



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA  
MESTRADO EM ENERGIA

MAIQUEL MOREIRA NUNES SANTOS

**APROVEITAMENTO TECNOLÓGICO DA CASCA DO CACAU  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

SÃO MATEUS

2016

MAIQUEL MOREIRA NUNES SANTOS

**APROVEITAMENTO TECNOLÓGICO DA CASCA DO CACAU  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Energia, área de concentração em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Paula Meneguelo

SÃO MATEUS

2016

## FICHA CATALOGRÁFICA

MAIQUEL MOREIRA NUNES SANTOS

**APROVEITAMENTO TECNOLÓGICO DA CASCA DO CACAU  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito para obtenção do Título de Mestre em Energia, área de concentração em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2016.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Paula Meneguelo  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Coorientadora

---

Prof. Dr. Paulo Sérgio da Silva Porto  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Membro Interno

---

Prof. Dr. Marco Antonio Galeas Aguilar  
Comissão Executiva do Plano da Lavoura  
Cacaueira  
Membro Externo

*Dedico este trabalho à minha esposa, Cristina, minha maior inspiração.  
Aos meus pais, William e Joana, meus exemplos de honestidade e perseverança.  
Às minhas irmãs, Michelle e Mirelle, pelo incentivo nos momentos difíceis.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, pela força durante a caminhada de desenvolvimento deste trabalho, mesmo diante de todas as dificuldades.

A toda a minha família, pelo apoio incondicional e incentivo em todos os momentos.

À família Terci, que me acolheu e torceu por mim durante esta pesquisa.

Ao meu orientador, professor doutor Leonardo da Silva Arrieche, por sua confiança, dedicação e ensinamentos transmitidos durante toda a caminhada.

À minha coorientadora, professor doutora Ana Paula Meneguelo, pela disposição em ajudar e contribuir para este trabalho.

Aos professores Thiago Xavier, pela ajuda na realização dos experimentos, e Paulo Sérgio da Silva Porto, pelas sugestões construtivas.

À professora doutora Gisele Chaves e família, pela amizade e o apoio durante toda a jornada.

Aos colegas de mestrado, Felipe Oliveira, Luila Saidler, Rômulo Souza, Patrick Araújo, pela convivência e ajuda nos estudos e, em especial, à colega Vanessa Dal-Bó, pela parceria ao longo de todo o curso.

Ao PPGEN, pelo suporte durante a pesquisa, e aos professores do programa que contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal.

Às alunas de graduação Giulia Correa, Caroline Meneguetti e Brenda Pirola, pelo auxílio na realização dos experimentos.

À Capes, pelo apoio financeiro, e À Ceplac, pelo fornecimento de amostras para realização dos experimentos, em especial ao professor Marco Antonio Aguilar, pela valiosa contribuição no desenvolvimento do trabalho.

## RESUMO

No atual cenário de instabilidade no mercado energético, o aproveitamento tecnológico da biomassa residual aparece como alternativa promissora. Durante o beneficiamento do fruto de cacau, os resíduos gerados ainda não possuem uma destinação adequada. Entre as diversas possibilidades de aproveitamento desses resíduos, a conversão energética necessita de avanços tecnológicos e operacionais. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi realizar a síntese do processo de produção de energia a partir da casca do cacau, via rotas de combustão direta, pirólise e gaseificação. Estudos experimentais com cultivares de cacau selecionadas – TSH 1188, Comum, Catongo e CCN 51 – permitiram a definição de alguns limites operacionais de processo. A multiplicidade de soluções, que podem atender a esse problema, demandou a aplicação dos conceitos da Engenharia de Processos. De acordo com resultados experimentais, as cultivares de cacau apresentaram faixa de poder calorífico superior, entre 16.79 MJ/kg e 17.26 MJ/kg, indicando bom potencial para o aproveitamento energético. Entretanto, também apresentaram uma faixa do teor de cinzas entre 8,36% e 9,63% e uma faixa do teor de água entre 81,94% e 83,20%, exigindo modificações operacionais. Na cinética de secagem, o modelo de Overhultz apresentou maior valor quanto ao coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e teste-t. Na etapa de síntese, a combinação das diferentes tecnologias de produção resultou em 10.752 fluxogramas plausíveis para cada rota tecnológica estudada. A busca heurística permitiu a determinação de apenas um fluxograma que maximiza o rendimento energético de cada rota, sendo CMC – BPM – SRD – IE – CBE – LFDB – IE para combustão direta e CMC – BPM – SRD – IE – NC – LFD – IE para pirólise e gaseificação. Com base nos fluxogramas heurísticos obtidos, a aplicação do método evolutivo gerou 25 fluxogramas vizinhos para cada rota tecnológica estudada. Este trabalho possibilita a concepção de tecnologias para o aproveitamento integral do fruto do cacau, por meio de uma abordagem inovadora, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da cadeia do cacau.

Palavras-chave: Biomassa. Resíduos do cacau. Engenharia de Processos. Heurísticas. Rotas termoquímicas.

## ABSTRACT

In the current scenario of instability in the energy market, the technological use of the residual biomass appears as a promising alternative. During the processing of the fruit of cocoa, the waste generated still do not have a proper final destination. Among the several possibilities of use of such residue, the energy conversion requires technological and operational advances. Thus, the objective of this work was the process synthesis of the energy production from the cocoa pod husk, through routes of direct combustion, pyrolysis and gasification. Experimental studies with selected cocoa – TSH 1188, Comum, Catongo e CCN 51 – allowed the definition of some operational process boards. The multiplicity of solutions that can meet this problem, demanded the application of the concepts of Processes Engineering. In accordance with experimental results, cocoa pod husk presented range of high heat value, between 16.79 MJ/kg and 17.26 MJ/kg, indicating good potential for energy use. However, it also presented a range of ash content of between 8.36% and 9.63% and a range of water content between 81,94% and 83,20%, requiring operational modifications. In the Drying kinetics, the Overhultz model presented a higher value on the coefficient of determination ( $R^2$ ) and test-t. In step of the synthesis, the combination of different technologies of production resulted in 10.752 flowcharts plausible for each technological route studied. The heuristic search has allowed the determination of only a flowchart that maximizes the energy yield of each route as CMC – BPM – SRD – IE – CBE – LFDB – IE for direct combustion and CMC – BPM – SRD – IE – NC – LFD – IE for pyrolysis and gasification. Based on the flowcharts heuristic obtained, the application of the method evolutionary generated 25 neighbouring flowcharts for each technological route studied. This study allows the design of technologies for full exploitation of the fruit of the cocoa, by means of an innovative approach, contributing to the sustainable development of the chain of cocoa.

Keywords: Biomass. Cocoa Waste. Process Engineering. Heuristics Thermochemical Routes.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Desenvolvimento sustentável na cadeia do cacau .....	18
Figura 2 – Produção mundial de cacau em 2014 (t) .....	21
Figura 3 – Produção nacional de cacau em 2014 (t) .....	21
Figura 4 – Fruto do cacau (a) e fruto do cacau aberto (b) .....	23
Figura 5 – Etapas do beneficiamento do cacau .....	24
Figura 6 – Principais rotas termoquímicas para a produção de energia .....	29
Figura 7 – Comportamento de uma partícula durante o processo de combustão .....	31
Figura 8 – Representação geral de árvore de estados .....	34
Figura 9 – Processos de combustão – a) forno mufla, b) analisador de gases portátil .....	43
Figura 10 – Tipos de cultivares de cacau: a) Catongo, b) Comum, c) TSH1188, d) CCN51 .....	47
Figura 11 – a) Casca do cacau. Espessura das cultivares de cacau: b) CCN51, c) Catongo .....	48
Figura 12 – Adimensional de umidade em função do tempo, para os níveis de temperatura do ar 60°C, 70°C e 80°C, no túnel de vento – (a) Velocidade do ar 1,5 m/s; (b) Velocidade do ar 2,0 m/s; (c) Velocidade do ar 2,5 m/s. .....	52
Figura 13 – Adimensional de umidade em função do tempo, para os níveis de velocidade do ar 1,5, 2,0 e 2,5 m/s, no túnel de vento (a) Temperatura do ar 60°C; (b) Temperatura do ar 70°C; (c) Temperatura do ar 80°C .....	53
Figura 14 – Adimensional de umidade em função do tempo, na estufa – temperatura do ar 60°C, 70°C e 80°C .....	55
Figura 15 – Concentração de CO durante a combustão da casca do cacau .....	57
Figura 16 – Concentração de NO <sub>x</sub> durante a combustão da casca do cacau .....	57
Figura 17 – Concentração de SO <sub>2</sub> no processo de combustão da casca do cacau ..	58
Figura 18 – Rotas termoquímicas de aproveitamento energético da casca do cacau .....	59
Figura 19 – Subsistemas das rotas de aproveitamento energético da casca do cacau .....	59
Figura 20 – Alternativas de corte/despolpa do fruto do cacau .....	60

Figura 21 – Principais tecnologias de redução de tamanho da biomassa do cacau..	61
Figura 22 – Alternativas de secagem da biomassa do cacau .....	63
Figura 23 – Alternativas para a compactação da biomassa de cacau.....	66
Figura 24 – Principais tecnologias de combustão de biomassa .....	67
Figura 25 – Principais alternativas de tecnologias de combustão de biomassa .....	68
Figura 26 – Principais rotas de gaseificação .....	69
Figura 27 – Rotas propostas para a etapa de pirólise .....	72
Figura 28 – Algoritmo decisório para a seleção de tecnologia de corte/despolpa do cacau .....	74
Figura 29 – Algoritmo decisório para a seleção de tecnologia de redução de tamanho .....	74
Figura 30 – Algoritmo decisório para a seleção de tecnologia de secagem .....	77
Figura 31 – Algoritmo decisório para a seleção da tecnologia de compactação .....	79
Figura 32 – Algoritmo decisório para a seleção do combustor para a biomassa do cacau.....	80
Figura 33 – Algoritmo decisório para a tecnologia de pirólise da biomassa .....	80
Figura 34 – Algoritmo decisório para a seleção da tecnologia de gaseificação de biomassa .....	81
Figura 35 – Fluxograma-base para a rota de combustão da biomassa do cacau .....	82
Figura 36 – Fluxograma-base para a rota de pirólise da biomassa do cacau .....	82
Figura 37 – Fluxograma-base para a rota de gaseificação .....	82

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Rendimentos normais das operações de utilização de subprodutos de cacau com referência a uma produtividade anual de 750 Kg do produto seco por hectare.....	22
Quadro 2 – Variações do processo de pirólise .....	33
Quadro 3 – Critérios de classificação de secadores.....	62
Quadro 4 – Principais vantagens e desvantagens do processo de compactação .....	64
Quadro 5 – Vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fixo de biomassa .....	69
Quadro 6 – Vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fluidizado de biomassa .....	70
Quadro 7 – Vantagens e desvantagens das alternativas de corte/despolpa do fruto do cacau .....	73
Quadro 8 – Principais tecnologias para a redução de tamanho de biomassa .....	75
Quadro 9 – Características das tecnologias de compactação de biomassa.....	78

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Pesquisas sobre aproveitamento dos resíduos do beneficiamento do cacau.....	18
Tabela 2 – Análise imediata de resíduos agrícolas .....	27
Tabela 3 – Poder calorífico de biomassas tradicionais.....	28
Tabela 4 – Equações de cinética de secagem utilizadas para materiais orgânicos ..	42
Tabela 5 – Características físicas do fruto do cacau por cultivar.....	49
Tabela 6 – Características físico-químicas da casca do cacau por cultivar.....	50
Tabela 7 – Análise imediata e poder calorífico da biomassa do cacau da literatura .	51
Tabela 8 – Parâmetros estimados do processo de secagem no túnel de vento.....	56
Tabela 9 – Principais diferenças entre briquetes e péletes .....	65
Tabela 10 – Exemplo das principais tecnologias de combustão existentes no mercado .....	67
Tabela 11 – Requisitos em relação à biomassa para diferentes tipos de gaseificadores .....	70
Tabela 12 – Principais parâmetros operacionais do processo de pirólise .....	71
Tabela 13 – Características das principais tecnologias de pirólise rápida de biomassa .....	71

## LISTA DE SÍMBOLOS

CH <sub>4</sub>	Metano	[--]
CO	Monóxido de carbono	[--]
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	[--]
H <sub>2</sub>	Hidrogênio	[--]
KPa	Kilopascal	[--]
m <sub>bio</sub>	Massa da biomassa	[g]
m <sub>1</sub>	Massa inicial da biomassa	[g]
m <sub>2</sub>	Massa final da biomassa	[g]
M	Umidade em base seca em um dado instante	[%]
M <sub>eq</sub>	Umidade de equilíbrio	[%]
m <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Massa de água	[g]
M <sub>0</sub>	Umidade inicial em base seca	[%]
MR	Adimensional de umidade	[--]
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogênio	[--]
O <sub>2</sub>	Oxigênio	[--]
PCI	Poder calorífico inferior	[MJ/kg]
PCS	Poder calorífico superior	[MJ/kg]
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação	[--]
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre	[--]
t	Student	[--]
teste-t	Tempo de secagem	[s]
T <sub>C</sub>	Teor de cinzas	[%]
T <sub>CF</sub>	Teor de carbono fixo	[%]
T <sub>H</sub>	Teor de hidrogênio	[%]
T <sub>O</sub>	Teor de oxigênio	[%]
T <sub>N</sub>	Teor de nitrogênio	[%]
T <sub>V</sub>	Teor de voláteis	[%]
V	Volume da biomassa	[cm <sup>3</sup> ]
V <sub>f</sub>	Volume do fluido adicionado	[m <sup>3</sup> ]
V <sub>pic</sub>	Volume do picnômetro	[m <sup>3</sup> ]
X <sub>BU</sub>	Umidade em base úmida	[%]
ρ	Massa específica da biomassa	[g/cm <sup>3</sup> ]
σ	Desvio-padrão	[--]

**LISTA DE SIGLAS**

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Aneel	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
Aspe	–	Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo
BP	–	Britador primário
BPB	–	Britador primário de barra
BPD	–	Britador primário de disco
BPF	–	Britador primário de facas
BPM	–	Britador primário de martelo
BPR	–	Britador primário de rolos
BS	–	Britador secundário
CBE	–	Briquetagem por extrusão de rosca
CBH	–	Briquetagem por pistão hidráulico
CBM	–	Briquetagem por pistão mecânico
CD	–	Subsistema de corte/despolpa
Ceplac	–	Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira
CMC	–	Corte mecânico dos frutos
CMN	–	Corte manual dos frutos
GF	–	Reator de gaseificação leito fixo
GFC	–	Gaseificação por leito fixo cocorrente
GFCT	–	Gaseificação por leito fixo contracorrente
GFL	–	Reator de gaseificação leito fluidizado
GLA	–	Reator de gaseificação leito de arraste
GLA	–	Gaseificação por leito de arraste
IBGE		Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICCO	–	<i>International Coffee Cocoa Organization</i>
IE	–	Integração energética
IPT	–	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LF	–	Reator de combustão leito fixo
LFD	–	Reator de combustão leito fluidizado
LFDB	–	Leito fluidizado borbulhante

LFDC	–	Leito fluidizado circulante
LFG	–	Reator de combustão leito fixo tipo grelha
LFS	–	Reator de combustão leito fixo tipo stockers
MH	–	Moinhos
NBR	–	Normas Brasileiras
NC	–	Sem compactação
NS	–	Sem secagem
PAV	–	Peletização de anel vertical
PCR	–	Reator de pirólise cone rotativo
PLF	–	Reator de pirólise de leito fixo
PLFD	–	Reator de pirólise de leito fluidizado
PP	–	Peletização plana
PRV	–	Reator de pirólise a vácuo
RC	–	Subsistema de combustão
RG	–	Reator de gaseificação
RP	–	Reator de pirólise
RT	–	Subsistema de redução de tamanho
SC	–	Subsistema de compactação
SS	–	Subsistema de secagem
SD	–	Secador de disco
SE	–	Secador de esteira
SF	–	Secador fluidizado
SIE	–	Sem integração energética
SP	–	Secador pneumático
SR	–	Sem redução de tamanho
SRD	–	Secador de tambor rotativo
SRI	–	Secador de tambor rotativo indireto
SSO	–	Secagem solar

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	V
<b>RESUMO</b> .....	VI
<b>ABSTRACT</b> .....	VII
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	VIII
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	X
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	XI
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	XII
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	XIII
<b>SUMÁRIO</b> .....	XV
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1 OBJETIVO GERAL.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	20
2.1 A IMPORTÂNCIA DA CADEIA DO CACAU/CHOCOLATE.....	20
2.2 GERAÇÃO DE BIOMASSA NA CADEIA DO CACAU.....	22
2.3 PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA BIOMASSA.....	25
<b>2.3.1 Massa específica</b> .....	25
<b>2.3.2 Análise imediata</b> .....	26
<b>2.3.3 Poder calorífico</b> .....	28
2.4 ROTAS TERMOQUÍMICAS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	29
<b>2.4.1 Combustão direta</b> .....	30
<b>2.4.2 Gaseificação</b> .....	32
<b>2.4.3 Pirólise</b> .....	32
2.5 ENGENHARIA DE PROCESSOS.....	33
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	37
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA.....	37
<b>3.1.1 Medidas físicas do fruto</b> .....	37
<b>3.1.2 Massa específica</b> .....	38
<b>3.1.3 Análise imediata</b> .....	38
<b>3.1.4 Poder calorífico</b> .....	40
3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	41
3.3 ENSAIOS DE SECAGEM E COMBUSTÃO.....	41

3.3.1 Secagem da casca do cacau.....	41
3.3.2 Combustão da casca de cacau.....	43
3.4 SÍNTESE DE PROCESSOS.....	43
3.4.1 Subsistemas e árvores de estados .....	43
3.4.2 Regras heurísticas e fluxograma-base .....	45
3.4.3 Método evolutivo.....	46
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA.....	47
4.1.1 Caracterização morfológica .....	47
4.1.2 Caracterização física .....	48
4.1.3 Análise imediata e poder calorífico .....	49
4.2 ENSAIO DE SECAGEM .....	52
4.3 ENSAIO DE COMBUSTÃO .....	57
4.4 SUBSISTEMAS E ÁRVORES DE ESTADOS.....	59
4.4.1 Subsistema de corte/despolpa .....	60
4.4.2 Subsistema de redução de tamanho .....	60
4.4.3 Subsistema de secagem .....	62
4.4.4 Subsistema de compactação .....	64
4.4.5 Subsistema de reação de combustão .....	66
4.4.6 Subsistema de reação de gaseificação.....	68
4.4.7 Subsistema de reação de pirólise .....	70
4.4.8 Árvore de estados .....	72
4.5 REGRAS HEURÍSTICAS E FLUXOGRAMA-BASE .....	72
4.5.1 Subsistema de corte/despolpa .....	72
4.5.2 Subsistema de redução de tamanho .....	74
4.5.3 Subsistema de secagem .....	76
4.5.4 Subsistema de compactação .....	77
4.5.5 Subsistema de reação química.....	79
4.5.6 Fluxograma-base .....	81
4.6 MÉTODO EVOLUTIVO .....	81
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>85</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>88</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A procura por energia e a crescente preocupação com os impactos sociais, econômicos e ambientais associados ao uso desse recurso estimulam a busca por fontes alternativas. Segundo dados da Agência Internacional de Energia, divulgados em 2014, a demanda por energia no mundo aumentará 37% até 2040, se não houver alterações nas políticas governamentais. A instabilidade do petróleo e a necessidade urgente de redução da emissão de gases promotores do efeito estufa abrem espaço para o aproveitamento da biomassa.

Entre as biomassas com potencial de utilização, destaca-se a biomassa residual, disponível em grandes quantidades e a custo baixo. O aproveitamento energético dos resíduos pode resolver outro problema existente: a destinação inadequada dos resíduos gerados pela sociedade. Entretanto, a heterogeneidade da biomassa residual dificulta a seleção de técnicas de aproveitamento energético condizentes com o resíduo avaliado. Essa característica permite a adequação de múltiplas possibilidades de tecnologias químicas para o aproveitamento de um resíduo específico (BATISTA, 2014).

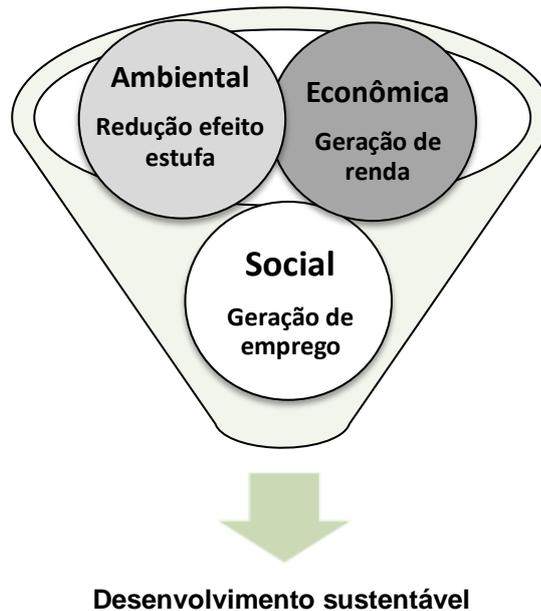
O desenvolvimento de tecnologias mais eficientes quanto à conversão energética a partir da biomassa é outro desafio a ser superado. Há a necessidade de processos mais eficientes para produção em pequena escala, imprescindíveis para o adequado aproveitamento de resíduos agrícolas, principalmente nas pequenas propriedades não ligadas à rede elétrica (CORTEZ *et al.*, 2008).

A cadeia do cacau é um grande exemplo de fonte geradora de resíduos em grande quantidade, os quais são subaproveitados. Novas tecnologias têm sido estimuladas para minimizar a geração de resíduos, a fim de que o cacau seja aproveitado integralmente (GONZALES *et al.*, 2013).

Entre os resíduos existentes, a casca do cacau é deixada normalmente nas plantações, após o corte dos frutos. Essa, por sua vez, deteriora-se com a ação das intempéries, o que exige gastos para o seu tratamento profilático com fungicidas (MENDES, 2000). Além disso, o potássio contido na casca pode ser liberado em

excesso para o solo, causando um desequilíbrio nutricional para a lavoura (GLOBO RURAL, 2015). Na Figura 1, observam-se os principais benefícios com o aproveitamento da casca do cacau para a produção de energia, viabilizando o desenvolvimento sustentável da cadeia do cacau. Na Tabela 1, são apresentadas as potencialidades de aproveitamento da casca do fruto que têm sido investigadas nos últimos anos.

Figura 1 – Desenvolvimento sustentável na cadeia do cacau



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

TABELA 1 – PESQUISAS SOBRE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DO CACAU

Referência	Resultado esperado	Foco
Pereira (2013)	Energia	Caracterização e análise de processos
Berbet (1972); Vriesmann <i>et al.</i> (2011)	Pectinas	Extração química
Chepote <i>et al.</i> (1990); Sodré <i>et al.</i> (2012)	Fertilizantes	Análise do potencial como fertilizantes
Agyeman; Oldham (1986); Syamsiro <i>et al.</i> (2011)	Energia	Análise de processos
Figueira <i>et al.</i> (1993)	Gomas / pigmento / nutrientes	Gera�o de novos produtos
Abiola (1991); Aregheore (2002); Donkoh <i>et al.</i> (1991)	Alimenta�o animal	Análise química e estudo de dietas
Martinez-Angel <i>et al.</i> (2015)	Energia	Análise do potencial energético

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A abordagem do presente estudo se destaca da maioria dos encontrados na literatura, por permitir a resolução de um problema de síntese de processos, que possui uma multiplicidade de soluções. Existem poucos trabalhos que possuem essa mesma abordagem, como o de Batista (2014).

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa realizar a síntese tecnológica e estrutural do processo de conversão energética a partir da biomassa do cacau. Assim, pretende-se obter o fluxograma base que maximize o rendimento energético via rotas termoquímicas, sob a ótica da Engenharia de Processos.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, propõe-se efetuar um estudo por meio das seguintes etapas:

- quantificar o volume de casca do cacau no beneficiamento do cacau;
- caracterizar fisicamente e quimicamente a casca do cacau;
- realizar ensaios de secagem e combustão do resíduo selecionado;
- selecionar as rotas tecnológicas para a obtenção de energia;
- elaborar os fluxogramas plausíveis e organizá-los na forma de árvores de estados;
- aplicar os métodos heurístico e evolutivo no processo de geração energética.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo descreve a importância da cadeia do cacau/chocolate e quantifica a geração de biomassa. Justifica-se a escolha das metodologias de análise para a caracterização da biomassa. São descritas as principais rotas tecnológicas de conversão energética e as técnicas de otimização da Engenharia de Processos.

### 2.1 A IMPORTÂNCIA DA CADEIA DO CACAU/CHOCOLATE

O cacauero é planta originária da região amazônica, de onde se obtém o fruto do cacau, e pertencente à família *Malvaceae*, espécie *Theobroma cacao* L. (ALVES, 2002). Essa denominação científica significa “manjar dos deuses”. Era conhecido por civilizações astecas e maias como *cacahuatl*, considerado sagrado, e possuía alto valor de troca, servindo inclusive para o pagamento de impostos. São reconhecidos três grupos botânicos do cacau: o Forasteiro Amazônico, o Crioulo e o Trinitário, sendo o primeiro o mais cultivado no Brasil (CEPLAC, 2012).

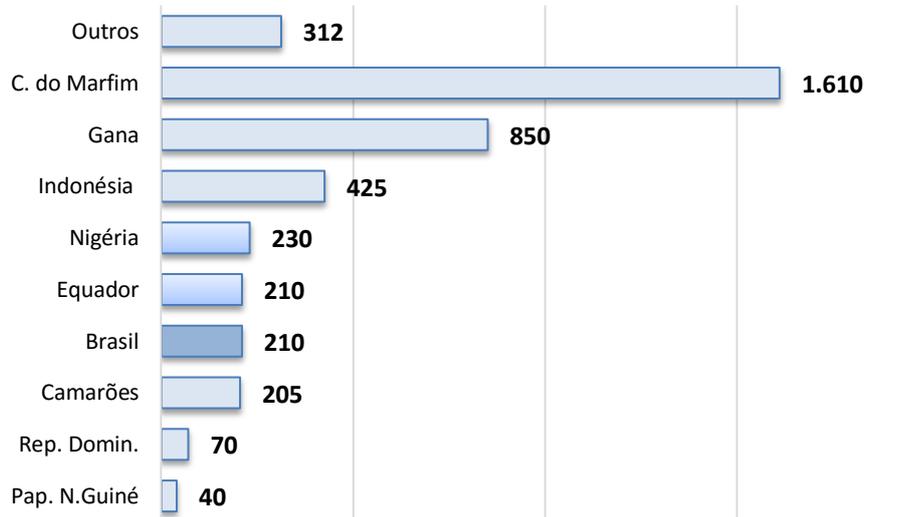
Em todo o mundo, o cacau é produzido em 8,2 milhões de hectares (MARQUES, 2015). A produção obtida na safra 2013-2014 foi atingiu 4,3 milhões de toneladas de amêndoas de cacau. Vale ressaltar que o preço médio do cacau na bolsa de Nova Iorque, em 2014, ultrapassou o índice de US\$ 3.000 por tonelada, indicando que o comércio mundial de amêndoas de cacau movimentou cifras de US\$12,9 bilhões (ICCO, 2016).

O mercado global de chocolates, maior demandante dos ingredientes de cacau, alcançou receitas de US\$ 117 bilhões em 2014, segundo a consultoria KPMG (2014). A base dessa cadeia é composta em sua maioria por agricultores familiares. Cerca de 50 mil cacauicultores produzem todo o cacau do Brasil, de acordo com os dados da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (Ceploc), divulgados no Anuário Brasileiro do Cacau 2012.

O maior produtor mundial de cacau atualmente é a Costa do Marfim, conforme se observa na Figura 2, enquanto o Brasil se encontra apenas na sexta posição. Já na

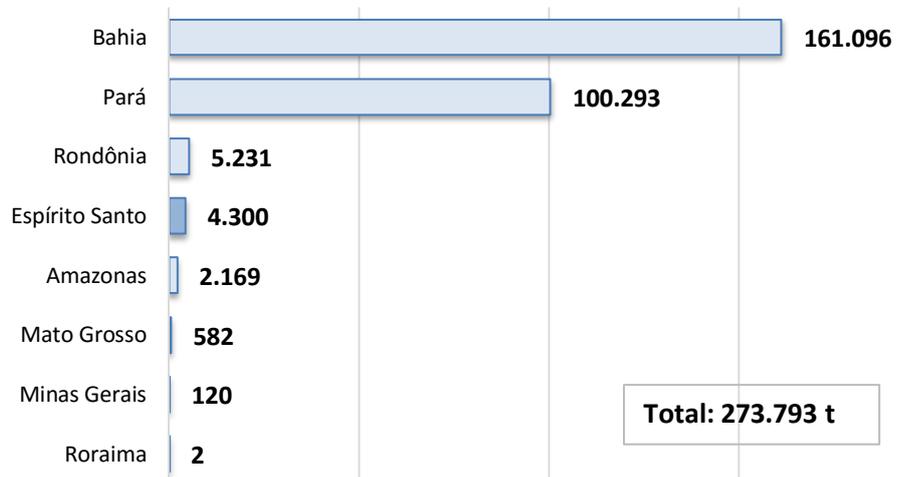
Figura 3, entre os estados produtores de cacau, em território nacional, a Bahia e o Pará se destacam.

Figura 2 – Produção mundial de cacau em 2014 (t)



Fonte: ICCO (2016).

Figura 3 – Produção nacional de cacau em 2014 (t)



Fonte: IBGE (2015).

Ainda de acordo com a Ceplac (2012) a cacauicultura, além de gerar empregos intensivamente e promover o aumento de renda, contribui para a preservação da biodiversidade local. Há a possibilidade do cultivo na forma de sistemas agroflorestais, ou seja, a cultura do cacau associada a outras espécies vegetais,

como a seringueira, essências florestais e fruteiras, diminuindo o risco de insucesso do empreendimento agrícola.

A descoberta de novos usos e novos mercados para o cacau brasileiro, além do chocolate, permite agregar maior valor à cadeia do cacau. No Quadro 1, estão reunidos os produtos obtidos do fruto do cacau (ANUÁRIO BRASILEIRO DO CACAU, 2012).

Quadro 1 – Rendimentos normais das operações de utilização de subprodutos de cacau com referência a uma produtividade anual de 750 Kg do produto seco por hectare

<b>Produto e subproduto</b>	<b>Rendimento por hectare</b>
Amêndoas secas	750 kg
Semente fresca	1875 kg
Mel de cacau	200 litros
Geleia	150kg
Destilado	25 litros
Polpa	300 a 400 litros
Suco congelado	300 a 400 litros
Néctar	600 a 800 litros
Geleado	200 a 300 litros

Fonte: Anuário Brasileiro do Cacau (2012).

A expansão dessa cadeia trouxe um impacto negativo, relativamente à maior quantidade gerada de resíduos da casca do cacau, sendo veículos potenciais de doenças para a lavoura, como a vassoura-de-bruxa e a podridão parda.

## 2.2 GERAÇÃO DE BIOMASSA NA CADEIA DO CACAU

Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal), a qual pode ser utilizada na produção de energia. As principais vantagens do uso da biomassa para a produção de energia são as seguintes: baixo custo produtivo e operacional; destinação adequada para os resíduos em questão; alta densidade energética; facilidades de armazenamento e transporte; e principalmente forma de aproveitamento bem menos poluente do que o uso de outras fontes de energia (ASPE, 2013).

Ao contrário dos combustíveis fósseis, a biomassa é uma energia limpa e renovável, pois não contribui para o acúmulo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera terrestre. Todo o CO<sub>2</sub> liberado durante o uso da biomassa é absorvido novamente no processo de fotossíntese para a formação dela (McKENDRY, 2002).

Nos países em desenvolvimento, a biomassa apresenta-se como uma importante fonte de energia, sobretudo em áreas rurais em que a utilização da mesma é, por vezes, a forma mais viável de produzir calor para a secagem de produtos agrícolas e/ou geração de eletricidade. O uso deste recurso renovável na geração de calor e eletricidade por meio de sistemas térmicos e elétricos cresce continuamente, desde a última década. Tal aplicação tem sido incentivada pelas questões ambientais, a fim de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e aumentar o uso de fontes renováveis.

A disponibilidade de resíduos provenientes do pré-processamento de produtos agrícolas, como café, arroz e cacau, entre outras culturas, é expressiva (MAGALHÃES, 2007). O fruto do cacau é composto principalmente da casca, polpa e sementes, conforme é mostrado na Figura 4. Os resultados deste estudo ratificaram que a casca é a maior fração do fruto (70%), sendo o restante (30%), referente às sementes e à polpa, as quais são transformadas em amêndoas e destinadas para a fabricação de chocolates. Assim uma fração de cerca de 70% do fruto não tem destino comercial efetivo.

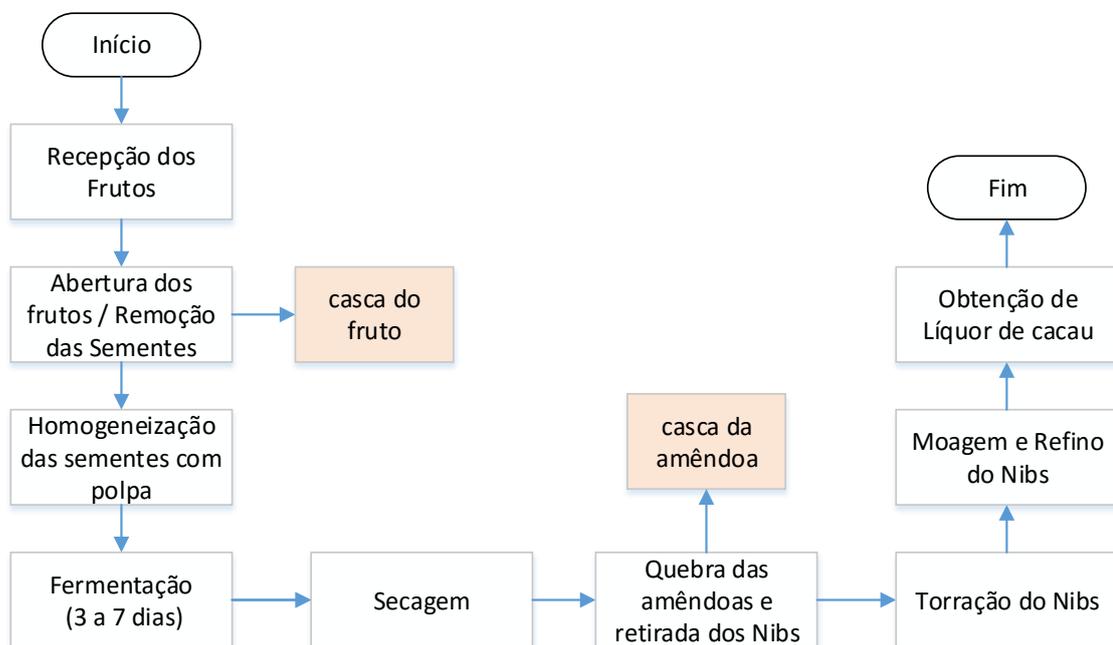
Figura 4 – Fruto do cacau (a) e fruto do cacau aberto (b)



Fonte: Arquivo do autor (2015).

As cascas do fruto do cacau são geradas no início do beneficiamento do cacau, conforme se ilustra na Figura 5. Geralmente as cascas permanecem nas áreas de cultivo na maioria dos produtores pelo mundo. Na etapa de torrefação, outro resíduo é gerado, a casca da amêndoa do cacau. Em processos posteriores, como na fabricação de chocolates, os resíduos estão associados à ineficiência de processo e atividades rotineiras. Por exemplo, amostras para avaliação sensorial, teste de vida de prateleira e controle de contraprovas.

Figura 5 – Etapas do beneficiamento do cacau



Fonte: Adaptado de Beckett (2009).

Além disso, há uma grande expectativa de que, nos próximos anos, ocorrerá um aumento na geração desses resíduos. Dados da Organização Internacional do Cacau (ICCO) apontam que a quantidade de moagem de amêndoas de cacau aumenta em torno de 5% ao ano. O crescimento mundial na produção de cacau, verificado nos últimos anos, é impulsionado pela demanda maior. Em relação à safra 2009/10, a demanda foi maior do que a produção (ANUÁRIO BRASILEIRO DO CACAU, 2012).

Outro fato que indica o futuro aumento da demanda por cacau e consequente aumento da geração de resíduos é o aumento do consumo de chocolate por parte

dos dois países mais populosos do mundo: Índia e China. Atualmente apresentam ainda consumo relativamente baixo, apenas de 0,7 kg a 1,2 kg por pessoa, respectivamente. Em 2016, 340 milhões de chineses se tornarão classe média, ou seja, consumidores potenciais de chocolate (KPMG, 2014).

No Brasil, há um projeto de lei em discussão no Senado Federal. Esse projeto estabelece um percentual mínimo de 35% de partes de cacau nos chocolates consumidos no país, seguindo um padrão internacional, e obriga a rotulagem do percentual de cacau contido nos produtos de chocolate (MERCADO DO CACAU, 2015).

### 2.3 PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA BIOMASSA

O conhecimento das características da biomassa é fundamental na seleção da tecnologia mais adequada na conversão energética. Basu (2010) afirma que o dimensionamento de sistemas de conversão energética a partir de biomassa depende da sua composição e do seu conteúdo energético, o qual é compreendido desde as propriedades físicas, a análise imediata e a composição elementar da biomassa.

Para o aproveitamento racional e adequado dos resíduos florestais, faz-se necessário o estudo de suas propriedades energéticas (PROTÁSIO, 2011). As características físicas e químicas dos resíduos podem influenciar no rendimento e na manutenção dos equipamentos que realizam os processos de combustão (GAVRILESCU, 2008).

A biomassa do cacau que deve ser gerado em maior quantidade nos próximos anos pode ser aproveitada, principalmente por suas propriedades energéticas, que serão discutidas a seguir.

#### 2.3.1 Massa específica

Rendeiro (2008) afirma que a massa específica de uma substância pode ser classificada em massa específica propriamente dita ou massa específica aparente. A

massa específica é a relação entre a massa contínua de biomassa pelo volume que essa massa ocupa, conforme mostra a equação 1. Por meio da massa específica, é possível obter a densidade dos materiais (VIEIRA, 2012).

$$\rho = \frac{M_{bio}}{V} \quad (1)$$

em que:

$\rho$  = massa específica da biomassa;

$M_{bio}$  = massa contínua da biomassa;

$V$  = volume ocupado pela biomassa.

Quando a matéria é contínua (não existem descontinuidades), ela representa massa específica aparente. Porém, para resíduos esse conceito não se aplica, pois existem vários pedaços do mesmo material ocupando o mesmo volume (RENDEIRO, 2008).

### 2.3.2 Análise imediata

Trata-se de quantificar os teores de umidade, materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo, presentes na biomassa. O teor de umidade, dado em porcentagem (%), é o fator que exerce maior influência sobre a queima de materiais combustíveis (SOUZA, 2010).

Além disso, variações no teor de umidade dificultam o controle da carbonização e da combustão. De modo geral, a queima de biomassa com teores de umidade acima de 100% a 120% base seca e 50% a 55% base úmida requer a suplementação com outros combustíveis, como gás natural ou óleo combustível. Carneiro *et al.* (2013) complementam que a combustão será incompleta e provavelmente haverá aumento na emissão de poluentes, dependendo da eficiência do queimador.

No entendimento de Vieira (2012), a biomassa com alto teor de voláteis apresenta maior facilidade queimar-se, porém o processo de combustão, em geral, pode ser prejudicado, já que existe dificuldade de controle.

De acordo com Gabardo *et al.* (2011), quanto maior a concentração de carbono no resíduo, maior o poder calorífico dos materiais. A quantidade de calor gerado pelo resíduo é estabelecida pelo percentual de carbono fixo; e, quanto maior esse valor, mais lentamente o combustível vai queimar-se (STURION *et al.*, 1988).

As cinzas são resíduos inorgânicos remanescentes da queima da matéria orgânica sem resíduo de carvão, as quais são consideradas como medida geral de qualidade e utilizadas como critério para definir potencialidade de um combustível para uma determinada aplicação. A cinza é constituída principalmente de grandes quantidades de K, Na, Ca e Mg, além de pequenas quantidades de Al, Fe, Cu, Mn e Zn (CHAVES *et al.*, 2004). Segundo Reed e Das (1988), quando o teor de cinzas supera 5% em biomassas, pode causar sérios prejuízos aos equipamentos usados para conversão energética.

Os valores de análise imediata de biomassas tradicionais estão disponibilizados na Tabela 2. É possível observar grandes variações entre diferentes autores.

TABELA 2 – ANÁLISE IMEDIATA DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS

Biomassa	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	Referência
Casca de arroz	10,61	64,24	23,84	11,90	Morais <i>et al.</i> (2011), Paula (2010)
	11,31	82,09	15,51	2,39	
Resíduos de soja	6,3	69,6	5,10	19,00	Werther <i>et al.</i> (2000), Paula (2010)
	12,23	89,90	3,29	6,81	
Bagaço de cana	8,20	83,10	4,20	12,70	Katyal; Thambimuthu, Valix (2003), Paula (2010)
	46,16	98,59	0,94	0,47	
Sabugo de milho	16,93	98,19	0,7	1,11	Paula (2010), Demirbas (2004)
	12,1	86,5	1,0	12,5	

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Outra questão que deve ser observada é o ponto de fusão das cinzas, pois processos de conversão com temperaturas maiores do amolecimento podem propiciar a aglomeração de material particulado denominado “sínter” ou “slagging” (a

fusão da cinza), que geralmente reduzem a eficiência da troca de calor no equipamento (RENDEIRO, 2008).

### 2.3.3 Poder calorífico

O poder calorífico é a indicação direta da quantidade de energia química contida na biomassa ou no combustível. Segundo Menezes (2013), ele divide-se em poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI).

Além disso, de acordo com Magalhães (2007) e Erol *et al.* (2010), o poder calorífico é a característica mais importante para o projeto e controle da conversão termoquímica da biomassa. Segundo Cortez *et al.* (2008), a principal diferença entre poder calorífico superior e poder calorífico inferior é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível e a água de formação obtida da oxidação do hidrogênio do combustível.

O poder calorífico de uma biomassa pode ser obtido por meio experimental (bomba calorimétrica) ou de correlações de dados obtidos em análise elementar ou imediata da biomassa. Na Tabela 3, podem ser observados o PCS e o PCI das principais biomassas estudadas na literatura.

TABELA 3 – PODER CALORÍFICO DE BIOMASSAS TRADICIONAIS

Biomassa	Poder calorífico superior (MJ/kg)	Poder calorífico inferior (MJ/kg)	Referência
Casca de arroz	15,96	14,42	Paula (2010), Jenkins and Ebeling (1985)
	16,14	15,27	
Bagaço de cana	17,90	16,14	Paula (2010), Jenkins and Ebeling (1985)
	17,33	16,24	
Caule de soja	18,86	17,15	Paula (2010)
Vagem da soja	16,87	15,18	Paula (2010)
Sabugo de milho	19,32	17,59	Paula (2010), Jenkins and Ebeling (1985)
	18,77	17,56	

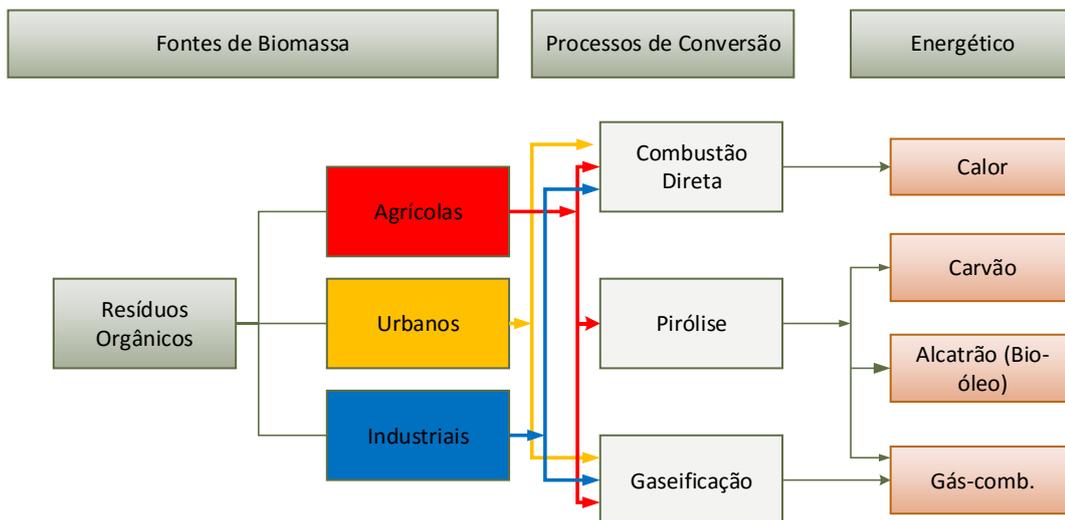
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Com base na pesquisa à literatura, foram encontradas diferenças nos valores de poder calorífico, que podem ser atribuídas às diferenças entre os materiais analisados e as metodologias utilizadas.

## 2.4 ROTAS TERMOQUÍMICAS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA

Existem diversas rotas tecnológicas para o aproveitamento da energia contida na biomassa, abrangendo processos termoquímicos e bioquímicos. As rotas termoquímicas fornecem diversos produtos químicos de valor agregado em um tempo menor de reação e são menos seletivas (BRIDGWATER; PEACOCKE, 2000). Na Figura 6, apresentam-se as rotas termoquímicas mais promissoras em termos de conversão energética da biomassa. A seleção da rota mais adequada ocorre conforme o tipo de produto energético desejado e as características da biomassa. Por exemplo, os resíduos agrícolas, como a casca do cacau, podem ser convertidos em calor por combustão direta; em carvão, alcatrão e gás por pirólise; ou em gás-combustível por meio da gaseificação.

Figura 6 – Principais rotas termoquímicas para a produção de energia



Fonte: Adaptado de Aspe (2013).

Todos esses processos têm por princípios básicos a decomposição térmica dos resíduos orgânicos de forma primária e a combustão dos produtos resultantes da decomposição. De acordo com Dinkelbach (2000), a principal diferença está

associada à quantidade de oxigênio que é fornecida ao processo, tendo por referência o valor do coeficiente estequiométrico na reação.

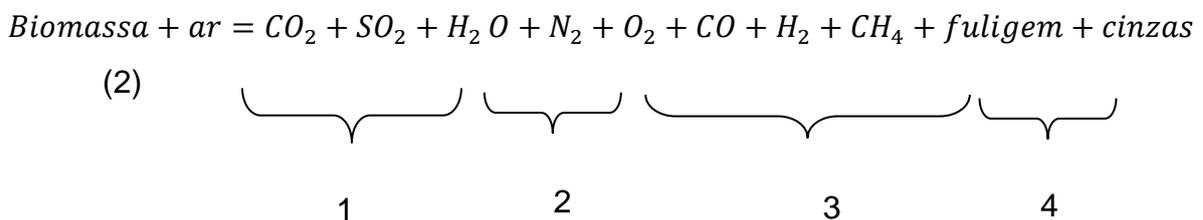
### 2.4.1 Combustão direta

Combustão direta é a transformação da energia química dos combustíveis em calor, por meio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. Ela geralmente ocorre em fogões (cozimento de alimentos), fornos (metalurgia) e caldeiras (geração de vapor) (ANEEL, 2005). É uma reação química de oxidação entre um combustível (biomassa, por exemplo) e um comburente (geralmente o oxigênio), de forma autossustentável, com liberação de luz, calor, fumaça e gases (CARNEIRO *et al.*, 2013).

De acordo com Carneiro *et al.* (2013), é necessário haver disponibilidade dos elementos fundamentais à reação: o combustível, o comburente e a temperatura de ignição. Nesse sentido, a oxidação ocorrerá em função da temperatura de ignição, da turbulência do comburente e do tempo disponível para combustão, chamados de três Ts (temperatura, turbulência e tempo).

Atualmente a combustão da biomassa é a principal rota tecnológica para a produção de energia, responsável por mais de 90% da contribuição global. O projeto de qualquer sistema de combustão de biomassa é determinado principalmente pelas características do combustível que será utilizado, legislação ambiente local, custos e desempenho do equipamento disponível ou necessário (LOO; KOPPEJAN, 2008).

Os combustíveis sólidos, como os resíduos agrícolas, são formados de carbono (C), hidrogênio (H<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>), enxofre (S), água (H<sub>2</sub>O) e cinzas (NOGUEIRA; LORA, 2003). Segundo Menezes (2013), a reação de combustão de um combustível com ar pode ser apresentada pela equação 2:



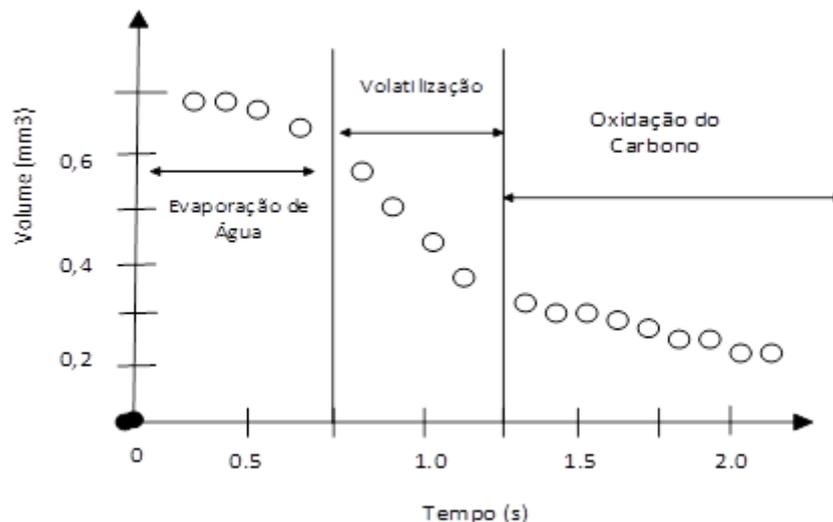
em que:

- 1 – produtos da oxidação completa:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . O conteúdo de enxofre da biomassa é sempre baixo, sendo seu valor desprezível;
- 2 – ar em excesso ( $\text{N}_2 + \text{O}_2$ ) e eventualmente a umidade do combustível e do ar;
- 3 – produtos gasosos ( $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$ ) e sólidos (fuligem) de combustão incompleta;
- 4 – fração mineral não combustível da biomassa (cinzas).

Loo e Koppejan (2008) afirmam que o processo de combustão de biomassa envolve aspectos físico-químicos de alta complexidade. A combustão se divide em vários processos: secagem, pirólise, gaseificação e combustão. Segundo Macedo (2006), durante esses processos, ocorrem três etapas: (1) evaporação da água; (2) queima dos compostos voláteis; e (3) queima do carbono fixo.

Na Figura 7, estão representadas as etapas do processo de combustão, considerando apenas uma partícula. Entretanto, para partículas maiores, ou dependendo do abastecimento do combustor (contínuo ou em batelada), pode haver sobreposição (BAXTER, 2000).

Figura 7 – Comportamento de uma partícula durante o processo de combustão



Fonte: Adaptado de Baxter (2000).

### 2.4.2 Gaseificação

Basu (2010) também afirma que gaseificação é a conversão de materiais sólidos ou líquidos em um combustível de natureza gasosa ou em compostos químicos que podem ser queimados para a liberação de energia ou usados para a produção de outros compostos químicos de valor agregado. Quimicamente, o processo de gaseificação fornece o hidrogênio aos materiais e retira o elemento carbono, gerando produtos de natureza gasosa com alto teor de hidrogênio em relação ao carbono. O processo típico da gaseificação da biomassa inclui as seguintes etapas: secagem, pirólise, combustão parcial de alguns gases, vapores, carvão e finalmente gaseificação dos produtos decompostos.

Para a ocorrência do processo, são supridas quantidades restritas de oxigênio, na forma de oxigênio puro ou simplesmente ar atmosférico, dependendo do poder energético desejado no produto gasoso obtido. Além das variações quanto ao agente gaseificador, há possibilidade de o processo ser pressurizado (até 6 MPa). As principais tecnologias utilizadas são leito fixo e leito fluidizado. Dependendo das condições locais de processamento da biomassa, o processo de gaseificação pode ser mais vantajoso que a queima direta da biomassa. Por exemplo, para geração de eletricidade em pequena escala, não há a necessidade de um ciclo a vapor (CORTEZ *et al.*, 2008).

### 2.4.3 Pirólise

É a decomposição termoquímica de biomassa em vários produtos úteis, na ausência total de agentes oxidantes ou em suprimento limitado, de forma a não permitir que ocorra a gaseificação. Durante o processo, moléculas complexas de hidrocarbonetos são quebradas em moléculas mais simples de natureza sólida (carvão), líquida (bio-óleo) e gasosa. A quantidade relativa desses produtos é dependente de vários fatores, como a configuração do pirolisador, das características físico-químicas da biomassa, do nível de aquecimento, da temperatura final (temperatura de pirólise) e do tempo de residência na zona da reação (BASU, 2010).

Segundo Stolz (2010), na pirólise os parâmetros de reação variam conforme os rendimentos dos produtos desejados e a eficácia do reator utilizado. As principais condições operacionais podem ser observadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Variações do processo de pirólise

<b>Processo de pirólise</b>	<b>Tempo de residência</b>	<b>Taxa de aquecimento</b>	<b>Temperatura máxima</b>	<b>Produtos</b>
Carbonização	Horas – dias	Muito pequena	400	Carvão vegetal
Convencional	5 min a 30 min	Pequena	600	Bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0,5 s a 5 s	Intermediária	650	Bio-óleo
Flash pirólise	< 1s	Alta	< 650	Bio-óleo / gás
Ultrarrápida	< 0,5 s	Muito alta	10000	Produtos químicos e gás combustível
Vácuo	2 s – 30 s	Intermediária	400	Bio-óleo

Fonte: Adaptado de Bridgwater e Bridge (1991).

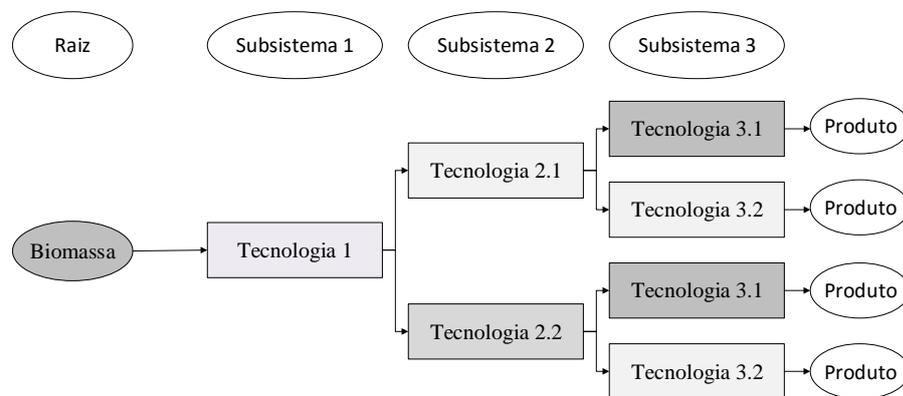
Vale salientar que a utilização direta da biomassa agrícola para conversão energética é dificultada devido às suas características físicas, como forma, tamanhos irregulares e densidade energética baixa. São necessários alguns processos de beneficiamento para melhorar as características originais dos materiais de biomassa quanto aos aspectos térmico e físico. Entre esses processos, destacam-se a redução de tamanho, secagem e compactação (SUGATHAPALA, 2013).

## 2.5 ENGENHARIA DE PROCESSOS

A principal contribuição da Engenharia de Processos é possibilitar a resolução de projetos de processos integrados, que resultam em problemas complexos, com multiplicidade de soluções. A Engenharia de Processos convoca conhecimentos de diversas áreas, como Engenharia de Sistemas e Inteligência Artificial, no intuito de facilitar a resolução desses projetos complexos. Preconiza-se a decomposição do projeto (problema) em subproblemas – tecnológico (definição das rotas tecnológicas), otimização estrutural (síntese de processos) e otimização paramétrica

(análise de processos) – para facilitar a busca da solução próxima à ótima. De forma a organizar a resolução, representam-se todas as alternativas possíveis do processo por meio de estruturas chamadas árvores de estados. Na Figura 8, observa-se que é um fluxograma em que a raiz da árvore representa o insumo para o processo; por exemplo, a biomassa no processo de geração de energia e os ramos representam as configurações de processo ou sequência das tecnologias necessárias para alcançar o objetivo, conforme apresentado na Figura 8 (PERLINGEIRO, 2005).

Figura 8 – Representação geral de árvore de estados



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Desse modo, a síntese de processos consiste em gerar todas as configurações plausíveis do processo estudado que podem solucionar o projeto, enquanto na etapa de análise de processos se determina aquela configuração de processo que apresenta o melhor desempenho (PERLINGEIRO, 2005; ZAKON; PESSOA, 2000).

A síntese de processos busca propor um novo e melhor caminho para o dimensionamento de um processo, considerando a experiência dos técnicos envolvidos e aprendizados com projetos anteriores. Esse conhecimento acumulado é resumido em instruções práticas e sequenciais, criadas para orientar as decisões técnicas do projeto, chamadas de regras heurísticas. É uma etapa que exige criatividade e trabalho em equipe (ARRUDA, 1999). Conforme Carvalho (1995), a aplicabilidade dos métodos heurísticos é resultado da simplicidade e da alta capacidade de selecionar as melhores sequências de tecnologias diante da multiplicidade de configurações geradas.

De acordo com Perlingeiro (2005), a grande vantagem do uso das regras heurísticas é a rapidez na determinação da solução final. Porém, vale salientar que não é necessariamente obtida a solução ótima para o projeto. É um bom ponto de partida para a busca de uma solução melhor. A identificação da solução ótima (heurística) é definida por uma função-objetivo ou um critério como lucro ou custo de cada etapa. Outros critérios também podem ser avaliados simultaneamente, como segurança ou eficiência energética.

Nesse sentido, a resolução do problema é alcançada por uma busca orientada pelas regras heurísticas ao longo da árvore de estados elaborada. Há outras maneiras para a determinação da solução ótima, como a busca exaustiva. Nesse caso, após a geração de todas as combinações possíveis do processo estudado, percorrem-se todos os ramos da árvore sucessivamente. Esse tipo de busca conduz sempre à solução ótima, mas, por motivos econômicos, somente se aplica quando o número de fluxogramas de processo gerados é reduzido (PERLINGEIRO, 2005; WINSTON, 1984).

Para Warne *et al.* (2004), essa metodologia exige grande carga computacional, condicionando sua aplicação em situações de baixa ordem. Com base na solução heurística, pode-se aplicar um método de análise da vizinhança estrutural ou método evolutivo, por meio do qual a busca ocorre mediante as regras evolutivas. Primeiramente, identificam-se todos os fluxogramas vizinhos ao fluxograma-base, gerado pelo método heurístico; em seguida, define-se o fluxograma de menor custo como o novo fluxograma-base. Esse processo é repetido até que não se encontrem mais fluxogramas de menor custo (PERLINGEIRO, 2005).

Atualmente há uma escassez de estudos e pesquisas focados no aproveitamento energético dos resíduos da cadeia do cacau na literatura. Os recentes progressos no campo da bioenergia ainda estão concentrados principalmente no beneficiamento da cana-de-açúcar e das espécies florestais. Não existem tecnologias desenvolvidas conforme a especificidade dos resíduos gerados e da dinâmica da cadeia do cacau/chocolate.

Sob a ótica da Engenharia de Processos, pretende-se apresentar um estudo sistematizado que contribua para o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento energético da biomassa do cacau, agregue valor à cultura e reduza os impactos ambientais.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi baseada em duas etapas: primeiramente é descrita a metodologia para obtenção das características físico-químicas da casca do cacau e o comportamento da biomassa em ensaios de secagem e combustão; as características da biomassa foram submetidas à análise estatística e paramétrica; em seguida, a metodologia da Síntese de Processos é abordada no intuito de gerar todos os fluxogramas de processo possíveis e determinar aquele que exhibe o melhor desempenho.

Todos os experimentos foram realizados nos laboratórios do Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo/Ceunes, *campus* de São Mateus.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Na caracterização da biomassa, foram utilizadas cascas de cacau de quatro cultivares diferentes: TSH 1188, Comum, Catongo e CCN 51. As amostras foram fornecidas pela Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (Ceplac), colhidas na cidade de Linhares-ES. Foram coletadas quatro amostras de dez frutos de cada cultivar, em diferentes períodos do ano (outubro, novembro e dezembro/2015 e janeiro/2016). As análises foram realizadas em triplicata.

##### 3.1.1 Medidas físicas do fruto

Foram determinados o comprimento, diâmetro, espessura e massa da casca e do fruto frescos do cacau para cada cultivar. As medidas de comprimento, diâmetro e espessura foram obtidas por meio de um paquímetro, da marca Mitutoyo, de precisão de 0,05mm. Obteve-se a massa numa balança semianalítica, da marca Toledo, de precisão de 0,01g. Todas as medições foram realizadas em triplicata.

### 3.1.2 Massa específica

A massa específica foi obtida pelo método da picnometria. Inicialmente, determinou-se a massa do picnômetro vazio. Depois, a amostra foi inserida no picnômetro, já calibrado com água destilada, sendo adicionado cerca de um quarto de seu volume. Desse modo, a massa foi determinada utilizando uma balança analítica. Em seguida, o picnômetro foi preenchido com um fluido inerte e sua massa também foi registrada. O procedimento descrito foi realizado em triplicata para permitir maior confiabilidade nos valores obtidos. A massa específica foi então calculada pela equação 3:

$$\rho = \frac{m}{V_{pic} - V_f} \quad (3)$$

em que:

$m$  = massa da amostra (base úmida);

$V_{pic}$  = volume do picnômetro;

$V_f$  = volume de fluido adicionado, que pode ser obtido com o auxílio de sua massa específica.

### 3.1.3 Análise imediata

- Teor de umidade

Para a determinação da análise imediata da biomassa *in natura*, seguiu-se a metodologia das Normas ABNT/NBR 8112 (Carvão Vegetal – Análise Imediata). Obteve-se a massa úmida de cada resíduo numa balança analítica de precisão. As amostras foram introduzidas em estufa, de marca Lucadema, a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  por 24 horas, ou até que a massa ficasse constante, obtendo-se a massa seca. O teor de umidade foi obtido pela diferença entre os pesos da amostra, antes e logo depois de ser submetida à secagem, conforme mostra a equação 4:

$$\%X_{BU} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (4)$$

em que:

$\%X_{BU}$  = teor de umidade da biomassa, em porcentagem (%), em base úmida;

$m_1$  = massa inicial da biomassa, em gramas (g);

$m_2$  = massa final da biomassa, em gramas (g).

- Teor de voláteis

Após a determinação do teor de umidade, a mesma matéria de biomassa foi introduzida em uma mufla, de marca Spencer, a  $850 \pm 10^\circ\text{C}$  por sete minutos, conforme a metodologia das Normas ABNT/NBR 8112. Depois disso, a amostra foi então colocada em um dessecador para resfriamento e posterior pesagem.

O teor de voláteis foi determinado pela equação 5:

$$\%T_v = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \cdot 100 \quad (5)$$

em que:

$\%T_v$  = teor de voláteis da biomassa, em base seca, em porcentagem (%);

$m_2$  = massa final da análise de umidade, em gramas (g);

$m_3$  = massa final após a mufla, em gramas (g).

- Teor de cinzas

A amostra (biomassa), já sem umidade e voláteis, foi colocada em mufla, de marca Spencer, a uma temperatura de  $710 \pm 10^\circ\text{C}$  por uma hora (meia hora com a porta meio aberta e meia hora com a porta da mufla fechada), conforme a metodologia NBR 8112. O teor de cinzas foi calculado utilizando a equação 6 a seguir:

$$\%T_c = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \cdot 100 \quad (6)$$

em que:

$\%T_c$  = teor de cinzas da biomassa, em base seca, em porcentagem (%);

$m_3$  = massa da amostra antes da análise de cinzas, em gramas (g);

$m_4$  = massa final após a análise de cinzas, em gramas (g).

- Teor de carbono fixo

Esta foi a última análise a ser realizada, conforme a metodologia NBR 8112, obtida por diferença por meio da equação, a qual se baseia na equação 7:

$$\%T_{cf} = 100 - (T_v + T_c) \quad (7)$$

em que:

$\%T_{cf}$  = teor de carbono fixo, em base seca, em porcentagem (%);

$T_v$  = teor de voláteis, em base seca, em porcentagem (%);

$T_c$  = teor de cinzas, em base seca, em porcentagem (%).

### 3.1.4 Poder calorífico

O poder calorífico foi determinado com base em correlações que utilizaram os resultados obtidos na análise imediata. Conforme Parikh, Channiwala e Ghosal (2005), o poder calorífico superior (PCS), obtido pela equação 8, apresentou erro médio absoluto baixo comparado ao de outras correlações da literatura.

$$PCS = 0,3536 \times (CF) + 0,1559 \times (MV) - 0,0078 \times (\%CI) \quad (8)$$

Para o cálculo do poder calorífico inferior (PCI), foi utilizada a equação 9, conforme o trabalho de Martinez-Ángel *et al.* (2015).

$$PCI = PCS - 212,2 H - 0,8 (O + N) \quad (9)$$

em que:

PCS, poder calorífico superior, em base seca (MJ/kg);

PCI, poder calorífico inferior, em base seca (MJ/kg);

CF, carbono fixo (%), MV, teor de voláteis (%), CI, teor de cinzas (%), em base seca.

H, teor de hidrogênio (%), O, teor de oxigênio (%), N, teor de nitrogênio (%), em base seca.

### 3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

O experimento obedeceu ao delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, sendo os tratamentos constituídos pelas cultivares Comum, Catongo, TSH 1188 e CCN 51. Os resultados foram submetidos à análise de variância e às médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5%, fazendo-se uso do sistema de análise estatística ASSISTAT, versão 7.7 beta 2014 (SILVA; AZEVEDO, 2009).

### 3.3 ENSAIOS DE SECAGEM E COMBUSTÃO

Foi selecionada a cultivar CCN51 para a realização dos ensaios de secagem e combustão, devido a sua maior capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais e maior plasticidade fenotípica.

#### 3.3.1 Secagem da casca do cacau

Para a realização da secagem, foram empregados dois tipos de equipamentos: uma estufa com controle de temperatura do ar de secagem e um secador convectivo, tipo túnel.

Para os experimentos realizados em estufa pré-aquecida, as amostras foram preparadas com dimensão cúbica de 1 cm e com massa aproximada de 4g. Em seguida, as amostras foram dispostas em camada fina em pratos de alumínio e expostas às temperaturas de 60°C, 70°C e 80°C. Durante todo o processo de secagem, a cada 10 minutos, foi medida a massa das amostras em balança analítica.

Nos experimentos realizados no secador tipo túnel, os cortes das amostras foram realizados da mesma maneira que na estufa, porém cada amostra possuía 50 gramas. Logo após, as amostras foram dispostas em uma cesta de alumínio e levadas ao túnel, onde estava acoplado uma balança analítica programada para

medida de massa automática de 4 em 4 minutos. As amostras foram submetidas a três níveis de temperatura (60°C, 70°C e 80°C), e para cada temperatura variou-se a velocidade em 1,5 m/s, 2,0 m/s e 2,5 m/s.

Para determinar a massa seca, ao final de cada experimento as amostras foram encaminhadas para uma estufa pré-aquecida a 105°C, durante um período de 24 horas. Os dados da cinética de secagem foram interpretados mediante os modelos da Tabela 4, que geraram os parâmetros coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão ( $\sigma$ ) e teste-t (*student*) e o gráfico dos resíduos, por meio do *software Origin®* 8.0 versão demonstração.

TABELA 4 – EQUAÇÕES DE CINÉTICA DE SECAGEM UTILIZADAS PARA MATERIAIS ORGÂNICOS

Referência	Equação	
Lewis (1921)	$MR = \exp(-K \cdot t)$ , sendo $K = a \cdot \exp\left(\frac{-b}{T}\right)$	(10)
Brooker et al. (1974)	$MR = c \cdot \exp(-K \cdot t)$ , sendo $K = a \cdot \exp\left(\frac{-b}{T}\right)$	(11)
Henderson and Henderson (1968)	$MR = c \cdot \left[ \exp(-K \cdot t) + \frac{1}{9} \cdot \exp(-9 \cdot K \cdot t) \right]$ , sendo $K = a \cdot \exp\left(\frac{-b}{T}\right)$	(12)
Overhults et al. (1973)	$MR = \exp[(-K \cdot t)^n]$ , sendo $K = A \cdot \exp\left(a + \frac{b}{T}\right)$	(13)

Fonte: Barrozo *et al.* (2004).

Em que: T a temperatura do ar (K); t é o tempo de secagem (s); e a, b, c e n adimensionais a serem estimados; K é a constante de secagem; MR é o adimensional de umidade pela equação 14.

$$MR = (M - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq}) \quad (14)$$

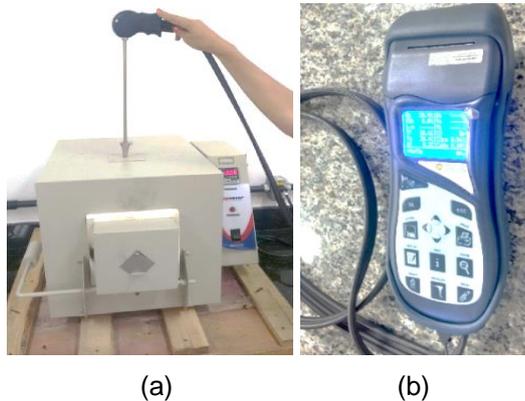
em que: M é a umidade em base seca em um dado instante,  $M_0$  e  $M_{eq}$  são, respectivamente, umidade inicial em base seca e umidade de equilíbrio.

Para verificar o grau de ajuste dos modelos, consideraram-se a magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o desvio padrão e o teste-t e o gráfico dos resíduos, por meio do *software Origin® 8.0* versão demonstração.

### 3.3.2 Combustão da casca de cacau

A medição dos gases da combustão foi realizada durante a queima numa mufla, da marca Spencer, com variação da temperatura de 100°C a 800°C. Os gases foram medidos por meio de um analisador contínuo, de marca Ecil, com funcionamento baseado numa célula eletroquímica. A sonda do analisador foi posicionada no orifício localizado acima da mufla, conforme apresentado na Figura 9. Os dados obtidos foram plotados em gráficos, por meio do *software Origin® 8.0* versão demonstração.

Figura 9 – Processos de combustão – a) forno mufla, b) analisador de gases portátil



Fonte: Arquivo do autor (2015).

## 3.4 SÍNTESE DE PROCESSOS

### 3.4.1 Subsistemas e árvores de estados

Entre as diversas rotas tecnológicas possíveis (termoquímica e bioquímica), para o aproveitamento energético da biomassa do cacau, foram selecionadas para estudo as de combustão direta, pirólise e gaseificação.

Com a finalidade de fazer uma análise focada nas operações de pré-tratamento da biomassa e de conversão energética, este trabalho não contemplou as questões ligadas à logística e transporte da biomassa.

Para facilitar a resolução do problema proposto, o processo de produção de energia foi decomposto em subproblemas ou subsistemas e representado em árvores de estados. De acordo com a pesquisa bibliográfica, cada subsistema ou etapa do processo foi composto pelas principais tecnologias existentes no mercado.

*Corte/despolpa (C)*: foram considerados o corte manual (CMN) dos frutos e o corte mecânico (CMC).

*Redução de tamanho (RT)*: foram propostas três possibilidades, britador primário (BP), britador secundário (BS), moinhos (MH) e a não utilização de redutores de tamanho (SR). Entre os britadores primários, foram propostas cinco possibilidades: facas (BPF), discos (BPD), martelo (BPM), barra (BPB) e rolos (BPR).

*Secagem (S)*: neste subsistema foram analisadas oito possíveis alternativas: secador tambor rotativo direto (SRD), secador de tambor rotativo indireto (SRI), de esteira (SE), fluidizado (SF), disco (SD), pneumático (SP) e secagem solar (SSO). Também foi avaliada a possibilidade de não execução desta etapa (NS).

*Compactação (C)*: neste subsistema foram consideradas as tecnologias de peletização e briquetagem, além da possibilidade de não ocorrer compactação (SC). Entre as tecnologias de briquetagem, foram propostas as de pistão mecânico (CBM), pistão hidráulico (CBH) e extrusão por rosca (CBE); enquanto para a peletização, foram propostas as tecnologias de anel vertical (PAV) e plana (PP).

*Reação de combustão (RC)*: foram avaliados dois possíveis reatores de combustão: leito fixo (LF) e leito fluidizado (LFD). Na tecnologia de leito fixo, foram analisados tipo grelha (LFG) e sistema *stockers* (LFS). Na tecnologia de leito fluidizado, foram propostos os reatores de leito fluidizado circulante (LFDC) e leito fluidizado borbulhante (LFDB).

*Reação de gaseificação (RG):* neste subsistema, foram avaliados três tipos de reatores de gaseificação: leito fixo (GF), leito fluidizado (GFD) e leito de arraste (LA). Para o leito fixo, foram propostas duas possibilidades: cocorrente (GFC) e contracorrente (GFCT).

*Reação de pirólise (RP):* para esta etapa, foram avaliados quatro possíveis reatores de pirólise: leito fixo (PLF), leito fluidizado (PLFD), reator cone rotativo (PCR) e reator a vácuo (PV).

No intuito de otimizar o consumo energético das rotas tecnológicas, foi considerada a opção de possuir integração energética (IE) ou não integração energética (SIE) para as etapas de secagem e reação química (pirólise, combustão e gaseificação).

### **3.4.2 Regras heurísticas e fluxograma-base**

Foi utilizado o método heurístico para a busca do fluxograma-base em cada rota tecnológica estudada. Desta forma, foram reunidas regras heurísticas para cada subsistema, com base na análise de livros, teses, dissertações e artigos publicados referentes ao processamento energético de outras biomassas mais tradicionais. As regras elaboradas estão relacionadas às características físico-químicas e energéticas da biomassa e às restrições técnicas dos equipamentos que compõem os ramos estruturais das árvores de estado. Desse modo, foram listadas as vantagens e desvantagens de cada tecnologia disponível, correspondente a cada subsistema das rotas tecnológicas estudadas.

Em seguida, por meio das regras heurísticas elaboradas, buscou-se analisar cada ramo da árvore de estado, formado pelas principais tecnologias e equipamentos disponíveis, a fim de chegar ao fluxograma-base, ou seja, a sequência de equipamentos que maximiza o projeto quanto à função-objetivo. Para este estudo, buscou-se maximizar o desempenho dos reatores de combustão direta, pirólise e gaseificação.

### **3.4.3 Método evolutivo**

Com base na identificação do fluxograma-base pelo método heurístico para cada rota tecnológica, aplicou-se o método evolutivo. De forma a aprimorar a solução heurística, foram determinados os fluxogramas vizinhos ao fluxograma-base (ou fluxograma heurístico). Nesse sentido, foram identificados os fluxogramas de processo que diferem de apenas um equipamento de todas as etapas do processo. Em seguida, entre os fluxogramas vizinhos, foi definido como fluxograma-base o de menor custo, de acordo com a literatura, e assim sucessivamente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

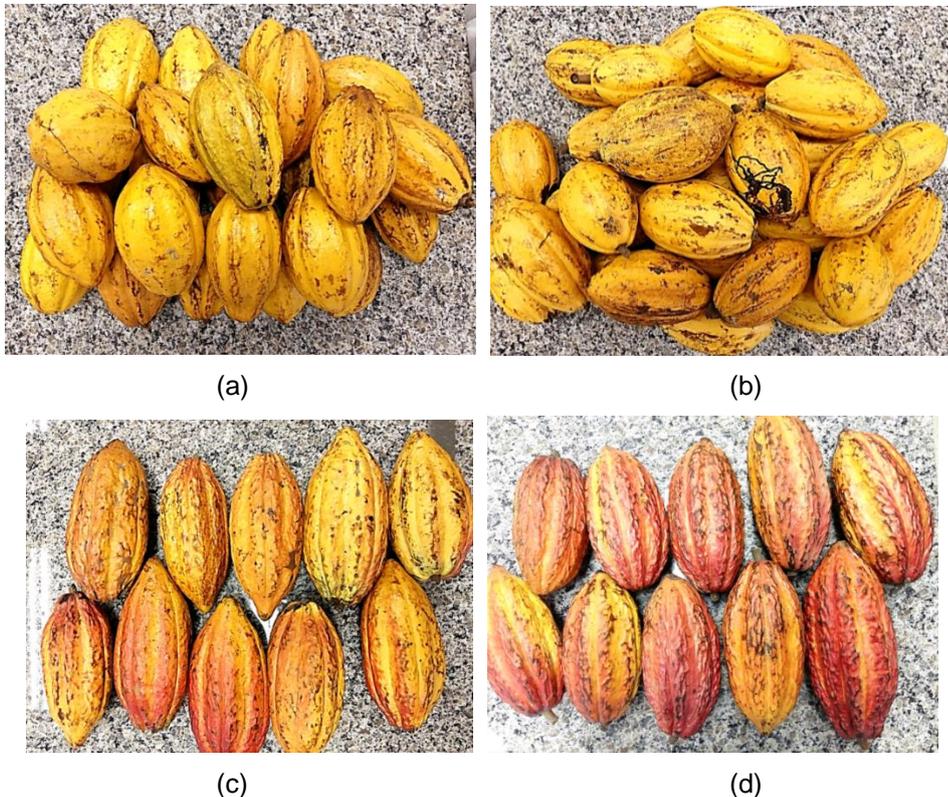
Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos seguindo-se a metodologia proposta para o trabalho. Primeiramente são expostos e discutidos os resultados dos experimentos, da caracterização, secagem e combustão da biomassa; em seguida, é apresentada a síntese de processo referente à produção de energia com base na biomassa do cacau.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

#### 4.1.1 Caracterização morfológica

Os frutos de cacau, das cultivares Catongo e Comum, possuem menor tamanho e apresentam cor amarela em toda a casca, conforme é observado na Figura 10. Já os frutos das cultivares TSH 1188 e CCN 51 apresentam comprimento maior e tons amarelos e vermelhos na casca.

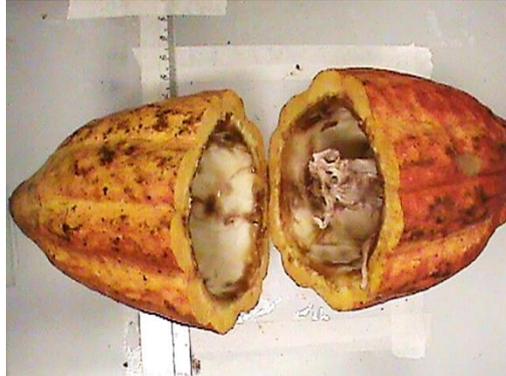
Figura 10 – Tipos de cultivares de cacau: a) Catongo, b) Comum, c) TSH1188, d) CCN51



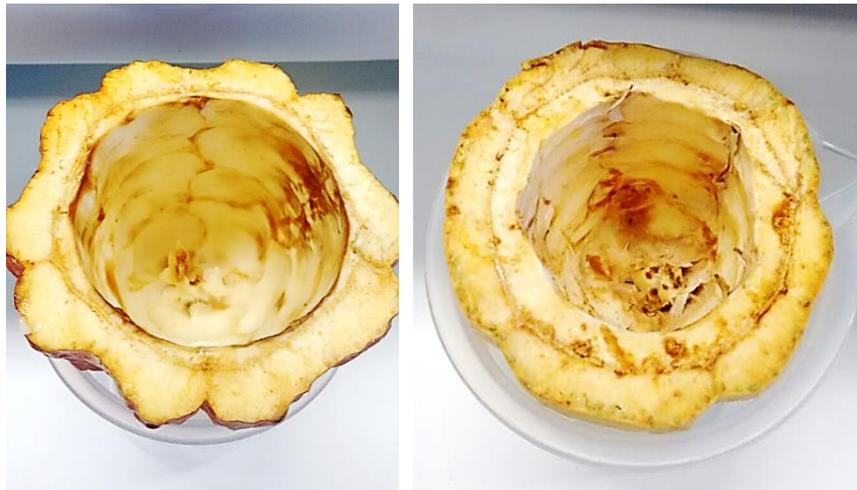
Fonte: Arquivo do autor (2015).

Na Figura 11, são apresentadas as amêndoas do cacau e a variação da espessura da casca de duas cultivares. A cultivar CCN51 possui sulcos mais profundos.

Figura 11 – a) Casca do cacau. Espessura das cultivares de cacau: b) CCN51, c) Catongo



(a)



(b)

(c)

Fonte: Arquivo do autor (2015).

#### 4.1.2 Caracterização física

Na Tabela 5, estão apresentados os resultados das características físicas da casca de quatro cultivares de cacau. Com base na análise estatística, confirma-se que há diferenças significativas quanto às dimensões físicas do fruto do cacau, entre as cultivares. O comportamento irregular das características físicas do fruto do cacau e a alta variabilidade aumentam o desafio do desenvolvimento de tecnologias de redução de tamanho com alta produtividade e sem danificação das amêndoas do fruto.

Nesse sentido, quanto ao diâmetro da casca do fruto, a cultivar Catongo apresenta o menor valor, enquanto as cultivares TSH1188 e CCN51 apresentam maior valor. Quanto à massa do fruto e da casca, a cultivar TSH1188 se distingue das demais com o maior valor.

Pode-se destacar, ainda, o fato de que a cultivar CCN51 apresenta quociente inferior ao das demais cultivares, considerando a massa da casca em relação à massa do fruto. Isso se explica por essa cultivar apresentar maior rendimento de amêndoa + polpa por fruto em relação aos demais. Esse é fato muito importante na escolha da cultivar para o cultivo.

TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO FRUTO DO CACAU POR CULTIVAR

Variáveis	Cultivares			
	Catongo	Comum	TSH1188	CCN51
Diâmetro (cm)	8,6 ± 1,4 b	8,4 ± 0,5 a	9,5 ± 0,2 a	8,8 ± 0,3 a
Comprimento (cm)	15,4 ± 2,7 c	16,3 ± 1,4 b	22,5 ± 0,6 a	20,5 ± 1,9 a
Espessura (cm)	1,5 ± 0,2 a	1,1 ± 0,1 b	1,6 ± 0,2 a	1,4 ± 0,1 a
Massa do fruto (g)	406,4 ± 62,5 c	411,9 ± 49,2 c	818,6 ± 47,4 a	632,0 ± 90,3 b
Massa da casca (g)	303,8 ± 61,6 c	305,0 ± 43,0 c	593,9 ± 27,6 a	426,4 ± 82,4 b
Massa da casca / Massa do fruto (%)	74 ± 0,04 a	75 ± 0,01 a	73 ± 0,02 a	67 ± 0,04 b
Massa (amêndoa+polpa) / Massa fruto (%)	26±0,04 b	26±0,01 b	27±0,02 b	33±0,04 a
Massa específica (g/mL)	0,92 ± 0,11 a	0,93 ± 0,03 a	0,96 ± 0,03 a	0,90 ± 0,06 a

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Nota: Médias seguidas de mesma letra minúscula, na mesma linha, não diferem entre si estatisticamente, pelo teste Scott Knott 5% de probabilidade.

#### 4.1.3 Análise imediata e poder calorífico

Na Tabela 6, são apresentados os resultados obtidos para a análise imediata e poder calorífico. De acordo com a análise estatística realizada, não foi encontrada diferença significativa entre as cultivares de cacau.

TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA CASCA DO CACAU POR CULTIVAR

Variáveis	Cultivares			
	Catongo	Comum	TSH1188	CCN51
Voláteis (% <sub>bs</sub> )	78,13 ± 1,07 a	75,56 ± 4,35 a	78,05 ± 1,57 a	76,43 ± 1,14 a
Cinzas (% <sub>bs</sub> )	8,51 ± 1,44 a	8,87 ± 2,75 a	8,36 ± 1,21 a	9,63 ± 2,59 a
Carbono Fixo (% <sub>bs</sub> )	13,35 ± 0,49 a	15,69 ± 2,83 a	13,70 ± 1,94 a	14,00 ± 1,43 a
Umidade (%)	82,46 ± 0,56 a	82,17 ± 1,08 a	83,20 ± 1,54 a	81,94 ± 1,14 a
PCS (MJ/kg)	16,84 ± 0,32 a	17,26 ± 0,66 a	16,95 ± 0,54 a	16,79 ± 0,69 a
PCI (MJ/kg)	15,65 ± 0,32 a	16,07 ± 0,66 a	15,76 ± 0,54 a	15,60 ± 0,69 a

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Nota: Médias seguidas de mesma letra minúscula, na mesma linha, não diferem entre si estatisticamente, pelo teste Scott Knott 5% de probabilidade.

A casca do cacau apresentou similaridade em relação a outros resíduos agrícolas usados para a produção energética, principalmente quanto ao teor de materiais voláteis. Quanto maior esse índice, maior será a facilidade de ignição da biomassa e maior será o seu poder calorífico (KLAUTAU, 2008; CIESLINSKI, 2014).

Por outro lado, quanto ao teor de cinzas, o valor encontrado foi inferior apenas ao da casca de arroz (JENKINS *et al.*, 1998). Essa característica da biomassa poderá causar corrosões e incrustações nos equipamentos, reduzindo o rendimento da conversão energética. De acordo com Cieslinski (2014), as cinzas em maior concentração podem diminuir o poder calorífico e afetar a transferência de calor, aumentando a perda de energia.

O teor de carbono fixo foi obtido de forma indireta, pela diferença entre os valores de teor de voláteis e teor de cinzas. Quanto maior for esse valor, maior será o poder calorífico do combustível e, conseqüentemente, mais lentamente ocorrerá a queima do combustível (STURION *et al.*, 1998).

Na Tabela 3, nota-se que os valores de poder calorífico superior e poder calorífico inferior, estimados com base nos resultados da análise imediata, estão condizentes com os valores de outras biomassas lignocelulósicas, como resíduos da soja e cana-de-açúcar, apresentadas na revisão da literatura. Não foi encontrada diferença

estatística entre as diferentes cultivares analisadas, quanto ao poder calorífico e à umidade da casca do cacau.

Deve-se destacar o alto conteúdo de água da biomassa do cacau comparado ao de outras biomassas energéticas, como a cana-de-açúcar, casca de milho e resíduos de soja. No intuito de aumentar a eficiência das tecnologias termoquímicas, será necessário o uso da secagem como etapa prévia no processo de conversão energética. Mediante os resultados da análise imediata, foram estimados o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior, também apresentados na Tabela 6.

Os valores obtidos na análise imediata e na estimativa do poder calorífico superior (PCS) estão também condizentes com os de outros trabalhos da literatura envolvendo a biomassa do cacau, apresentados na Tabela 7.

TABELA 7 – ANÁLISE IMEDIATA E PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA DO CACAU DA LITERATURA

<b>Voláteis (%, bs)</b>	<b>Carbono fixo (%, bs)</b>	<b>Cinzas (%, bs)</b>	<b>PCS (MJ/kg)</b>	<b>Referência</b>
76,4	11,6	12,0	17,39	Titiloye <i>et al.</i> (2013)
66,6	22,9	10,5	15,89	Van der Drift <i>et al.</i> (2001)
68,0	23,8	8,2	19,04	Kitani and Hall (1989)
73,7	12	14,3	16,67	Martinez-Ángel <i>et al.</i> (2015)

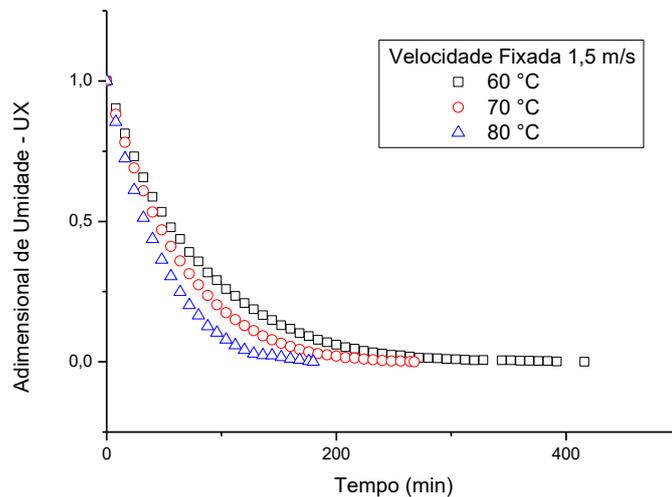
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Com base nos resultados obtidos, comparando-os aos encontrados na literatura, deve-se considerar que a constituição química da biomassa depende de vários fatores, como constituição do solo, clima, época da colheita, forma de plantio, variedade, entre outros (BRUM, 2007). Podem ocorrer também diferenças na forma de amostrar o material e na própria metodologia de realização da análise. Ademais, conforme salienta Paula (2010), trata-se de resíduo, material que é resultado de um processo e pode ter sido contaminado ou armazenado em locais inadequados.

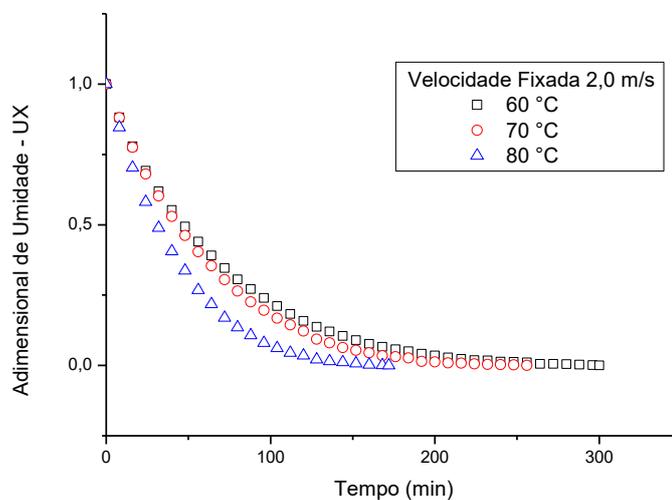
## 4.2 ENSAIO DE SECAGEM

As curvas de secagem foram representadas na forma de adimensional de umidade (MR) em função do tempo de secagem (min). A umidade de equilíbrio foi determinada por meio da massa constante da biomassa. Nas Figuras 12, 13 e 14, observa-se o comportamento cinético da casca do cacau nas condições experimentais estabelecidas nos secadores túnel de vento e estufa, respectivamente.

Figura 12 – Adimensional de umidade em função do tempo, para os níveis de temperatura do ar 60°C, 70°C e 80°C, no túnel de vento – (a) Velocidade do ar 1,5 m/s; (b) Velocidade do ar 2,0 m/s; (c) Velocidade do ar 2,5 m/s



(a)  $v = 1,5$  m/s



(b)  $v = 2,0$  m/s

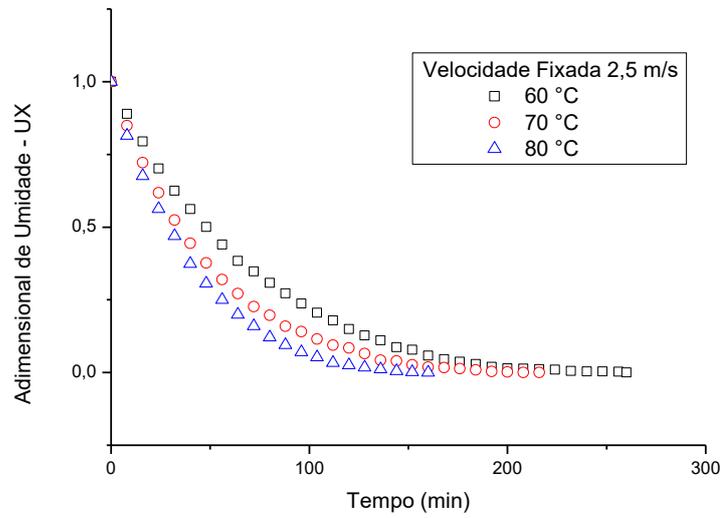
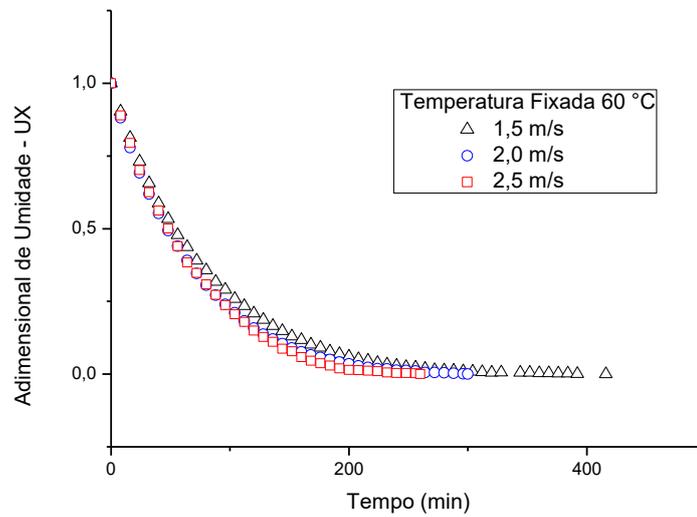
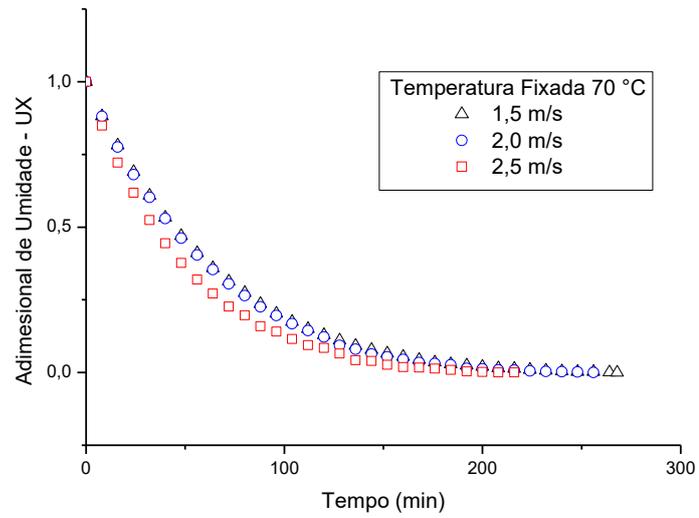
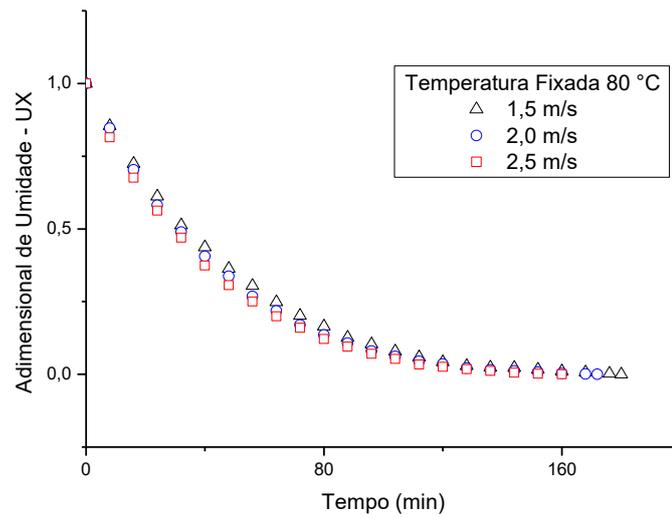
(c)  $v = 2,5 \text{ m/s}$ 

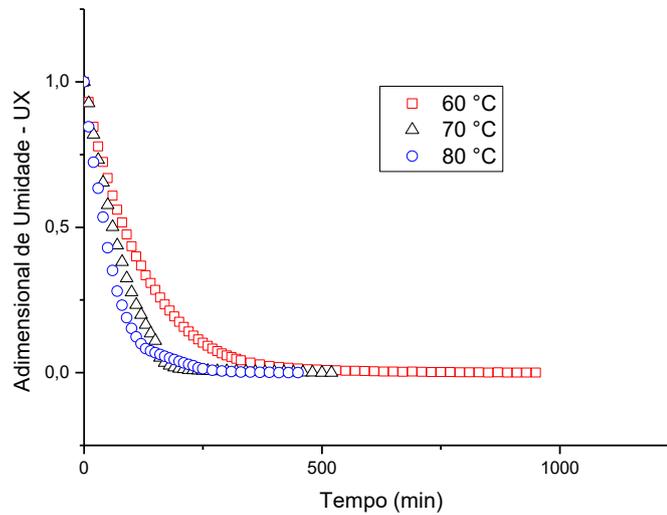
Figura 13 – Adimensional de umidade em função do tempo, para os níveis de velocidade do ar 1,5, 2,0 e 2,5 m/s, no túnel de vento (a) Temperatura do ar 60 °C; (b) Temperatura do ar 70°C; (c) Temperatura do ar 80°C

(a)  $T = 60^\circ\text{C}$

(b)  $T = 70^\circ\text{C}$ (c)  $T = 80^\circ\text{C}$ 

Fonte: Arquivo do autor (2015).

Figura 14 – Adimensional de umidade em função do tempo, na estufa – temperatura do ar 60°C, 70°C e 80°C



Fonte: Arquivo do autor (2015).

Nos experimentos de secagem realizados, percebe-se maior influência da temperatura em relação à velocidade durante a secagem, por meio dos gráficos apresentados. Nota-se também que o teor de umidade da superfície do sólido é bem próximo ao valor de equilíbrio, já que a secagem é controlada pela difusão, que aumenta com a elevação da temperatura. Logo, a secagem ocorre mais rápido a temperaturas mais altas. Pela observação dos modelos cinéticos aplicados, têm-se resultados satisfatórios do parâmetro  $R^2$  tanto na secagem de convecção natural (estufa) quanto na de convecção forçada (túnel de vento), e o processo realizado na estufa é mais lento. Os parâmetros estimados, o desvio padrão, o ajuste de modelo ( $R^2$ ) e teste-t, são apresentados na Tabela 8. O teste-t é definido como *parâmetro/desvio-padrão*.

TABELA 8 – PARÂMETROS ESTIMADOS DO PROCESSO DE SECAGEM NO TÚNEL DE VENTO

Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)	Modelo	Parâmetro		$\sigma$	Teste t	R <sup>2</sup>		
1,5	60	Lewis	k	0,03126	6,765E-05	196,019	0,9991		
		Brooker	k	0,01337	8,904E-05	150,151	0,9991		
		Henderson	c	1,00847	0,00448	225,1049	0,9969		
			k	0,01270	1,657E-04	76,71785			
		Overhults	c	0,95387	0,00812	117,4717	0,9994		
			k	0,01315	5,5584E-5	236,5788			
			n	1,03501	0,00681	151,9823			
		1,5	70	Lewis	k	0,01654	1,665E-04	99,34053	0,9975
				Brooker	k	0,01689	2,045E-04	82,58159	0,9979
Henderson	c			1,02201	0,00814	125,5541	0,9940		
	k			0,01601	3,414E-04	46,89706			
Overhults	c			0,96281	0,01318	73,05083	0,9993		
	k			0,01625	8,3492E-5	194,6294			
	n			1,08456	0,00911	119,0515			
1,5	80			Lewis	k	0,02212	3,674E-04	60,20751	0,9956
				Brooker	k	0,02272	4,465E-04	50,88637	0,9962
		Henderson	c	1,02873	0,01298	79,25501	0,9908		
			k	0,02140	6,77E-04	31,59973			
		Overhults	c	0,96313	0,01902	50,63775	0,9989		
			k	0,02159	1,7390E-4	124,1518			
			n	1,11919	0,01526	73,3414			

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

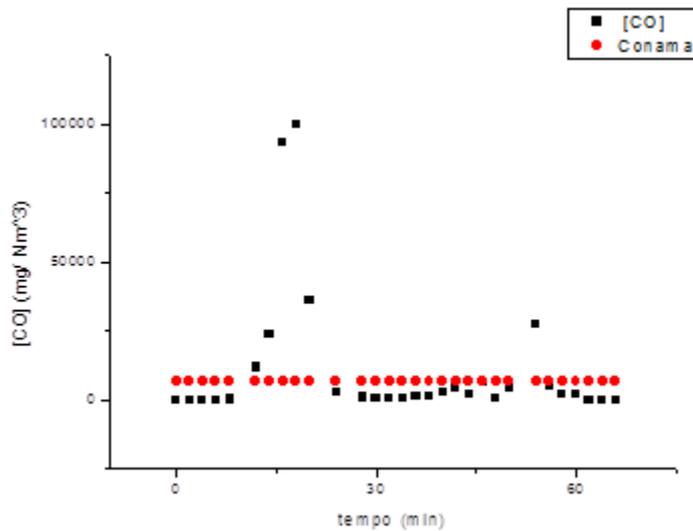
Os valores obtidos nas outras condições propostas seguiram os mesmos resultados da tabela acima, na qual o modelo de Overhults apresentou maior valor de R<sup>2</sup>, maior valor do teste t e menor desvio-padrão.

Diante dos resultados, devem-se privilegiar, na seleção das tecnologias de secagem, equipamentos com controle de temperatura e funcionamento baseado na variação da temperatura de aquecimento, e não na velocidade do ar de aquecimento, evitando consumo energético desnecessário.

### 4.3 ENSAIO DE COMBUSTÃO

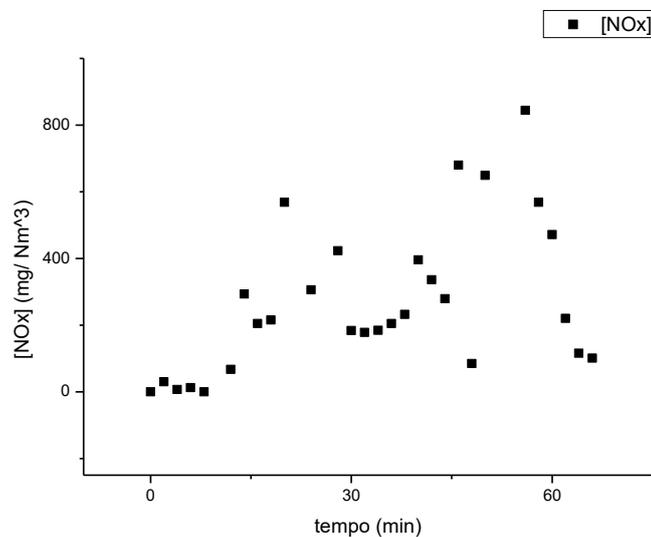
Na Figura 15, observa-se que as concentrações dos gases de monóxido de carbono (CO) produzidos atingiram picos acima dos limites permitidos pela legislação nacional, no início do processo de combustão. Enquanto isso, nas Figuras 16 e 17, estão apresentadas as concentrações dos gases óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), respectivamente, obtidas durante o processo de combustão da casca do cacau.

Figura 15 – Concentração de CO durante a combustão da casca do cacau

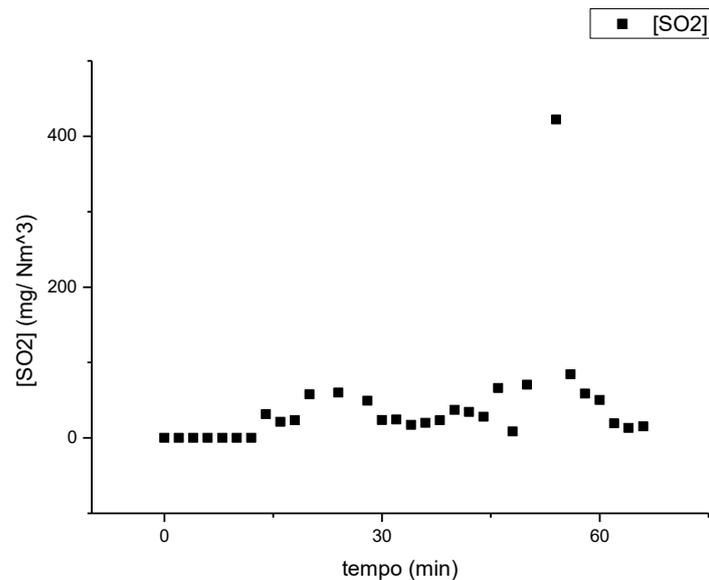


Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Figura 16 – Concentração de NO<sub>x</sub> durante a combustão da casca do cacau



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Figura 17 – Concentração de SO<sub>2</sub> no processo de combustão da casca do cacau

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

As emissões de CO durante a combustão da casca do cacau ultrapassaram o limite de emissão, estabelecido pelo Conama mediante a Resolução n.º 382/06, de 6.500 mg/Nm<sup>3</sup>, corrigidos para 8% de oxigênio, para um queimador com potência térmica de até 0,05 MW, considerando os limites estabelecidos para a biomassa da cana-de-açúcar. Quanto aos gases do tipo NO<sub>x</sub>, não há um limite estabelecido de emissão para queimadores de baixa potência, enquanto para os gases do tipo SO<sub>2</sub> não há um padrão nacional estabelecido para biomassa.

A emissão de poluentes é resultado de uma combustão incompleta, de acordo com Carvalho Júnior e Lacava (2003). No intuito de reduzir as emissões de CO, deve-se fornecer determinado excesso de ar e intensificar o índice de mistura entre combustível e ar. Além disso, como o processo de oxidação do CO é um processo relativamente lento, é preciso que o projeto da câmara de combustão e suas condições operacionais sejam combinados de tal forma que o tempo de residência seja suficiente para a oxidação completa do CO.

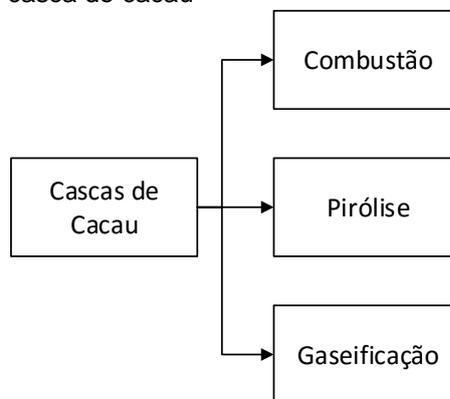
Quanto aos gases NO<sub>x</sub>, o uso de combustíveis com teores de nitrogênio, a alta temperatura de operação das câmaras de combustão, o projeto dos queimadores e

da câmara de combustão são fatores determinantes, ao passo que as emissões de  $\text{SO}_2$  dependem apenas da composição do combustível.

#### 4.4 SUBSISTEMAS E ÁRVORES DE ESTADOS

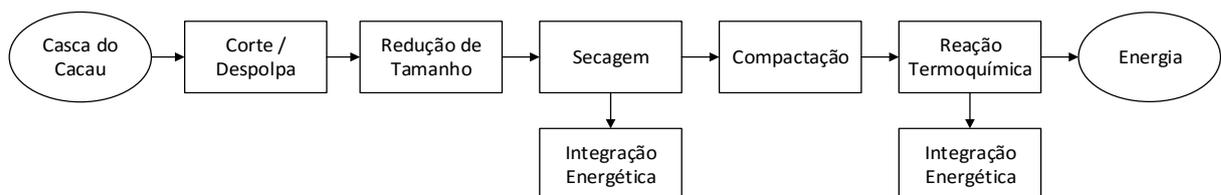
O problema de síntese de produção de energia a partir da casca do cacau foi estruturado no nível tecnológico em três rotas termoquímicas: combustão direta, gaseificação e pirólise. Cada rota tecnológica selecionada foi dividida em subsistemas, conforme representado Figuras 18 e 19. Para cada subsistema ou etapa do processo, foi construído um fluxograma que representa as alternativas de execução, e os subsistemas de secagem e do reator termoquímico podem possuir integração energética. Para as etapas anteriores à reação termoquímica, também foi considerada a possibilidade de não utilização da tecnologia de integração energética.

Figura 18 – Rotas termoquímicas de aproveitamento energético da casca do cacau



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Figura 19 – Subsistemas das rotas de aproveitamento energético da casca do cacau

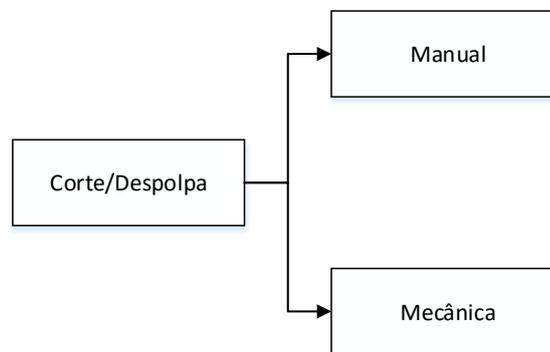


Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 4.4.1 Subsistema de corte/despolpa

De acordo com a revisão bibliográfica, a primeira etapa no beneficiamento do cacau é o corte/despolpa do fruto do cacau. O principal objetivo dessa operação é a separação das amêndoas e polpa da casca do fruto. Enquanto as amêndoas e polpa serão destinadas à fermentação, a casca será destinada ao processo de conversão energética. Atualmente essa operação pode ser realizada de duas formas: 1) manual ou 2) mecanizada, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Alternativas de corte/despolpa do fruto do cacau



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 4.4.2 Subsistema de redução de tamanho

A próxima etapa necessária no processo de conversão energética da casca do cacau é a redução do tamanho da biomassa. Quanto aos materiais sólidos, essa etapa é utilizada com o objetivo de aumentar a relação superfície/volume, para otimizar a eficiência de operações posteriores, como extração, aquecimento, resfriamento, desidratação, homogeneização.

A trituração ou moagem é considerada muito ineficaz do ponto de vista energético. Apenas 5% de toda energia elétrica gerada é usada na redução do tamanho. Com base na energia necessária para a criação das novas superfícies, o processo em escala industrial tem eficiência menor que 1% (RHODES, 2008). A maior parte se dirige para a deformação desse sólido e a criação de novas linhas de sensibilidade que pode produzir a ruptura sucessiva dos fragmentos. O resto da energia se dissipa em forma de calor.

Segundo Womac *et al.* (2005), a redução de tamanho da biomassa oferece as seguintes vantagens:

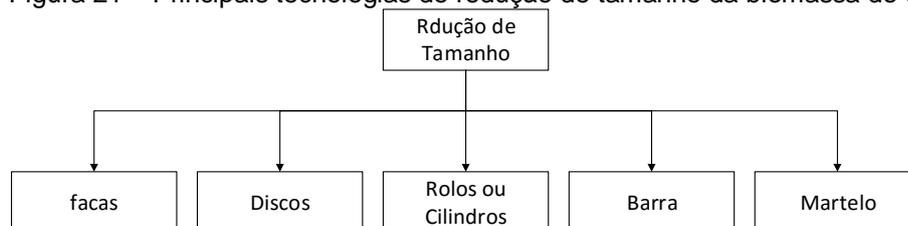
- Facilita o manuseio e a secagem do material.
- Inicia a densificação da biomassa.
- Facilita o processo de densificação (briquetagem e peletização).
- Reduz os custos de transporte.
- Facilita a classificação do material por meio da separação por tamanho.
- Aumenta a área de superfície de reação das partículas de biomassa, quando há exposição a processos bioquímicos.

Os materiais sólidos podem ser quebrados de várias formas, mas somente quatro tipos de forças mecânicas são aplicados pelos equipamentos de redução de tamanho: (1) compressão, (2) impacto, (3) atrito ou cisalhamento, e (4) corte (McCABE *et al.*, 1993).

Uma grande variedade de equipamentos é oferecida pelo mercado, inclusive com uma diversidade muito grande de modelos construtivos e conceitos funcionais. Esse fato aumenta o desafio na seleção do equipamento mais adequado. As máquinas que efetuam a fragmentação grosseira são chamadas de britadores, e as que dão produtos mais finos são chamadas de moinhos.

Os principais tipos de tecnologias de redução de tamanho usadas no processamento de biomassa são moinhos rotativos: moinho de rolos, moinho de facas, moinho de discos e moinhos de martelos, conforme Womac *et al.* (2007); Bitra *et al.* (2008); Miu *et al.* (2006). Na Figura 21, podem-se evidenciar as alternativas possíveis consideradas no presente trabalho.

Figura 21 – Principais tecnologias de redução de tamanho da biomassa do cacau



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 4.4.3 Subsistema de secagem

A redução de umidade da biomassa é fundamental para as etapas seguintes nesse processo de conversão energética. A secagem reduz o volume de material, facilitando seu manuseio. Oliveira (2015) afirma que, para a biomassa ser compactada adequadamente, a matéria-prima deve ser sujeita a secagem para diminuir o teor de umidade até um valor de 12% (m/m). Durante a peletização, a alta umidade pode causar formação de excesso de vapor, que pode provocar desintegração dos péletes e reduzir a eficiência do processo de combustão. Quanto às etapas de conversão energética, a secagem aumenta a eficiência e o rendimento energético.

Segundo Sugathapala (2013), dentro dos reatores de conversão energética, assim que ocorre o aquecimento da biomassa, a umidade é evaporada, levando consigo grande quantidade de energia. Mas, se o teor de umidade for excessivamente baixo, a superfície e os ligantes dos péletes poderão carbonizar prejudicando a transferência de calor (OLIVEIRA, 2015).

Devido à grande variedade de tipos de produtos que devem ser secos por diferentes métodos, existe também uma variedade de projeto de secadores. Os critérios usados para classificar os secadores são muitos e, segundo Strumillo e Kudra (1986), podem ser assim divididos, conforme se ilustra no Quadro 3.

Quadro 3 – Critérios de classificação de secadores

<b>Critério</b>	<b>Tipo</b>
Modo de operação	Contínuo ou em batelada
Método de suprir o calor	Convecção, condução, radiação, infravermelho, sublimação e combinação dos métodos
Tipo do fluxo do material (condição hidrodinâmica)	Regime estacionário, transiente ou disperso
Tipo do agente de secagem	Ar quente, vapor superaquecido, líquidos aquecidos e gases rejeitados
Direção do fluxo de calor e sólidos	Cocorrente, contracorrente e fluxo cruzado
Método do fluxo do agente de secagem	Livre ou forçado

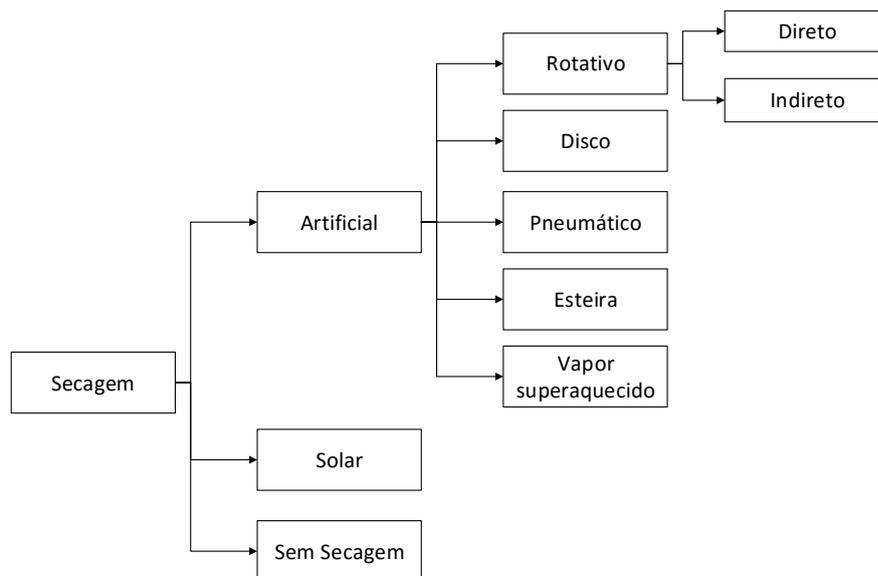
Método do carregamento da umidade	Com agente externo de secagem, com gás inerte, com absorção química da umidade
Tempo de residência	Pequeno (< 1 min) Médio (1-60 min) Longo (> 60 min)
Pressão no secador	Atmosférico ou vácuo
Número de estágios	Único ou múltiplo

Fonte: Adaptado de Strumillo e Kudra (1986).

A forma mais tradicional de realização de secagem da biomassa é a sua exposição ao sol. As cascas do cacau podem ser dispostas até em barcaças, já existentes em fazendas de cacau e usadas para secagem das amêndoas. Como alternativa à secagem solar, emprega-se a secagem artificial.

Entre as diversas opções, Amos (1998) afirma que as principais tecnologias disponíveis direcionadas para a secagem artificial da biomassa são tambor rotativo, esteira transportadora, disco, secador pneumático ou secador que utiliza vapor superaquecido, conforme se pode observar na Figura 22, representada na sequência.

Figura 222 – Alternativas de secagem da biomassa do cacau



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 4.4.4 Subsistema de compactação

Compactação ou densificação é o processo de aumento de densidade de resíduos agrícolas melhorando as propriedades desses materiais, principalmente para o transporte e para aplicações energéticas. Podem-se listar as principais vantagens e desvantagens do processo de compactação, como se pode observar no Quadro 4, que serão importantes na escolha entre compactar e não compactar a biomassa (SUGATHAPALA, 2013).

Quadro 4 – Principais vantagens e desvantagens do processo de compactação

Vantagens	Desvantagens
O processo aumenta o poder calorífico do material por unidade de volume.	Investimento financeiro relativamente alto.
Facilita o transporte e o manuseio da biomassa.	Alguns briquetes apresentam características indesejáveis quanto à combustão.
Facilita o transporte e o manuseio da biomassa.	Tendência de baixa resistência de alguns briquetes a exposição à água e a ambientes com alta umidade.
Há uniformidade no tamanho e qualidade.	
O processo ajuda a reduzir o desmatamento por gerar um combustível substituto a lenha.	
O processo reduz/elimina a possibilidade de combustão espontânea nos estoques.	
Reduz a biodegradação dos resíduos.	

Fonte: Adaptado de Sugathapala (2013).

Os briquetes e péletes apresentam algumas diferenças quanto à densidade e dimensão, conforme se pode observar na Tabela 9. Além disso, ambos têm poder calorífico superior (PCS) na faixa de 16,92 MJ/kg a 17,64 MJ/kg e umidade entre 7% e 12%. A quantidade de cinzas depende da matéria-prima (DIAS *et al.*, 2012).

TABELA 9 – PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE BRIQUETES E PÉLETES

<b>Características</b>	<b>Briquetes</b>	<b>Péletes</b>
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	500 a 1200	500 a 750
Diâmetro (mm)	60	6 a 16
Comprimento (mm)	25 a 300	25 a 30

Fonte: Adaptado de Dias *et al.* (2012).

O tamanho das partículas é muito importante para determinar a qualidade e durabilidade de um pélete ou briquete. Quanto menor for o tamanho de partícula, menor será a porosidade do produto final e, portanto, maior será a sua densidade. A baixa porosidade do pélete ou briquete pode dificultar a queima devido ao menor número de espaços livres para difusão de calor. Sendo assim, o nível de combustão dos produtos muito densos será menor e maior o período de combustão (DIAS *et al.*, 2012).

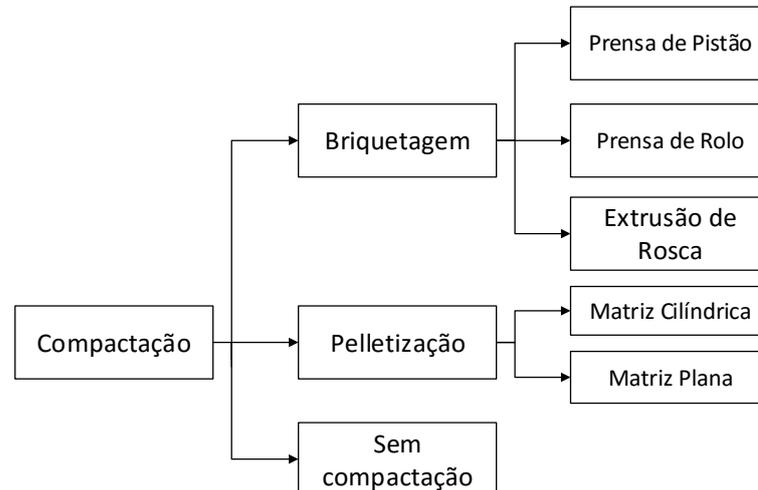
Exceto materiais que possuem pequeno tamanho de partícula, como serragem e casca de arroz, todos os outros materiais devem ser reduzidos a 6 mm-8 mm de tamanho com cerca de 10% a 20% de finos, para obter bons resultados de briquetagem. As condições de processamento devem ser alteradas para se adequarem às exigências de cada biomassa particularmente (DIAS *et al.*, 2012).

Estudos mostram que o teor de água ideal para a maioria das biomassas está entre 5% e 10%, pois resulta em um produto mais denso, estável e durável do que briquetes compactados com teores de água acima dos 15% (DEMIRBAS, 2004). A literatura sugere um teor de umidade de 15% a 20% para a queima, visto que os valores superiores reduzem o valor do calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape (GONÇALVES *et al.*, 2009). Por outro lado, baixo teor de água (<5%) pode resultar em perda de material, bem como a sua quebra, geração de finos durante o transporte e armazenamento (DIAS *et al.*, 2012).

Na Figura 23, evidenciam-se as principais tecnologias que podem ser usadas para compactação de biomassa são a briquetagem e a peletização. A briquetagem pode

ser realizada por prensa de pistão, prensa de rolo ou extrusão de rosca, enquanto as peletizadoras podem possuir matriz plana ou cilíndrica (TUMULURU *et al.*, 2011; OLIVEIRA, 2015).

Figura 23 – Alternativas para a compactação da biomassa de cacau



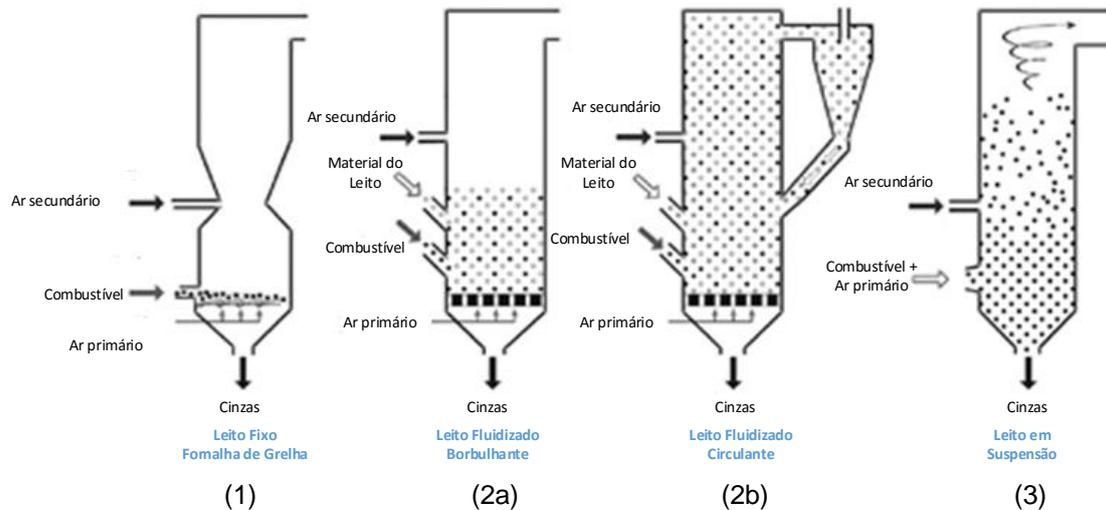
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 4.4.5 Subsistema de reação de combustão

A natureza do processo de combustão depende das propriedades do combustível e da tecnologia de combustão aplicada. O processo de combustão global pode também ser um processo contínuo ou um processo em batelada, e a adição de ar pode ser realizada de forma natural ou forçada. O processo em batelada é usado geralmente em unidades de combustão de pequena escala, usando a configuração adição de ar natural. Unidades de combustão de média e grande escala são sempre processos contínuos e de adição forçada de ar (LOO; KOPPEN, 2008).

Independentemente do tipo de aplicação (caldeiras, fornalhas), os processos de combustão de materiais sólidos podem ser divididos em três tipos de tecnologia, conforme Marutzky e Seeger (1999): 1) Combustão em Leito Fixo; 2a) Combustão em Leito Fluidizado Borbulhante; 2b) Combustão em Leito Fluidizado Circulante; 3) Combustão em Suspensão. Essas principais tecnologias podem ser visualizadas na Figura 24.

Figura 24 – Principais tecnologias de combustão de biomassa



Fonte: Adaptado de Marutzky e Seeger (1999).

A transferência de massa entre o combustível e o ar de combustão no leito fluidizado é feita por convecção forçada. O leito atua como um reservatório de calor, assegurando uma ignição rápida e combustão eficiente.

Uma das grandes vantagens da combustão em leito fluidizado é a possibilidade de obter baixa emissão de poluentes como o  $\text{NO}_x$  (óxidos nitrosos) e CO (monóxido de carbono), maior eficiência de processo, conforme apresentado na Tabela 10. A baixa emissão de  $\text{NO}_x$  é resultado da baixa temperatura em que ocorre a combustão no leito, em torno de  $800^\circ\text{C}$ , o que minimiza a formação de  $\text{NO}_x$  térmico.

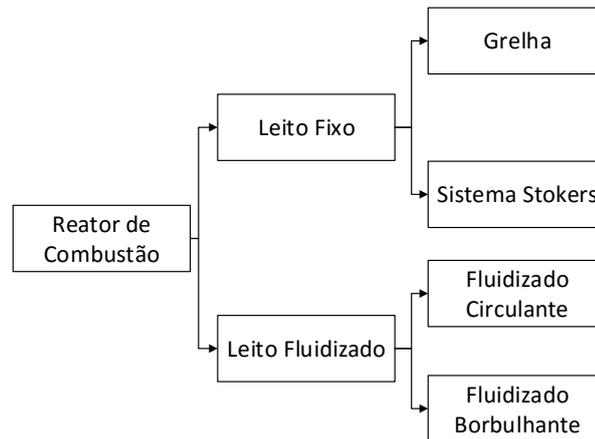
TABELA 10 – EXEMPLO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE COMBUSTÃO EXISTENTES NO MERCADO

Parâmetros	Grelha	Leito fluidizado
Emissões de $\text{NO}_x$	> 250 ppm	< 150 ppm
Emissões de CO	> 200 ppm	<100 ppm
Eficiência de combustão	95% a 97%	99,5%
Velocidade dos gases na fornalha	11 m/s a 12 m/s	6 m/s a 7 m/s
Potencial de incêndio na parte traseira	Maior	Menor
Flexibilidade no uso de várias biomassas	Não	Sim

Fonte: Adaptado de Perdona (2013).

Desse modo, de acordo com a pesquisa à literatura, as principais rotas tecnológicas para a combustão de biomassa foram representadas em fluxograma, conforme se ilustra na Figura 25.

Figura 25 – Principais alternativas de tecnologias de combustão de biomassa



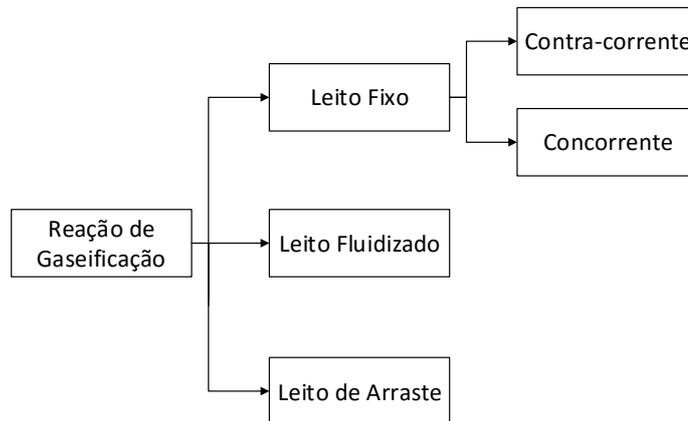
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 4.4.6 Subsistema de reação de gaseificação

De acordo com Cortez *et al.* (2008), a técnica de gaseificação é extremamente versátil, mas ainda há alguns desafios para a viabilização dessa tecnologia na prática. As maiores dificuldades residem no projeto do equipamento, que deve produzir um gás de alta qualidade energética (alto poder calorífico) com eficiência e segurança. A seleção do gaseificador tem que considerar o tipo da biomassa e o uso final do gás.

As principais tecnologias de gaseificação são a de leito fixo (contracorrente e cocorrente), leito fluidizado e leito de arraste (CORTEZ *et al.*, 2008; BUEKENS; SHOETERS, 1985). Na Figura 26, podem-se evidenciar as principais rotas de execução via gaseificação.

Figura 26 – Principais rotas de gaseificação



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Na seleção da tecnologia de gaseificação mais adequada, torna-se necessário identificar as vantagens e desvantagens de cada uma, principalmente quanto à eficiência e controle do processo e às características da biomassa. Nos Quadros 5 e 6, estão apresentadas as vantagens e desvantagens do leito fixo e do leito fluidizado, respectivamente.

De acordo com os Quadros 5 e 6, destaca-se a maior eficiência térmica dos gaseificadores de leito fluidizado e menor produção de poluentes, em relação ao leito fixo. Na Tabela 11, destaca-se a menor sensibilidade do leito fluidizado ao teor de cinzas da biomassa e a necessidade de menor diâmetro da biomassa para esse reator, comparado ao leito fixo.

Quadro 5 – Vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fixo de biomassa

Vantagens	Desvantagens
Unidades simples e baratas	Poucas possibilidades de controlar a região central de reação
Alta eficiência térmica (contracorrente) em relação ao concorrente	Requer um combustível uniforme para atingir operação ótima
Alta eficiência de conversão de carbono	Alto teor de alcatrão no gás (contracorrente)
Baixo teor de partículas de cinzas no gás	Possibilidade de aglomeração e clivagem das cinzas na grelha e nos refratários
Baixo teor de alcatrão no gás (cocorrente)	Baixa capacidade volumétrica

Fonte: Buekens e Schoeters (1985).

Quadro 6 – Vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fluidizado de biomassa

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Flexibilidade com relação à taxa de alimentação e composição do combustível	A temperatura de operação é limitada pela possibilidade de sinterização das cinzas
Alta capacidade volumétrica	A carga de partículas de cinzas no gás é alta
Possibilidade de controle de temperatura do leito	A perda de carbono na fuligem pode ser alta
Alta eficiência térmica em relação ao leito fixo	Alcatrão é formado a baixas temperaturas de operação
Reduz a formação de particulados, óxidos de enxofre e nitrosos, em relação ao leito fixo	

Fonte: Buekens e Schoeters (1985); IPT (1992).

TABELA 11 – REQUISITOS EM RELAÇÃO À BIOMASSA PARA DIFERENTES TIPOS DE GASEIFICADORES

<b>Característica da biomassa</b>	<b>Contracorrente</b>	<b>Concorrente</b>	<b>Leito fluidizado</b>
Diâmetro (mm)	10-100	10-100	1-10
Teor de cinzas (%)	≤ 2	< 6	< 20
Teor de umidade (%)	≤ 40	≤ 25	< 50
Temperatura de fusão das cinzas (°C)	1000	1000	1000
Pressão de operação (kPa)	Até 3000	Até 3000	Até 6000

Fonte: Buekens e Schoeters (1985).

#### 4.4.7 Subsistema de reação de pirólise

Conforme Bridgwater (2012), o processo de pirólise é classificado de acordo com a taxa de aquecimento do material, em pirólise rápida, intermediária e lenta. Já Neves *et al.* (2011) distinguem a pirólise, em lenta com aquecimento entre 10°C/s e 100°C/s e rápida, com aquecimento entre 100°C/s e 1000°C/s. Os principais parâmetros de pirólise estão apresentados na Tabela 12.

TABELA 12 – PRINCIPAIS PARÂMETROS OPERACIONAIS DO PROCESSO DE PIRÓLISE

<i>Processo</i>	<i>Tamanho da partícula</i>	<i>Temperatura / tempo residência</i>	<i>Rendimento dos produtos (%)</i>		
			Líquido	Sólido	Gás
Rápida	< 1mm	~500°C / ~1s	75	12	13
Intermediária		~500°C / ~10-30s	50	25	25
Lenta	5 mm – 50 mm	~400°C / ~ dias	30	35	35

Fonte: Adaptado de Bridgwater (2012); Demirbas e Arin (2002).

Existem diversas tecnologias que estão sendo estudadas e construídas ao redor do mundo, em busca de altos rendimentos de conversão energética, via pirólise, a partir da biomassa e para a produção de materiais químicos de alto valor agregado. As principais tecnologias de pirólise rápida estão apresentadas na Tabela 13.

TABELA 13 – CARACTERÍSTICAS DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE PIRÓLISE RÁPIDA DE BIOMASSA

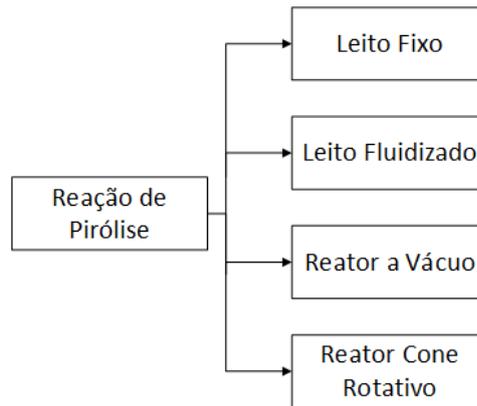
<b>Características</b>	LFB	LFC	Cone rotativo	Vórtice (ablativo)	Reator a vácuo
<b>Produto principal (%)</b>	Líquido (70 – 75)	Líquido (83)	Líquido (60 – 70)	Líquido (60 – 80)	Líquido (35 – 50)
<b>Temperatura (°C)</b>	500 – 550	500	-	625	450
<b>Tempo de residência (s)</b>	0,5	0,001-5	0,5	0,05-0,01	-
<b>Taxa de aquecimento</b>	-	1000°C/s	5000 k/s		

Fonte: Basu (2010) e Bridgwater (2012).

Nota: LFB = Leito Fluidizado Borbulhante; LFC = Leito Fluidizado Circulante.

Com base no estudo literário, foram propostas quatro rotas de conversão energética via processo de pirólise, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Rotas propostas para a etapa de pirólise



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 4.4.8 Árvore de estados

Tendo em vista a multiplicidade de tecnologias e as várias rotas propostas em cada subsistema, o problema de síntese de produção de energia foi estruturado em árvores de estados. Nesse sentido, cada uma das rotas termoquímicas foi estruturada em sete subsistemas e 10.752 ramos ou configurações possíveis de processo.

### 4.5 REGRAS HEURÍSTICAS E FLUXOGRAMA-BASE

Com base na pesquisa à literatura e nos resultados experimentais, foram elaboradas regras heurísticas que guiaram a busca pelo fluxograma heurístico, um fluxograma próximo ao ótimo. De acordo com o objetivo de maximizar o rendimento energético no processo estudado, algumas das regras heurísticas selecionadas foram destacadas em negrito.

#### 4.5.1 Subsistema de corte/despolpa

Antes de iniciar o pré-tratamento da biomassa com foco na conversão energética, torna-se necessária a separação das amêndoas e da polpa do fruto. Conforme é mostrado no Quadro 7, existem vantagens e desvantagens da escolha de cada uma das formas de quebra e despolpamento do fruto.

Quadro 7 – Vantagens e desvantagens das alternativas de corte/despolpa do fruto do cacau

Procedimento manual		Procedimento mecanizado	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Ausência de materiais estranhos nas amêndoas	Necessidade de maior quantidade de mão de obra	Redução de mão de obra	Presença de resíduos de casca nas amêndoas
	Maior risco de contaminação por manuseio	Maior segurança ao colhedor	Investimento inicial alto
		Maior produtividade	
		Menor esforço na etapa seguinte de redução de tamanho	

Fonte: Andrade (2012).

Com base nas vantagens e desvantagens citadas acima, podem-se formular as seguintes regras heurísticas, as quais foram reunidas no algoritmo apresentado na Figura 28. De forma a maximizar o desempenho do processo de conversão energética, a melhor escolha é o processo mecanizado.

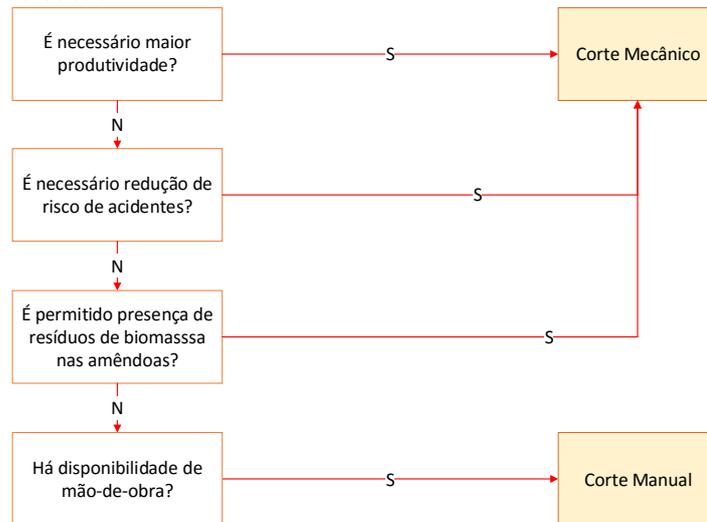
**Regra 01 — Caso seja desejado maior produtividade do processo de corte/despolpa, aplicar procedimento mecanizado.**

**Regra 02 — Caso haja dificuldade em contratação de mão de obra, aplicar procedimento mecanizado.**

**Regra 03 — Caso seja desejado um processo mais seguro para os operadores, aplicar corte/despolpa mecanizado.**

**Regra 04 — Caso seja de interesse produzir chocolate de altíssima qualidade, aplicar corte manual.**

Figura 28 – Algoritmo decisório para a seleção de tecnologia de corte/despolpa do cacau

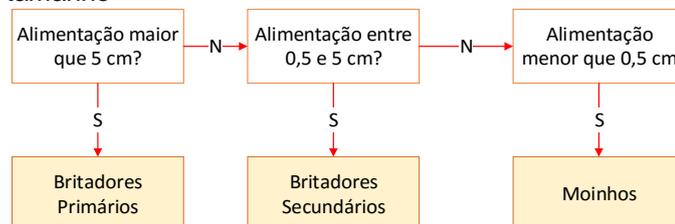


Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 4.5.2 Subsistema de redução de tamanho

A próxima etapa necessária para a conversão energética é a redução de tamanho da biomassa. De acordo com Miao (2014), essa etapa facilita as etapas de densificação e secagem, por aumentar a área da superfície de contato da biomassa. Conforme Foust *et al.* (2008), considerando a alimentação dos moinhos disponíveis, foram desenvolvidas regras heurísticas, apresentadas na Figura 29, na forma de um algoritmo. Com base nos resultados experimentais, a casca do fruto do cacau possui comprimento médio de 15 cm a 25 cm, e a melhor opção é usar os britadores primários.

Figura 29 – Algoritmo decisório para a seleção de tecnologia de redução de tamanho



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Entre os britadores primários, existem vários tipos de tecnologias disponíveis. No Quadro 8, foram apresentadas as principais características dessas tecnologias, que podem contribuir no processo de tomada de decisão. Essas variáveis podem guiar a

seleção da tecnologia mais adequada para o pré-tratamento da biomassa lignocelulósica, de acordo com os trabalhos de Womac *et al.* (2007); Bitra *et al.* (2008); Miu *et al.* (2006); e McKinney (2006, 2008).

Quadro 8 – Principais tecnologias para a redução de tamanho de biomassa

Características	Moinho de rolos	Moinho de martelo	Moinhos de discos	Moinho de barras	Moinho de facas
Sensibilidade a contaminantes	Alta	Baixa	Média	Alta	Alta
Custos de manutenção	Alto	Baixo	Médio	Baixo	Médio
Complexidade de operação e manutenção	Média	Baixa	Média	Baixo	Média
Custos de aquisição	Alto	Baixo	Médio	Baixo	Médio
Produtividade	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta

Fonte: Elaborado com base em Womac *et al.* (2007); Bitra *et al.* (2008); Miu *et al.* (2006); e McKinney (2006, 2008).

De acordo com a pesquisa à literatura, foram estabelecidas regras heurísticas para os equipamentos de redução de tamanho. Com base nas heurísticas, a tecnologia mais adequada para a redução do tamanho da biomassa do cacau é o moinho de martelos, em virtude de alcançar maior produtividade, maior simplicidade de operação e manutenção, além de menor consumo energético.

**Regra 01 — Se houver necessidade de alta produtividade no processo, utilizar moinhos de rolos ou moinhos de martelo ou moinhos de facas.**

**Regra 02 — Se os recursos energéticos forem escassos, utilizar moinho de martelo ou moinho de barras.**

**Regra 03 — Se houver risco de contaminantes na biomassa, utilizar moinhos de martelo.**

**Regra 04 — Se o nível de qualificação da equipe operacional for baixo, utilizar moinhos de martelo.**

### 4.5.3 Subsistema de secagem

Diante do alto percentual de umidade da casca do fruto do cacau (> 80%), a próxima etapa necessária é a secagem da biomassa, que aumenta a eficiência das reações de conversão energética. As regras heurísticas desenvolvidas foram reunidas em algoritmo, conforme se mostra na Figura 30.

Conforme Dias *et al.* (2012), para a próxima etapa do processo (compactação), há uma exigência que a biomassa tenha 5% a 10% de umidade, para que resulte em um produto mais estável, denso e durável. De acordo com as regras heurísticas, o secador rotativo é a melhor escolha devido à menor exigência operacional e de manutenção e à maior produtividade.

**Regra 01 — Se a biomassa residual apresentar umidade superior a 10%, aplicar secagem.**

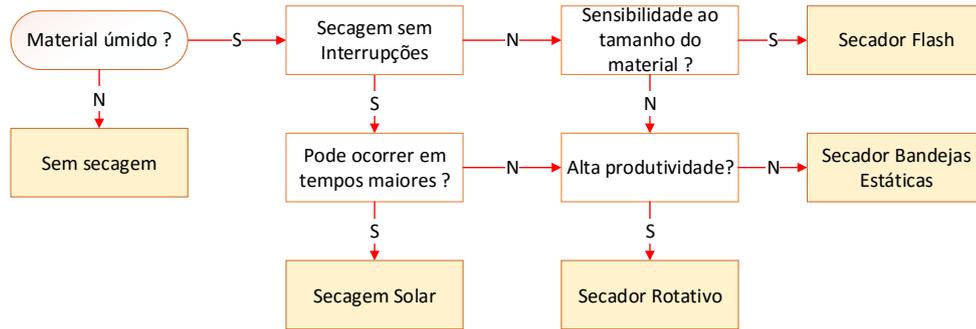
**Regra 02 — Se houver a necessidade de que a secagem ocorra com maior velocidade, sem interrupções, o resíduo ser altamente biodegradável e o processamento ocorrer em regiões úmidas, aplicar secagem artificial.**

**Regra 03 — Se houver o interesse em uma tecnologia com menor exigência operacional e de manutenção, utilizar secador rotativo.**

**Regra 04 — Se houver o interesse em uma tecnologia com maior possibilidade de recuperação energética, aplicar secador em esteira.**

**Regra 05 — Se houver a necessidade de maior produtividade no processo de secagem artificial, via secador rotativo, optar por secador rotativo de aquecimento direto.**

Figura 30 – Algoritmo decisório para a seleção de tecnologia de secagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 4.5.4 Subsistema de compactação

Após o estudo da secagem, analisou-se o subsistema de compactação. Segundo Tumuluru *et al.* (2011), as duas modalidades de compactação – briquetagem e peletização – são fundamentais para aumentar a densidade energética dos resíduos lignocelulósicos e uniformizar o formato da biomassa. As principais características das tecnologias de compactação estão apresentadas no quadro a seguir.

Quadro 9 – Características das tecnologias de compactação de biomassa

<b>Parâmetros</b>	<b>Peletizadora</b>	<b>Prensa de pistão</b>	<b>Prensa de rolo</b>	<b>Extrusora de rosca</b>
Teor de umidade da biomassa	10 a 15	10 a 15	10 a 15	4 a 8
Tamanho de partícula (mm)	< 3	6 a 12	< 4	2 a 6
Adição de adesivo	Não necessária	Não necessária	Necessária	Não necessária
Forma	Cilíndrica	Cilíndrica	Geralmente elíptica	Cilíndrica/Sextavada/Retangular/Quadrada
Atrito nas partes de contato	Alto	Baixo	Alto	Alto
Saída de produto	Contínua	Contínua	Contínua	Contínua
Consumo de energia (kwh/t)	16 a 75	37 a 77	30 a 83	37 a 150
Produtividade (t/h)	5	2,5	5 a 10	0,5 a 2
Densidade unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,1 a 1,2	< 1,0	Sem informação	1 a 1,4
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,65 a 0,75	0,4 a 0,5	0,48 a 0,53	0,5 a 0,6
Frequência de manutenção	Baixa	Alta	Baixa	Baixa
Desempenho nas tecnologias termoquímicas	Muito bom	Moderado	Moderado	Muito bom

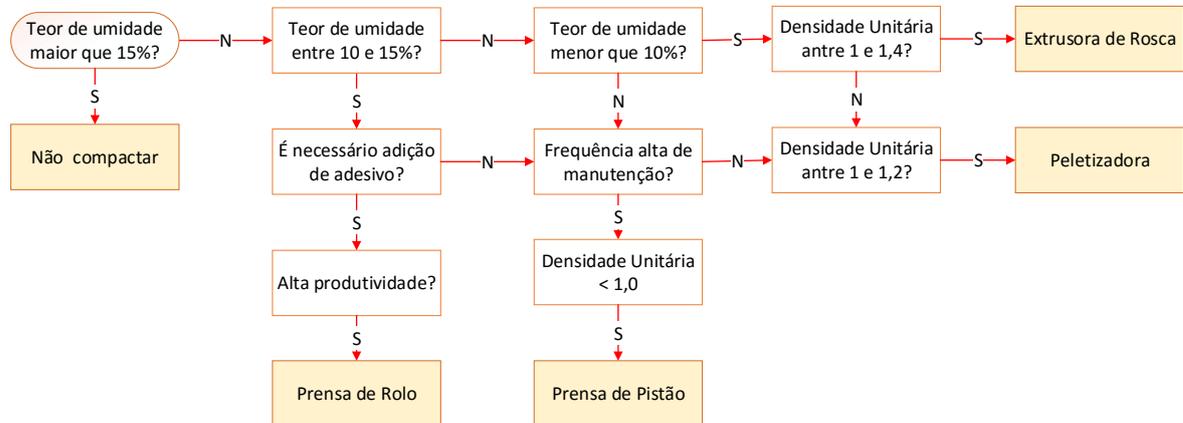
Fonte: Adaptado de Tumuluru *et al.* (2011).

De todos os parâmetros contidos no Quadro 9, podem ser priorizados os ligados à característica da biomassa, como o teor de umidade e tamanho do material; a produtividade e densidade unitária do produto; e principalmente o parâmetro de desempenho do material compactado ante as tecnologias de conversão. Inicialmente as tecnologias de peletização e briquetagem por extrusão se destacam entre as demais tecnologias disponíveis. Em termos tecnológicos, a peletização é mais exigente, enquanto a briquetagem resulta em produtos de maior densidade energética e permite alcançar maior produtividade.

As principais regras heurísticas foram reunidas no algoritmo apresentado na Figura 31. Desse modo, buscando maior produtividade, produtos de maior densidade

energética e melhor desempenho na reação de conversão (combustão, pirólise e gaseificação) deve-se aplicar briquetagem por meio da extrusora de rosca.

Figura 31 – Algoritmo decisório para a seleção da tecnologia de compactação



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

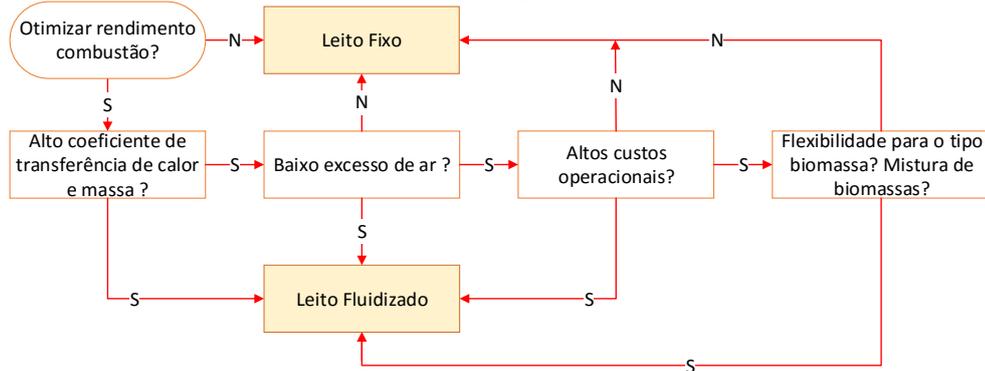
Para as rotas de pirólise e gaseificação, não será aplicada a operação de compactação. Na reação de pirólise, o maior rendimento energético é alcançado quando se aplica a pirólise rápida, a qual tem exigência de tamanho da partícula menor que 1 mm (Tabela 13). Do mesmo modo, na reação de gaseificação, o leito fluidizado, o qual maximiza a produção do gás de síntese, demanda que o diâmetro da biomassa seja de 1 mm a 10 mm (Tabela 11).

#### 4.5.5 Subsistema de reação química

O próximo subsistema avaliado é referente aos reatores, em que realmente ocorre a conversão energética. As etapas anteriores são preparatórias para as operações de combustão, pirólise e gaseificação. Na rota de combustão, os tipos de combustores mais utilizados são leito fixo e fluidizado. Os reatores de leito fixo (grelha) se destacam pela simplicidade de operação e são viáveis em menor escala de produção, enquanto os de leito fluidizado necessitam de maior investimento, mas possuem maior rendimento energético e produzem níveis menores de emissões de poluentes. Além disso, o leito fluidizado tem menor sensibilidade ao teor de cinzas da biomassa, mas têm exigências quanto ao tamanho da biomassa. O leito fluidizado circulante exige tamanho menor que 40 mm, enquanto o leito fluidizado borbulhante exige tamanho menor que 80 mm (LOO; KOPPERJAN, 2008). Nesse

sentido, as regras heurísticas foram reunidas num algoritmo decisório, conforme apresentado na Figura 32, para facilitar a escolha da tecnologia mais adequada. No intuito de alcançar maior desempenho energético, a escolha mais adequada é o reator do tipo leito fluidizado.

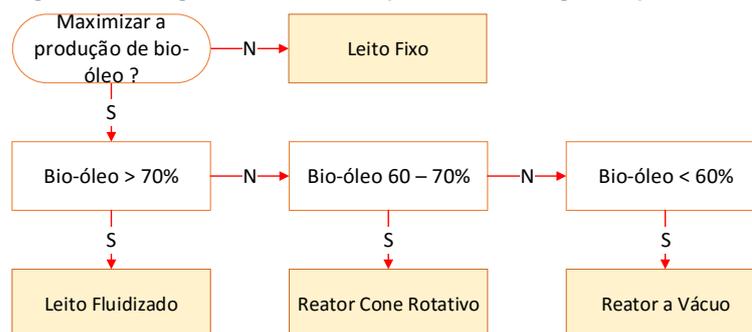
Figura 32 – Algoritmo decisório para a seleção do combustor para a biomassa do cacau



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

No processo de pirólise, o principal produto é o bio-óleo, líquido que pode ser utilizado como combustível diretamente ou para a produção de energia elétrica. Perante as regras heurísticas apresentadas na Figura 33, o reator de leito fluidizado é a escolha mais adequada, por fornecer maior rendimento de bio-óleo.

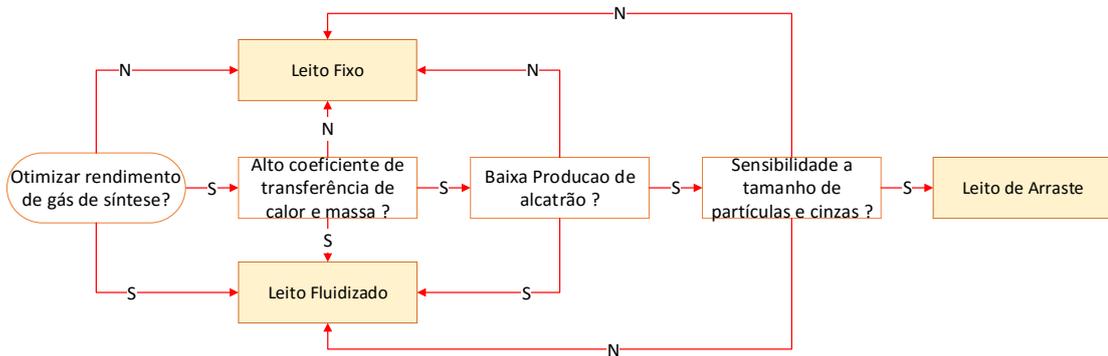
Figura 33 – Algoritmo decisório para a tecnologia de pirólise da biomassa



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Na rota de gaseificação, o resultado esperado é otimizar o rendimento de gás de síntese com o maior poder calorífico possível. O leito de arraste não é recomendado para biomassa, devido à dificuldade de mobilidade. Perante as regras heurísticas reunidas em algoritmo, o leito fluidizado é a tecnologia mais adequada, conforme se pode evidenciar pela análise da Figura 34.

Figura 34 – Algoritmo decisório para a seleção da tecnologia de gaseificação de biomassa



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Levando-se em consideração o interesse de um produto (combustível) com maior poder energético, a melhor opção é o gaseificador leito fluidizado, que poderá produzir um combustível gasoso livre de alcatrão.

Após as operações termoquímicas, os combustíveis produzidos (gases na combustão, bio-óleo na pirólise e gás de síntese na gaseificação) podem ser conduzidos a processos de ciclos de vapor ou turbinas a gás ou motores de combustão interna, quando o objetivo é a produção de energia elétrica. Existem pesquisas envolvendo a biomassa com tecnologias mais avançadas para obter melhores resultados, como as tecnologias de microturbina a gás e células a combustível.

#### 4.5.6 Fluxograma-base

Diante do que foi apresentado, foi possível determinar o fluxograma-base pela composição das tecnologias escolhidas no processo decisório, baseado nas regras heurísticas aplicadas aos subsistemas necessários para a conversão energética.

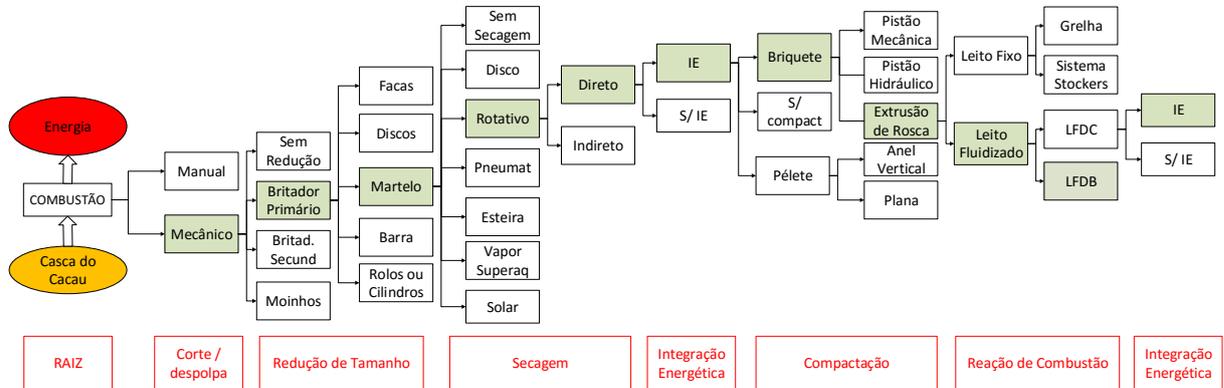
Desse modo, a sequência ideal de tecnologias que maximizam o desempenho das rotas termoquímicas estudadas é apresentada abaixo. O fluxograma-base para as rotas tecnológicas de combustão, pirólise e gaseificação pode ser visualizado também Figuras 35, 36 e 37, respectivamente.

Combustão direta: CMC – BPM – SRD – IE – CBE – LFDB – IE;

Pirólise: CMC – BPM – SRD – IE – NC – LFD - IE;

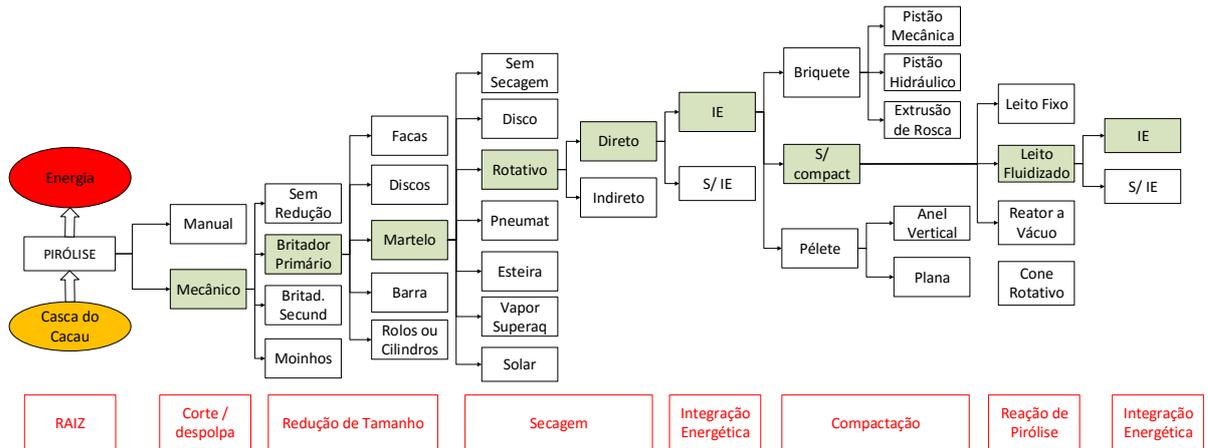
Gaseificação: CMC – BPM – SRD – IE – NC – LFD - IE.

Figura 35 – Fluxograma-base para a rota de combustão da biomassa do cacau



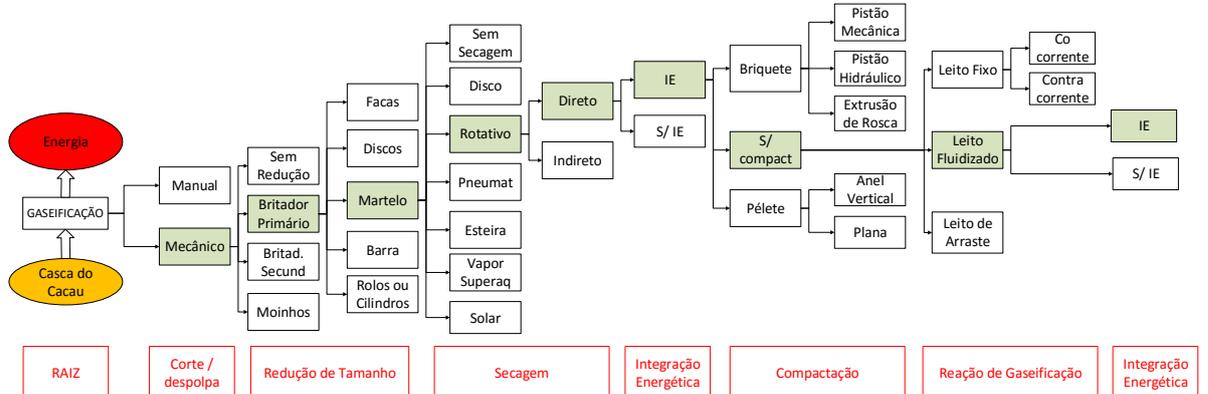
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Figura 36 – Fluxograma-base para a rota de pirólise da biomassa do cacau



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Figura 37 – Fluxograma-base para a rota de gaseificação



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 4.6 MÉTODO EVOLUTIVO

A partir de cada fluxograma-base, foram também determinados os vizinhos estruturais, de acordo com o método evolutivo. Por definição, os vizinhos estruturais são aqueles fluxogramas que diferem por um, e somente um, subsistema do fluxograma-base.

Como apresentado na seção anterior, o fluxograma-base da rota tecnológica de combustão direta é a sequência CMC – BPM – SRD – IE – CBE – LFDB – IE, mostrado na Figura 35. Variando-se apenas o subsistema Integração Energética, do subsistema reação de combustão, obtém-se o primeiro fluxograma vizinho:

- CMC – BPM – SRD – IE – CBE – LFDB – SIE

Agora, variando-se apenas o subsistema de combustão e mantendo os demais fixos, obtêm-se os fluxogramas vizinhos:

- CMC – BPM – SRD – IE – CBE – LFG – IE

- CMC – BPM – SRD – IE – CBE – LFS – IE

- CMC – BPM – SRD – IE – CBE – LFDC – IE

Da mesma forma, variando-se apenas o subsistema de compactação, foram determinados os seguintes fluxogramas vizinhos:

- CMC – BPM – SRD – IE – CBM – LFDB – IE

- CMC – BPM – SRD – IE – CBH – LFDB – IE

- CMC – BPM – SRD – IE – PAV – LFDB – IE

- CMC – BPM – SRD – IE – PP – LFDB – IE

- CMC – BPM – SRD – IE – NC – LFDB – IE

Variando-se apenas o subsistema integração energética, ligado ao subsistema de secagem, obtém-se apenas um fluxograma vizinho:

- CMC – BPM – SRD – SIE – CBE – LFDB – IE

Ao variar apenas o subsistema de secagem, foram determinados sete fluxogramas vizinhos:

- CMC – BPM – SRI – IE – CBE – LFDB – IE

- CMC – BPM – SF – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – BPM – SS – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – BPM – NS – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – BPM – SD – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – BPM – SP – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – BPM – SE – IE – CBE – LFDB – IE

Da mesma forma, variando-se apenas o subsistema de redução de tamanho, foram determinados os seguintes fluxogramas vizinhos:

- CMC – BPF – SRD – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – BPD – SRD – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – BPB – SRD – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – BPR – SRD – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – BS – SRD – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – SR – SRD – IE – CBE – LFDB – IE
- CMC – MH – SRD – IE – CBE – LFDB – IE

O último fluxograma vizinho foi determinado variando-se o subsistema corte/despolpa do fruto:

- CMN – BPM – SRD – IE – CBE – LFDB – IE

Ao todo foram determinados 25 vizinhos estruturais para a rota de combustão direta da biomassa do cacau.

Seguindo a mesma técnica, foram determinados os vizinhos estruturais para as rotas de pirólise e gaseificação. Coincidentemente, para ambas as rotas, também foram determinados 25 vizinhos estruturais.

Por meio dos vizinhos estruturais determinados, torna-se possível aprimorar a solução heurística – fluxograma-base determinado pelo método heurístico –, de forma a encontrar a solução ótima, que, por exemplo, possa ser o fluxograma que maximiza a produção energética, com o menor custo possível.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos resultados experimentais, foi observada expressiva variabilidade nas características físicas da casca fresca do fruto do cacau, indicando o desafio de desenvolvimento de tecnologias eficientes para o corte e redução de tamanho da biomassa.

Entre as cultivares estudadas, a CCN 51, que apresenta alta resistência a doenças, destacou-se pelo maior rendimento de massa de amêndoas e menor rendimento de massa de casca, em relação à massa do fruto.

O alto teor de água inicial da biomassa estudada e o teor de cinzas, acima de 5%, indicam a necessidade de secagem como etapa preparatória e modificações nos equipamentos de conversão energética. Não foi encontrada diferença significativa entre as cultivares estudadas quanto à análise imediata e ao poder calorífico. A média entre as cultivares estudadas de 16,96 MJ/kg, referente ao poder calorífico superior, demonstra o potencial promissor da biomassa do cacau para a produção de energia, comparado ao de biomassas tradicionais, como a casca de arroz e o bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados da análise imediata das cultivares também estão condizentes com a literatura pesquisada.

Quanto às características físicas do fruto do cacau, foi encontrada diferença significativa entre as médias das quatro cultivares estudadas. Isso demonstra que a falta de uniformidade das dimensões da casca do fruto é um desafio para o desenvolvimento de tecnologias para o pré-tratamento dessa biomassa. Quanto aos resultados de análise imediata e poder calorífico obtidos, não foi encontrada diferença significativa entre as cultivares analisadas.

No ensaio de secagem nos secadores túnel convectivo e estufa, o modelo de Overhults descreveu melhor os dados, pois apresentou maior valor de  $R^2$  e do teste  $t$  e menor valor do desvio-padrão. No ensaio de combustão, ficou evidente a necessidade da construção de um reator com o controle adequado de entrada de agente oxidante, de modo a otimizar o processo de combustão.

Pelo método heurístico apenas um fluxograma maximiza o rendimento energético de cada rota, sendo CMC – BPM – SRD – IE – CBE – LFDB – IE para combustão direta e CMC – BPM – SRD – IE – NC – LFD – IE para pirólise e gaseificação. Pelo método evolutivo foram determinados 25 fluxogramas vizinhos para cada rota tecnológica estudada. A abordagem sistêmica, sob os conceitos da Engenharia de Processos, possibilitou a compreensão dos efeitos de diferentes rotas e o impacto da combinação dos diferentes equipamentos no processo de conversão energética, quanto à maximização do desempenho dos processos de combustão direta, pirólise e gaseificação. A aplicação das metodologias heurística e evolutiva se mostrou adequada na busca de solução de um problema complexo, de caráter combinatório, de forma eficiente. As regras heurísticas elaboradas poderão contribuir no processo de tomada de decisão em futuros projetos e no desenvolvimento de novas tecnologias.

Este trabalho contribui para o atendimento de exigências atuais da agroindústria familiar e propõe alternativas para a redução do impacto ambiental causado pelo uso dos combustíveis fósseis. Certamente o aproveitamento energético da biomassa residual é uma das alternativas viáveis para atender às necessidades atuais da sociedade, sem comprometer o meio ambiente para as gerações futuras.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, a fim de dar continuidade a esta pesquisa:

- Realizar estudo de viabilidade econômica das tecnologias selecionadas para a produção de energia a partir da biomassa do cacau.
- Aprimorar a otimização do processo de produção de energia elétrica a partir da biomassa do cacau.
- Realizar o estudo de otimização para a rota de biodigestão da biomassa do cacau.
- Analisar o potencial energético do carvão produzido da carbonização da biomassa.
- Estudar o potencial energético do bio-óleo produzido da casca do cacau.
- Montar um aparato experimental para simular as condições operacionais para combustão, pirólise e gaseificação da casca do cacau.
- Realizar a análise termogravimétrica (TG) e a análise térmica diferencial (DTA) para prever o comportamento da decomposição térmica de biomassas em reatores de pirólise, combustores e gaseificadores.
- Estudar o aproveitamento energético de outras partes da planta do cacau, como ramos e tronco, resultantes das podas e substituição de cacauzeiros velhos por plantas novas, produtivas e resistentes a estresses.

## REFERÊNCIAS

ABIOLA, S. S.; TEWE, O. O. Chemical evaluation of cocoa by-products. **Tropical Agriculture**. Trinidad. v. 68, n. 4, p. 335-336, 1991.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão vegetal, Análise imediata. 1986.

AGYEMAN, K. O. G.; OLDHAM, J. H. Utilization of cocoa by-products as an alternative source of energy. **Biomass**. v. 10, p. 311-318, 1986.

ALVES, S. A. M. **Epidemiologia da vassoura de bruxa (Crinipellis perniciosa (STAHEL) SINGER) em cacauzeiros enxertados em Uruçuca, Ba.** 2002.

Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba-SP, p. 70, 2002.

AMOS, W. A. **Report on biomass drying technology**. National Renewable Energy Laboratory. U. S. Department of Energy. Colorado. 1998.

ANDRADE, R. C. Mecanização do beneficiamento e secagem do cacau. **Palestra ministrada no III Congresso Brasileiro do Cacau, realizada em Ilhéus, Bahia, em 2012**. Disponível em:

<[http://www.ceplac.gov.br/paginas/cbc/paginas/palestras/P7\\_1.pdf](http://www.ceplac.gov.br/paginas/cbc/paginas/palestras/P7_1.pdf)>. Acesso em: 15 dez. 2015.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: Aneel, 2005.

AREGHEORE, E. M. Chemical evaluation and digestibility of cocoa (Theobroma cacao) by products fed to goats. **Trop. Anim. Health Prod.** v. 34, p. 339-348, 2002.

ARRUDA, A. D. **Sequenciamento e integração energética de colunas de destilação**: desproporcionamento do tolueno. 1999. [s.n.]. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1999.

ASPE – AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Atlas de bioenergia do Espírito Santo**. Vitória, 2013.

BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. A Study of the Statistical Discrimination of the Drying Kinetics Equation. **Food and Bioproducts Processing**, v. 82, p. 219-225, 2004.

BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis**: Practical design and theory. Burlington: Elsevier. 2010.

BATISTA, R. R. **Rotas de aproveitamento tecnológico de resíduo orgânico agrícola**: casca de coco, casca de cacau e casca de café – destinadas à geração de energia. 2014, 90 f. Dissertação (Mestrado em Energia), Centro Universitário Norte do Espírito Santo. São Mateus. 2014.

BAXTER, PROF. L. **IEA Bioenergy Task 19 meeting**. Australia: Goldcoast, 2000.

BECKETT, S. T. **The science of chocolate**. 2. ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2009.

BERBERT, P. R. Estudo da pectina do mel e da casca do fruto do cacau. **Revista Theobroma**. Ilhéus, v. 2, n. 49, p. 51, 1972.

BITRA, V. S. P. *et al.* Comminution properties of biomass in hammer mill and its particle size characterization. **ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers**. Rhode Island, 2008.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**. v. 38, p. 68-94, 2012.

BRIDGWATER, A. V.; BRIDGE, S. A. A Review of Biomass Pyrolysis and Pyrolysis Technologies. In: **Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilization**. Londres: Elsevier Applied Science, 1991, cap. 2, p. 11-92.

BRIDGWATER, A. V.; PEACOCKE, G. V. C. Fast pyrolysis process for biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 4, n. 1, p. 1-73, 2000.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. The Avi Publishing Company Inc., 1974.

BRUM, S. S. **Caracterização e modificação química de resíduos sólidos do beneficiamento do café para produção de novos materiais**. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

BUEKENS, A. G.; SCHOETERS, J. G. Modelling of biomass gasification, in **Fundamentals of thermochemical biomass conversion**. Londres: Elsevier App. Sc. Pub Ed. 1985. p. 619-89.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Conversão direta da madeira em calor e energia. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bionergia & Biorrefinaria**. Viçosa: Editora Viçosa, 2013, cap. 13, p. 353-378.

CARVALHO JÚNIOR, J. A.; LACAVA, P. T. **Emissões em processos de combustão**. São Paulo: Editora UNESP, 2003.

CARVALHO JÚNIOR, R. M. **Desenvolvimento e análise energética do processo de obtenção do biodiesel de microalga por metanólise *in situ***. 2010. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

CARVALHO, C. A. C. **Síntese e otimização de sequências de destilação utilizando simuladores comerciais**. 1995. 236 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1995.

- CHAVES, O. C. V. *et al.* Caracterização físico-química do suco da acerola. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. v. 4, n. 2, 2004.
- CHEPOTE, R. E.; SANTANA, J. L. C.; DELEON, F. Como utilizar composto de casca de cacau na adubação do cacaueiro. **Difusão Agropecuária**. Ilhéus, v. 2, n. 1, p. 11-17, 1990.
- COMISSÃO EXECUTIVA DO PLANO DA LAVOURA CACAUEIRA – CEPLAC. Cacau. **Informações de pesquisa** (09/11/2010 a 02/01/2012). Brasília, 2012.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.
- CUNHA, J.; SERÔDIO, R. S. **Tecnologia disponível para o beneficiamento e armazenamento do cacau**. Ilhéus: CEPLAC-CEPEC, 1991.
- DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Prog. Energy Combust.** Sci 30:219-230. 2004.
- DIAS, J. M. C. S. *et al.* Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **Embrapa-Agroenergia**. Brasília-DF, 2012.
- DINKELBACH, L. Thermochemical conversion of willow from short rotation forestry. In: **ECNC--00-028 REGROW Guide, Energy research Centre of the Netherlands**. ECN, Petten, the Netherlands. 2000.
- DONKOH, A. *et al.* Chemical composition of cocoa pod husk and its effect on growth and food efficiency in broiler chicks. **Anim. Feed Sci. Technol.** v. 35, p. 161-169, 1991.
- EFRAIM, P. **Estudo para minimizar as perdas de flavonoides durante a fermentação de sementes de cacau para produção de chocolates**. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Campinas. 2004.
- EFRAIM, P. *et al.* Influência da fermentação e secagem de amêndoas de cacau no teor de compostos fenólicos e na aceitação sensorial. **Ciênc. Tecnol. Aliment.** v. 30, n. 1, p. 142-150, Campinas, 2010.
- EROL, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; KÜÇÜKBAYRAK, S. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. **Renewable Energy**. v. 35, p. 170-173, Istanbul, Turkey, 2010.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Statistical date**. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/home/E>>. Acesso em: 15 out. 2015.
- FIGUEIRA, A.; JANICK, J.; BEMILLER, J. N. New products from *Theobroma cacao*: seed pulp and pod gum. **New Crops**. p. 475-478, New York, 1993.

FOUST, A. S. *et al.* **Princípios das operações unitárias**. Traduzido por Horácio Macedo. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FREIRE, E. S.; ROMEU, A. P.; PASSOS, F. V. Aproveitamento de resíduos e subprodutos da pós-colheita do cacau. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CACAU, 3., 1990, Ilhéus. **Anais Eletrônicos...** Disponível em: <[http://www.ceplac.gov.br/paginas/cbc/paginas/palestras/P7\\_3.pdf](http://www.ceplac.gov.br/paginas/cbc/paginas/palestras/P7_3.pdf)>. Acesso em: 5 out. 2015.

GABARDO, R. P. *et al.* Aproveitamento de resíduos de origem florestal para a produção de carvão. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2011, Londrina. **Anais Eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2011/X-002.pdf>>. Acesso em: 1 ago. 2015.

GAVRILESCU, D. Energy from biomass in pulp and paper mills. **Environmental Engineering and Management Journal**. v. 7, n. 5, p. 537-546. 2008.  
 GLOBO RURAL. **Agrônomo explica como fazer o aproveitamento da casca de cacau**. Disponível em: <<http://globoplay.globo.com/v/4266178/>>. Acesso em: 21 out. 2015.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 13, p. 657-661, Campina Grande, 2009.

GONZALES, A. D. F. *et al.* Desenvolvimento sustentável para o resgate da cultura do cacau baseado no aproveitamento de resíduos. **Interfaces Científicas – Saúde e Ambiente**. v. 1. n. 2. p. 41-52, Aracaju, 2013.

GUPTA, R. B.; DEMIRBAS, A. **Gasoline, diesel, and ethanol biofuels from grasses and plants**. New York :Cambridge University Press, 2010.

HENDERSON, J. M.; HENDERSON, S. M. A. Computacional Procedure for DeepBed Drying Analysis. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 13, p. 87-95, 1968.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola Municipal: Culturas temporárias e permanentes 2014, v. 41, 2015. Disponível em: [http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/66/pam\\_2014\\_v41\\_br.pdf](http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/66/pam_2014_v41_br.pdf). Acesso em: 15 mar. 2016.

ICCO – INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION. **Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, v. XLII, n. 1, cocoa year 2015/16**. Disponível em: <[http://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/cat\\_view/30-related-documents/46-statistics-production.html](http://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/cat_view/30-related-documents/46-statistics-production.html)>. Acesso em: 25 abr. 2016.

ICCO – INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION. **The world cocoa economy: past and present**. 2012.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Tecnologia, ambiente de desenvolvimento**. Secretaria da Ciência e Tecnologia e Desenvolvimento Econômico, 1992.

JENKINS, B. M. *et al.* Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**. v. 54, p. 17-46.

JENKINS, B. M.; EBELING, J. M. Thermochemical properties of biomass fuels. **Calif. Agric.** v. 39, p. 14-16, 1985.

KATYAL, S.; THAMBIMUTHU, K.; VALIX, M. Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: influence of process variables on char yield and characteristics. **Renewable Energy**. v. 28, p. 713-725, Canada: Pergamon, 2003.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

KPMG – KPMG International Cooperative. **A taste of the future**: The trends that could transform the chocolate industry. Haymarket Network Ltd, 2014.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solids materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

LOO V. S.; KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion and co-firing**. London: Earthscan, 2008.

MACEDO, J. C. F. **Análise térmica e ambiental da queima do lodo primário da fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa à grelha**. 2006. 196 f. Dissertação (Mestrado em Conservação de Energia) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

MAGALHÃES, E. A. **Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa**. 2007. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Grinding performance and physical properties of selected biomass. **ASAE Annual Meeting**. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2002.

MARQUES, T. M. **Viabilidade econômica do cultivo de cacaueteiro e bananeira irrigados no Maranhão**. 2015. 84 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Agronegócio) – Programa de Pós-Graduação em Agronegócio, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2015.

MARTINEZ-ÁNGEL, J. D. VILLAMAR-GALHARDO, R. A.; ORTIZ-RORIGUES, O. O. Characterization and evaluation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk as a renewable energy source. **Agrociência**. v. 49, p. 329-345, 2015.

MARTINI, P. R. R. **Conversão pirolítica de bagaço residual da indústria de suco de laranja e caracterização química dos produtos**. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MARUTZKY, R.; SEEGER, K. **Energie aus holz und anderer biomasse**, DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden-Echtlingen, Germany. 1999.

McCABE, W. L.; SMITH, J.; HARRIOTT, P. **Unit operations in chemical engineering**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion Technologies, **Bioresource Technology**. v. 83, p. 47-54, 2002.

McKINNEY, L. J. Grain Processing: Particle Size Reduction Methods. **Oklahoma State University's Cattle Grain Processing Symposium**. Tulsa: Oklahoma, 2006.

McKINNEY, L. J. Particle Size Reduction. Oklahoma State University Cattle Grain Processing Symposium. **MP-177, Cooperative Extension Service**. Oklahoma State University: Stillwater, 2008.

MENDES, F. A. T. A cacauicultura na Amazônia brasileira: potencialidades, abrangência e oportunidades de negócio. **Movendo Idéias**. v. 5, n. 8, p.53 - 61, Belém, dez. 2000.

MENEZES, M. J. S. **Poder calorífico e análise imediata da maravalha de Pinus (*Pinus sp*) e Araucária (*Araucaria angustifolia*) de reflorestamento como resíduos de madeira**. 2013. 51 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

MERCADO DO CACAU. **Senado vai debater aumento do percentual de cacau em chocolates produzidos no Brasil**. Disponível em: <<http://mercadodocacau.com/artigo/senado-vai-debater-aumento-do-percentual-de-cacau-em-chocolates-produzidos-no-brasil>>. Acesso em: 15 maio 2015.

MIAO, Z.; GRIFT, T. E.; TING, K. C. Size Reduction and Densification of Lignocellulosic Biomass Feedstock for Biopower, Bioprod. and Liquid Biofuel Prod. **Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering**. v. 2, p. 10-13, 2014.

MIU, P.I. *et al.* Analysis of Biomass Comminution and Separation Processes in Rotary Equipment – A Review. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. Oregon Convention Center Portland, Julho de 2006.

MOLES, P. **Tendências do cacau sustentável no mundo e a experiência com o cacau Rainforest Alliance Certified**. DELFI CACAU BRASIL, 2011.

MORAIS, M. R. *et al.* **Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação**. Disponível em:

<<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v2/089.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2016.

MÜLLER, Igor. **Anuário brasileiro do cacau 2012**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2012. 64 p.: il.

NEVES, D. *et al.* Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. **Progress in energy and combustion Science**. v. 37, n. 5, p. 611-630, 2011.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed., Rio de Janeiro: Interciências, 2003.

NONHEBEL, M. A., MOSS, A. A. H. **Drying of solids in the chemical industry**. Londres: Butterworth & Co Publishers Ltd, 1971.

OLIVEIRA, C. M. **Biomassa briquete woodpellets**. Curitiba: Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável. 2015.

OVERHULTS, D. G. *et al.* "Drying Soybeans with Heated Air". **Transactions of the American Society of Agricultural Engineer**. v. 16, n. 2, p. 195-200, 1973.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**. v. 84, p. 487-494, 2005.

PAULA, L. E. de R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Program de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Universidade Federal de Lavras. Lavras.

PERDONÁ, R. C. Aproveitamento energético de resíduos e biomassa. **Palestra ministrada no Conselho Regional de Química, realizada em São Paulo, em 2013**. Disponível em: <[http://www.crq4.org.br/sms/files/file/aproveitamento\\_biomassa\\_perdona\\_odebrecht.pdf](http://www.crq4.org.br/sms/files/file/aproveitamento_biomassa_perdona_odebrecht.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2015.

PEREIRA, I. O. **Viabilidade da utilização da casca do cacau como combustível no aquecimento de ar para a secagem de amêndoas de cacau**. 2013. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de processos: Análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. São Paulo: Blucher, 2005.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesq. Flor. Bras**. v. 31, n. 66, p. 113-122, Colombo, abr./jun. 2011. Disponível em: <[www.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/download/.../211](http://www.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/download/.../211)>. Acesso em: 20 nov. 2015.

REED, T. B.; DAS, A. **Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems**. 2. ed. Golden: The Biomass Energy Foundation Press, 1988.

RENDEIRO, G. (Coord.). **Combustão e gaseificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

RHODES, M. **Introduction to particle technology**. 2. ed. Melbourne: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

SILVA NETO, P. J. *et al.* **Sistema de produção da Amazônia brasileira**. Belém: CEPLAC, 2001.

SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. v. 4, n. 1, p. 71-78, Campina Grande, 2002.

SODRÉ, G.A.*et al.* Extrato da casca do fruto do cacaueteiro como fertilizante potássico no crescimento de mudas de cacaueteiro. **Rev. Bras. Frutic.** v. 34, n. 3, p. 881-887, 2012.

SOUSA, P. L. N. **Desenvolvimento tecnológico do aproveitamento energético da biomassa a nível industrial**. 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

SOUZA, M. M. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita florestal e do processamento de *Pinus taeda* L.** 2010. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

STOLZ, A. dos S. **Caracterização dos produtos da pirólise controlada da madeira de *Acacia Mearnsii* de wild** – Acácia negra. 2010. 132p. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2010.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design**. Montreux: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

STURION, J. A; PEREIRA, J. C. D; CHEMIM, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Colombo, n. 16, p. 55-59, 1988.

SUGATHAPALA, A. G. T. **Technologies for converting waste agricultural biomass to energy**. UNEP – United Nations Environment Programme. Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre Osaka. 2013.

SYAMSIRO, M. *et al.* Preliminary study on use of cocoa pod husk as a renewable source of energy in Indonesia. **Energy for Sustainable Development**. v. 16, p. 74-77. 2011.

TUMULURU, J. S. *et al.* A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr**. v. 5, n. 6, p. 683-707, Hoboken, 2011.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 56f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Programa de Mestrado em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

VRIESMANN, L. C.; AMBONI, R. D. M. C.; PETKOWICZ, C. L. O. **Cocoa pod husks (Theobroma Cacao L.): composition and hot-water-soluble pectins**. *Industrial Crops and Products*, v. 34, p. 1173-1181, 2011.

WARNE, K. *et al.* Statistical and computational intelligence techniques for inferential model development: A comparative evaluation and a novel proposition for fusion. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. v. 17, p. 871-885, 2004.

WERTHER, J. *et al.* Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 26, n. 1, p. 1-27, Oxford, 2000.

WINSTON, P. H. **Artificial Intelligence**. 3. ed. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1984.

WOMAC, A. R. *et al.* Biomass Pre-processing size reduction with instrumented mills. **ASAE Annual Meeting**. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007.

WOMAC, A.R. *et al.* Shearing characteristics of biomass for size-reduction. **ASAE Annual Meeting**. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2005.

ZAKON, A.; PESSOA, F. L. P. As engenharias de processo, projeto e processos químicos industriais. In: COBENGE – Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. **Anais eletrônicos**. v. 28, Ouro Preto, 2000. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2000/artigos/068.PDF>>. Acesso em: 12 jan. 2016.