8,0	10,7	13,4	16,0
L_d [m]	1,8	2,7	3,6	4,5	5,3
E_d [kW]	8,9	20,0	35,6	55,7	80,1
E_m [kW]	6,3	9,4	12,6	15,7	18,9
A_h [m ²]	86,3	129,4	172,5	215,7	258,8

Fonte: Autora (2025).

Os custos de secagem em função das principais variáveis operacionais são mostrados na Figura 5.1. A Figura 5.1(a) apresenta os custos totais de secagem em função de H

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

considerando diferentes T_g^1 . Pode-se perceber que, independentemente da temperatura do ar, o aumento da altura do leito de sólidos resultou na diminuição dos custos totais de secagem. O aumento da altura do leito, juntamente com a temperatura do ar, diminuiu os custos totais de US\$ 913.303 ano⁻¹ para US\$ 369.112 ano⁻¹, uma redução notável de 59,6%. Isso decorreu do fato de que, para processar a mesma quantidade de sólidos, o aumento da altura do leito resultou em um secador menor e, conseqüentemente, reduziu a vazão de ar necessária para a secagem, o que diminuiu a potência requerida pelo compressor centrífugo. Além disso, a diminuição do comprimento do secador levou a uma menor potência necessária para movimentar a esteira de sólidos. O aumento da temperatura do ar gerou os mesmos resultados. Como consequência, houve uma redução do custo de investimento da etapa de secagem, uma vez que este foi baseado na área superficial do equipamento, assim como uma diminuição nos custos operacionais com energia elétrica, a qual compensou o aumento dos custos com consumo de vapor devido à elevação da temperatura. O resultado foi a redução dos custos totais.

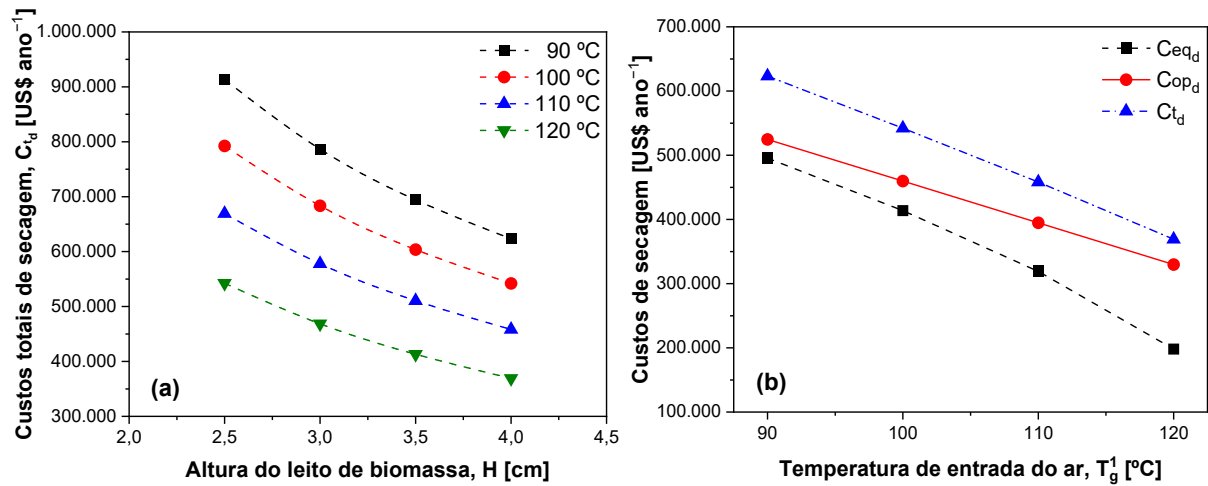
Portanto, a princípio, operar a uma temperatura do ar e altura do leito mais elevadas oferece vantagem econômica. Myllymaa, Holmberg e Ahtila (2020) também observaram a diminuição da área do secador e, conseqüente redução dos custos, com o aumento da temperatura do ar de 40 para 120 °C em um secador de esteira para secagem de mistura de lodo de fuligem e serragem. Myllymaa et al. (2015) verificaram que a área de superfície do secador e os custos de investimento eram inversamente proporcionais à altura do leito na secagem em leito fixo de cavacos de madeira, indicando operar nas maiores alturas possíveis a fim de reduzir os custos. Esses estudos mostram que o resultado obtido neste trabalho está em conformidade com a literatura.

Os custos dos equipamentos (C_{eq_d}), custos operacionais (C_{op_d}) e custos totais da etapa de secagem (C_{t_d}) em função da temperatura do ar de entrada são mostrados na Figura 5.1(b). Como a secagem foi mais efetiva para temperaturas mais altas do ar, devido à maior evaporação da água e ao menor tempo de secagem, a área e o comprimento do secador foram reduzidos, exigindo baixa potência do compressor e menor energia necessária para movimentar a esteira. Assim, todos os custos reduziram consideravelmente com o aumento da temperatura do ar. No entanto, o custo dos equipamentos de secagem apresentou uma curva decrescente com queda mais acentuada, reduzindo-se de US\$ 495.382 ano⁻¹ para US\$ 198.202 ano⁻¹, o que representou uma diminuição de 60,0%. Por outro lado, os custos operacionais reduziram de forma linear e menos acentuada que os custos dos equipamentos, caindo 37,2%, de US\$ 524.701 ano⁻¹ para US\$ 329.709 ano⁻¹. Ambos os fatores resultaram na diminuição dos custos totais, os quais

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

reduziram 40,8%. Isso reflete em uma otimização tanto no investimento quanto nos gastos com energia ao se operar com temperaturas de entrada de ar mais elevadas.

Figura 5.1 Custos da etapa de secagem: (a) custos totais de secagem (C_{td}) em função da altura do leito de biomassa (H) para diferentes temperaturas de entrada do ar (T_g^1), mantendo constante $F_s = 1000 \text{ kg h}^{-1}$, e $v = 1,0 \text{ m s}^{-1}$; (b) equipamentos (C_{eqd}), operacionais (C_{opd}) e totais de secagem (C_{td}) em função de T_g^1 para $F_s = 1000 \text{ kg h}^{-1}$, $H = 4 \text{ cm}$, e $v = 1,0 \text{ m s}^{-1}$.



Fonte: Autora (2025).

Os custos de aquisição dos equipamentos, custos operacionais dos equipamentos e custos totais da planta de pré-tratamento, considerando as etapas de secagem, cominuição, densificação e logística, em função da vazão mássica de biomassa, são apresentados na Figura 5.2(a) para o melhor cenário ou nível superior de secagem ($H = 4 \text{ cm}$, $T_g^1 = 120 \text{ °C}$ e $v = 1,0 \text{ m s}^{-1}$). De acordo com os resultados apresentados, ficou claro que, com o aumento da vazão de biomassa seca, tanto os custos operacionais quanto os custos totais aumentaram expressivamente de forma linear, o que confirma a expectativa de que maior capacidade demanda maiores dimensões dos equipamentos e eleva os gastos com energia e vapor para aquecer o ar de secagem. Os custos totais e operacionais mais que dobraram, passando de US\$ 260.325 ano⁻¹ para US\$ 660.321 ano⁻¹ e US\$ 200.961 ano⁻¹ para US\$ 562.890 ano⁻¹, respectivamente. Já os custos dos equipamentos aumentaram em uma proporção menor com o aumento de F_s , cerca de 64,1%. Além disso, para vazões inferiores a aproximadamente 1125 kg h⁻¹, os custos com equipamentos superaram os custos operacionais, mas esse comportamento

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

se alterou a partir dessa vazão. Isso mostra que a operação em maior escala impacta mais diretamente os custos operacionais.

Os resultados de investimento, custos operacionais totais, receita e lucro anuais da planta de pré-tratamento, apresentados na Figura 5.2(b), aumentaram linearmente com F_s . Observa-se que o investimento foi sempre superior aos custos operacionais, independente da capacidade de processamento de biomassa seca, e apresentou um crescimento mais acentuado, passando de US\$ 1.018.980 para US\$ 1.672.405 (aumento de 64,1%). Isso indica que a planta requer um investimento inicial considerável em infraestrutura e equipamentos.

Para fins de comparação, buscaram-se estudos na literatura que estimaram investimentos de processos usando resíduos de café. Um exemplo é o artigo de Duarte et al. (2021) sobre a viabilidade de uma planta de produção de bioetanol usando polpa, mucilagem e caule do café. As plantas de grande (187 mil t bioetanol ano⁻¹), médio (94 mil t bioetanol ano⁻¹) e pequeno porte (47 mil t bioetanol ano⁻¹) resultaram em investimentos iniciais de US\$ 36.487.192, US\$ 18.446.451 e US\$ 10.526.951, respectivamente. Outro exemplo é o processo de utilização de hastes cortadas de café para fermentação de acetona-butanol-etanol (ABE), alcançando um investimento de US\$ 17.510.000 para produção de 11,2 t ABE h⁻¹ (CARMONA-GARCIA; ORTIZ-SÁNCHEZ; ALZATE, 2019).

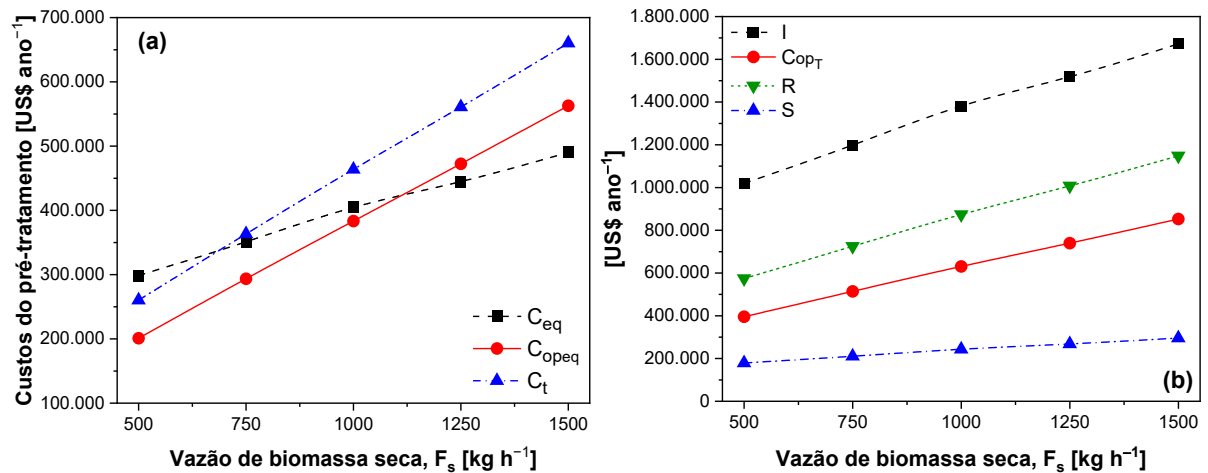
O investimento da planta de pré-tratamento é menor do que o relatado em estudos encontrados na literatura, pois os resíduos utilizados apresentam características distintas, embora todos sejam oriundos do café. Além disso, os produtos obtidos são diferentes (briquetes, bioetanol e ABE) e, conseqüentemente, os processos produtivos também o são, exigindo equipamentos distintos. Outra razão para a diferença no investimento refere-se às capacidades de processamento das plantas descritas nos artigos mencionados, as quais são consideravelmente superiores à capacidade máxima adotada neste trabalho (1,5 t h⁻¹). Assim, caso essa capacidade fosse significativamente maior, possivelmente, o investimento da planta de pré-tratamento aumentaria de forma expressiva.

Para toda faixa de capacidade de processamento, a receita anual ultrapassou os custos operacionais, gerando, conseqüentemente, um lucro anual positivo. Além disso, apesar do aumento dos custos operacionais (de US\$ 395.391 ano⁻¹ para US\$ 852.533 ano⁻¹), demonstrou-se que a maior vazão mássica de biomassa proporcionou maior atratividade, uma vez que uma maior produção de briquetes proporcionou maior lucro anual (de US\$ 178.532 ano⁻¹ para US\$ 295.356 ano⁻¹). Ou seja, o aumento dos custos operacionais devido a maior vazão foi compensado pelo aumento do lucro. Desse modo, operar na vazão de biomassa mais elevada é atrativo economicamente, desde que os parâmetros de projeto de secagem permaneçam dentro

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

dos padrões práticos. Foi visto, na Tabela 5.3, que as dimensões dos equipamentos foram adequadas a 1500 kg h^{-1} , considerando o nível superior de secagem.

Figura 5.2 Custos da planta de pré-tratamento para $T_g^1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $H = 4 \text{ cm}$, e $v = 1,0 \text{ m s}^{-1}$: (a) equipamentos (C_{eq}), operacionais (C_{opeq}), e custos totais das etapas (C_t) em função da vazão de biomassa seca (F_s); (b) investimento (I), custos operacionais (C_{opT}), receita (R) e lucro (S) em função de F_s .



Fonte: Autora (2025).

A Tabela 5.4 apresenta os resultados dos índices econômicos para os dois níveis de secagem. Nota-se que a planta de pré-tratamento de casca de café demonstrou viabilidade econômica em todos os cenários, com VPL positivo, TIR superior à TMA adotada (10,86% a.a.) e períodos de retorno razoáveis. Dessa forma, entende-se que a venda dos briquetes a partir da casca de café por via úmida é viável. Discussões sobre o preço e valor de venda do briquete são feitas na Seção 5.2.3.

Para o nível inferior de secagem, os valores de VPL foram maiores. Já os resultados de TIR para os dois cenários foram bem próximos, assim como os *paybacks*. Pode-se dizer que os resultados de *payback* simples e descontado de ambos os cenários foram da mesma magnitude: superior a 5 anos e inferior a 6 anos, e superior a 9 anos e inferior a 10 anos, respectivamente.

Além disso, observa-se que o aumento da capacidade de processamento resultou na elevação do lucro anual, o que tornou o processo mais competitivo e com maiores valores de VPL , bem como valores de TIR ligeiramente superiores e uma sutil diminuição nos resultados de *payback*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 5.4 Índices econômicos da planta de pré-tratamento: níveis inferior e superior de secagem.

Nível inferior de secagem (pior cenário)					
Índices econômicos	500 kg h ⁻¹	750 kg h ⁻¹	1000 kg h ⁻¹	1250 kg h ⁻¹	1500 kg h ⁻¹
VPL_{pt} [US\$]	74.726	101.134	129.506	159.267	192.046
TIR [%]	11,62	11,70	11,78	11,86	11,95
P [anos]	5,74	5,72	5,70	5,68	5,66
P_d [anos]	9,48	9,43	9,38	9,32	9,27
Nível superior de secagem (melhor cenário)					
Índices econômicos	500 kg h ⁻¹	750 kg h ⁻¹	1000 kg h ⁻¹	1250 kg h ⁻¹	1500 kg h ⁻¹
VPL_{pt} [US\$]	38.635	48.775	58.802	67.813	77.273
TIR [%]	11,75	11,82	11,86	11,91	11,95
P [anos]	5,71	5,69	5,68	5,67	5,66
P_d [anos]	9,39	9,35	9,32	9,29	9,27

Fonte: Autora (2025).

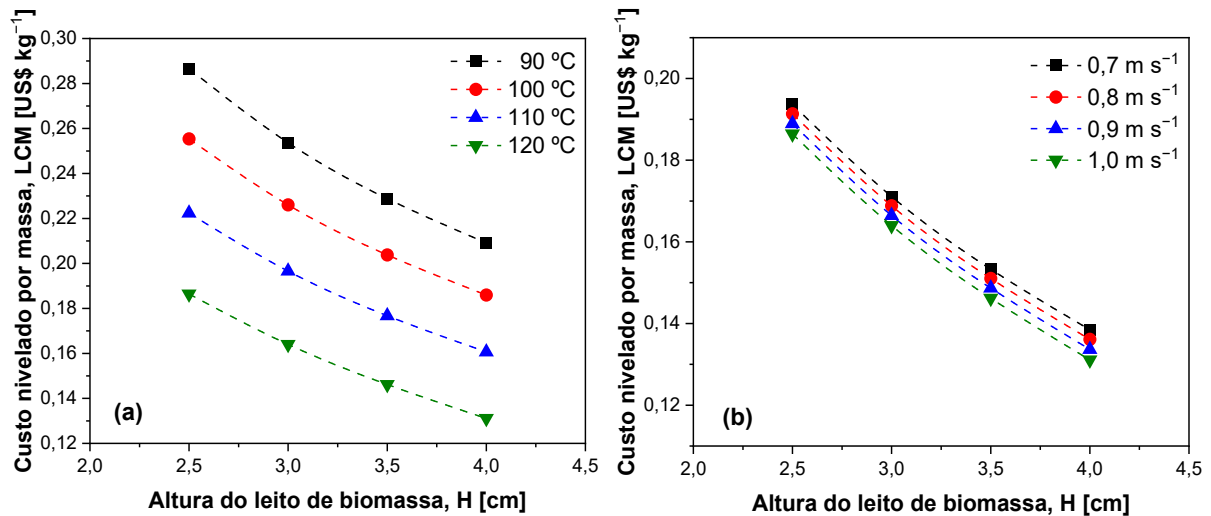
5.2.2 Custo nivelado de produção por massa de briquete

O parâmetro econômico LCM foi analisado, uma vez que a planta de pré-tratamento apresentou viabilidade econômica, independente da combinação das variáveis de secagem, e sem diferença notável nos valores de TIR e $payback$. A Figura 5.3(a) ilustra a influência da altura do leito de sólidos, bem como da temperatura de entrada do ar, nos valores de LCM , considerando $F_s = 1000 \text{ kg h}^{-1}$ e $v = 1,0 \text{ m s}^{-1}$. Com base nos resultados apresentados, percebe-se que LCM diminuiu consideravelmente com o aumento da altura do leito e da temperatura do ar, cerca de 54,3% (de US\$ 0,287 kg⁻¹ para US\$ 0,131 kg⁻¹). Portanto, pode-se afirmar que as condições de $H = 4 \text{ cm}$ e $T_g^1 = 120 \text{ °C}$ são as ótimas neste caso, pois são capazes de proporcionar o menor LCM . Assim, é possível estimar um preço do briquete mais baixo, ao mesmo tempo que garante a viabilidade econômica do projeto, dado que quando $P_{briq} > LCM$, há viabilidade.

Por outro lado, a velocidade do ar não apresentou impacto significativo no LCM , apenas a altura do leito, conforme apresentado na Figura 5.3(b) para $F_s = 1000 \text{ kg h}^{-1}$ e $T_g^1 = 120 \text{ °C}$. Para a espessura de biomassa de 4 cm, o aumento na velocidade de $0,7 \text{ m s}^{-1}$ para $1,0 \text{ m s}^{-1}$, gerou uma redução mínima no LCM (de US\$ 0,138 kg⁻¹ para US\$ 0,131 kg⁻¹), podendo considerar essa variação como desprezível. Dessa forma, a otimização do processo de secagem deve priorizar outros parâmetros, como a altura do leito e a temperatura de entrada do ar, para alcançar maior eficiência e rentabilidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 5.3 Influência das condições de secagem no custo nivelado de produção por massa de briquete (*LCM*): (a) *LCM* parametrizado na temperatura de entrada do ar (T_g^1) para diferentes valores de altura do leito de biomassa (H); (b) *LCM* parametrizado na velocidade do ar (v) para diferentes valores de H .



Fonte: Autora (2025).

O custo de produção por massa de briquete (C_{briq}), *LCM*, preço (P_{briq}) e valor de venda do briquete (V_{briq}) em função da capacidade de processamento da planta (F_s) são mostrados nas Figuras 5.4(a) e 5.4(b) para os níveis superior e inferior de secagem, respectivamente. Observa-se que, em ambos os cenários, C_{briq} foi sempre inferior ao *LCM*. Contudo, devido à margem de lucro selecionada ($ML = 13\%$), o P_{briq} foi ligeiramente superior ao *LCM*. Por isso, houve viabilidade econômica da planta, independente da combinação das variáveis operacionais de secagem. É importante ressaltar que os valores de P_{briq} poderiam ser significativamente superiores ou inferiores aos resultados de *LCM*, caso a ML fosse superior a 13% ou inferior a esse valor, respectivamente. Assim, para uma determinada capacidade de processamento, o resultado de *LCM* é fixo, enquanto o P_{briq} pode ser manipulado por meio da ML . V_{briq} foi notavelmente superior ao P_{briq} , uma vez que engloba, além do C_{briq} e ML , os impostos sobre vendas praticadas no Brasil (IP).

Nota-se que os valores de *LCM* de US\$ 0,115 kg⁻¹ a US\$ 0,172 kg⁻¹, obtidos no melhor cenário ou nível superior de secagem, foram significativamente menores que os do nível inferior (US\$ 0,285 kg⁻¹ a US\$ 0,333 kg⁻¹), em razão dos menores custos operando com maior eficiência de secagem. O *LCM* menor permite maior competitividade no mercado. Assim, esse parâmetro econômico pode ser utilizado como critério de decisão da melhor combinação das condições operacionais, visto que o VPL foi positivo independente da combinação de variáveis. Os valores de VPL do nível inferior de secagem apenas foram maiores (vide Tabela 5.4), pois

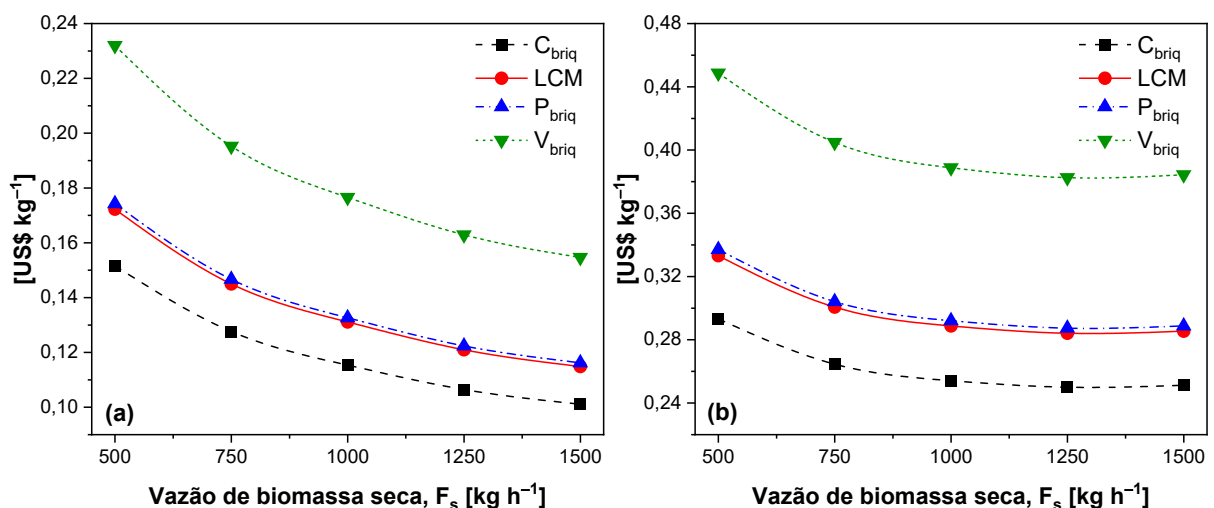
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

os preços do briquete tiveram que ser mais elevados para cobrir os custos unitários do produto, gerando receitas mais altas.

A faixa de preços do briquete (P_{briq}) para o nível superior de secagem foi de US\$ 0,116 kg^{-1} a US\$ 0,174 kg^{-1} , enquanto para o nível inferior foi de US\$ 0,289 kg^{-1} a US\$ 0,337 kg^{-1} . Sendo assim, considerando o melhor cenário, o preço praticado pode ser menor para garantir a viabilidade econômica. Conseqüentemente, o valor de venda (V_{briq}), levando em conta os impostos nacionais de comercialização, foi cerca de US\$ 0,155 kg^{-1} a US\$ 0,232 kg^{-1} para o melhor cenário, faixa bem menor que do pior cenário (US\$ 0,384 kg^{-1} a US\$ 0,449 kg^{-1}) e até mesmo inferior aos valores de C_{briq} (US\$ 0,251 kg^{-1} a US\$ 0,293 kg^{-1}).

O aumento na capacidade de processamento da planta diminuiu todos os parâmetros da Figura 5.4. Entretanto, a redução foi mais expressiva nas condições do nível superior de secagem, alcançando aproximadamente 33,3%. No nível inferior, essa diminuição foi de cerca de 14,3%, e a partir de 1000 kg h^{-1} , os parâmetros permaneceram praticamente constantes, como V_{briq} em torno de US\$ 0,385 kg^{-1} .

Figura 5.4 Custo de produção por massa (C_{briq}), custo nivelado de produção por massa (LCM), preço (P_{briq}) e valor de venda do briquete (V_{briq}) em função da vazão de biomassa seca (F_s) para (a) níveis superior, e (b) inferior de secagem.



Fonte: Autora (2025).

De maneira semelhante, Carmona-Garcia, Ortiz-Sánchez e Alzate (2019) verificaram a redução do custo de produção de butanol, acetona e etanol a partir de hastes de café através do aumento da capacidade da planta. Desse modo, o aumento da vazão mássica de biomassa,

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

apesar de resultar em maior investimento e aumento nos custos operacionais, como mostrado na Figura 5.2(b), é compensado por um menor valor de LCM , sendo viável operar com alta capacidade. Ao processar uma quantidade maior de biomassa, os custos fixos são diluídos, resultando em um menor custo por massa de produto. Neste caso, usinas de maior capacidade podem fornecer briquetes a um menor custo, o que proporciona maior rentabilidade. Somente é importante atentar-se aos parâmetros de projeto ao aumentar significativamente a vazão de processamento, pois foi visto que isso resulta em maiores dimensões dos equipamentos, principalmente em uma alta potência para movimentar a esteira do secador. Deve-se, então, equilibrar os parâmetros de projeto com os resultados econômicos.

5.2.3 Custo de produção por massa, preço e valor de venda do briquete

Para o cenário de melhor combinação de variáveis, os resultados de custo de produção por massa (C_{briq}), custo nivelado de produção por massa (LCM), preço (P_{briq}) e valor de venda do briquete (V_{briq}), variando de 500 a 1500 kg h⁻¹, foram convertidos em R\$ t⁻¹, considerando a taxa de câmbio adotada neste trabalho de R\$ 5,2439 US\$⁻¹ (IPEA, 2024). Os valores obtidos são mostrados na Tabela 5.5.

O custo de produção por massa (C_{briq}) variou de R\$ 530 t⁻¹ a R\$ 795 t⁻¹, sendo o custo mínimo obtido na maior vazão mássica de biomassa (1500 kg h⁻¹). Para fins de comparação, Oliveira et al. (2015) informou um custo de R\$ 0,460 kg⁻¹ de briquete de casca de café em 2015. Utilizando a calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil e considerando o Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M/FGV) (BCB, 2025), estimou-se que esse valor equivaleria a R\$ 997 t⁻¹ em março de 2025, indicando que a faixa de C_{briq} obtida neste trabalho foi inferior a outro custo da literatura.

Stolarski et al. (2013) estimaram os custos de briquetes de diferentes biomassas agrícolas e florestais na Polônia, que variaram de € 66,55 t⁻¹ a € 137,87 t⁻¹ em 2013, equivalendo a R\$ 191 t⁻¹ a R\$ 396 t⁻¹ na época (EXCHANGE RATES, 2025). Usando o IGP-M/FGV (BCB, 2025), essa faixa ficaria em torno de R\$ 453 t⁻¹ a 938 t⁻¹ em março de 2025. Sendo assim, os resultados de C_{briq} deste trabalho estão em conformidade com outro dado da literatura.

O LCM ficou em torno de R\$ 602 t⁻¹ a R\$ 903 t⁻¹, com média igual a R\$ 718 t⁻¹. Como o LCM representa o preço mínimo de venda do biocombustível para anular o VPL , o preço de

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

venda do briquete de casca de café no Brasil deve ser, no mínimo, superior a R\$ 602 t⁻¹ para garantir viabilidade econômica do processo, conforme os resultados obtidos.

O preço do briquete (P_{briq}) variou de R\$ 609 t⁻¹ a R\$ 914 t⁻¹, considerando a maior (1500 kg h⁻¹) e menor capacidade de processamento (500 kg h⁻¹), respectivamente. Já o valor de venda mínimo (V_{briq}) foi de R\$ 811 t⁻¹ em 1500 kg h⁻¹. Segundo o estudo de Felfli et al. (2011), os preços de venda dos briquetes variam bastante, dependendo do tipo de cliente, do tamanho do pedido e, eventualmente, da distância de entrega, quando o serviço de entrega é oferecido pelo fabricante. Os autores estimaram preços entre R\$ 200 t⁻¹ a R\$ 305 t⁻¹ no mercado brasileiro em 2011. Usando o IGP-M/FGV (BCB, 2025), essa faixa equivaleria a aproximadamente R\$ 537 t⁻¹ a R\$ 819 t⁻¹ em março de 2025. Não se sabe se os autores incluíram no preço os impostos sobre vendas, mas, mesmo assim, tanto P_{briq} quanto V_{briq} mínimos enquadram-se no intervalo relatado pela literatura.

Stolarski et al. (2013) também determinaram os preços dos briquetes de biomassa, que variaram entre € 94,60 t⁻¹ a € 132,70 t⁻¹ (R\$ 272 t⁻¹ a R\$ 381 t⁻¹ em 2013) (EXCHANGE RATES, 2025). A partir do IGP-M/FGV, em março de 2025, esse intervalo equivaleria a R\$ 644 t⁻¹ a R\$ 903 t⁻¹ (BCB, 2025). Como o artigo não fez menção a impostos, pode-se comparar essa faixa com o preço mínimo do briquete de R\$ 609 t⁻¹. Logo, o preço obtido no trabalho, para a maior capacidade de processamento, foi até mesmo inferior aos preços estimados no referido artigo.

De acordo com a fabricante de briquetadeiras BIOMAX (2025), o preço de venda do briquete varia, em média, de R\$ 300 t⁻¹ a R\$ 450 t⁻¹, dependendo da região. Se esse intervalo fosse considerado como o P_{briq} na análise econômica do projeto, não haveria viabilidade da planta de pré-tratamento, visto que o preço teve que ser no mínimo R\$ 609 t⁻¹ para gerar lucro e, ao considerar os impostos cobrados no Brasil, o valor de venda no mercado seria no mínimo R\$ 811 t⁻¹. Por outro lado, alguns anúncios de briquetes no mercado nacional variam entre R\$ 800 t⁻¹ até R\$ 1.200 t⁻¹, considerando biomassa de resíduo têxtil, casca de amendoim, serragem e madeira (MF RURAL, 2025a; 2025b; 2025c). Assim, pode-se dizer que o valor mínimo de venda alcançado no trabalho está dentro da faixa comercial.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 5.5 Resultados de custo de produção (C_{briq}), custo nivelado (LCM), preço (P_{briq}) e valor de venda do briquete (V_{briq}), para capacidades variando de 500 a 1500 kg h⁻¹, considerando o melhor cenário de secagem, convertidos para R\$ t⁻¹ e comparados aos valores da literatura.

	Resultados		Literatura	Referência
C_{briq}	0,101 a 0,152 US\$ kg ⁻¹	530 a 795 R\$ t ⁻¹	997 R\$ t ⁻¹	Oliveira et al. (2015)
LCM	0,115 a 0,172 US\$ kg ⁻¹	602 a 903 R\$ t ⁻¹	–	–
P_{briq}	0,116 a 0,174 US\$ kg ⁻¹	609 a 914 R\$ t ⁻¹	537 a 819 R\$ t ⁻¹ 644 a 903 R\$ t ⁻¹	Felfli et al. (2011) Stolarski et al. (2013)
V_{briq}	0,155 a 0,232 US\$ kg ⁻¹	811 a 1.216 R\$ t ⁻¹	300 a 450 R\$ t ⁻¹ 800 a 1.200 R\$ t ⁻¹	Biomax (2025) MF Rural (2025a; 2025b e 2025c)

Fonte: Autora (2025).

Para saber se o briquete de casca de café pode ser mais econômico que a lenha, amplamente utilizada no Brasil, compararam-se P_{briq} e V_{briq} com o preço médio da lenha nacional comercializada ao consumidor. Em fevereiro de 2025, seu preço equivalia a R\$ 158,84 m⁻³ (SEAB, 2025). Considerando a densidade de 390 kg m⁻³ para lenha comercial (GIODA, 2019), o preço era de aproximadamente R\$ 0,407 kg⁻¹. Esse valor mais acessível pode dificultar a aceitação do briquete pelos consumidores na prática. Entretanto, como o PCI do briquete de casca de café (20,01 MJ kg⁻¹) (OLIVEIRA et al., 2015) pode ser quase o dobro do PCI da lenha de eucalipto (10,46 MJ kg⁻¹) (DRIEMEIER, 2009; MORAES; ABREU, 2020), para a lenha fornecer a mesma quantidade de energia fornecida em 1 kg de briquete, seriam necessários 1,91 kg de lenha. Isso resulta em um preço em torno de R\$ 0,777 ou R\$ 777, considerando 1910 t de lenha, o qual é maior que o preço mínimo do briquete de casca de café considerado neste trabalho (R\$ 609 t⁻¹), mas inferior ao valor com acréscimo de impostos no país (R\$ 811 t⁻¹). Na prática, esse valor (V_{briq}) pode ser reduzido caso existam incentivos fiscais para a produção de fontes de energia renovável, como o caso da planta de pré-tratamento.

O lado direito da Inequação (5.1) representa o cálculo feito para chegar ao resultado de R\$ 0,777, preço equivalente em lenha para gerar a mesma energia de 1 kg de briquete. Caso essa inequação seja satisfeita para outras biomassas, pode-se afirmar que o uso do briquete é mais econômico que o da lenha.

$$V_{briq} < \left(\frac{PCI}{PCI_l} \right) P_l \quad (5.1)$$

Sendo V_{briq} dado em R\$ kg⁻¹, PCI_l o poder calorífico inferior da lenha [MJ kg⁻¹] e P_l o preço da lenha [R\$ kg⁻¹].

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em vista do exposto, no geral, concluiu-se que o preço mínimo do briquete calculado no trabalho (P_{briq}) enquadrou-se aos valores relatados na literatura e o valor mínimo de venda (V_{briq}) se aproximou de alguns anúncios do mercado brasileiro. No entanto, o valor de venda do briquete de casca de café, com impostos, não foi tão competitivo ao compará-lo com a lenha. Foi discutido na Seção 3.10 que os briquetes e seus benefícios são desconhecidos para muitos potenciais consumidores e empresários. Logo, se o consumidor brasileiro estiver focado apenas no menor preço e desconsiderar os aspectos sustentáveis e energéticos, provavelmente não optará pelo briquete de casca de café. Desse modo, apesar da viabilidade econômica, a planta de pré-tratamento pode não ser tão promissora na prática se os impostos sobre vendas (ICMS, PIS/COFINS) forem considerados.

A viabilidade econômica da planta foi garantida a partir do preço mínimo do briquete de R\$ 609 t^{-1} (US\$ 0,116 kg^{-1}), valor que se elevou com a inclusão de tributos. Sendo assim, caso haja suporte político e incentivos para a indústria produtora de briquetes, como a redução da carga tributária, o briquete pode ser mais econômico que a lenha (R\$ 609 t^{-1} < R\$ 777). Isso incentivaria o uso do briquete de casca de café em larga escala e contribuiria para o aumento da participação da biomassa na matriz energética brasileira.

5.3 Planta de bioenergia

Nesta seção são apresentados os resultados econômicos da planta de bioenergia, considerando as etapas do pré-tratamento da casca de café, gerada na via úmida, e a tecnologia de combustão dos briquetes a fim de produzir energia elétrica para venda.

5.3.1 Análise econômica do cenário base

A Figura 5.5 apresenta a contribuição de cada etapa da planta de bioenergia nos custos do cenário base, divididos em investimento e custos operacionais e de manutenção. O investimento total (US\$ 4.795.998,82) foi cerca de 7,36 vezes maior que os custos operacionais totais (US\$ 651.628,71 ano^{-1}). Segundo IRENA (2012), dentre as tecnologias de conversão termoquímica, como gaseificação e combustão em leito fluidizado, a combustão direta em *stoker boiler* apresenta um dos menores custos de capital, sendo superada apenas pela co-combustão em termos de economia. Mesmo assim, somente a tecnologia de conversão termoquímica foi responsável pela maior parte do investimento, cerca de 63,7%, e 24,4% dos custos operacionais. O investimento da conversão é alto, uma vez que inclui vários elementos,

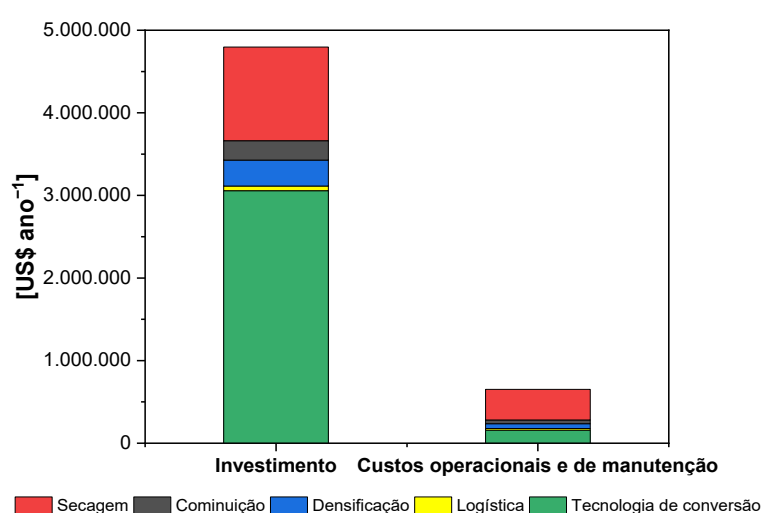
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

como equipamentos, sistemas de manuseio, engenharia, construção, planejamento e capital de giro.

A etapa de secagem requer despesas anuais mais elevadas para operação e manutenção, representando mais da metade dos custos operacionais totais (56,8%) e 23,6% do investimento. A briquetagem apresentou uma contribuição moderada no investimento (6,5%) e nos custos operacionais (8,8%), sendo a segunda etapa mais dispendiosa do pré-tratamento. Já as porções referentes aos custos da moagem e logística foram praticamente irrelevantes às das outras etapas.

Esses resultados mostram que a secagem possui um impacto significativo nos custos da planta de bioenergia. Segundo Poirier (2015), o custo operacional de um secador industrial possui contribuição significativa no custo total de produção do produto acabado, devido ao alto consumo de combustível dessa operação para aquecer o ar de secagem. Segundo o autor, é comum subestimar o impacto de melhorias no design de secadores tipo esteira. Entretanto, Holmberg, Isaksson e Lahdelma (2014) mencionaram a importância de estudar a influência de parâmetros técnicos e econômicos no projeto da configuração ótima do secador. Logo, é fundamental encontrar uma condição operacional que possa equilibrar os custos com a umidade necessária da biomassa seca.

Figura 5.5 Investimento e custos operacionais e de manutenção da planta de bioenergia considerando o cenário base: $C_{un} = \text{US\$ } 3.000 \text{ kW}^{-1}$, $F_s = 650 \text{ kg h}^{-1}$, $T_g^1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $v = 0,80 \text{ m s}^{-1}$ e $H = 4 \text{ cm}$.



Fonte: Autora (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As estimativas de custos da planta de bioenergia são apresentadas na Tabela 5.6. Nota-se que se obteve um lucro negativo, diferentemente dos resultados obtidos para a planta somente de pré-tratamento. A receita da venda de energia não compensou os custos. Esse resultado ocorreu devido aos consideráveis custos operacionais relacionados à etapa de conversão termoquímica, ao baixo valor da tarifa de venda de energia no Brasil, à produção relativamente baixa de energia elétrica e aos altos custos com o consumo de vapor para aquecer o ar da etapa de secagem (C_{opeq}). Outra forma comum de aquecer o ar de secagem é por meio de queimador a gás; porém, esse método é utilizado em secadores que requerem temperaturas do ar significativamente mais elevadas do que as exigidas pelo secador de esteira, que opera abaixo de 200 °C (LI et al., 2012). Por essa razão, manteve-se no projeto o aquecimento do ar por meio do trocador de calor utilizando vapor.

Além disso, parte da energia elétrica total gerada foi consumida no funcionamento dos próprios equipamentos, sendo baixa a energia excedente, disponível para venda. Somente a etapa de secagem foi responsável por 71,9% da energia elétrica consumida, seguida da densificação (23,4%) e cominuição (4,7%). Trata-se, portanto, de uma planta que gera uma quantidade reduzida de energia elétrica a um custo operacional e de investimento elevados.

Com relação aos índices econômicos do cenário base, obteve-se um *VPL* negativo, demonstrando inviabilidade econômica da planta de geração de energia a partir dos briquetes de casca de café. Isso ocorreu não apenas pelos altos custos operacionais, especialmente da secagem, mas também pelo elevado investimento da tecnologia de conversão termoquímica aliado à baixa produção de energia elétrica. Esse último fato também pode ser atribuído à eficiência relativamente baixa dos sistemas de combustão de biomassa, que não ultrapassam 30% (IRENA, 2022). Por esses motivos, o custo nivelado da energia gerada encareceu, resultando em um *LCOE* igual a US\$ 300,96 MWh⁻¹. Esse valor não se enquadrava na faixa típica para projetos de geração de bioenergia (até US\$ 250 MWh⁻¹), segundo a IRENA (2022). Isso ressalta a importância de se avaliar os parâmetros de secagem e encontrar uma condição operacional que seja capaz de proporcionar melhores índices econômicos.

Comparando com *LCOEs* de outras fontes de energia renovável, como biogás (US\$ 81,20 MWh⁻¹), solar fotovoltaica (US\$ 138,80 MWh⁻¹), eólica (US\$ 59,28 MWh⁻¹) e hidrocinética (US\$ 74,40 – 98,01 MWh⁻¹) (SILVA et al., 2021), o *LCOE* obtido pode ser considerado alto, tornando a combustão dos briquetes de casca de café pouco competitiva no mercado de energia. Como exemplo, Freitas e Renó (2022) estudaram a viabilidade de um cenário de gaseificação da casca de café e produção de energia elétrica. Os autores concluíram

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

que, embora tecnicamente viável, a análise econômica mostrou-se inviável, com $LCOE$ superior (414,8 – 476,8 R\$ MWh⁻¹) a todos os outros valores analisados de $LCOE$ para diferentes fontes de energia.

Tabela 5.6 Resultados econômicos da planta de bioenergia: cenário base.

Resultados econômicos	Valor
Custos dos equipamentos da etapa de secagem (C_{eqd}) [US\$]	332.209,74
Custos dos equipamentos da etapa de cominuição (C_{eqc}) [US\$]	68.874,50
Custos dos equipamentos da etapa de briquetagem (C_{eqb}) [US\$]	91.819,05
Custos dos equipamentos da etapa de logística (C_{eqs}) [US\$]	16.831,89
Custo fixo do pré-tratamento (C_f) [US\$]	1.656.639,36
Capital de giro do pré-tratamento (C_w) [US\$]	82.831,97
Investimento do pré-tratamento (I_{pt}) [US\$]	1.739.471,32
Investimento da etapa de conversão termoquímica (I_e) [US\$]	3.056.527,50
Investimento total da planta de bioenergia (I) [US\$]	4.795.998,82
Custos operacionais dos equipamentos de secagem (C'_{opeq}) [US\$ ano ⁻¹]	193.427,27
Custos operacionais da etapa de conversão termoquímica (C_{ope}) [US\$ ano ⁻¹]	158.785,38
Custos operacionais do pré-tratamento (C'_{op}) [US\$ ano ⁻¹]	492.843,33
Custos operacionais totais da planta de bioenergia (C_{opT}) [US\$ ano ⁻¹]	651.628,71
Custos totais anuais da planta de bioenergia (C_t) [US\$ ano ⁻¹]	1.461.221,43
Energia elétrica total (E_T) [MWh ano ⁻¹]	4.998,03
Energia elétrica excedente (E) [MWh ano ⁻¹]	4.220,68
Receita pela venda de energia elétrica (R_e) [US\$ ano ⁻¹]	284.120,60
Lucro líquido (S_e) [US\$ ano ⁻¹]	- 367.508,11
Valor Presente Líquido da planta de bioenergia (VPL) [US\$]	- 7.925.382,28
Custo Nivelado de Eletricidade ($LCOE$) [US\$ MWh ⁻¹]	300,96

Fonte: Autora (2025).

5.3.2 Análise de sensibilidade aos parâmetros econômicos

A Figura 5.6(a) mostra a variação de VPL para três cenários diferentes, mantendo as variáveis operacionais de secagem no cenário base: um cenário otimista, em que o custo unitário da tecnologia *stoker boiler* (C_{un}) foi igual a US\$ 2.000 kW⁻¹; o cenário base, sendo o custo unitário igual a US\$ 3.000 kW⁻¹; e um cenário pessimista, com o maior valor de custo unitário, igual a US\$ 4.000 kW⁻¹. Variou-se C_{un} a fim de verificar seu impacto nos resultados, visto que o investimento da tecnologia de conversão foi responsável pela maior contribuição nos custos.

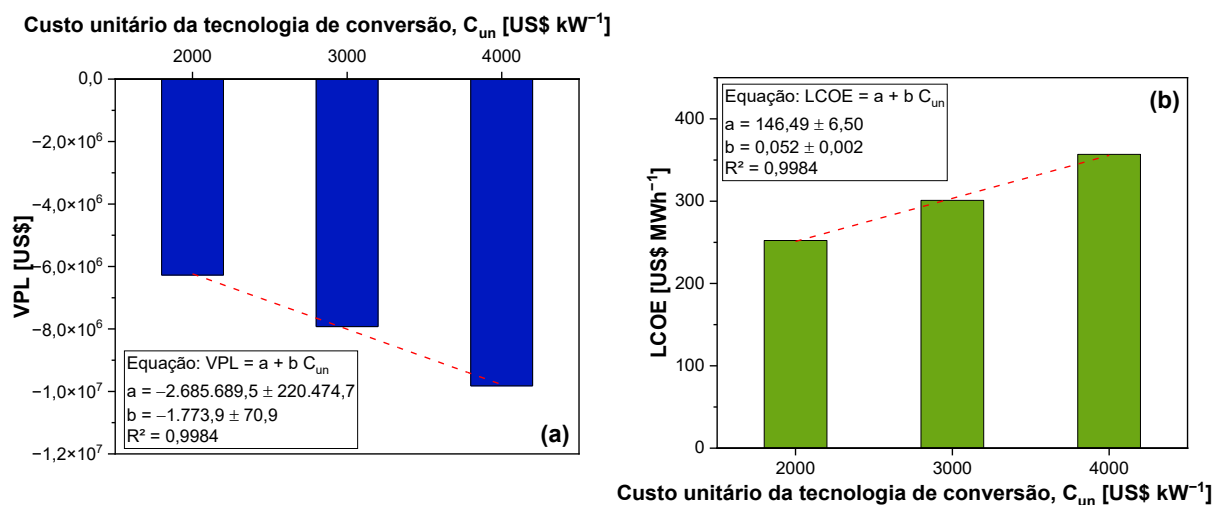
Observa-se que à medida que o custo unitário aumentou, o VPL ficou cada vez mais negativo, seguindo uma tendência linear. Mesmo para o cenário otimista, o VPL alcançado não foi positivo. Nestas condições operacionais, seria necessário um custo unitário negativo para anular o VPL . Ou seja, não houve viabilidade econômica da usina de bioenergia a partir da casca de café, por via úmida, nessas condições. Isso sugere que a tecnologia selecionada possui limitações econômicas intrínsecas, o que representa um forte indicativo do motivo pelo qual a

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

casca de café úmida ainda não é utilizada, em larga escala, para geração de energia por meio da combustão. Para alcançar a viabilidade econômica, seria necessário explorar outras tecnologias para aproveitamento da casca de café ou tentar otimizar os processos de secagem e combustão, além de considerar possíveis incentivos e políticas de apoio.

A Figura 5.6(b) apresenta a variação do $LCOE$ para os três cenários: otimista ($C_{un} = \text{US\$ } 2.000 \text{ kW}^{-1}$), base ($C_{un} = \text{US\$ } 3.000 \text{ kW}^{-1}$) e pessimista ($C_{un} = \text{US\$ } 4.000 \text{ kW}^{-1}$), mantendo as variáveis operacionais de secagem no cenário base. Conforme o custo unitário aumentou, o $LCOE$ apresentou um aumento linear, variando de $\text{US\$ } 252,29 \text{ MWh}^{-1}$ a $\text{US\$ } 356,88 \text{ MWh}^{-1}$. A tarifa de venda de energia (T) teria que ser maior que esses valores para alcançar a viabilidade econômica. Assim, investimentos deveriam ser feitos para aumentar a tarifa da biomassa no Brasil, a fim de tornar essa fonte de energia economicamente viável e competitiva no mercado. Para isso, é necessário promover políticas públicas que incentivem a utilização da biomassa, oferecendo subsídios governamentais e isenções fiscais para os projetos de bioenergia. Além de investimentos em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar as tecnologias de conversão da biomassa, buscando maior eficiência e menores custos. Entretanto, mesmo se houver incentivos nessa área, os $LCOEs$ obtidos são extremamente altos se comparados com o valor da tarifa base de venda de energia atual, de aproximadamente $\text{US\$ } 67,32 \text{ MWh}^{-1}$.

Figura 5.6 (a) VPL e (b) LCOE em função do custo unitário otimista ($\text{US\$ } 2.000 \text{ kW}^{-1}$), base ($\text{US\$ } 3.000 \text{ kW}^{-1}$) e pessimista ($\text{US\$ } 4.000 \text{ kW}^{-1}$), considerando $F_s = 650 \text{ kg h}^{-1}$, $T_g^1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $v = 0,80 \text{ m s}^{-1}$ e $H = 4 \text{ cm}$.



Fonte: Autora (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

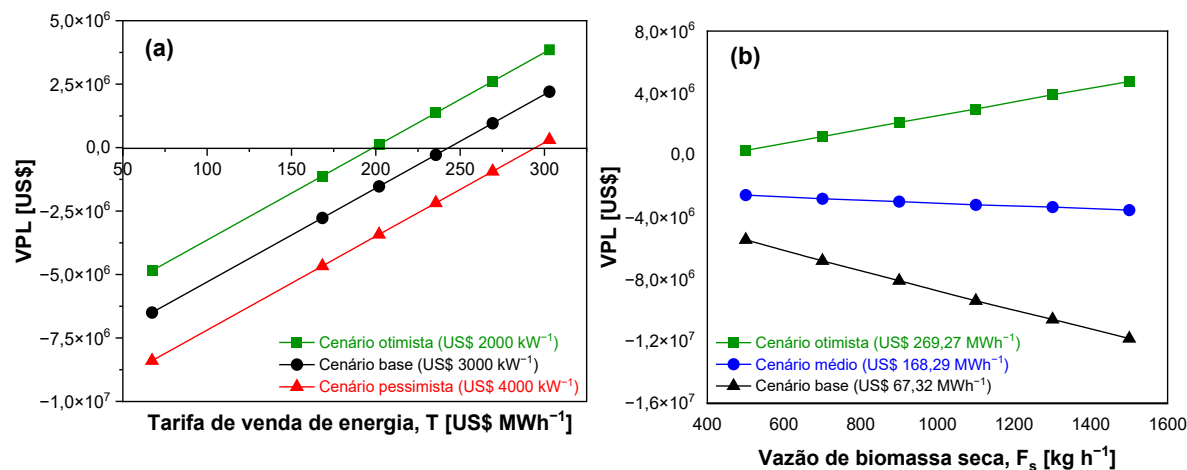
A Figura 5.7(a) ilustra os resultados de *VPL* em função da tarifa de venda de energia (*T*) nos três cenários (otimista, base e pessimista). A maior temperatura de entrada do ar de secagem (120 °C) foi considerada por proporcionar menores custos, conforme será discutido na Seção 5.3.3. É possível observar a tendência linear de aumento do *VPL* com o crescimento da tarifa de energia. A viabilidade econômica ($VPL > 0$) foi alcançada quando a tarifa foi superior a US\$ 198,58 MWh^{-1} e US\$ 243,27 MWh^{-1} para os cenários otimista e base, respectivamente. Isso é mais que o triplo da tarifa base (US\$ 67,32 MWh^{-1}). Sendo assim, a tarifa deve ser no mínimo três vezes superior para que o projeto seja viável. No cenário pessimista, somente houve viabilidade econômica quando a tarifa foi 4,5 vezes superior à tarifa base, correspondendo a US\$ 302,92 MWh^{-1} . Essas tarifas elevadas não seriam alcançadas nem mesmo se o projeto fosse destinado exclusivamente ao abastecimento da própria planta, utilizando a modalidade de geração distribuída. Isso demonstra a impossibilidade de se produzir energia elétrica em larga escala a partir da combustão da casca de café processada por via úmida. As tarifas exigidas são proibitivamente altas em comparação com a média do mercado.

A Figura 5.7(b) mostra a variação do *VPL* em função da vazão de biomassa seca (F_s) para três cenários distintos: cenário otimista, com tarifa de energia equivalente a quatro vezes a tarifa base (US\$ 269,27 MWh^{-1}); cenário médio (US\$ 168,29 MWh^{-1}) e cenário pessimista, em que a tarifa foi igual à tarifa base (US\$ 67,32 MWh^{-1}). Observa-se que, no cenário otimista, houve viabilidade econômica e o *VPL* foi diretamente proporcional ao aumento da capacidade de processamento. Isso indica que, com uma tarifa de energia suficientemente elevada, vazões mais altas são ideais para serem empregadas, mantendo cuidado para que as variáveis de projeto apresentem resultados práticos.

No entanto, nos demais cenários, o aumento da capacidade de processamento resultou em diminuição do *VPL*, levando a maiores prejuízos econômicos. Isso ocorreu devido ao aumento dos custos de investimento e de operação associados a uma capacidade mais elevada, os quais superaram os benefícios financeiros gerados pelo aumento da produção de energia, uma vez que as tarifas estavam abaixo do nível necessário para que o projeto se tornasse rentável. Essa análise evidencia que, para que o aumento da vazão de biomassa seca seja economicamente vantajoso, é necessário que a tarifa de venda de energia esteja significativamente acima da tarifa base. Caso contrário, o aumento de capacidade pode não ser suficiente para compensar os custos adicionais de investimento e operação. Assim, quando a tarifa é baixa, elevar a capacidade de produção a fim de aumentar a energia elétrica gerada pela planta contribui negativamente para o *VPL*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 5.7 VPL em função (a) da tarifa de venda de energia (T) (considerando $F_s = 650 \text{ kg h}^{-1}$), e (b) da vazão de biomassa seca (F_s) (considerando $C_{un} = \text{US\$ } 3.000 \text{ kW}^{-1}$), mantendo constantes para ambas as figuras as variáveis: $T_g^1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $v = 0,80 \text{ m s}^{-1}$ e $H = 4 \text{ cm}$.



Fonte: Autora (2025).

5.3.3 Análise de sensibilidade aos parâmetros técnicos

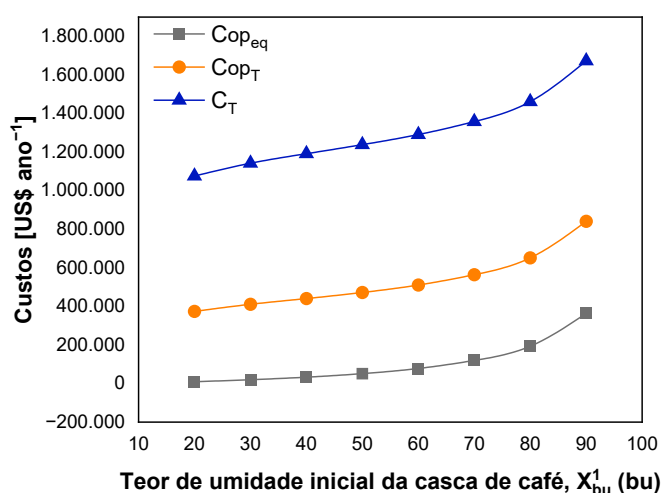
Os altos custos e $LCOE$ da planta de bioenergia estão diretamente relacionados à secagem, uma vez que corresponde à etapa de pré-tratamento com maior contribuição no investimento e custos. Um dado fundamental no projeto do secador consiste no teor de umidade inicial da biomassa, o qual é muito elevado para a casca de café proveniente da via úmida, sendo igual a 80% (base úmida) (TRAN et al., 2020). Isso implicou em uma proporção significativa de massa de água evaporada durante o processo, o que elevou a energia requerida na secagem para evaporar essa grande quantidade de água. Como essa energia está atrelada à vazão mássica de vapor, para aquecer o ar de secagem, seu aumento resultou em uma elevação do consumo de vapor e, conseqüentemente, de combustível para produzi-lo. De acordo com Poirier (2015), o custo com combustível para o secador representa o maior custo de operação desse equipamento.

A Figura 5.8 apresenta os custos operacionais da etapa de secagem devido ao consumo de vapor (C_{opeq}), custos operacionais totais da planta (C_{opT}) e custos totais (C_T) em função do teor de umidade inicial da casca de café (X_{bu}^1). De forma geral, demonstrou-se que à medida que o teor de umidade aumentou, todos os custos também aumentaram. Porém, observou-se que, principalmente, a partir de 70% (base úmida), a elevação nos custos foi exponencialmente maior. O impacto foi mais pronunciado nos custos totais (C_T), o qual também englobava o investimento. A biomassa com maior teor de umidade requer um secador com maiores

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

dimensões, elevando os custos de aquisição e, conseqüentemente, C_T . Além disso, há maior consumo de vapor para aquecer o ar de secagem e evaporar uma grande quantidade de água.

Figura 5.8 Custos operacionais com consumo de vapor (C_{opeq}), custos operacionais totais (C_{opt}) e custos totais (C_T) em função do teor de umidade inicial da biomassa (X_{bu}^1), considerando o cenário base.



Fonte: Autora (2025).

Quanto maior o teor de umidade inicial da casca de café, maiores os custos de secagem, elevando significativamente o custo unitário de energia elétrica produzida. A Figura 5.9(a) apresenta a relação entre $LCOE$ e X_{bu}^1 para diferentes alturas do leito de biomassa (H). Esse parâmetro operacional de secagem foi variado com o intuito de analisar seu impacto nos índices econômicos da planta. Nota-se que o $LCOE$ mais que duplicou, subindo de US\$ 191,96 MWh^{-1} para US\$ 405,89 MWh^{-1} , à medida que o teor de umidade inicial aumentou de 20% para 90% (base úmida) no cenário base. Contudo, pode-se perceber que o impacto significativo na elevação do $LCOE$ ocorreu principalmente a partir de 70% (base úmida) em todos os casos. Esse aumento foi mais evidente no cenário de menor altura do leito (3 cm), correspondendo a 78,6%, chegando a quase US\$ 550 MWh^{-1} . Considerando os cenários base e de maior altura do leito, caso a casca de café possuísse teor de umidade inicial inferior a 60% (base úmida), o $LCOE$ seria abaixo de US\$ 250 MWh^{-1} , dentro da faixa de projetos de bioenergia (IRENA, 2022). Logo, um dos fatores responsáveis pelo alto $LCOE$ obtido no cenário base é o alto teor de umidade da biomassa e, conseqüentemente, elevados custos com combustível para produzir vapor, além do maior consumo de energia.

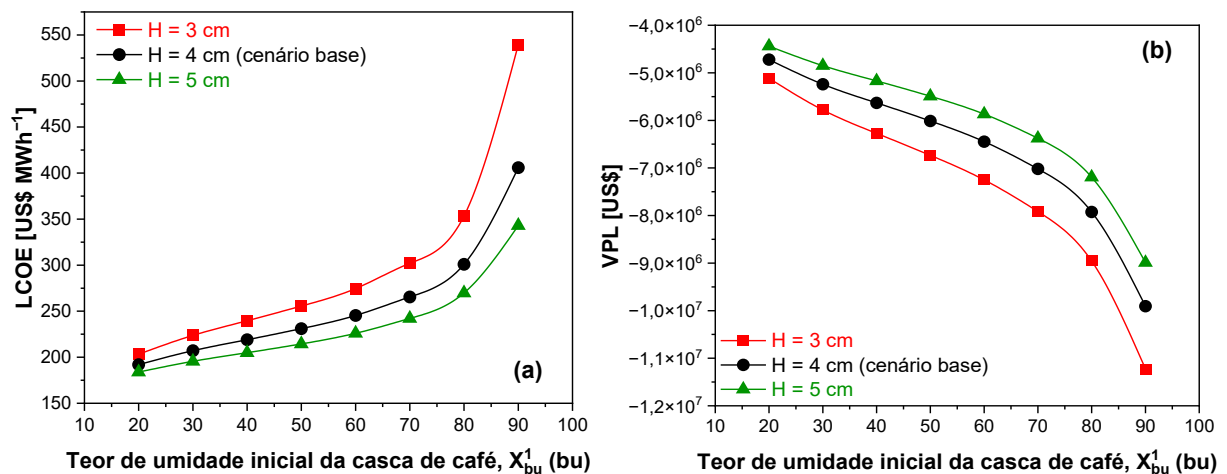
Com relação à altura do leito de biomassa, observa-se que seu aumento contribuiu para a diminuição do $LCOE$. Isso ocorreu, pois a maior espessura proporcionou dimensões menores

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

do secador, o que reduziu também as potências requeridas para movimentar a esteira e no compressor centrífugo. Consequentemente, menos energia elétrica foi consumida nesta etapa e os custos totais e o *LCOE* diminuíram. Para o cenário de maior altura do leito, o *LCOE* aumentou à medida que o teor de umidade cresceu, mas a um ritmo mais lento do que os outros cenários. Portanto, operar a uma maior altura do leito possível, como 5 cm, é economicamente mais vantajoso.

A Figura 5.9(b) mostra a variação do *VPL* em função de X_{bu}^1 para diferentes *H*. Percebe-se que não houve viabilidade econômica em nenhum cenário e, em todos os casos, o *VPL* se tornou mais negativo à medida que o teor de umidade da biomassa aumentou. Isso significa que o aumento da umidade impacta negativamente o *VPL*, independentemente da altura do leito. Como a casca de café possui 80% de umidade, isso explica o motivo do *VPL* do cenário base ser tão negativo. O cenário com menor espessura (3 cm) apresentou o menor *VPL*. À medida que o teor de umidade da biomassa aumentou, o *VPL* caiu de maneira significativa, especialmente a partir de um teor de umidade em torno de 60% (base úmida). O comportamento do cenário base (4 cm) foi semelhante ao de menor espessura, mas com uma queda do *VPL* menos acentuada. Para uma altura maior do leito (5 cm), o impacto financeiro foi menos severo, resultando em um *VPL* menos negativo em comparação com alturas menores. Isso reforça que operar com espessuras mais altas no secador esteira transportadora é preferível, especialmente quando o teor de umidade da biomassa é alto.

Figura 5.9 (a) *LCOE* e (b) *VPL* em função do teor de umidade inicial da biomassa (X_{bu}^1) para alturas do leito (*H*) de 3, 4 e 5 cm, mantendo constantes: $C_{un} = \text{US\$ } 3.000 \text{ kW}^{-1}$, $F_s = 650 \text{ kg h}^{-1}$, $v = 0,80 \text{ m s}^{-1}$ e $T_g^1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.



Fonte: Autora (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Outro parâmetro operacional da etapa de secagem foi avaliado com o objetivo de averiguar o efeito deste processo na análise econômica da planta. É essencial a determinação da configuração ótima do secador que minimize os custos totais, visto que essa operação é intensiva em energia e capital. Desse modo, a temperatura de entrada do ar de secagem (T_g^1) foi alterada considerando os cenários otimista ($C_{un} = \text{US\$ } 2.000 \text{ kW}^{-1}$), base ($C_{un} = \text{US\$ } 3.000 \text{ kW}^{-1}$) e pessimista ($C_{un} = \text{US\$ } 4.000 \text{ kW}^{-1}$), conforme mostra a Figura 5.10.

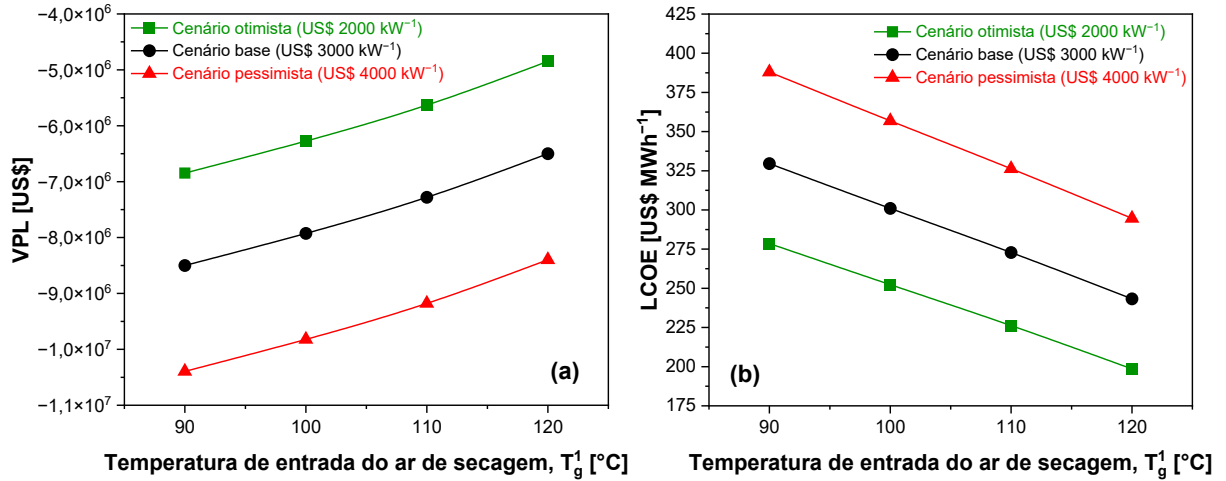
Apesar do aumento da temperatura ter acarretado em um aumento linear do *VPL*, não houve viabilidade econômica em nenhum dos casos (Figura 5.10(a)). A elevação de T_g^1 proporcionou uma secagem mais efetiva, em menor tempo, reduzindo as dimensões do secador e as potências necessárias para o compressor centrífugo e para movimentar a esteira. Conseqüentemente, diminuíram-se os custos de aquisição dos equipamentos e custos operacionais, além de aumentar a energia elétrica disponível para venda. Por isso, o *VPL* aumentou, mas não o suficiente para tornar o projeto economicamente viável.

A influência da temperatura de entrada do ar de secagem nos três cenários também foi avaliada com relação ao *LCOE*, conforme apresenta a Figura 5.10(b). Em todos os casos, o *LCOE* reduziu linearmente com a elevação da temperatura do ar. No cenário base, o aumento da temperatura de 90 para 120 °C foi capaz de diminuir o *LCOE* de $\text{US\$ } 329,57 \text{ MWh}^{-1}$ para $\text{US\$ } 243,27 \text{ MWh}^{-1}$, uma redução de 26,2%. Sendo assim, operar a secagem em 120 °C é economicamente mais vantajoso e o *LCOE* se enquadra na faixa típica para projetos de geração de bioenergia.

O menor *LCOE* ($\text{US\$ } 198,58 \text{ MWh}^{-1}$) foi alcançado na mais alta temperatura do ar no cenário otimista, onde os custos de investimento foram mais baixos. Esse valor está dentro do intervalo usual de *LCOE* para plantas com tecnologia de combustão em *stoker boiler*, que varia entre $\text{US\$ } 60 \text{ MWh}^{-1}$ a $\text{US\$ } 210 \text{ MWh}^{-1}$ (IRENA, 2012), mas ainda acima dos *LCOEs* de outras fontes renováveis de energia. O cenário pessimista, no qual o investimento foi mais elevado, também apresentou uma tendência de queda no *LCOE* com o aumento da temperatura do ar, mas os valores permaneceram acima de $\text{US\$ } 300 \text{ MWh}^{-1}$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

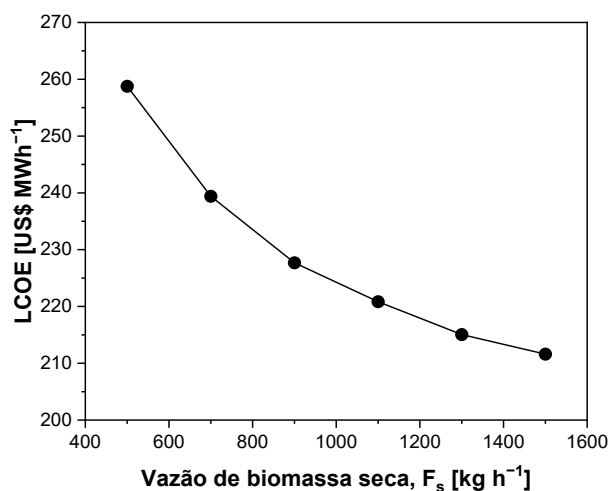
Figura 5.10 (a) *VPL* e (b) *LCOE* em função da temperatura de entrada do ar no secador (T_g^1) para os cenários otimista, base e pessimista, mantendo constantes as variáveis operacionais: $F_s = 650 \text{ kg h}^{-1}$, $v = 0,80 \text{ m s}^{-1}$ e $H = 4 \text{ cm}$.



Fonte: Autora (2025).

A variação do *LCOE* em função da capacidade de processamento da planta (F_s) é apresentada na Figura 5.11, mantendo constantes os demais parâmetros no cenário base, com exceção da temperatura de entrada do ar, a qual foi adotada igual a 120 °C. Observa-se que o comportamento do *LCOE* foi inversamente proporcional à vazão de biomassa seca, indicando que operar com uma maior capacidade de processamento possa ser uma estratégia vantajosa do ponto de vista econômico. No entanto, foi visto que o aumento da capacidade é aconselhável apenas quando a tarifa é suficientemente alta (vide Figura 5.7(b)). À medida que F_s aumentou de 500 kg h⁻¹ para 1500 kg h⁻¹, o *LCOE* diminuiu de US\$ 258,76 MWh⁻¹ para US\$ 211,60 MWh⁻¹, uma redução de 18,2%. O aumento de F_s implicou na elevação do investimento e custos totais da planta. Contudo, essa elevação foi superada pelo aumento da energia elétrica produzida, reduzindo, assim, o custo nivelado de eletricidade. Desse modo, usinas de maior porte possuem maior chance de viabilidade econômica, desde que a tarifa de venda de energia seja suficientemente alta.

Figura 5.11 *LCOE* em função da vazão de biomassa seca (F_s), mantendo constantes as variáveis: $C_{un} =$ US\$ 3.000 kW⁻¹, $T_g^1 = 120$ °C, $v = 0,80$ m s⁻¹ e $H = 4$ cm.



Fonte: Autora (2025).

5.3.4 Análise de sensibilidade aos parâmetros técnicos e econômicos

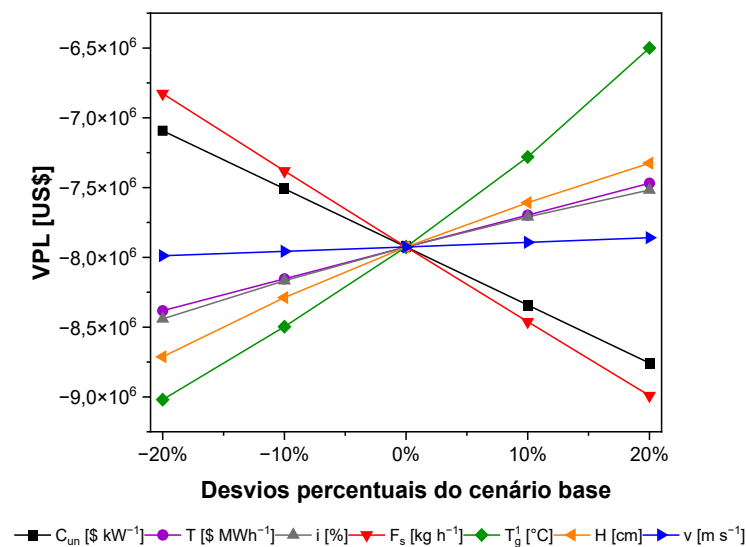
A Figura 5.12 mostra a resposta do *VPL* na análise de sensibilidade das condições de secagem e dos parâmetros econômicos. O *VPL* variou de -US\$ 9.019.965,34 a -US\$ 6.499.615,86, com média de -US\$ 7.923.029,64, evidenciando a falta de viabilidade econômica em todos os cenários analisados. Entre as variáveis, a temperatura de entrada do ar de secagem (T_g^1) foi o parâmetro com maior elasticidade, ou seja, sua variação apresentou o impacto mais significativo nos valores de *VPL*. O maior valor foi alcançado na mais alta temperatura do ar (120 °C), indicando que temperaturas mais elevadas são ideais para serem empregadas. O segundo parâmetro com maior elasticidade foi a capacidade de processamento da planta (F_s). Nota-se que o máximo valor foi obtido a partir da menor capacidade de processamento (520 kg h⁻¹), possivelmente devido aos menores custos totais associados a uma planta de menor escala. Esse comportamento foi visto na Figura 5.7(b) nos cenários em que a tarifa adotada era abaixo do *LCOE*, como neste caso, em que a tarifa é igual à base (US\$ 67,32 MWh⁻¹). O *VPL* somente aumentou, à medida que F_s cresceu, quando a tarifa foi suficientemente alta.

Outros parâmetros que exerceram razoável influência foram o custo unitário da tecnologia de conversão termoquímica (C_{un}) e a altura do leito de biomassa (H). Um custo unitário mais baixo resultou em um *VPL* mais favorável, indicando a necessidade de reduzir os custos de capital da conversão para melhorar a viabilidade do projeto. A altura do leito de biomassa, quando aumentada, contribuiu para melhorar o *VPL*, o que está relacionado a uma

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

melhor eficiência no processo de secagem. Entre todas as variáveis analisadas, a velocidade do ar (v) foi a que menos impactou o VPL , seguida da taxa de juros (i) e da tarifa de venda de energia (T), respectivamente. Portanto, verifica-se que T_g^1 , seguida de H , são parâmetros essenciais para um projeto de secador esteira eficiente. Contudo, nenhum dos cenários analisados conseguiu alcançar viabilidade econômica. Isso se deve a uma combinação de fatores discutidos anteriormente, incluindo altos custos de investimento da tecnologia de conversão termoquímica e elevados custos operacionais, particularmente pelo consumo de vapor na secagem. Além disso, a baixa geração de energia elétrica agrava a situação, pois a receita obtida com a venda de energia não é suficiente para compensar os custos operacionais e de investimento.

Figura 5.12 Análise de sensibilidade das condições de secagem e dos parâmetros econômicos e resposta do VPL .



Fonte: Autora (2025).

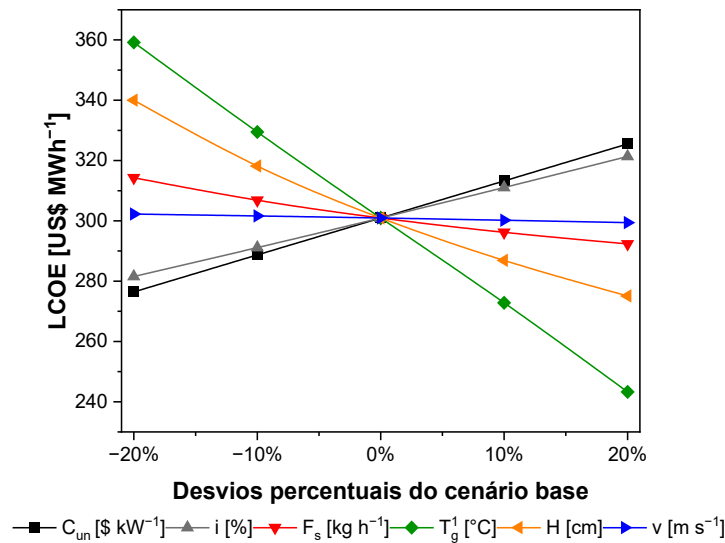
A partir da Figura 5.13, observa-se que, diferentemente da resposta do VPL , a vazão de biomassa seca não demonstrou considerável elasticidade em relação ao $LCOE$. Os maiores custos com uma capacidade de processamento maior foram compensados pela maior geração de energia elétrica, não alterando significativamente os valores de $LCOE$ dentro da faixa de 520 – 780 kg h⁻¹. Entre os parâmetros analisados, C_{un} , i e v foram os que tiveram menor impacto na variação de $LCOE$. Em contrapartida, as variáveis com maior elasticidade foram a temperatura do ar, seguida da altura do leito de biomassa, demonstrando novamente a

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

importância dessas variáveis de secagem nos resultados econômicos. Aumentar esses parâmetros resultou em uma redução no *LCOE*, o que é economicamente positivo.

O *LCOE* variou de 243,27 a 359,20 US\$ MWh⁻¹, sendo a média igual a US\$ 301,76 MWh⁻¹. O menor *LCOE* foi alcançado com a maior temperatura do ar. Essa análise demonstra que ajustes em variáveis operacionais, como temperatura e altura do leito, podem melhorar os resultados econômicos de plantas de bioenergia a partir de biomassa, aproximando o *LCOE* da faixa típica de outros projetos de bioenergia (até US\$ 250 MWh⁻¹) (IRENA, 2022). Entretanto, foi testado que mesmo na mais alta temperatura do ar (120 °C), maior espessura do leito (4,8 cm) e maior vazão de biomassa (780 kg h⁻¹), não houve viabilidade econômica, resultando em um *LCOE* de US\$ 213,88 MWh⁻¹.

Figura 5.13 Análise de sensibilidade das condições de secagem e dos parâmetros econômicos e resposta do *LCOE*.



Fonte: Autora (2025).

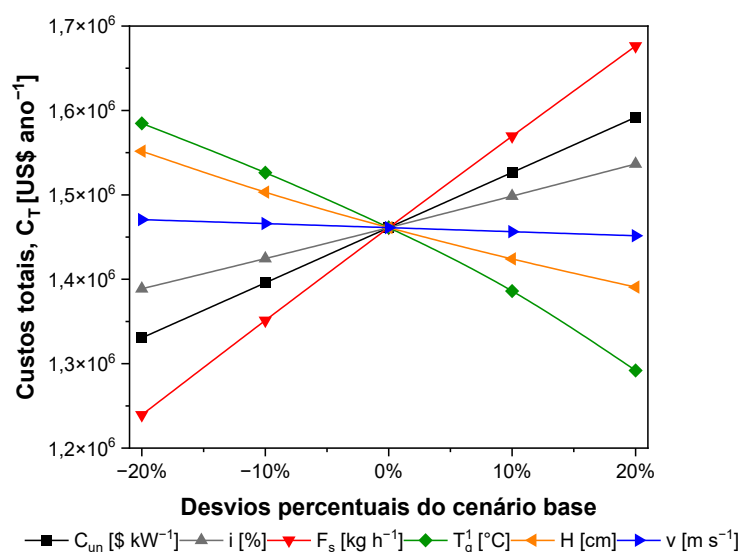
A Figura 5.14 mostra a análise de sensibilidade e a resposta dos custos totais (C_T) para a planta de bioenergia. Os custos variaram de US\$ 1.239.352,56 ano⁻¹ a US\$ 1.676.379,74 ano⁻¹, sendo a média igual a US\$ 1.460.022,64 ano⁻¹. A vazão de biomassa seca apresentou a maior elasticidade com relação aos custos totais anuais, sendo diretamente proporcional. Isso indica a relevância de se escolher bem a capacidade de processamento da planta, pois pode impactar significativamente no *VPL* e C_T . T_g^1 foi o segundo parâmetro que demonstrou maior influência, sendo seu aumento crucial para a diminuição de C_T , uma vez que temperaturas mais altas permitem uma secagem mais eficiente. C_{un} também impactou consideravelmente os

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

custos totais, sendo diretamente proporcional. Isso demonstra que a escolha da tecnologia de conversão impacta diretamente a viabilidade econômica do projeto. Além disso, à medida que a altura do leito de biomassa e a taxa de juros aumentaram, os custos diminuíram e aumentaram, respectivamente, mas não com tanto impacto como as demais variáveis.

Dentre os parâmetros, a velocidade do ar de secagem foi a variável que menos influenciou em todos os resultados. Embora seu aumento tenha gerado diminuições nos C_T e $LCOE$ e um aumento no VPL , a magnitude dessa variação foi considerada ínfima, tornando-a uma variável inelástica na análise. Isso sugere que a velocidade do ar, embora importante para o processo de secagem, não é um fator crítico para a viabilidade econômica no contexto estudado. É necessário priorizar outras variáveis, como F_s , T_g^1 e H , que têm um impacto substancial nos custos totais da planta de bioenergia.

Figura 5.14 Análise de sensibilidade das condições de secagem e dos parâmetros econômicos e resposta dos custos totais (C_T).



Fonte: Autora (2025).

Em vista do que foi discutido, apesar de ter analisado a influência de diferentes variáveis nos resultados econômicos da planta de bioenergia, não houve viabilidade considerando a geração de energia elétrica a partir da combustão em *stoker boiler* dos briquetes de cascas de café descartadas na via úmida. A viabilidade econômica da planta de bioenergia somente foi alcançada em cenários em que a tarifa de venda de energia era excessivamente alta, como, no mínimo, superior a $\text{US\$ } 198,58 \text{ MWh}^{-1}$, o que dificilmente se concretizará na prática. Assim, torna-se evidente o motivo pelo qual a casca de café úmida não é empregada em usinas no

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Brasil. É possível que a casca de café proveniente do processo por via seca conduza a resultados melhores em termos de viabilidade econômica, tendo em vista que a secagem foi uma das operações que mais impactaram os custos operacionais. Contudo, mesmo assim, a viabilidade não pode ser confirmada, dado o alto investimento da tecnologia de combustão.

Pode-se considerar, então, que a melhor alternativa para a casca de café por via úmida é a instalação de uma planta de pré-tratamento, com foco na produção e comercialização de briquetes para indústrias e comércios, em detrimento da implantação de uma usina geradora de energia elétrica. Dessa forma, ainda se contribui para a diversificação da matriz energética brasileira.

6 CONCLUSÕES

A biomassa de resíduos agroindustriais é uma alternativa promissora para produção de energia renovável aliada à destinação ambientalmente correta. No processamento pós-colheita do café por via úmida, a casca corresponde ao resíduo mais abundante e apresenta alto teor de umidade. Assim, com o objetivo de avaliar uma forma de aproveitamento deste resíduo cafeeiro, este trabalho realizou o projeto e a análise de viabilidade econômica de uma planta de pré-tratamento de cascas de café, incluindo etapas de secagem, cominuição e densificação, visando à produção e comercialização dos briquetes. Além disso, analisou-se a viabilidade da planta de bioenergia, englobando o pré-tratamento e a combustão dos briquetes para geração e venda de energia elétrica, considerando diversos cenários com variações em parâmetros técnicos e econômicos.

Os resultados do potencial de geração de energia elétrica a partir da casca de café, produzida na via úmida no Brasil, mostraram que a região Sudeste concentrou 85,57% da capacidade de processamento do país em 2024 (até 23,22 t h⁻¹), podendo gerar até 178.532,34 MWh ano⁻¹. Assim, o intervalo de capacidade de processamento (F_s) selecionado no trabalho (500 – 1500 kg h⁻¹) foi razoável para a produção de briquetes nesta região. Além disso, estimou-se a produção de 813.570 toneladas de cascas de café úmidas somente no Sudeste em 2024. Desse modo, esta região, por ser a principal produtora de café do país, possui maior chance de viabilidade econômica da planta, com possibilidades de aumento da capacidade conforme necessário.

A planta de pré-tratamento foi analisada a partir dos níveis superior ($H = 4$ cm, $T_g^1 = 120$ °C e $v = 1,0$ m s⁻¹) e inferior de secagem ($H = 2,5$ cm, $T_g^1 = 90$ °C e $v = 0,7$ m s⁻¹). O nível superior apresentou secagem mais efetiva, resultando em dimensões de projeto adequadas e reduzidas em torno de 90%, comparadas ao nível inferior. Além da vantagem técnica, a elevação de T_g^1 para 120 °C e H para 4 cm demonstrou notável redução dos custos totais de secagem, diminuindo de 913.303 para 369.112 US\$ ano⁻¹ (cerca de 59,6%). O aumento de F_s de 500 para 1500 kg h⁻¹ acarretou investimento (até US\$ 1.672.405) e custos operacionais mais altos (até US\$ 852.533 ano⁻¹), mas foram compensados com maior lucratividade (US\$ 295.356 ano⁻¹).

O projeto de pré-tratamento foi viável economicamente, independente da combinação das variáveis operacionais de secagem. Para o intervalo de 500 a 1500 kg h⁻¹, o *VPL* variou de US\$ 38.635 a US\$ 192.046, *TIR* de 11,62% a 11,95%, *payback* simples de 5,66 a 5,74 anos e

6 CONCLUSÕES

descontado de 9,27 a 9,48 anos. Os valores máximos de VPL e TIR , e mínimos períodos de retorno foram alcançados na maior vazão de biomassa. Contudo, como, para ambos os níveis de secagem, os resultados de TIR e $payback$ foram da mesma magnitude e os valores de VPL foram positivos, o custo nivelado de produção por massa de briquete (LCM) foi analisado.

O aumento de T_g^1 para 120 °C e de H para 4 cm resultou em uma redução significativa de 54,3% no LCM , enquanto a variação de v não apresentou impacto relevante. Sendo assim, os valores de LCM de 0,115 a 0,172 US\$ kg⁻¹, determinados no nível superior de secagem, foram consideravelmente menores que os do nível inferior (0,285 a 0,333 US\$ kg⁻¹). O LCM menor permite preços de venda mais baixos e maior competitividade no mercado. O valor mínimo foi obtido na maior vazão de biomassa (1500 kg h⁻¹), a qual também foi capaz de diminuir notavelmente outros parâmetros, como o custo de produção por massa (C_{briq}), preço (P_{briq}) e valor de venda do briquete (V_{briq}).

O nível superior de secagem foi definido, então, como o melhor cenário. O C_{briq} mínimo alcançado foi de R\$ 530 t⁻¹ (US\$ 0,101 kg⁻¹), resultado coerente com a literatura. O menor LCM foi de R\$ 602 t⁻¹ (US\$ 0,115 kg⁻¹), significando que o preço de venda do briquete de casca de café deve ser, no mínimo, superior a esse valor para garantir viabilidade econômica. O P_{briq} mínimo, considerando a margem de lucro de 13%, foi de R\$ 609 t⁻¹ (US\$ 0,116 kg⁻¹), valor que se enquadrou nas faixas de preços relatadas na literatura para briquetes de biomassas. Já o menor V_{briq} , que considera o acréscimo de impostos sobre vendas no país, foi igual a R\$ 811 t⁻¹ (US\$ 0,155 kg⁻¹), aproximando-se de alguns anúncios de briquetes no mercado nacional. Portanto, o preço e valor de venda estimados a partir das melhores condições operacionais de secagem se mostraram compatíveis com o mercado. No entanto, V_{briq} não foi tão competitivo ao compará-lo com a lenha. R\$ 777 foi o preço equivalente em lenha para gerar a mesma energia de 1 t de briquete. Assim, caso o consumidor brasileiro priorize exclusivamente o menor preço, desconsiderando critérios sustentáveis e energéticos, a escolha pelo briquete de casca de café torna-se improvável. Contudo, com incentivos à indústria de briquetes, como a redução de impostos, o produto pode se tornar mais econômico que a lenha, favorecendo seu uso.

O cenário base de análise econômica da planta de bioenergia foi definido nas seguintes condições operacionais: $F_s = 650$ kg h⁻¹, $H = 4$ cm, $T_g^1 = 100$ °C e $v = 0,8$ m s⁻¹. Dentre as etapas de pré-tratamento, a secagem foi responsável pela maior parte do investimento e dos custos operacionais, indicando que possui impacto significativo nos custos da planta. O VPL do cenário base foi de - US\$ 7,92 milhões, demonstrando inviabilidade econômica. Isso ocorreu devido ao alto investimento da tecnologia de combustão em *stoker boiler* (63,7% do

6 CONCLUSÕES

investimento total), altos custos de secagem (56,8% dos custos operacionais), baixa tarifa de venda de energia no Brasil (US\$ 67,32 MWh⁻¹) e produção limitada de energia elétrica, dada a baixa eficiência da combustão e utilização de parte da energia produzida pela planta. Outro fator que poderia tornar o cenário ainda menos viável economicamente seria a inclusão dos custos relacionados ao transporte da casca de café até a usina de bioenergia. Neste estudo, considerou-se um cenário ideal, no qual a casca é gerada e pré-tratada no mesmo local onde ocorre a geração de energia elétrica. Além disso, caso fosse utilizada a casca da via seca, desconsiderando-se a etapa de secagem, espera-se um resultado econômico mais vantajoso. Entretanto, não é possível afirmar sua viabilidade devido aos demais fatores mencionados.

O *LCOE* do cenário base foi de US\$ 300,96 MWh⁻¹, acima da faixa para projetos de bioenergia e outras renováveis. O aumento de T_g^1 até 120 °C resultou na diminuição do *LCOE*, sendo o menor valor (US\$ 198,58 MWh⁻¹) encontrado no cenário otimista ($C_{un} = \text{US\$ } 2.000 \text{ kW}^{-1}$), mas ainda acima da tarifa base. Houve viabilidade quando a tarifa foi quatro vezes superior à tarifa base (US\$ 269,27 MWh⁻¹), considerando $C_{un} = \text{US\$ } 3.000 \text{ kW}^{-1}$. Neste caso, o aumento da vazão de biomassa resultou em elevação do *VPL*. A viabilidade foi alcançada quando a tarifa superou US\$ 198,58 MWh⁻¹ e US\$ 243,27 MWh⁻¹ para os cenários otimista ($C_{un} = \text{US\$ } 2.000 \text{ kW}^{-1}$) e base ($C_{un} = \text{US\$ } 3.000 \text{ kW}^{-1}$), respectivamente. Desse modo, apesar de ter variado diversos parâmetros, a viabilidade econômica somente foi alcançada quando as tarifas foram excessivamente altas em relação à média do mercado, sendo um desafio a geração de eletricidade a partir da combustão da casca de café descartada na via úmida.

Os altos valores de custos e de *LCOE* da planta de bioenergia estão relacionados em grande parte à etapa de secagem, visto que a umidade inicial da casca de café é alta (80% base úmida). Consequentemente, o processo requer uma energia elevada para evaporar essa grande quantidade de água, exigindo um alto consumo de vapor para aquecer o ar de secagem. Os resultados demonstraram a elevação dos custos da planta com o aumento da umidade da biomassa. Diante disso, seria interessante avaliar se outra tecnologia de secagem, além do secador de esteira transportadora, poderia apresentar um melhor desempenho econômico. No entanto, como a escolha do secador de esteira se baseou nas características físicas da casca de café, seria necessário, inicialmente, analisar como as propriedades da biomassa influenciam a eficiência do novo equipamento.

A análise de sensibilidade aos parâmetros técnicos e econômicos indicou que a variável de maior impacto no *VPL* foi T_g^1 , seguido de F_s e custo unitário da tecnologia de conversão (C_{un}). O maior *VPL* foi obtido na mais alta T_g^1 . Já o aumento de C_{un} e F_s resultou na diminuição

6 CONCLUSÕES

do *VPL*. Assim, altas capacidades são aconselháveis apenas quando a tarifa for suficientemente alta. Com relação ao *LCOE*, o parâmetro mais elástico foi T_g^1 , seguido por H , sendo inversamente proporcionais. A terceira variável de maior impacto no *LCOE* foi C_{un} . Os custos totais (C_T) apresentaram maior influência de F_s , seguido por T_g^1 e C_{un} . Maiores F_s e C_{un} resultaram na elevação dos custos e o aumento de T_g^1 proporcionou menores custos. v foi inelástica em todas as análises. Embora os resultados indiquem operar com T_g^1 e H mais elevados, a viabilidade da planta de bioenergia não foi alcançada, mesmo nas condições mais favoráveis. C_{un} foi a variável econômica com maior influência nos resultados, diferentemente da tarifa e taxa de juros.

Desse modo, seria necessário reduzir os custos de capital da tecnologia de combustão ou ainda explorar outras tecnologias mais acessíveis para conversão da casca de café da via úmida em bioenergia. O projeto da planta de bioenergia demonstrou viabilidade apenas quando a tarifa de energia foi no mínimo o triplo da tarifa base atual, o que é pouco provável de se concretizar na prática. Esse resultado contribui para compreender por que a casca de café úmida ainda não é utilizada em usinas de geração de energia elétrica em larga escala no Brasil. Logo, dentre os dois cenários analisados no trabalho, aquele que considera apenas a produção e comercialização dos briquetes a partir da casca de café é mais promissor, visto que os preços de venda foram adequados ao mercado, apresentando viabilidade econômica. Assim, é possível contribuir para a diversificação da matriz energética brasileira, aumentando a participação da biomassa.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e conclusões obtidos neste trabalho, têm-se como sugestões para eventuais trabalhos futuros:

- i. A realização de experimentos de cinética de secagem da casca de café, proveniente da via úmida, em novas condições operacionais, principalmente em altas temperaturas do ar de secagem (acima de 110 °C) e maiores espessuras do leito de sólidos (2 – 6 cm). Uma vez que os dados de secagem utilizados neste trabalho foram baseados em Silva et al. (2023), em que a temperatura do ar foi limitada a 90 – 113,53 °C e a espessura a 0,32 – 1 cm.
- ii. A análise de viabilidade econômica da planta de pré-tratamento da casca de café, levando em consideração novas condições operacionais de secagem.
- iii. A mudança do tipo de tecnologia de secagem para a casca de café a fim de verificar se é possível diminuir os custos, visto que esse processo apresentou a maior contribuição no investimento e custos operacionais dentre as etapas de pré-tratamento.
- iv. A análise de viabilidade econômica da planta de pré-tratamento considerando, além do preço do briquete calculado a partir do custo de produção, um cenário em que o preço seja baseado em dados do mercado.
- v. A alteração, segundo outra fonte da literatura, dos custos de investimento da tecnologia de combustão selecionada no trabalho.
- vi. O estudo de viabilidade econômica da planta de bioenergia a partir dos briquetes de casca de café, considerando outra tecnologia de conversão termoquímica, a fim de avaliar se é economicamente mais atrativa que a combustão convencional.

REFERÊNCIAS

- 24CHEMICAL RESEARCH. **2022-2027 Global and Regional Briquette Industry Status and Prospects Professional Market Research Report Standard Version**. 2022. Disponível em: <<https://www.24chemicalresearch.com/reports/132420/global-regional-briquette-market-2022-2027-903>>. Acesso em: 02 jan. 2025.
- 6WRESEARCH. **Brazil Briquette Market (2025-2031) | Trends, Outlook & Forecast**. 2025. Disponível em: <<https://www.6wresearch.com/industry-report/brazil-briquette-market-outlook>>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- ABIB. Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável. **Conjuntura Nacional e Internacional Setor Industrial de Biomassa Pellets Briquetes**. Curitiba: ABIB, 2019. Disponível em: <<https://www.abibbrasil.com.br/>>. Acesso em: 16 set. 2024.
- ABIMCI. Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. **Estudo Setorial 2022: ano base 2021. 2022**. Disponível em: <<https://abimci.com.br/publicacoes/estudo-setorial/>>. Acesso em: 23. jan. 2025.
- ACAR, C.; DINCER, I.; MUJUMDAR, A. A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future. **Drying Technology**, v. 40, n. 6, p. 1029–1050, 2020. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1848858>.
- ACCHAR, W.; DULTRA, E. J. V.; SEGADÃES, A. M. Untreated coffee husk ashes used as flux in ceramic tiles. **Applied Clay Science**, v. 75, p. 141–147, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.03.009>.
- AJIMOTOKAN, H. A.; IBITOYE, S. E.; ODUSOTE, J. K.; ADESOYE, O. A.; OMONIYI, P. O. Physico-mechanical properties of composite briquettes from corncob and rice husk. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 4, n. 3, p. 159–165, 2019. <https://doi.org/10.12162/jbb.v4i3.004>.
- ALAMIA, A.; STRÖM, H.; THUNMAN, H. Design of an integrated dryer and conveyor belt for woody biofuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 77, p. 92–109, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.022>.
- ALCHALIL; SETIAWAN, A.; JUWAINI; NUR, T. B. Effect of densification pressure on physical and combustion properties of binderless briquettes made from rice-husk and coffee-pulp. *In*: AKHYAR. **Proceedings of the 2nd International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering: ICECME 2020**, Banda Aceh, October 13–14. Singapore: Springer, 2021. p. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0736-3_1.
- ALLIED MARKET RESEARCH. **Biomass Briquette Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Type, by Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2024-2033**. 2024. Disponível em: <<https://www.alliedmarketresearch.com/biomass-briquette-market>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ANASTOPOULOS, I.; KARAMESOUTI, M.; MITROPOULOS, A. C.; KYZAS, G. Z. A review for coffee adsorbents. **Journal of Molecular Liquids**, v. 229, p. 555–565, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.12.096>.

ANDRADE, K. S. **Avaliação das técnicas de extração e do potencial antioxidante dos extratos obtidos a partir de casca e de borra de café (*Coffea arabica* L.)**. 2011. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Leilão de Energia Nova A-5 tem edital aprovado e está confirmado para 16 de setembro**. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/leilao-de-energia-nova-a-5-tem-edital-aprovado-e-esta-confirmado-para-16-de-setembro>>. Acesso em: 26 ago. 2024.

ANGGONO, W.; GOTAMA, G. J.; PRONK, C.; HERNANDO, I. C.; SUTRISNO, T. Characteristics of biomass briquettes from coffee husk as sustainable fuel. **BIO Web of Conferences**, v. 62, p. 03002, 2023. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236203002>.

ARYA, M.; RAO, L. J. M. An impression of coffee carbohydrates. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 47, n. 1, p. 51–67, 2007. <https://doi.org/10.1080/10408390600550315>.

ASAMOAH B., NIKIEMA, J.; GEBREZGABHER, S.; ODonkor, E.; NJENGA, M. **A review on production, marketing and use of fuel briquettes**. Colombo: International Water Management Institute (IWMI), 2016. 51 p. (Resource Recovery and Reuse Series, 7). <https://doi.org/10.5337/2017.200>.

BAILIS, R.; RUJANAVECH, C.; DWIVEDI, P.; DE OLIVEIRA VILELA, A.; CHANG, H.; DE MIRANDA, R. C. Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 2, p. 189–200, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.10.008>.

BAJWA, D. S.; PETERSON, T.; SHARMA, N.; SHOJAEIARANI, J.; BAJWA, S. G. A review of densified solid biomass for energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p. 296–305, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040>.

BANOONI, S.; HAJIDAVALLOO, E.; DORFESHAN, M. A comprehensive review on modeling of pneumatic and flash drying. **Drying Technology**, v. 36, n. 1, p. 33–51, 2018. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1298123>.

BATTESTIN, V.; MACEDO, G. A. Effects of temperature, pH and additives on the activity of tannase produced by *Paecilomyces variotii*. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 2, p. 191–199, 2007. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-34582007000200003>.

BCB. Banco Central do Brasil. **Calculadora do cidadão**. 2025. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=xibirFormCorrecaoValores>>. Acesso em: 18 abr. 2025.

BCB. Banco Central do Brasil. **Taxa de juros básica – Histórico**. 2024. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>>. Acesso em: 25 out. 2024.

REFERÊNCIAS

BEKALO, S. A.; REINHARDT, H. W. Fibers of coffee husk and hulls for the production of particleboard. **Materials and Structures**, v. 43, n. 8, p. 1049–1060, 2010. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9565-0>.

BIOBRAX. **Secador Rotativo**. 2025. Disponível em: <<https://biobrax.com.br/produtos/secador-rotativo/>>. Acesso em: 23 abr. 2025.

BIOENERGY EUROPE. **Bioenergy Europe Statistical Report 2020**: Report Pellets. Bruxelas: Bioenergy Europe, 2020. Disponível em: <<https://bioenergyeurope.org/article/268-pellet.html>>. Acesso em: 11 out. 2023.

BIOENERGY EUROPE. **Bioenergy Europe Statistical Report 2022**: Report Pellets. Bruxelas: Bioenergy Europe, 2022. Disponível em: <<https://bioenergyeurope.org/article/389-sr-22-pellets.html>>. Acesso em: 11 out. 2023.

BIOENERGY EUROPE. **Pellets**: Bioenergy Europe Statistical Report 2024. Bruxelas: Bioenergy Europe, 2024. Disponível em: <<https://bioenergyeurope.org/statistical-reports/>>. Acesso em: 22 nov. 2024.

BIOMAX. Indústria de Máquinas Ltda. **Relatórios de viabilidade**. 2025. Disponível em: <<https://www.biomaxind.com.br/produtos/briquetadeiras/relatorios-de-viabilidade/>>. Acesso em: 18 abr. 2025.

BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; CANEVER, V. B.; CREMONEZ, P. A.; FRIGO, E. P.; DIETER, J.; TELEKEN, J. G. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2365–2378, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.075>.

BONILLA, J.; GORDILLO, G. Adiabatic fixed-bed gasification of Colombian coffee husk using air-steam blends for partial oxidation. **Journal of Combustion**, v. 2017, p. 1–10, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3576509>.

BONILLA, J.; GORDILLO, G.; CANTOR, C. Experimental gasification of coffee husk using pure oxygen-steam blends. **Frontiers in Energy Research**, v. 7, p. 127, 2019. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00127>.

BRAND, M. A.; JACINTO, R. C.; ANTUNES, R.; DA CUNHA, A. B. Production of briquettes as a tool to optimize the use of waste from rice cultivation and industrial processing. **Renewable Energy**, v. 111, p. 116–123, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.084>.

BRANKER, K.; PATHAK, M. J. M.; PEARCE, J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4470–4482, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MMA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf>. Acesso em: 11 out. 2023.

REFERÊNCIAS

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>.

BRIQUETTE MACHINE. **Biomass Briquetting Plant Cost and Market**. 2024a. Disponível em: <<https://www.briquette-machine.com/articles/biomass-briquetting-plant-cost.html>>. Acesso em: 17 jan. 2025.

BRIQUETTE MACHINE. **[Market Report] Global Biomass Briquette Machine Market Outlook Analysis**. 2024b. Disponível em: <<https://www.briquette-machine.com/global-biomass-briquette-market-outlook-report.html>>. Acesso em: 23 dez. 2024.

CAFICULTORES ALTO CAJAMARCA. **Natural coffee**. 2023. Disponível em: <<https://www.caficultoresaltocajamarca.com/en/post/natural-coffee>>. Acesso em: 03 nov. 2024.

CARMONA-GARCIA, E.; ORTIZ-SÁNCHEZ, M.; ALZATE, C. A. C. Analysis of the coffee cut stems as raw material for the production of sugars for acetone–butanol–ethanol (ABE) fermentation: techno-economic analysis. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, p. 3793–3808, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00632-x>.

CARVALHO, N. R.; BARROS, J. L.; SILVA, D. A., NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M. Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. **Química Nova**, v. 44, n. 1, p. 35–40, 2021. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170663>.

CARVALHO, R. L.; JENSEN, O. M.; TARELHO, L. A. C. Mapping the performance of wood-burning stoves by installations worldwide. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 658–679, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.010>.

CBP&D/CAFÉ. Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café. **Sumário Executivo Café**: dezembro 2024. 2024. Disponível em: <http://www.consorciopesquisacafe.com.br/images/stories/noticias/2021/2024/Dezembro/Sumario_Cafe_dezembro_2024.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2025.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. **Valores de tarifas e serviços**. 2024. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>>. Acesso em: 25 out. 2024.

CHALA, B.; OECHSNER, H.; MÜLLER, J. Introducing temperature as variable parameter into kinetic models for anaerobic fermentation of coffee husk, pulp and mucilage. **Applied Sciences**, v. 9, n. 3, p. 412, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9030412>.

CHALFOUN, S. R.; FERNANDES, A. P. Efeitos da fermentação na qualidade da bebida do café. **Visão Agrícola USP**, n. 12, p. 105–108, 2013.

CHAN, Y.; DYAH, T. M. N.; KAMARUDDIN, A. Solar dryer with pneumatic conveyor. **Energy Procedia**, v. 65, p. 378–385, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.067>.

COELHO, S. T.; SANCHES-PEREIRA, A.; TUDESCHINI, L. G.; GOLDEMBERG, J. The energy transition history of fuelwood replacement for liquefied petroleum gas in Brazilian

REFERÊNCIAS

households from 1920 to 2016. **Energy Policy**, v. 123, p. 41–52, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.041>.

COGNITIVE MARKET RESEARCH. **Bulk Biomass Briquette Fuel Market Report 2025 (Global Edition)**. 2024. Disponível em: <<https://www.cognitivemarketresearch.com/bulk-biomass-briquette-fuel-market-report?srsltid=AfmBOop52eUEjTntyfCuqRk1gCWqE9sXUk5ekpjr0GVVBpoP-O9IkC7->>>. Acesso em 06 jan. 2024.

COMGÁS. **Soluções de Gás Natural para Indústrias**. 2024b. Disponível em: <<https://www.comgas.com.br/nossas-solucoes/industrias/>>. Acesso em: 25 out. 2024.

COMGÁS. **Tarifas**. 2024a. Disponível em: <<https://www.comgas.com.br/minha-conta/tarifas/>>. Acesso em: 25 out. 2024.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café**. Brasília: CONAB, v. 10, n. 4, quarto levantamento, 2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café**. Brasília: CONAB, v. 12, n. 1, primeiro levantamento, 2025.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília: CONAB, v. 12, n. 3, terceiro levantamento, 2024.

CORDEIRO, J. L. C. **Produção de estruturas carbonáceas sustentáveis e sua aplicação na remoção de compostos orgânicos voláteis (COVs)**. 2022. 146 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022.

CORTAZAR, M.; SANTAMARIA, L.; LOPEZ, G.; ALVAREZ, J.; ZHANG, L.; WANG, R.; BI, X.; OLAZAR, M. A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification. **Energy Conversion and Management**, v. 276, p. 116496, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116496>.

CREPALDI, S. A.; CREPALDI, G. S. **Contabilidade de custos**. 7. ed. Barueri: Atlas, 2023.

CUBERO-ABARCA, R.; MOYA, R.; VALARET, J.; TOMAZELLO FILHO, M. Use of coffee (*Coffea arabica*) pulp for the production of briquettes and pellets for heat generation. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 461–470, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000500005>.

CUERVO, O. H. P.; ROSAS, C. A.; ROMANELLI, G. P. Valorization of residual lignocellulosic biomass in South America: A review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 32, p. 44575–44607, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33968-6>.

DRIEMEIER, L. H. **Geração distribuída**. 2009. 76 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CZEKAŁA, W.; ŁUKOMSKA, A.; PULKA, J.; BOJARSKI, W.; POCHWATKA, P.; KOWALCZYK-JUŚKO, A.; ONISZCZUK, A.; DACH, J. Waste-to-energy: Biogas potential

of waste from coffee production and consumption. **Energy**, v. 276, p. 127604, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127604>.

DA COSTA, G. G.; DOS SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; DE OLIVEIRA MACHADO, G.; BARBEDO, M. D. G. Mapping and energy analysis of Brazilian bioenergy power potential for three agricultural biomass byproducts. **Journal of Cleaner Production**, v. 349, p. 131466, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131466>.

DAL-BÓ, V.; LIRA, T.; ARRIECHE, L.; BACELOS, M. Process synthesis for coffee husks to energy using hierarchical approaches. **Renewable Energy**, v. 142, p. 195–206, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.089>.

DATAINTELO. **Biomass Briquette Market Research Report 2032**. 2024. Disponível em: <<https://dataintelo.com/report/biomass-briquette-market>>. Acesso em: 27 dez. 2024.

DATAM INTELLIGENCE. **Biomass Briquette Market Size, Share, Industry, Forecast and Outlook (2024-2031)**. 2024. Disponível em: <<https://www.datamintelligence.com/research-report/biomass-briquette-market>>. Acesso em: 03 jan. 2025.

DE ALMEIDA, L. F. P.; SOLA, A. V. H.; BEHAINNE, J. J. R. Sugarcane bagasse pellets: Characterization and comparative analysis. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, n. 4, p. 461–468, 2017. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i4.30198>.

DE ALMEIDA, M. N.; HALFELD, G. G.; DA COSTA, I. B.; DE LIMA GUIMARÃES, L. G.; CORDEIRO, B.; GUIMARÃES, V. M. Exploring the potential of coffee husks as a raw material for second-generation ethanol production. **BioEnergy Research**, v. 17, n. 1, p. 281–293, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10655-x>.

DE LIMA, J. D.; SCHEITT, L. C.; BOSCHI, T. F.; SILVA, N. J.; MEIRA, A. A.; DIAS, G. H. Propostas de ajuste no cálculo do *payback* de projetos de investimentos financiados. **Custos e Agronegócios Online**, v. 9, n. 4, p. 162–180, 2013.

DE MORAES, S. L.; MASSOLA, C. P.; SACCOCCIO, E. M.; DA SILVA, D. P.; GUIMARÃES, Y. B. T. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 4, 2017.

DE SOUZA, L. L. P.; HAMEDANI, S. R.; LORA, E. E. S.; PALACIO, J. C. E.; COMODI, G.; VILLARINI, M.; COLANTONI, A. Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in Brazil towards 2050. **Energy Reports**, v. 7, p. 2574–2587, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.026>.

DELELE, M. A.; WEIGLER, F.; MELLMANN, J. Advances in the application of a rotary dryer for drying of agricultural products: A review. **Drying technology**, v. 33, n. 5, p. 541–558, 2015. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.958498>.

DIAS, J. J. M. **Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas**. 2002. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2002.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. 1. ed. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/952626/1/DOC13.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2023.

DONATO, C. J. **Resíduo de madeira em Presidente Prudente: um estudo sobre a viabilidade ecológica e comercial na fabricação de briquetes**. 2020. 75 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional) – Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2020.

DONZELLI, G.; SUAREZ-VARELA, M. M. Tropospheric Ozone: A critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects. **Atmosphere**, v. 15, n. 7, p. 779, 2024. <https://doi.org/10.3390/atmos15070779>.

DU, N.; LI, M.; ZHANG, Q.; ULSIDO, M. D.; XU, R.; HUANG, W. Study on the biogas potential of anaerobic digestion of coffee husks wastes in Ethiopia. **Waste Management & Research**, v. 39, n. 2, p. 291–301, 2020. <https://doi.org/10.1177/0734242X20939619>.

DUARTE, A.; URIBE, J. C.; SARACHE, W.; CALDERÓN, A. Economic, environmental, and social assessment of bioethanol production using multiple coffee crop residues. **Energy**, v. 216, p. 119170, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119170>.

DURÁN, C. A. A.; TSUKUI, A.; SANTOS, F. K. F. D.; MARTINEZ, S. T.; BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M. Café: aspectos gerais e seu aproveitamento para além da bebida. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 107–134, 2017.

ECOPELL. **Pellets – Ecopell**. 2025. Disponível em: <<https://www.ecopell.com.br/pellets>>. Acesso em: 20 fev. 2025.

EDITORA BRASIL BIOMASSA. **Anuário Produtores Brasil Briquete Pellets**. 2024. Disponível em: <https://www.editorabrasilbiomassa.com/product-page/anu%C3%A1rios-e-planilhas-produtores-brasil-briquetes-e-pellets-de-madeira?srsltid=AfmBOoqtZWzSvzIWVdAuZej8PsOI9_t1ZJNTZXx69B2I4hKcceblSunm>. Acesso em: 27 dez. 2024.

EMMA, A. F.; ALANGAR, S.; YADAV, A. K. Extraction and characterization of coffee husk biodiesel and investigation of its effect on performance, combustion, and emission characteristics in a diesel engine. **Energy Conversion and Management: X**, v. 14, p. 100214, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100214>.

EMBRAPA. **Artigo - Produção mundial de café foi estimada em 176,2 milhões de sacas de 60kg para a safra 2024–2025**. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/91004784/producao-mundial-de-cafe-foi-estimada-em-1762-milhoes-de-sacas-de-60kg-para-a-safra-20242025?p_auth=uSVxwXY7>. Acesso em: 13 fev. 2025.

EMBRAPA. **Briquetagem e peletização de resíduos agrícolas e florestais**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/932713/briquetagem-e-peletizacao-de-residuos-agricolas-e-florestais>>. Acesso em: 13 out. 2023.

- ENERGYNEWS. **Biomass briquette market to reach USD 1.9 billion by 2033**. 2024. Disponível em: <<https://energynews.pro/en/biomass-briquette-market-to-reach-usd-1-9-billion-by-2033/>>. Acesso em: 10 nov. 2024.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2024**: ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2025.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2013**: ano base 2012. Rio de Janeiro: EPE, 2013. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2013>>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2007**: ano base 2006. Rio de Janeiro: EPE, 2007. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2007>>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **BEN – Séries Históricas e Matrizes**. 2024b. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Compleatas>>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Síntese 2024**: ano base 2023. 2024c. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.
- ESHETE, A. T. Production and characterization of coffee husk and sawdust briquettes with potato peel, waste paper and molasses as a binding material. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 10, n. 8, p. 1281–1290, 2019.
- ESQUIVEL, P.; JIMÉNEZ, V. M. Functional properties of coffee and coffee by-products. **Food Research International**, v. 46, n. 2, p. 488–495, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.028>.
- EXCHANGE RATES. **Histórico de Taxas de Câmbio do Euro (EUR) para o Real Brasileiro (BRL) em 2013**. 2025. Disponível em: <<https://www.exchange-rates.org/pt/historico/eur-brl-2013>>. Acesso em: 18 abr. 2025.
- FAGERNÄS, L.; BRAMMER, J.; WILÉN, C.; LAUER, M.; VERHOEFF, F. Drying of biomass for second generation synfuel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 9, p. 1267–1277, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.005>.
- FELFLI, F. F.; MESA P, J. M.; ROCHA, J. D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C. A.; PIPPO, W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 236–242, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.011>.
- FERNANDES, E. **PIS/Cofins**: O que é, como funciona e como calcular. 2025. Disponível em: <<https://valor.globo.com/legislacao/artigo/pis-cofins-o-que-e-como-funciona-e-como-calcular.ghtml>>. Acesso em: 22 mar. 2025.

- FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Biomass Briquette Market Size, Industry Share | Forecast [2025-2032]**. 2024. Disponível em: <<https://www.fortunebusinessinsights.com/biomass-briquette-market-102750>>. Acesso em: 27 dez. 2024.
- FREITAS, L. C. F.; RENÓ, M. L. G. Environmental and economic evaluation of coffee residues. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 4, p. 715–721, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210159>.
- FRODESON, S.; BERGHEL, J.; RENSTRÖM, R. The potential of using two-step drying techniques for improving energy efficiency and increasing drying capacity in fuel pellet industries. **Drying Technology**, v. 31, n. 15, p. 1863–1870, 2013. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.833520>.
- GARCIA, D. P. Cresce a produção de *pellets* no Brasil. **O Papel**, p. 83-84, 2017.
- GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; PROTÁSIO, T. P.; VIANA, R. S.; SCATOLINO, M. V. Produção brasileira de *pellets* de biomassa agroflorestal. **Energia na Agricultura**, v. 37, n. 1, p. 30–38, 2022. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2022v37n1p30-38>.
- GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de *pellets* de madeira. **Revista da Madeira**, v. 24, n. 135, p. 14–16, 2013.
- GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3. ed. New Yersey: Prentice Hall, 1993.
- GEBREEGZIABHER, T.; OYEDUN, A. O.; HUI, C. W. Optimum biomass drying for combustion – A modeling approach. **Energy**, v. 53, p. 67-73, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.004>.
- GEMECHU, F. G. Embracing nutritional qualities, biological activities and technological properties of coffee byproducts in functional food formulation. **Trends in Food Science & Technology**, v. 104, p. 235–261, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.005>.
- GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. 215 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- GIODA, A. Características e procedência da lenha usada na cocção no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 33, p. 133-149, 2019. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2019.3395.0009>.
- GIUDICE, A.; ACAMPORA, A.; SANTANGELO, E.; PARI, L.; BERGONZOLI, S.; GUERRIERO, E.; PETRACCHINI, F.; TORRE, M.; PAOLINI, V.; GALLUCCI, F. Wood chip drying through the using of a mobile rotary dryer. **Energies**, v. 12, n. 9, p. 1–16, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12091590>.
- GLOBE NEWSWIRE. **Biomass Briquettes Market to Cross USD 700 Million With a CAGR of 7.4% by 2028 | BlueWeave Consulting**. 2022. Disponível em: <<https://www.globenewswire.com/news-release/2022/08/16/2499365/0/en/Biomass-Briquettes-Market-to-Cross-USD-700-Million-With-a-CAGR-of-7-4-by-2028-BlueWeave-Consulting.html>>. Acesso em: 28 dez. 2024.

- GLOBE NEWSWIRE. **Global Biomass Briquettes Market to 2028: Adoption of Biomass Briquettes in Developed Countries Drives Growth**. 2023. Disponível em: <<https://www.globenewswire.com/news-release/2023/06/26/2694243/28124/en/Global-Biomass-Briquettes-Market-to-2028-Adoption-of-Biomass-Briquettes-in-Developed-Countries-Drives-Growth.html>>. Acesso em: 28 dez. 2024.
- GOUVÊA, B. M.; TORRES, C.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; OLIVEIRA, E. S. Feasibility of ethanol production from coffee husks. **Biotechnology Letters**, v. 31, n. 9, p. 1315–1319, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10529-009-0023-4>.
- GREEN, D. W.; PERRY, R. H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- GUIMARÃES, L. S. **O custo nivelado da eletricidade e seu impacto na transição energética**. 2019. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opiniao_-_transicao_energetica.pdf>. Acesso em 25 out. 2024.
- GUPTA, A.; YAN, D. **Mineral Processing Design and Operations: An Introduction**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2016. p. 71–121. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63589-1.00003-4>.
- GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 712–725, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>.
- HAN, J.; CHOI, Y.; KIM, J. Development of the process model and optimal drying conditions of biomass power plants. **ACS omega**, v. 5, n. 6, p. 2811–2818, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03557>.
- HAQUE, N.; SOMERVILLE, M. Techno-economic and environmental evaluation of biomass dryer. **Procedia Engineering**, v. 56, p. 650–655, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.173>.
- HAVILAH, P. R.; SHARMA, A. K.; GOVINDASAMY, G.; MATSAKAS, L.; PATEL, A. Biomass gasification in downdraft gasifiers: A technical review on production, up-gradation and application of synthesis gas. **Energies**, v. 15, n. 11, p. 3938, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15113938>.
- HEYA, M. N.; HERNÁNDEZ, A. L. R.; POURNAVAB, R. F.; PINTOR, L. F. I.; DÍAZ-JIMÉNEZ, L.; HEYA, M. S.; CRUZ, L. R. S.; PARRA, A. C. Physicochemical characteristics of biofuel briquettes made from pecan (*Carya illinoensis*) pericarp wastes of different particle sizes. **Molecules**, v. 27, n. 3, p. 1035, 2022. <https://doi.org/10.3390/molecules27031035>.
- HOLMBERG, H.; AHTILA, P. Comparison of drying costs in biofuel drying between multi-stage and single-stage drying. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 6, p. 515–530, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.09.007>.
- HOLMBERG, H.; ISAKSSON, J.; LAHDELMA, R. Minimization of total drying costs for a continuous packed-bed biomass dryer operating at an integrated chemical pulp and paper mill.

REFERÊNCIAS

Biomass and Bioenergy, v. 71, p. 431–442, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.09.010>.

HOSEINI, M.; COCCO, S.; CASUCCI, C.; CARDELLI, V.; CORTI, G. Coffee by-products derived resources. A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 148, p. 106009, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106009>.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2024**. 2024. Disponível em: <<https://iba.org/relatorio2024.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tabela 7832 - Área plantada, área colhida, produção e rendimento médio, por ano da safra e produto das lavouras**. 2025. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7832>>. Acesso em: 26 jan. 2025.

IEA. International Energy Agency. **Energy Statistics Data Browser**. 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>>. Acesso em: 18 fev. 2025.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook 2021**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>>. Acesso em: 18 fev. 2025.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>>. Acesso em: 18 fev. 2025.

INVESTING.COM. **Preços históricos GBP/USD**. Disponível em: <<https://br.investing.com/currencies/gbp-usd-historical-data>>. Acesso em: 01 out. 2024.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Taxa de câmbio comercial para compra: real (R\$) / dólar americano (US\$) – média**. 2024. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=38590&module=M>>. Acesso em: 01 out. 2024.

IRENA. International Renewable Energy Agency. Biomass for Power Generation. **Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series**, v. 1, n. 1/5, 2012.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Renewable Power Generation: Costs in 2021**. Abu Dhabi: IRENA, 2022.

ISAKSSON, J; ÅSBLAD, A.; BERNTSSON, T. Influence of dryer type on the performance of a biomass gasification combined cycle co-located with an integrated pulp and paper mill. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 336–347, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.002>.

ITAL, Y.; SANTOS, R.; BRANQUINHO, M.; MALICO, I.; GHESTI, G. F.; BRASIL, A. M. Numerical and experimental assessment of a downdraft gasifier for electric power in Amazon using açai seed (*Euterpe oleracea* Mart.) as a fuel. **Renewable Energy**, v. 66, p. 662–669, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.007>.

- JANISSEN, B.; HUYNH, T. Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. **Resources, Conservation and recycling**, v. 128, p. 110–117, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.001>.
- JEGUIRIM, M.; LIMOUSY, L.; FOSSARD, E. Characterization of coffee residues pellets and their performance in a residential combustor. **International Journal of Green Energy**, v. 13, n. 6, p. 608–615, 2016. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.888664>.
- JIAMJARIYATAM, R.; SAMOSORN, S.; DOLSOPHON, K.; TANTAYOTAI, P.; LORLIAM, W.; KRAJANGSANG, S. Effects of drying processes on the quality of coffee pulp. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 10, p. e16876, 2022. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16876>.
- JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A. S. Dryer Emission Control Systems. *In*: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 1045–1076.
- KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337–359, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>.
- KEEY, R. B. **Introduction to Industrial Drying Operations**. 1. ed. Oxford: Pergamon Press, 1978.
- KORZENOWSKI, C.; DE SOUZA, C. B. S.; AGUERO, R. R.; DOS SANTOS, M. G. Reaproveitamento de cascas de cupuaçu para a produção de energia através da sua transformação em briquetes. **International Seven Journal of Multidisciplinary**, v. 2, n. 2, p. 189–220, 2023. <https://doi.org/10.56238/isevmjv2n2-003>.
- KROKIDA, M.; MARINOS-KOURIS, D.; MUJUMDAR, A. S. Rotary Drying. *In*: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 139–159.
- KUDRA, T. Cost-estimation methods for dryers and drying processes. *In*: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 1291–1301.
- LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. Fluidized bed dryers. *In*: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 161–189.
- LEE, Y. G.; CHO, E. J.; MASKEY, S.; NGUYEN, D. T.; BAE, H. J. Value-added products from coffee waste: A review. **Molecules**, v. 28, n. 8, p. 3562, 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules28083562>.
- LEVY, A.; BORDE, I. Pneumatic and Flash Drying. *In*: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 381–392.
- LI, H.; CHEN, Q.; ZHANG, X.; FINNEY, K. N.; SHARIFI, V. N.; SWITENBANK, J. Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 35, p. 71–80, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.009>.

LIMA, M. D.; JUNIOR, J. S. G.; SOUSA, E. F.; DE OLIVEIRA, F. I. P.; COIMBRA, K. R. G.; RIOS, M. A. S. Análise comparativa das biomassas jucá, catingueira e nim visando potenciais aplicações energéticas. *In: ENCONTRO NACIONAL DE QUÍMICA E SUSTENTABILIDADE (ENQUIS)*, 4., 2024, Teresina. **Anais eletrônicos [...]** Teresina: Associação Brasileira de Química, 2024. Disponível em: <<https://www.abq.org.br/enquis/trabalhos/134/A134T25390-1716483993.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2024.

LORENTZ, F. **Contabilidade e análise de custos**: Uma abordagem prática e objetiva: livro texto com 320 exercícios resolvidos. 3. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2021.

LUBWAMA, M.; YIGA, V. A. Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. **Renewable Energy**, v. 118, p. 43–55, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.003>.

MACHADO, C. M. M.; OLIVEIRA, B. H.; PANDEY, A.; SOCCOL, C. R. Coffee husk as substrate for the production of gibberellic acid by fermentation. *In: SERA, T.; SOCCOL, C. R.; PANDEY, A.; ROUSSOS, S. Coffee Biotechnology and Quality: Proceedings of the 3rd International Seminar on Biotechnology in the Coffee Agro-Industry*, Londrina, Brazil. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 401–408. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1068-8_37.

MANRIQUE, R.; VÁSQUEZ, D.; CEBALLOS, C.; CHEJNE, F.; AMELL, A. Evaluation of the energy density for burning disaggregated and pelletized coffee husks. **ACS Omega**, v. 4, n. 2, p. 2957–2963, 2019. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02591>.

MANRIQUE, R.; VÁSQUEZ, D.; CHEJNE, F.; PINZÓN, A. Energy analysis of a proposed hybrid solar–biomass coffee bean drying system. **Energy**, v. 202, p. 117720, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117720>.

MANZONI, L. P.; BARROS, T. D. Carvão vegetal. **Embrapa**, 08 dez. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/socioeconomia/florestas/carvao-vegetal>>. Acesso em: 13 jun. 2024.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Brasil é o maior produtor mundial e o segundo maior consumidor de café**. 2023a. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-e-o-maior-produtor-mundial-e-o-segundo-maior-consumidor-de-cafe>>. Acesso em: 13 fev. 2025.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Projeções do Agronegócio**: Brasil 2022/23 a 2032/33. Brasília: MAPA, 2023b.

MARAFON, A. C.; AMARAL, A. F. C.; MACHADO, J. C.; CARNEIRO, J. D. C.; BIERHALS, A. N.; GUIMARÃES, V. D. S. Chemical composition and calorific value of elephant grass varieties and other feedstocks intended for direct combustion. **Grassland Science**, v. 67, n. 3, p. 241–249, 2021. <https://doi.org/10.1111/grs.12311>.

REFERÊNCIAS

MARAFON, A. C.; NUNES, M. U. C.; AMARAL, A. F. C.; SANTOS, J. P. **Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica: potencialidades e desafios**. 1. ed. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019.

MARKET RESEARCH INTELLECT. **Tamanho do mercado de briquetas por produto, por aplicação, por geografia, cenário competitivo e previsão**. 2025. Disponível em: <<https://www.marketresearchintellect.com/pt/product/global-briquette-market-size-and-forecast/>>. Acesso em: 16 fev. 2025.

MARKWIDE RESEARCH. **Briquette Market 2025-2034 | Size, Share, Growth**. 2024. Disponível em: <<https://markwideresearch.com/briquette-market/>>. Acesso em: 02 jan. 2025.

MAROULIS, Z. B.; SARAVACOS, G. D.; MUJUMDAR, A. S. Spreadsheet-aided dryer design. *In*: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 111–123.

MARTINS, F. P.; BOSCH NETO, J. C.; SILVA, A. J. O.; SIQUEIRA, A. M. O. Drying: A review. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 4, 2020. <https://doi.org/10.18540/jcecv16iss4pp0600-0607i>.

MAYER, F. D.; HOFFMANN, R.; RUPPENTHAL, J. E. Gestão energética, econômica e ambiental do resíduo de casca de arroz em pequenas e médias agroindústrias de arroz. *In*: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 8., 2006, Bauru. **Anais eletrônicos [...]**. Bauru: Unesp, 2006. Disponível em: <https://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/124.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.

MELESE, Y. Y.; KOLECH, S. A. Coffee (*Coffea arabica* L.): methods, objectives, and future strategies of breeding in Ethiopia. **Sustainability**, v. 13, n. 19, p. 10814, 2021. <https://doi.org/10.3390/su131910814>.

MENSAH, J. H. R.; SILVA, A. T. Y. L.; DOS SANTOS, I. F. S.; DE SOUZA RIBEIRO, N.; GBEDJINO, M. J.; NAGO, V. G.; TIAGO FILHO, G. L.; BARROS, R. M. Assessment of electricity generation from biogas in Benin from energy and economic viability perspectives. **Renewable Energy**, v. 163, p. 613–624, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.014>.

MF RURAL. **Briquetes Biomassa**. 2025a. Disponível em: <<https://www.mfrural.com.br/busca/briquetes-biomassa>>. Acesso em: 18 abr. 2025.

MF RURAL. **Briquetes Caldeira**. 2025b. Disponível em: <<https://www.mfrural.com.br/busca/briquetes-caldeira>>. Acesso em: 18 abr. 2025.

MF RURAL. **Briquetes Serragem**. 2025c. Disponível em: <<https://www.mfrural.com.br/busca/briquete-serragem>>. Acesso em: 18 abr. 2025.

MIITO, G. J.; BANADDA, N. A short review on the potential of coffee husk gasification for sustainable energy in Uganda. **F1000Research**, v. 6, 2017. <https://doi.org/10.12688/f1000research.10969.1>.

- MORAES, M. B. F.; ABREU, Y. V. **Produção de Energia Elétrica por meio de Biodigestores utilizando Resíduos Pecuários: Viabilidade Econômica**. 1. ed. Campo Grande: Life Editora, 2020.
- MORALES-MARTÍNEZ, J. L.; AGUILAR-USCANGA, M. G.; BOLAÑOS-REYNOSO, E.; LÓPEZ-ZAMORA, L. Optimization of chemical pretreatments using response surface methodology for second-generation ethanol production from coffee husk waste. **BioEnergy Research**, v. 14, n. 3, p. 815–827, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10197-6>.
- MORENO-RAMÓN, H.; QUIZEMBE, S. J.; IBÁÑEZ-ASENSIO, S. Coffee husk mulch on soil erosion and runoff: experiences under rainfall simulation experiment. **Solid Earth**, v. 5, n. 2, p. 851–862, 2014. <http://doi.org/10.5194/se-5-851-2014>.
- MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification, and Selection of Dryers. *In*: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 3–29.
- MURTHY, P. S.; NAIDU, M. M. Production and application of xylanase from *Penicillium* sp. utilizing coffee by-products. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, p. 657–664, 2012b. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0331-7>.
- MURTHY, P. S.; NAIDU, M. M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 66, p. 45–58, 2012a. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>.
- MYLLYMAA, T.; HOLMBERG, H.; AHTILA, P. Economic evaluation of drying of soot sludge and sawdust mixture at low temperatures using the characteristic drying curve method. **ChemEngineering**, v. 4, n. 1, p. 6, 2020. <https://doi.org/10.3390/chemengineering4010006>.
- MYLLYMAA, T.; HOLMBERG, H.; AHTILA, P. Techno-economic evaluation of biomass drying in moving beds: The effect of drying kinetics on drying costs. **Drying Technology**, v. 37, n. 10, p. 1201–1214, 2019. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1492615>.
- MYLLYMAA, T.; HOLMBERG, H.; HILLAMO, H.; LAAJALEHTO, T.; AHTILA, P. Wood chip drying in fixed beds: drying kinetics and economics of drying at a municipal combined heat and power plant site. **Drying Technology**, v. 33, n. 2, p. 205–215, 2015. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.945179>.
- MYRIAD. **20.0 Ton Rectangular Pellet Silo (2m x 4m x 5.435m) - Biomass Silo Systems**. 2024. Disponível em: <<https://biomasssparesonline.co.uk/collections/biomass-silo-systems/products/8000-litre-buffer-vessel-3-bar-90-degree-flanged-connections>>. Acesso em: 01 out. 2024.
- NAM, N. H.; NGOC, C. T. A.; BAY, T. V. Investigation on gasification of coffee husk in CO₂, H₂O, and mixed atmospheres. **Vietnam Journal of Chemistry**, v. 59, n. 6, p. 775–780, 2021.
- NGO, T. T. N.; PHAN, T. H.; NGUYEN, T. B. T. Screening of fungal strains grown in solid-state culture for production of pectinase from coffee husk. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 6, n. 3, p. 273–276, 2016. 10.18517/IJASEIT.6.3.782.

- NUAMSRINUAN, N.; NAEMCHANTHARA, P.; LIMSUWAN, P.; NAEMCHANTHARA, K. Fabrication and characterization of particle board from coffee husk waste. **Applied Mechanics and Materials**, v. 891, p. 111–116, 2019. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.891.111>.
- OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 6, p. 653–669, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>.
- OBI, O. F.; PECENKA, R.; CLIFFORD, M. J. A review of biomass briquette binders and quality parameters. **Energies**, v. 15, n. 7, p. 2426, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15072426>.
- OKELLO, C.; KASISIRA, L. L.; MACKAY O. Optimising densification condition of coffee husks briquettes using response surface methodology. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 2., 2011, Entebbe. **Anais eletrônicos** [...]. Entebbe: AET, 2011. Disponível em: <<https://nru.uncst.go.ug/handle/123456789/5408>>. Acesso em: 18 fev. 2025.
- OLIVEIRA, T. L.; ASSIS, P. S.; LEAL, E. M.; ILÍDIO, J. R. Study of biomass applied to a cogeneration system: A steelmaking industry case. **Applied Thermal Engineering**, v. 80, p. 269–278, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.002>.
- ORELLANA, B. B. M. A. **Utilização de resíduos de biomassa do Distrito Federal para fins energéticos**. 2019. 202 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- PAES, J. L.; COSTA, L. M. P.; FERNANDES, P. L. B. G.; VARGAS, B. C.; CECCHIN, D. Biogas production by anaerobic digestion of coffee husks and cattle manure. **Engenharia Agrícola**, v. 43, p. e20220126, 2023. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43nepe20220126/2023>.
- PAIVA, M. V. **Tecnologia de produção de briquetes de resíduos de fruta para geração de energia**. 2022. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.
- PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; NIGAM, P.; BRAND, D.; MOHAN, R.; ROUSSOS, S. Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. **Biochemical Engineering Journal**, v. 6, n. 2, p. 153–162, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(00\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(00)00084-X).
- PANG, S. Biomass Drying for an Integrated Bioenergy Plant. *In*: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 847–860.
- PANG, S.; MUJUMDAR, A. S. Drying of woody biomass for bioenergy: Drying technologies and optimization for an integrated bioenergy plant. **Drying Technology**, v. 28, n. 5, p. 690–701, 2010. <https://doi.org/10.1080/07373931003799236>.
- PERAZZINI, H.; PERAZZINI, M. T. B. Drying of agro-industrial residues for biomass applications. *In*: ISLAM, S. U.; SHALLA, A. H.; KHAN, S. A. **Handbook of Biomass**

Valorization for Industrial Applications, 1. ed. Beverly: Scrivener Publishing LLC, 2022, p. 129–178.

PERAZZINI, H.; PERAZZINI, M. T. B.; FREIRE, F. B.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Modeling and cost analysis of drying of citrus residues as biomass in rotary dryer for bioenergy. **Renewable Energy**, v. 175, p. 167–178, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.144>.

PETERS, M.; TIMMERHAUS, K.; WEST, R. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

POIRIER, D. Conveyor Dryers. *In*: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 393–403.

POYILIL, S.; PALATEL, A.; CHANDRASEKHARAN, M. Physico-chemical characterization study of coffee husk for feasibility assessment in fluidized bed gasification process. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 51041–51053, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17048-7>.

PR NEWSWIRE. **Biomass Briquette Market to Reach \$1.9 Billion, Globally, by 2033 at 7.9% CAGR**: Allied Market Research. 2024. Disponível em: <<https://www.prnewswire.com/news-releases/biomass-briquette-market-to-reach-1-9-billion-globally-by-2033-at-7-9-cagr-allied-market-research-302220713.html>>. Acesso em: 03 jan. 2025.

PRADHAN, P.; MAHAJANI, S. M.; ARORA, A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. **Fuel Processing Technology**, v. 181, p. 215–232, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1252–1258, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100015>.

RALLIS, C.; CODLIN, S.; BÄHLER, J. TORC1 signaling inhibition by rapamycin and caffeine affect lifespan, global gene expression, and cell proliferation of fission yeast. **Aging cell**, v. 12, n. 4, p. 563–573, 2013. <https://doi.org/10.1111/ace1.12080>.

RAUDAH; ZULKIFLI. Optimization of binder addition and particle size for densification of coffee husks briquettes using response surface methodology. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 334, p. 012007, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/334/1/012007>.

REZAEI, H.; SOKHANSANJ, S. A review on determining the residence time of solid particles in rotary drum dryers. **Drying Technology**, v. 39, n. 11, p. 1762–1772, 2021. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1912081>.

RODRIGUEZ, R. S.; HAUGEN, R.; RUEBER, A.; HUANG, C. C. Reversible neuronal and muscular toxicity of caffeine in developing vertebrates. **Comparative Biochemistry and**

Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, v. 163, p. 47–54, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2014.03.004>.

RUIZ, S. O.; GORDILLO, G.; MOHAMAD, A. A. Numerical simulation of a simplified, transient, 2D, non-reactive heat transfer model of a lab-scale fixed-bed pyrolysis reactor. **Applied Thermal Engineering**, v. 150, p. 545–551, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.027>.

SACCOL, A. F. O.; WELTER, C. A.; ROSA, R. C.; COLDEBELLA, R.; LONGHI, S. J.; FARIAS, J. A.; PEDRAZZI, C. Aproveitamento da biomassa florestal na fabricação de briquetes. **Revista Matéria**, v. 25, n. 2, p. e-12634, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1034>.

SALÁRIO. **Operador de maquinas fixas em geral**: salário, o que faz, piso salarial 2024. 2024. Disponível em: <<https://www.salario.com.br/profissao/operador-de-maquinas-fixas-em-geral-cbo-862150/>>. Acesso em: 01 out. 2024.

SAMSON, R.; MANI, S.; BODDEY, R.; SOKHANSANJ, S.; QUESADA, D.; URQUIAGA, S. U.; REIS, V.; HO LEM, C. The potential of C₄ perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 24, n. 5–6, p. 461–495, 2005. <https://doi.org/10.1080/07352680500316508>.

SANTOS, J. O.; SANTOS, R. M. S.; COSTA, L. M.; MEDEIROS, A. C.; COELHO, D. C.; MARACAJÁ, P. B. Produção e utilização de briquetes no Brasil. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v. 5, n. 1, p. 36–40, 2015.

SEAB. Secretaria de Agricultura e do Abastecimento do Paraná. **Preços de Produtos Florestais**. 2025. Disponível em: <<https://www.agricultura.pr.gov.br/Pagina/Precos-de-Produtos-Florestais>>. Acesso em: 18 abr. 2025.

SETTER, C.; ATAÍDE, C. H.; MENDES, R. F.; DE OLIVEIRA, T. J. P. Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 8215–8223, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11124-0>.

SETTER, C.; OLIVEIRA, T. J. P. Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis. **Renewable Energy**, v. 189, p. 1007–1019, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.077>.

SETTER, C.; BORGES, F. A.; CARDOSO, C. R.; MENDES, R. F.; OLIVEIRA, T. J. P. Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. **Industrial Crops and Products**, v. 154, p. 112731, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112731>.

SETTER, C.; SILVA, F. T. M.; ASSIS, M. R.; ATAÍDE, C. H.; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, T. J. P. Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. **Fuel**, v. 261, p. 116420, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116420>.

SHANKARANAND, V. S.; LONSANE, B. K. Coffee husk: an inexpensive substrate for production of citric acid by *Aspergillus niger* in a solid-state fermentation system. **World**

Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 10, p. 165–168, 1994. <https://doi.org/10.1007/bf00360879>.

SILVA, A. O.; GARCIA, F. P.; PERAZZINI, M. T. B.; PERAZZINI, H. Design and economic analysis of a pre-treatment process of coffee husks biomass for an integrated bioenergy plant. **Environmental Technology & Innovation**, v. 30, p. 103131, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103131>.

SILVA, D. A. L.; DELAI, I.; MONTES, M. L. D.; OMETTO, A. R. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 532–547, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.056>.

SILVA, J. P. **Caracterização da casca de café (*Coffea arábica*, L) in natura, e de seus produtos obtidos pelo processo de pirólise em reator mecanicamente agitado**. 2012. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

SILVA, L. A.; DOS SANTOS, I. F. S.; DE OLIVEIRA MACHADO, G.; TIAGO FILHO, G. L.; BARROS, R. M. Rice husk energy production in Brazil: An economic and energy extensive analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, p. 125188, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125188>.

SINNOTT, R. K. **Coulson & Richardson's Chemical Engineering: Chemical Engineering Design**. 4. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2005.

SIMTAX. **Tabela ICMS 2025**: Alíquotas de todos estados [atualizada]. 2025. Disponível em: <<https://simtax.com.br/tabela-icms-2025-aliquotas-de-todos-estados-atualizada/>>. Acesso em: 22 mar. 2025.

SMARTFIRE. **Diferença entre briquetes e pellets**. 2020. Disponível em: <<https://www.smartfire.pt/diferenca-entre-briquetes-e-pellets/>>. Acesso em: 13 jan. 2025.

SOARES, M.; CHRISTEN, P.; PANDEY, A.; SOCCOL, C. R. Fruity flavour production by *Ceratocystis fimbriata* grown on coffee husk in solid-state fermentation. **Process Biochemistry**, v. 35, n. 8, p. 857–861, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00144-2](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00144-2).

SOKRETHYA, S.; AMINOV, Z.; VAN QUAN, N.; XUAN, T. D. Feasibility of 10 MW biomass-fired power plant used rice straw in Cambodia. **Energies**, v. 16, n. 2, p. 651, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16020651>.

SONTER, L. J.; BARRETT, D. J.; MORAN, C. J.; SOARES-FILHO, B. S. Carbon emissions due to deforestation for the production of charcoal used in Brazil's steel industry. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 4, p. 359–363, 2015. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2515>.

SOUZA, T. C. A.; ARAÚJO, J. A.; PERAZZINI, M. T. B.; PERAZZINI, H. Drying of granular cellulosic fibers by-products: Material characterization, kinetics modeling, and costs analysis towards process optimization. **Bioresource Technology Reports**, v. 15, p. 100820, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100820>.

- SPHERICAL INSIGHTS. **Global Biomass Briquettes Market Size, Price, Insights, Forecasts**. 2024. Disponível em: <<https://www.sphericalinsights.com/reports/biomass-briquettes-market>>. Acesso em: 02 jan. 2025.
- STELTE, W.; SANADI, A. R.; SHANG, L.; HOLM, J. K.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. Recent developments in biomass pelletization – A review. **BioResources**, v. 7, n. 3, p. 4451–4490, 2012. <https://doi.org/10.15376/biores.7.3.4451-4490>.
- STENSTRÖM, S. Drying of biofuels from the forest—A review. **Drying technology**, v. 35, n. 10, p. 1167–1181, 2017. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1258571>.
- STOLARSKI, M. J.; SZCZUKOWSKI, S.; TWORKOWSKI, J.; KRZYŻANIAK, M.; GULCZYŃSKI, P.; MLECZEK, M. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. **Renewable Energy**, v. 57, p. 20–26, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.005>.
- SUAREZ, J. A.; LUENGO, C. A. Coffee husk briquettes: a new renewable energy source. **Energy Sources**, v. 25, n. 10, p. 961–967, 2003. <https://doi.org/10.1080/00908310390232415>.
- SUGEBO, B. A review on enhanced biofuel production from coffee by-products using different enhancement techniques. **Materials for Renewable and Sustainable Energy**, v. 11, n. 2, p. 91–103, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40243-022-00209-0>.
- SURYANINGSIH, S.; NURHILAL, O.; YULIAH, Y.; MULYANA, C. Combustion quality analysis of briquettes from variety of agricultural waste as source of alternative fuels. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 65, p. 012012, 2017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012012>.
- SVIECH, V.; MANTOVAN, E. A. Análise de investimentos: controvérsias na utilização da TIR e VPL na comparação de projetos. **Percursos**, v. 1, n. 13, p. 270–298, 2013. <http://dx.doi.org/10.21902/RevPercursos.2316-7521.v1i13.657>.
- SVOBODA, K.; MARTINEC, J.; POHOŘELÝ, M.; BAXTER, D. Integration of biomass drying with combustion/gasification technologies and minimization of emissions of organic compounds. **Chemical Papers**, v. 63, p. 15–25, 2009. <https://doi.org/10.2478/s11696-008-0080-5>.
- TAIWAN NEWS. **Biomass Briquette Market Overview, Size, Raw Materials, Applications, and Regional Forecasts 2024-2032**. 2024. Disponível em: <<https://www.taiwannews.com.tw/news/5941934>>. Acesso em: 06 jan. 2025.
- TAVARES, M. A. M. E.; TAVARES, S. R. L. Perspectivas para a participação do Brasil no mercado internacional de *pellets*. **Holos**, v. 5, p. 292–306, 2015. <https://doi.org/10.15628/holos.2015.2662>.
- TAVARES, S. R. L.; TAVARES, M. A. M. E. O briquete como alternativa energética para reduzir o desmatamento da Caatinga no Baixo-Açu Potiguar. *In*: TAVARES, S. R. L. **Biocombustíveis sólidos: fonte energética alternativa visando à recuperação de áreas degradadas e à conservação do Bioma Caatinga**. Brasília: Embrapa; Natal: Editora do IFRN, 2014, p. 293–317.

TESFAYE, A.; WORKIE, F.; KUMAR, V. S. Production and characterization of coffee husk fuel briquettes as an alternative energy source. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2022, p. 1–13, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9139766>.

TESFAYE, T.; TIBESSO, A.; ALIYI, A. Development and evaluation of a coffee husk biomass briquette machine. **Irish Interdisciplinary Journal of Science & Research**, v. 7, n. 3, p. 22–37, 2023. <https://doi.org/10.46759/IJRSR.2023.7303>.

TIBOLA, F. L.; DE OLIVEIRA, T. J. P.; CARVALHO, W. S.; ATAÍDE, C. H.; CARDOSO, C. R. Coffee husks characterization for the fast pyrolysis process. **Materials Science Forum**, v. 899, p. 130–135, 2017. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.899.130>.

TOWERING SKILLS. **Cost Indices – Towering Skills**. 2024. Disponível em: <<https://toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices/>>. Acesso em: 01 out. 2024.

TOWLER, G.; SINNOTT, R. **Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2022.

TRAN, T. M. K.; KIRKMAN, T.; NGUYEN, M.; VAN VUONG, Q. Effects of drying on physical properties, phenolic compounds and antioxidant capacity of Robusta wet coffee pulp (*Coffea canephora*). **Heliyon**, v. 6, n. 7, p. e04498, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04498>.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683–707, 2011. <https://doi.org/10.1002/bbb.324>.

TURTON, R.; SHAEIWITZ, J. A.; BHATTACHARYYA, D.; WHITING, W. B. **Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes**. 5. ed. Londres: Pearson, 2018.

ULBRICH, M.; PREßL, D.; FENDT, S.; GADERER, M.; SPLIETHOFF, H. Impact of HTC reaction conditions on the hydrochar properties and CO₂ gasification properties of spent grains. **Fuel Processing Technology**, v. 167, p. 663–669, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.08.010>.

UN COMTRADE. United Nations Commodities Trade. **Free access to detailed global trade data**. Disponível em: <<https://comtradeplus.un.org/>>. Acesso em: 03 jan. 2025.

UNIVDATOS. **Biomass Briquette Fuel Market: Current Analysis and Forecast (2023-2030)**. 2024. Disponível em: <<https://univdatos.com/report/biomass-briquette-fuel-market/>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

VAISH, S.; SHARMA, N. K.; KAUR, G. A review on various types of densification/briquetting technologies of biomass residues. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1228, p. 012019, 2022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1228/1/012019>.

REFERÊNCIAS

VALUATES REPORTS. **Global Biomass Briquette Fuel Market Insights, Forecast to 2030**. 2024. Disponível em: <<https://reports.valuates.com/market-reports/QYRE-Auto-8V4255/global-biomass-briquette-fuel>>. Acesso em: 27 dez 2024.

VAN'T LAND, C. M. **Drying in the Process Industry**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

VERIFIED MARKET REPORTS. **Biomass Briquette Market Size, Growth, Outlook & Forecast 2032. 2025**. Disponível em: <<https://www.verifiedmarketreports.com/product/biomass-briquette-market/>>. Acesso em: 16 fev. 2025.

WBDG. Whole Building Design Guide. **Biomass for Electricity Generation**. 2016. Disponível em: <<https://www.wbdg.org/resources/biomass-electricity-generation>>. Acesso em: 30 set. 2024.

WOGDERESS, A. S. Available information on the feeding value of coffee waste and ways to improve coffee waste for animal feed. **African Journal of Biology**, v. 3, n. 6, p. 243–257, 2016.

WOOD PELLET MILL. **Biomass briquete machine in Brazil market**. 2024. Disponível em: <<https://www.wood-pellet-mill.com/wood-pellet-news/Brazil-biomass-briquette-machine.html>>. Acesso em: 27 dez. 2024.

YI, J.; LI, X.; HE, J.; DUAN, X. Drying efficiency and product quality of biomass drying: A review. **Drying Technology**, v. 38, n. 15, p. 2039–2054, 2020. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1628772>.

YIGA, V. A.; LUBWAMA, M. Thermogravimetric analysis of agricultural residue carbonized briquettes for domestic and industrial applications. **MRS Advances**, v. 5, n. 20, p. 1039–1048, 2019. <https://doi.org/10.1557/adv.2019.485>.

YU, S.; SUN, J.; SHI, Y.; WANG, Q.; WU, J.; LIU, J. Nanocellulose from various biomass wastes: Its preparation and potential usages towards the high value-added products. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 5, p. 100077, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100077>.

ZERBINATTI, O. E.; SILVA, A. B.; PEREIRA, A. J.; MIRANDA, J. M. Briquetagem de resíduos de cafeeiro conduzido no sistema safra zero. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 3, p. 1143–1152, 2014. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n3p1143>.

ZHANG, H.; PANG, B.; KANG, S.; FU, J.; TANG, P.; CHANG, J.; LI, J.; LI, Z.; DENG, S. The influence of feedstock stacking shape on the drying performance of conveyor belt dryer. **Heat and Mass Transfer**, v. 58, n. 1, p. 157–170, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00231-021-03098-7>.

ZION MARKET RESEARCH. **Biomass Briquette Fuel Market Size, Share, Growth, Share Analysis 2023-2030. 2023**. Disponível em: <<https://www.zionmarketresearch.com/report/biomass-briquette-fuel-market>>. Acesso em: 02 jan. 2025.