



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

VANESSA DAL-BÓ

**POTENCIALIDADES PARA O APROVEITAMENTO DE BIOMASSA
DE CASCA DE CAFÉ ROBUSTA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA**

SÃO MATEUS – ES

2016

VANESSA DAL-BÓ

**POTENCIALIDADES PARA O APROVEITAMENTO DE BIOMASSA
DE CASCA DE CAFÉ ROBUSTA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia, para obtenção do título de Mestre em Energia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª Taisa Shimosakai de Lira

SÃO MATEUS – ES

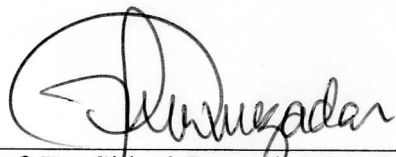
2016

POTENCIALIDADES PARA O APROVEITAMENTO DE BIOMASSA DE CASCA DE CAFÉ ROBUSTA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA

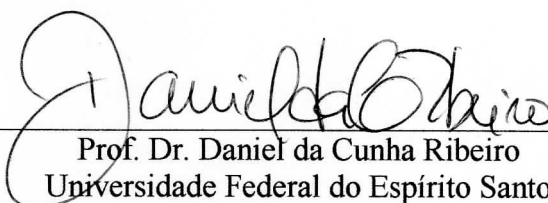
VANESSA DAL-BÓ

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia, para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada: 02/08/2016.



Prof. Dr. Sidnei Quezada Meireles Leite
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador Externo



Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno



Prof.ª Dr.ª Taisa Shimosakai de Lira
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientadora



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

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES - BC, ES, Brasil)

D136p Dal-Bó, Vanessa, 1992-
Potencialidades para o aproveitamento de biomassa de casca de café robusta para a geração de energia / Vanessa Dal-Bó. – 2016.
109 f. : il.

Orientador: Leonardo da Silva Arrieche.
Coorientador: Taisa Shimosakai de Lira.
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Engenharia de processos. 2. Heurística. 3. Pirólise. 4. Secagem. 5. Combustão. I. Arrieche, Leonardo da Silva. II. Lira, Taisa Shimosakai de. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”

(Arthur Schopenhauer)

Aos meus pais, Lourival e Adriana, que sempre me apoiaram.

A meu esposo, Graciano, pelo carinho e compreensão.

Aos meus irmãos, Bruno e Diogo, que sempre estiveram ao meu lado.

Aos meus Avós, pelo exemplo de vida.

Ao Prof. Dr. Leonardo Arrieche, pela paciência e compreensão.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me amparar nos momentos difíceis e pela oportunidade de realizar mais uma conquista.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leonardo Arrieche, por sua amizade, confiança, apoio e incentivo, bem como todo o conhecimento transmitido.

À minha coorientadora, Prof^ª. Dr^ª. Taisa Shimosakai de Lira, pelos seus ensinamentos, amizade e pela disponibilidade em contribuir com este trabalho.

Aos professores do PPGEN e DETEC, Prof^ª. Dr^ª. Ana Paula Meneguelo, Prof. Dr. Carlos Minoru Nascimento Yoshioka, Prof. Dr. Eduardo Perini Muniz e Prof. Dr. Thiago Xavier pela ajuda na realização dos experimentos.

Ao Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro, pelas contribuições dadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Sidnei Quezada por ter aceito participar da minha banca de defesa de mestrado.

Aos colegas de mestrado Antônio Carlos Oliveira, Domênico Andreatta, Joice Lauer, Maiquel Santos, Patrick Araújo, Renato Oliveira e Rodrigo Mazolini pela parceria ao longo de todo o curso e pelo suporte dado na parte experimental e análises dos dados do trabalho.

Às alunas de graduação Giulia Corrêa, Leticia Comério e Lívia Kafler pelo auxílio na realização dos experimentos e análise dos dados.

À toda a minha família e amigos pelo apoio, compreensão e incentivo durante a jornada.

À Capes pelo suporte financeiro concedido para a realização deste trabalho.

RESUMO

No Brasil, a região norte do Espírito Santo destaca-se como a principal produtora de café robusta. Durante o processamento do café, gera-se cerca de 50% de cascas, que na maioria das vezes são descartadas de forma inadequada. O objetivo deste trabalho foi estudar a otimização do aproveitamento tecnológico da casca do café robusta para a obtenção de energia, por meio dos métodos heurístico e evolutivo. A síntese estrutural para a geração de energia, por meio de árvores de estados resultou em 3780 fluxogramas plausíveis a serem analisados, para as quatro rotas tecnológicas abordadas (biodigestão anaeróbia, combustão direta, gaseificação e pirólise). Estudos experimentais com a casca do café robusta permitiram identificar algumas características fundamentais para a definição do fluxograma embrião ao processo. A análise estatística para os ensaios de caracterização das biomassas comprovou, pelo teste de Tukey a 95% de confiança, que houve diferenças significativas entre as amostras analisadas para a massa específica, teor de umidade, carbono fixo e poder calorífico superior. A caracterização do material indicou elevado potencial energético e foi útil para definir o fluxograma de recuperação energética. A análise granulométrica permitiu identificar o modelo que melhor se ajustou aos dados, sendo o RRB (*Rosin, Rammler e Bennet*) e GGS (*Gates, Gaudin e Schumann*) para a casca proveniente do processamento via seca e via úmida, respectivamente, e o diâmetro médio de Sauter foi de 2,69 mm e 1,24 mm. A cinética de secagem da casca do café foi realizada em camada fina, por meio de um secador convectivo com fluxo de ar paralelo. Foi elaborado um planejamento fatorial para o estudo do efeito da temperatura e da velocidade sobre a umidade. Foram analisados modelos semi-empíricos para determinar uma equação que melhor representasse a cinética de secagem. O modelo de Overhults apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, comprovado pela técnica da discriminação de modelos rivais, a partir das medidas de não linearidade. O estudo de secagem foi importante para avaliar os parâmetros e foi útil para elaborar as regras heurísticas. Para a combustão, foram monitoradas, durante os ensaios, as emissões de gases poluentes, como monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos. Porém, mais estudos são necessários para a aplicação efetiva da combustão, visto que as emissões gasosas ultrapassaram os limites estabelecidos pelo conselho nacional do meio ambiente – CONAMA. A aplicação das regras heurísticas permitiu definir a rota de pirólise como promissora para a aplicação energética da casca do café. Pelo método evolutivo identificaram-se onze vizinhos estruturais. Este estudo pode contribuir para o desenvolvimento sustentável e promover o aperfeiçoamento de novas tecnologias para o aproveitamento de biomassa.

Palavras-Chave: Engenharia de Processos. Síntese Estrutural. Heurístico. Pirólise. Secagem.

ABSTRACT

In Brazil, the northern region of the State of Espírito Santo is the main coffee production area (Coffee robusta). The processing of coffee beans generates around 50% in mass of husks, which most often are improperly disposed. The objective of this work was to optimize the technological use of the coffee husk for obtaining energy based on heuristic and evolutionary methods. The structural synthesis for power generation through states tree resulted in 3,780 plausible flowcharts to be analyzed including four technological routes (anaerobic digestion, direct combustion, gasification and pyrolysis). Experimental results helped to define the flowchart embryo in the process. Statistical analysis for the characterization results of biomass proved, by Tukey test at 95% confidence, that there were significant differences between the analyzed samples for the density, moisture content, fixed carbon and higher calorific value. Besides the characterization husk particle size analysis identified the model that best fit the data, and the RRB (*Rosin, Rammler and Bennet*) and GGS (*Gates, Gaudin and Schumann*) for from husk processing via dry and wet respectively, and the diameter Average Sauter was 2.69 mm and 1.24 mm. The drying testes were carried out in a convective dryer with parallel and following a factorial design in order to evaluate the effect of temperature and speed on the moisture. Among the models semi-empirical applied the model that better represented the experimental data was of Overhults, confirmed by technical breakdown rival models, from the non-linearity measures. The drying study was important to evaluate the parameters and was helpful in creating the heuristic rules. During the combustion tests, were monitored the emissions of carbon monoxide, carbon dioxide, sulfur dioxide, nitrogen oxides and hydrocarbons. However, more studies are needed for the effective implementation of combustion, since the gaseous emissions exceed the limits established by CONAMA's norm. The application of heuristic rules allowed define the route of pyrolysis as promising for energy application of the coffee husks. The application of the evolutionary method generated eleven structural neighbors. This study can contribute to sustainable development and promote the development of new technologies for the energetic use of biomass.

Keywords: Process Engineering. Structural synthesis. Heuristic. Pyrolysis. Drying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Principais países produtores de café no ano de 2015.....	22
Figura 2.1 – Seção longitudinal do fruto do café.	27
Figura 2.2 – Etapas básicas do beneficiamento do café.	29
Figura 2.3 – Esquema geral dos produtos obtidos por conversão tecnológica da biomassa.....	37
Figura 2.4 – Modelo de representação por superestrutura.	45
Figura 2.5 – Modelo de representação gráfica por árvore de estados.	46
Figura 3.1 – Etapas básicas para rota de: (a) Biodigestão anaeróbia; (b) Combustão direta, Gaseificação e Pirólise.....	50
Figura 3.2 – Casca do café in natura: (a) via úmida; (b) via seca.	50
Figura 3.3 – Bancada para secagem: Secador túnel de vento.....	55
Figura 3.4 – Bandeja de secagem utilizada no procedimento – (a) sem envolvimento. (b) com envolvimento.....	55
Figura 4.1 – Árvore de Estados reduzida – Rota: Combustão direta.	62
Figura 4.2 – Árvore de Estados reduzida – Rota: Gaseificação.	62
Figura 4.3 – Árvore de Estados reduzida – Rota: Pirólise.	63
Figura 4.4 – Árvore de Estados reduzida – Rota: Biodigestão anaeróbia.	63
Figura 5.1 – Distribuição de frequência das partículas da casca do café.	64
Figura 5.2 – Distribuição cumulativa das partículas da casca do café.	65
Figura 5.3 – Ajuste para a casca do café derivada do processamento via seca.....	67
Figura 5.4 – Ajuste para a casca do café derivada do processamento via úmida.....	67
Figura 5.5 – Análise imediata.....	69
Figura 5.6 – Poder Calorífico Superior.	70

Figura 5.7 – Adimensional de umidade em função do tempo – (a) Velocidade do ar 0,6 m/s e temperatura do ar 51,9 e 78,1°C; (b) Velocidade do ar 2,4 m/s e temperatura do ar 51,9 e 78,1°C.	71
Figura 5.8 – Adimensional de umidade em função do tempo – (a) Velocidade do ar 1,5 m/s e temperatura do ar 50, 65 e 80°C; (b) Temperatura do ar 65 °C e velocidade do ar 0,5, 1,5 e 2,5 m/s.	72
Figura 5.9 – Adimensional de umidade em função do tempo – (a) Temperatura do ar 51,9 °C e velocidade do ar 0,6 e 2,4 m/s; (b) Temperatura do ar 78,1 °C e velocidade do ar 0,6 e 2,4 m/s.	73
Figura 5.10 – Emissões de: NO _x , e SO _x em mg/Nm ³ durante o teste de combustão da casca do café.	77
Figura 5.11 – Emissões de: CO ₂ e C _x H _y , em percentual, durante o teste de combustão da casca do café.	78
Figura 5.12 – Emissões de Monóxido de Carbono durante o teste de combustão da casca do café.	78
Figura 6.1 – Algoritmo decisório para a escolha do tipo de secador.	81
Figura 6.2 – Algoritmo decisório para a escolha do tipo de compactação.	81
Figura 6.3 – Algoritmo decisório para a escolha do tipo de reator de pirólise.	82
Figura A.1 – Árvore de estados do processamento da casca do café para a geração de energia.	99
Figura D.1 – Resíduos como função dos valores preditos para a casca do café derivada do processamento via seca – (a) GGS; (b) RRB.	104
Figura D.2 – Resíduos como função dos valores preditos para a casca do café derivada do processamento via seca – LN.	105
Figura D.3 – Resíduos como função dos valores preditos para a casca do café derivada do processamento via úmida – GGS.	105
Figura D.4 – Resíduos como função dos valores preditos para a casca do café derivada do processamento via úmida – (a) RRB; (b) LN.	106

- Figura E.1** – Curvas das taxas de secagem em função da umidade da casca do café para temperatura fixa do ar de secagem de: (a) 51,9°C; (b) 65°C..... 107
- Figura E.2** – Curvas das taxas de secagem em função da umidade da casca do café para temperatura fixa do ar de secagem de 78,1°C. 108
- Figura E.3** – Curvas das taxas de secagem em função da umidade da casca do café para velocidade fixa do ar de secagem de 0,6 m/s..... 108
- Figura E.4** – Curvas das taxas de secagem em função da umidade da casca do café para velocidade fixa do ar de secagem de: (a) 1,5 m/s e (b) 2,4 m/s. 109

LISTA DE QUADROS

Quadro 6.1 – Fonte das regras heurísticas	79
Quadro 6.2 – Vizinhos Estruturais	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais Estados brasileiros produtores de café no ano de 2015.	28
Tabela 2.2 – Análise imediata da casca do café e de biomassas semelhantes.....	32
Tabela 2.3 – Poder calorífico superior da casca do café e de biomassas semelhantes.	35
Tabela 2.4 – Análise elementar da casca do café e de biomassas semelhantes.....	36
Tabela 2.5 – Teor energético dos produtos da pirólise comparado a biomassa.	42
Tabela 2.6 – Principais parâmetros operacionais para o processo de pirólise.....	42
Tabela 2.7 – Características dos reatores de pirólise.....	43
Tabela 3.1 – Especificações das peneiras.	52
Tabela 3.2 – Modelos de distribuição granulométrica.	53
Tabela 3.3 – Diâmetro médio de Sauter para cada modelo de distribuição de tamanhos.	53
Tabela 3.4 – Matriz do planejamento fatorial.....	56
Tabela 3.5 – Equações semi-empíricas de cinética de secagem.....	57
Tabela 5.1 – Valores do coeficiente de correlação e dos parâmetros para os modelos testado.	66
Tabela 5.2 – Características físico-químicas da casca do café.	69
Tabela 5.3 – Parâmetros estimados para os modelos de cinética de secagem.....	74
Tabela B.1 – Análise granulométrica das biomassas do café.....	100
Tabela C.1 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via seca: modelo GGS.....	101
Tabela C.2 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via seca: modelo RRB.....	101
Tabela C.3 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via seca: modelo LN.....	102
Tabela C.4 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via úmida: modelo GGS.....	102

Tabela C.5 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via úmida: modelo RRB.....	102
Tabela C.6 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via úmida: modelo LN.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS

a, b, c, n	Parâmetros das equações de equilíbrio	[--]
D', n	Parâmetros do modelo RRB	[--]
D ₁₀₀	Diâmetro D para X=1	[mm]
D _{15,9}	Diâmetro D para X=0,159	[mm]
D ₅₀	Diâmetro médio geométrico	[mm]
D _{63,2}	Diâmetro D para X=0,632	[mm]
D _{84,1}	Diâmetro D para X=0,841	[mm]
D _i	Diâmetro de partícula	[mm]
d _{ps}	Diâmetro médio de Sauter	[mm]
F	Distribuição de Fisher	[--]
H/C	Razão Hidrogênio-Carbono	[--]
IN	Componente intrínseco	[--]
k, m	Parâmetros do modelo GGS	[--]
M	Umidade em base seca em um dado instante	[--]
m ₀	Massa inicial	[g]
M ₀	Umidade em base seca inicial	[--]
m _{bio}	Massa de biomassa	[g]
m _c	Massa de cinzas	[g]
M _{eq}	Umidade de equilíbrio	[--]
m _{H₂O}	Massa de água	[g]
m _r	Massa residual	[g]
MR	Razão de umidade	[--]
m _{ss}	Massa de sólidos seco	[g]
n'	Número de pontos experimentais	[--]
p	Probabilidade	[--]
p'	Número de parâmetros	[--]
PCI	Poder calorífico Inferior	[MJ/kg]
PCS	Poder calorífico Superior	[MJ/kg]
PE	Componente paramétrico	[--]
R ²	Coefficiente de determinação	[--]
T _{CF}	Teor de carbono fixo	[--]
T _{CI}	Teor de cinzas	[--]

T_f	Temperatura do ar	[K]
T_v	Teor de voláteis	[--]
U	Umidade	[--]
V	Volume	[m ³]
X_{BS}	Umidade em base seca	[--]
X_{BU}	Umidade em base úmida	[--]
X_i	Fração cumulativa	[--]
x_i	Fração mássica	[--]

Símbolos Gregos

$\Gamma(r)$	Função gama	[--]
α	Nível de significância	[--]
ρ_{ap}	Massa específica aparente	[g/cm ³]
σ	Desvio-padrão geométrico	[--]

LISTA DE ABREVIACES

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	Britador secundário
CB	Briquetagem
CHONS	Carbono, Hidrognio, Oxignio, Nitrogênio e Enxofre
CI	Com integrao energética
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Peletizao
CTQ	Com tratamento químico
GC	Gerao a combustível
GGG	<i>Gates, Gaudin e Schumann</i>
GV	Gerao a vapor
LN	<i>Log-normal</i>
MF	Moinhos finos
OIC	<i>International Coffee Organization</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
RBAB	Reator de biodigesto anaeróbio em batelada
RBAC	Reator de biodigesto anaeróbio compartimentado
RBC	Reator de biodigesto anaeróbio de contato
RBHF	Reator de biodigesto anaeróbio horizontal de leito fixo
RBLE	Reator de biodigesto anaeróbio de leito expandido
RCGM	Reator de combusto de grelha móvel
RCLB	Reator de combusto de leito fluidizado borbulhante
RCLC	Reator de combusto de leito fluidizado circulante
RCS	Reator de combusto Stoker
RGCC	Reator de gaseificao de leito fixo concorrente
RGCT	Reator de gaseificao de leito fixo contracorrente
RGFC	Reator de gaseificao de fluxo cruzado
RGLB	Reator de gaseificao leito fluidizado borbulhante
RGLC	Reator de gaseificao de leito fluidizado circulante
RGLS	Reator de gaseificao de leito em suspenso
RPAV	Reator de pirólise ablativo de vrtice

RPCR	Reator de pirólise ablativo de cone rotativo
RPLB	Reator de pirólise de leito fluidizado borbulhante
RPLC	Reator de pirólise de leito fluidizado circulante
RPLF	Reator de pirólise de leito fixo
RPV	Reator de pirólise a vácuo
RRB	<i>Rosin, Rammler e Bennet</i>
SAB	Secador agitado a batelada
SB	Secador de bandejas
SC	Sem compactação
SCA	Secador com circulação de ar
SF	Secador de leito fluidizado
SI	Sem integração energética
SP	Secador pneumático
SRG	Sem redução granulométrica
SSE	Sem secagem
SSO	Secagem solar
STQ	Sem tratamento químico
UASB	Reator de biodigestão anaeróbio de fluxo ascendente
Vel.	Velocidade
VS	Palha do café
VU	Casca úmida

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
LISTA DE ABREVIACÕES	xvii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	22
1.1 ASPECTOS GERAIS	22
1.2 OBJETIVOS E ETAPAS	25
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	25
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA.....	26
2.2 O CAFEIEIRO	27
2.3 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	29
2.3.1 Tamanho das Partículas	30
2.3.2 Massa Específica	31
2.3.3 Análise Imediata	31
2.3.4 Poder Calorífico	34
2.3.5 Analise Elementar	36
2.3 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA EM ENERGIA	37
2.3.1 Biodigestão Anaeróbia	37
2.3.2 Combustão	40

2.3.3 Gaseificação	40
2.3.4 Pirólise	41
2.4 SÍNTESE DE PROCESSO	44
2.4.1 Método Heurístico	47
2.4.1 Método Evolutivo	47
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	49
3.1 SÍNTESE DA ÁRVORE DE ESTADOS	49
3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	50
3.2.1 Caracterização da casca do café	51
3.2.2 Testes de Secagem	54
3.2.3 Ensaios de combustão da casca do café	58
3.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL POR MEIO DOS MÉTODOS HEURÍSTICO E EVOLUTIVO	58
CAPÍTULO 4 – ÁRVORE DE ESTADOS GERADAS	60
4.1 SUBSISTEMAS ENVOLVIDOS	60
4.2 REPRESENTAÇÃO POR ÁRVORES DE ESTADOS	61
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE EXPERIMENTAL	64
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA DO CAFÉ	64
5.1.1 Distribuição granulométrica	64
5.1.2 Massa específica	68
5.1.3 Análise imediata e poder calorífico	68
5.2 CINÉTICA DE SECAGEM	70
5.3 COMBUSTÃO DA CASCA DO CAFÉ	76
CAPÍTULO 6 – OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL POR MEIO DOS MÉTODOS HEURÍSTICO E EVOLUTIVO	79
6.1 REGRAS HEURÍSTICAS	79

6.2 ESCOLHA DO FLUXOGRAMA-BASE	82
6.3 DETERMINAÇÃO DOS VIZINHOS ESTRUTURAIS	83
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES	85
CAPÍTULO 8 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICE A	99
APÊNDICE B.....	100
APÊNDICE C	101
APÊNDICE D	104
APÊNDICE E.....	107

CAPÍTULO 1

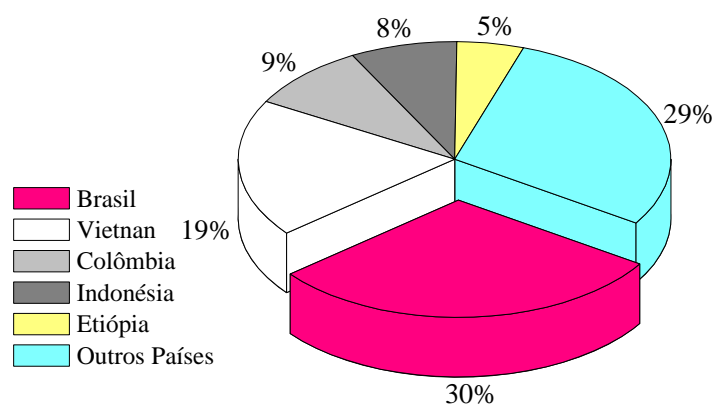
INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados a motivação à pesquisa para o desenvolvimento científico do processo de aproveitamento tecnológico da casca de café pelas técnicas de biodigestão anaeróbia, combustão direta, gaseificação e pirólise, os problemas técnicos envolvidos sob o ponto de vista interdisciplinar, o objetivo do trabalho, as etapas cumpridas e a organização da dissertação.

1.1 ASPECTOS GERAIS

Oriundo da Etiópia, centro da África, o café, pertencente ao gênero *Coffea* da família *Rubiaceae*, é amplamente cultivado e processado em todo o mundo. No ano de 2015, segundo dados da OIC (*International Coffee Organization*) e CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) o Brasil foi o principal produtor, exportador e consumidor mundial de café, sendo responsável, respectivamente, por 30,1%, 33,5% e 43,8% do mercado internacional. O gráfico da Figura 1.1 mostra os principais países produtores de café no ano de 2015.

Figura 1.1 – Principais países produtores de café no ano de 2015.



Fonte: Adaptado de OIC (2016); Conab (2016).

Os mais variados tipos de grão são cultivados obtendo todas as qualidades de bebida. De acordo com Esteves (2006), existem mais de 100 espécies de café, porém apenas duas representam importância econômica, *coffea arabica* (café arábica) e *coffea canephora* (café robusta ou conilon). As duas espécies diferem consideravelmente em preço, qualidade e aceitabilidade. Os grãos do café arábica são verde-claros e de forma oval, enquanto que os grãos de café robusta tendem a ser mais arredondados e castanhos. Após a torra e a moagem as espécies não se distinguem visualmente, sendo necessários outros critérios para discriminação (CAMPANHA, 2008).

Segundo dados da Conab (2016) o Brasil em 2015, produziu cerca de 43,2 milhões de sacas de café, sendo 32 milhões de café arábica e 11,2 milhões de café robusta. A região norte do Espírito Santo destaca-se como uma das principais produtoras de café robusta. No ano de 2015, o Estado produziu cerca de 7,8 milhões de sacas de café, o que equivale a mesma quantidade de resíduos gerados durante o processamento do café em coco, e na maioria das vezes são descartados de forma inadequada. Dessa forma, torna-se necessário buscar soluções viáveis para o seu reaproveitamento.

Silva (2012) afirma que a casca do café apresenta características desejáveis para uma possível aplicação energética, já que seu poder calorífico é próximo ao do bagaço da cana. Nos últimos anos, diversas pesquisas foram realizadas com o intuito de utilizar a casca como opção energética de baixo custo, como apresentado nos trabalhos de Saenger *et al.* (2000); Melo *et al.* (2005); Vale *et al.* (2007); Saiter (2008); Velez *et al.* (2009); Orsini (2012); Silva (2012); Protássio *et al.* (2013) e Batista (2014). Na maioria destes trabalhos, a finalidade dos autores é analisar o potencial energético do resíduo, contribuir para a substituição de combustíveis fósseis por renováveis e diminuir as preocupações do aquecimento global.

Silva (2012), em seu estudo, fez a caracterização física, termoquímica e fluidodinâmica da casca de café (*coffea arabica*), visando sua aplicação em processo de pirólise convencional, e posterior caracterização das frações líquidas e sólidas geradas. Observou que a casca do café possui um grande potencial como fonte energética para aplicação em processos de pirólise em função das propriedades do carvão e do líquido gerado em temperaturas superiores a 300 °C.

Saenger *et al.* (2000) levantaram as principais características da casca do café para o processo de combustão e observaram que os baixos teores de cinzas e de umidades são pontos favoráveis para a utilização desse resíduo agrícola em combustores. Enquanto que Velez *et al.*

(2009) apresentaram a caracterização da casca do café para o processo de gaseificação e Vale *et al.* (2007) apresentaram as características energéticas para a carbonização do resíduo.

Protássio *et al.* (2013) mostraram, em seu estudo, o potencial energético da madeira *Eucalyptus*, além dos resíduos agrícolas como casca do arroz, bagaço da cana de açúcar, casca de café e resíduos de colheita de milho. Entre os materiais estudados, encontraram na casca do café a maior densidade energética.

Orsini (2012) desenvolveu em seu trabalho um estudo que visa o aproveitamento do resíduo da lavoura cafeeira como fonte de biomassa na obtenção de hidrogênio, por meio de um processo de pirólise. Avaliou também o rendimento deste gás na mistura gasosa produzida para estimar aplicações futuras em células a combustível na geração de energia limpa.

Outras aplicações também foram estudadas, como a utilização do resíduo cafeeiro para geração de calor (energia) na secagem dos próprios grãos de café, como mostrado no trabalho de Saiter (2008) e Melo *et al.* (2005).

Analisando a diversidade de tecnologias disponíveis para a transformação da casca do café em energia, configurações distintas podem ser adotadas para a estrutura de processamento, por meio de modificações nos tipos de equipamentos de cada subsistema. A diversidade de tecnologias disponíveis gera a multiplicidade de soluções para o problema. A determinação da melhor solução possível é a essência da engenharia de processos, que compreende a síntese e a análise dos processos. A primeira compreende o conjunto de estruturas viáveis para o processo e a segunda prevê e avalia o desempenho das estruturas geradas. Dessa forma, torna-se de suma importância analisar rotas para a geração de energia elétrica com o auxílio dos métodos desenvolvidos na engenharia de processos (NASCIMENTO, 2014).

Batista (2014) analisou, em seu trabalho, três rotas para a geração de energia elétrica a partir da casca do café, por meio do método heurístico da engenharia de processos, e obteve a conversão química do tipo pirólise como rota tecnológica promissora.

De acordo com essa motivação e com base na revisão da literatura, torna-se relevante aperfeiçoar o estudo da obtenção de energia elétrica por meio das tecnologias de biodigestão anaeróbia, combustão direta, gaseificação e pirólise, aplicando conceitos da engenharia de processos, como os métodos heurístico e evolutivo. Com esses métodos, pode-se alcançar o resultado de forma eficaz, diminuindo custos e tempo de trabalho, que possibilitam obter processos mais econômicos, seguros e ambientalmente integrados (PERLINGEIRO, 2005).

1.2 OBJETIVOS E ETAPAS

O objetivo deste trabalho foi estudar as potencialidades tecnológicas para o aproveitamento energético da casca de café beneficiada, na forma de biomassa. Para isso, foram avaliadas a síntese estrutural e a otimização experimental de amostras de café robusta em laboratório de Engenharia Química. Buscou-se dar uma visão concisa de como a engenharia de processos pode influenciar na escolha da possível alternativa para o problema, já que a diversidade de tecnologias disponíveis gera uma multiplicidade de soluções. Para atingir o objetivo proposto, foram cumpridas as seguintes etapas:

- i. Escolha dos processos tecnológicos a serem estudados;
- ii. Definição dos subsistemas envolvidos no processo de obtenção de energia;
- iii. Confecção da árvore de estados;
- iv. Análise experimental da casca do café, por meio de caracterização física, química e energética, cinética de secagem, e análise dos gases de combustão;
- v. Otimização estrutural por meio de regras heurísticas (definição do fluxograma-base); e,
- vi. Identificação dos vizinhos estruturais (método evolutivo).

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A seguir apresenta-se os capítulos referentes ao desenvolvimento deste estudo. No Capítulo 2 tem-se uma revisão da literatura, na qual destacam-se: as características gerais da biomassa e da casca do café; as tecnologias de conversão da biomassa em energia e a síntese de processo. No Capítulo 3 descreve-se a metodologia experimental empregada para a realização desta pesquisa. Nos Capítulos 4, 5 e 6 apresentam-se os resultados e discussões referentes aos subsistemas envolvidos no processo e as representações por árvores de estados; caracterização da biomassa, cinética de secagem e combustão da casca do café; e a otimização estrutural por meio dos métodos heurístico e evolutivo. No Capítulo 7 expõe-se as principais conclusões referentes à pesquisa realizada. Por fim, no Capítulo 8 descrevem-se as sugestões para trabalhos futuros que visam dar continuidade à metodologia desenvolvida.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo refere-se à fundamentação teórica e revisão de literatura necessários para o desenvolvimento e compreensão desta pesquisa. Inicialmente, é descrito a forma clássica de como a problemática é abordada na literatura. Logo após, a revisão bibliográfica é direcionada às rotas tecnológicas de conversão energética. Em seguida, são abordadas as técnicas de otimização da engenharia de processos.

2.1 BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA

A Biomassa é definida como todo material orgânico de origem vegetal. Esse material deriva da reação entre gás carbônico, água e luz solar, ou seja, pelo processo de fotossíntese, o qual armazena fração de energia solar nas ligações químicas de seus componentes (SOUZA; SORDI; OLIVA, 2002).

Lora e Andrade (2004) apontam que, tanto em escala mundial como no Brasil, o potencial energético da biomassa é enorme, podendo se tornar uma das soluções para o fornecimento de eletricidade em comunidades isoladas, incentivando o desenvolvimento de atividades extrativistas sustentáveis que contribuam para o desenvolvimento destas comunidades.

Ainda, a biomassa oferece flexibilidade, pois possui diversas aplicações e pode ser usada na produção de vários combustíveis (CIESLINSKI, 2014). Ela pode ser queimada para produzir eletricidade ou calor, ou pode ser transformada (por meio de processos de conversão físicos, químicos e biológicos) em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos (AÇMA, 2003).

O uso da energia proveniente da biomassa foi relativamente superior as demais fontes energéticas durante milhares de anos. Porém em meados do século XIX sua utilização começou a diminuir devido ao aumento na demanda total de energia a partir de combustíveis fósseis (ZANETTE, 2009). Com a crise do petróleo na década de 1970, a biomassa passou a ser vista por muitos governantes e formuladores de políticas como um recurso energético viável e

doméstico com potencial para reduzir o uso de derivados de petróleo (KLASS, 1998; ZANETTE, 2009). Além disso, a redução no consumo dos derivados do petróleo também diminui a emissão de gases promotores do efeito estufa (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; CIESLINSKI, 2014).

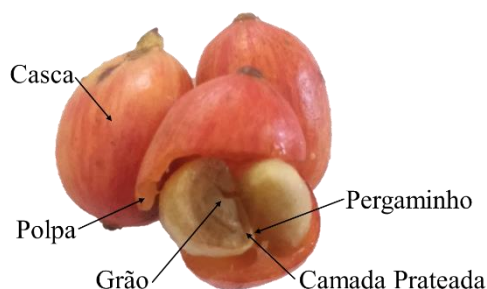
Segundo Barbosa (2009), uma grande vantagem de utilizar biomassa como fonte energética está associada com a mitigação das emissões de CO₂. Os compostos liberados durante o processamento da biomassa são sequestrados pelos novos plantios fechando o ciclo do carbono, portanto, não contribuem com o efeito estufa, sendo uma prática ecologicamente correta.

2.2 O CAFEIEIRO

O café originário da Etiópia, centro da África, é uma planta dicotiledônea da família das *Rubiáceas* e do gênero *Coffea* (SAATH, 2010). No mundo, existem cerca de 100 espécies de cafeeiros, das quais apenas duas são importantes economicamente: *Coffea arabica* L. (café arábica) e *Coffea canephora pierre* (café robusta). A espécie *Coffea arabica* é adaptada às condições de clima tropical de altitude com umidade e temperatura amenas. Já a espécie *Coffea canephora*, adapta-se às regiões equatoriais baixas, quentes e úmidas (MATIELLO, 1991; BRITO, 2008; LEITE, 2013).

O fruto do cafeeiro apresenta coloração vermelha ou amarela quando maduro. O fruto (Figura 2.1) é formado pelo grão (endosperma + embrião), película prateada, mesocarpo (polpa ou mucilagem), endocarpo (ou pergaminho) e, finalmente, pelo epicarpo (casca).

Figura 2.1 – Seção longitudinal do fruto do café.



Fonte: O autor.

Em 2015, a produção no Brasil concentrou-se principalmente nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia e Paraná, sendo Minas Gerais o maior produtor de café arábica e o Espírito Santo o maior produtor de café robusta (CONAB, 2016). Na Tabela 2.1, pode ser observado o ranking da produção de café no ano de 2015 dos principais estados produtores.

Tabela 2.1 – Principais Estados brasileiros produtores de café no ano de 2015.

Estados	Tipo de Café	Produção total (em mil sacas)
Minas Gerais – MG	Arábica	21.996
	Robusta	337
Espírito Santo – ES	Arábica	2.939
	Robusta	7.761
São Paulo – SP	Arábica	4.064
Bahia – BA	Arábica	1.162
	Robusta	1.184
Rondônia – RO	Robusta	1.724
Paraná – PR	Arábica	1.290

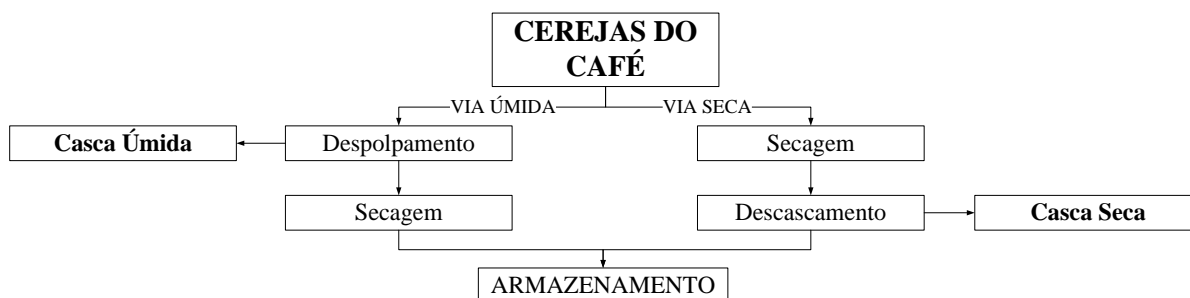
Fonte: Adaptado de Conab (2016).

O café é a bebida sem álcool mais consumida e apreciada no mundo, porém o seu beneficiamento gera grandes quantidades de resíduos sólidos e líquidos, os quais podem ocasionar graves problemas, como poluição de rios e solos, proliferação de pragas e, principalmente, o não aproveitamento de uma matéria-prima que pode ter uma composição nutricional rica (BRUM, 2007; VENTURIM, 2002).

Segundo Bruno e Oliveira (2008), o tipo de resíduo gerado depende do processamento ou preparo dos frutos de café após a colheita. Duas metodologias podem ser empregadas: por via seca ou por via úmida (Figura 2.2). Na forma de preparo por via seca, o fruto é seco na sua forma integral, dando origem ao café em coco. Já na forma de preparo por via úmida, originam-

se os cafés despulpados, desmucilados e descascados. Em ambos os processamentos gera-se a casca como principal resíduo.

Figura 2.2 – Etapas básicas do beneficiamento do café.



Fonte: O autor.

No Brasil, cerca de 75% do café é processado por “via seca”, sendo que em média para cada tonelada de grãos produzida, uma tonelada de cascas é gerada (SILVA, 2012). Segundo Brito (2008), o tratamento e destinação desses resíduos elevam o custo de produção. Normalmente, esse resíduo é utilizado como fertilizante, por ser rico em potássio, e em alimentação de ruminantes. Porém, o manejo inadequado do potássio no solo pode ocasionar perdas significativas, ocasionando problemas ambientais e econômicos (ZOCA, 2012). Além disso, é considerado antinutricional aos ruminantes por conter substâncias tóxicas como cafeína, taninos e pólifenóis (SOCCOL, 2002; ANDRADE, 2011). Dessa forma, torna-se necessário buscar soluções viáveis para o seu reaproveitamento.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

A composição da biomassa é quem determina a escolha do processo de conversão energética e as dificuldades de processamento subsequentes que possam surgir (VIEIRA, 2012). Dentre os principais fatores que devem ser observados e analisados, quanto a características de biomassas, pode-se citar: tamanho das partículas, massa específica, análise imediata (umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo), poder calorífico e análise elementar (CHONS). Sánchez (2010) afirma que a caracterização da biomassa deve ainda ser baseada em

seu uso e trazer elementos para a compreensão das propriedades determinantes, particulares a cada aplicação.

2.3.1 Tamanho das Partículas

O tamanho e a forma das partículas são os fatores que mais exercem influência sobre a taxa de aquecimento de combustíveis sólidos, grau de escoabilidade, massa específica, porosidade do leito fixo e comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado, fazendo deste um dos parâmetros passíveis de controle rigoroso (LIRA, 2012; SILVA, 2012).

A granulometria das partículas pode ser representada pelo diâmetro médio de Sauter ($\overline{d_{pS}}$) representado pela Equação 2.1. Segundo Kuni e Levenspiel (1991), o diâmetro de Sauter leva em consideração tanto a área superficial das partículas quanto o volume de partículas em contato com o fluido.

$$\overline{d_{pS}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{D_i} \right)} \quad (2.1)$$

em que: x_i é a fração mássica da partícula retida na peneira i ; e D_i é o diâmetro das partículas retidas, ou seja, é a média aritmética das aberturas das malhas das peneiras i e $i-1$.

Para Foust *et al.* (1982), as dimensões das partículas encontradas dependem dos dispositivos de medida adotados. A granulometria pode ser determinada por três métodos principais: peneiramento utilizando peneiras padronizadas, microscopia eletrônica e o método físico baseado na velocidade de sedimentação das partículas. Sendo o método das peneiras padronizadas o mais comum entre eles. De acordo com Macías-García, Cuerda-Correa e Díaz-Díez (2004) os resultados de uma análise de distribuição de tamanhos de partículas podem ser obtidos na forma diferencial ou na forma cumulativa. Frare *et al.* (2000) afirma que a forma cumulativa é a mais usual devido a facilidade de interpretar resultados quanto à continuidade de dados e ajuste de modelos matemáticos que descrevem a distribuição de tamanhos de partículas.

2.3.2 Massa Específica

Segundo Barreto (2008), a massa específica de uma biomassa pode ser dividida em massa específica propriamente dita, aplicável a matéria contínua, e massa específica aparente, a qual se aplica a resíduos devido aos diversos pedaços do mesmo material ocupando o volume. Para a biomassa do café, aplica-se o conceito de massa específica aparente (ρ_{ap}), a qual é definida como a massa total de biomassa armazenada em um volume, dividido pelo valor desse volume, conforme pode ser observado na Equação 2.2.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{bio}}{V} \quad (2.2)$$

em que: m_{bio} é a massa de biomassa em kg; e V é o volume que a biomassa ocupa em m^3 .

2.3.3 Análise Imediata

A análise imediata refere-se ao conteúdo percentual de umidade, matéria volátil (facilidade de queima), carbono fixo (fração de carvão após o aquecimento da amostra) e cinzas em relação a uma determinada amostra (OLIVEIRA, 2006).

Conforme Barreto (2008), dependendo do procedimento adotado para fazer as quantificações, diferentes resultados podem ser obtidos no final. Desta forma, foram criadas normas de ensaios, com intuito de padronizar os testes de maneira que resultados feitos em diferentes laboratórios sejam comparáveis.

Na Tabela 2.2, podem ser observados valores típicos referentes a análise imediata da casca do café comparada a biomassas semelhantes. Dentre os resíduos citados verifica-se que a casca do café possui grande potencial de transformação energética, devido ao baixo teor de cinzas e elevado teor de voláteis comparados a biomassas semelhantes. Segundo Friedl *et al.* (2005), o valor da volatilidade do combustível utilizado e o teor de cinzas são propriedades importantes para a concepção e controle das plantas térmicas. Nota-se divergência nos valores para uma mesma biomassa, como, por exemplo, o bagaço de cana-de-açúcar. Tal fato é justificado em função a variedade da biomassa e as características do solo.

Tabela 2.2 – Análise imediata da casca do café e de biomassas semelhantes.

Biomassa	Umidade (% bu)	Teor de Voláteis (% bs)	Teor de Cinzas (% bs)	Teor de Carbono Fixo (% bs)
Casca de café	8,20 ^a	77,00 ^a	5,60 ^a	17,40 ^a
	17,20 ^b	73,06 ^b	6,50 ^b	19,90 ^b
Bagaço de cana-de-açúcar	51,01 ^c	83,66 ^c	3,20 ^c	13,15 ^c
	10,50 ^b	66,40 ^b	18,80 ^b	14,80 ^b
Casca de arroz	8,47 ^c	61,81 ^c	21,24 ^c	16,95 ^c
	11,60 ^b	64,20 ^b	20,60 ^b	15,20 ^b
Serragem de madeira	13,50 ^d	85,60 ^d	0,18 ^d	14,22 ^d
	9,95 ^e	83,83 ^e	0,19 ^e	15,91 ^e
Palha de milho	8,00 ^f	69,74 ^f	6,90 ^f	15,36 ^f
	12,60 ^d	81,70 ^d	1,58 ^d	16,72 ^d

Fonte: Adaptado de ^a Domínguez *et al.* (2007); ^b Cieslinski (2014); ^c Chaniwala e Parikh (2002); ^d Horst (2013); ^e Rabello e Pécora (2011); ^f Tumuluru *et al.* (2011).

– Umidade

O teor de água indica a fração de água presente no material e pode ser expressa tanto na base úmida quanto na base seca. Essa quantidade pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem (Equação 2.3, base úmida e Equação 2.4, base seca).

$$X_{BU} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{SS}} \quad (2.3)$$

$$X_{BS} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{SS}} \quad (2.4)$$

em que: X_{BU} e X_{BS} é o teor de umidade em base úmida e base seca, respectivamente; m_{H_2O} é a massa de água, a qual é dada pela diferença entre a massa inicial e a massa de sólidos seco ($m_{H_2O} = m_0 - m_{SS}$); m_{SS} é a massa de sólidos seco.

Segundo Brito e Barrichelo (1979), a determinação do teor de umidade é de grande importância, devido a água possuir um efeito depreciativo no poder calorífico, uma vez que necessita de calor para evaporá-la. O teor de água na biomassa também dificulta a ignição e a queima e aumenta os produtos indesejáveis da combustão (COUTO, 2014; CIESLINSKI, 2014).

– *Teor de Voláteis*

O teor de voláteis (T_V) é a parte da biomassa que evapora como um gás (incluindo umidade) por aquecimento. O seu teor pode ser quantificado medindo-se a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, conforme mostra a Equação 2.5 (MCKENDRY, 2002; BARRETO, 2008).

$$T_V = \frac{m_0 - m_r}{m_0} \quad (2.5)$$

em que: m_0 é a massa inicial da amostra e m_r é a massa residual, ambos em g.

A matéria volátil possui papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão da biomassa, além de determinarem a estabilidade da chama durante a combustão (CORTEZ *et al.*, 2008)

– *Teor de Cinzas*

O teor de cinzas (T_{CI}) é caracterizado pelos resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos sob rígido controle de massa, temperatura, tempo e atmosfera. O teor de cinzas pode ser calculado por meio da Equação 2.6 (BARRETO, 2008).

$$T_{CI} = \frac{m_c}{m_0} \quad (2.6)$$

em que: m_0 é massa inicial de amostra e m_c é a massa de cinzas, ambos em g.

Segundo Brand (2010), alta concentração de cinzas pode diminuir o poder calorífico, causar perda de energia e também afetar a transferência de calor sendo, portanto, necessária a sua remoção.

– *Teor de Carbono Fixo*

O teor de carbono fixo (T_{CF}) representa a massa restante após a liberação dos materiais voláteis, excluindo as cinzas e a umidade (Equação 2.7). Compõe-se principalmente de carbono, embora possa conter outros elementos não liberados durante a volatilização (MCKENDRY, 2002).

$$T_{CF} = 100 - (T_V + T_{CI}) \quad (2.7)$$

2.3.4 Poder Calorífico

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante o processo termoquímico do combustível. O valor quantitativo desse parâmetro pode variar de acordo com o teor de água da biomassa (CIESLLINSKI, 2014). Erol, Haykiri-Acma e Küçükbayrak (2010) afirmaram que o poder calorífico é a mais importante propriedade de um combustível, pois o projeto e controle de um combustor de biomassa são profundamente dependentes do poder calorífico da mesma.

O poder calorífico de um combustível pode ser dividido em Superior (PCS) e Inferior (PCI), dependendo do estado da água (líquido ou vapor) ao final do processo. O PCS representa o calor liberado, ou seja, a quantidade máxima de energia que pode ser obtida da transferência de calor do combustível. Enquanto que o PCI refere-se à água gerada no estado de vapor, ou seja, energia foi consumida no processo de evaporação (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1998; KLAUTAU, 2008; VIEIRA, 2012; LIRA, 2012).

A principal diferença entre PCS e PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível e a água de formação obtida a partir da oxidação do hidrogênio do combustível (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). O poder Calorífico Superior ou Inferior de uma determinada biomassa é a propriedade físico-química mais importante a considerar para a escolha de um processo termoquímico.

O PCS de uma biomassa pode ser determinado por meio experimental ou calculado a partir de correlações que utilizam valores das análises elementares ou imediata. Já o PCI só pode ser determinado se for conhecido o poder calorífico superior do combustível e a relação entre as quantidades de átomos de hidrogênio-carbono (H/C) existentes no combustível (BARRETO, 2008).

Parikh, Channiwala e Ghosal (2005) apresentaram correlações para estimar o PCS de 100 biomassas diferentes por meio de análise imediata. Dentre as correlações obtidas a de menor erro absoluto é mostrada na Equação 2.8.

$$PCS = 84,5104 \cdot T_{CF} + 37,2601 \cdot T_V - 1,8642 \cdot T_{CI} \quad (2.8)$$

em que: PCS o poder calorífico superior em MJ/kg; T_{CF} teor de carbono fixo; T_V teor de voláteis; e T_{CI} teor de cinzas.

Na Tabela 2.3, nota-se os valores para o poder calorífico da casca do café comparada a biomassas semelhantes. Verifica-se que a casca do café possui elevado poder calorífico quando comparado a casca do arroz, e possui valores de PCS próximos ao bagaço de cana-de-açúcar, o que favorece a sua aplicação como opção energética.

Tabela 2.3 – Poder calorífico superior da casca do café e de biomassas semelhantes.

Biomassa	PCS (MJ/kg)	Referência
Casca de café	17,90	Domínguez <i>et al.</i> (2007)
	18,61	Cieslinski (2014)
Bagaço de cana-de-açúcar	15,96	Cieslinski (2014)
	18,73	Chaniwala e Parikh (2002)
Casca de arroz	14,34	Cieslinski (2014)
	14,69	Chaniwala e Parikh (2002)
Serragem de madeira	19,77	Horst (2013)
	17,63	Rabello e Pécora (2011)
Palha de milho	17,63	Horst (2013)
	16,28	Tumuluru <i>et al.</i> (2011)

2.3.5 Análise Elementar

A composição elementar de uma determinada amostra apresenta dados sobre a composição química do material, ou seja, fornece teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre. Segundo Cortez, Lora e Gómez (2008), a análise elementar é uma das características de maior importância no combustível, pois constitui a base para a análise dos processos de combustão, tais como o cálculo do volume de ar necessário ao processo, volume de gás gerado e entalpia de reação.

McKendry (2002) aponta que quanto maior a proporção de oxigênio e hidrogênio, em comparação com o carbono, o valor energético de um combustível é reduzido, devido a menor energia contida em ligações carbono – oxigênio e carbono – hidrogênio, do que em ligações carbono-carbono. Segundo Demirbás (2001), a baixa densidade energética da biomassa *in natura* em comparação com combustíveis fósseis em geral é caracterizada pelo seu alto teor de oxigênio.

Os valores de análise elementar da casca do café comparada a resíduos semelhantes estão disponibilizados na Tabela 2.4. É notável as divergências encontradas entre diferentes autores. Esse fato ocorre devido as condições climáticas das regiões, o manejo e a variedade da cultura.

Tabela 2.4 – Análise elementar da casca do café e de biomassas semelhantes.

Biomassa	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Casca de café	47,30 ^a	6,40 ^a	37,70 ^a	2,70 ^a	0,30 ^a
	43,90 ^b	4,80 ^b	49,60 ^b	1,60 ^b	0,10 ^b
Bagaço de cana-de-açúcar	45,48 ^c	5,96 ^c	45,21 ^c	0,15 ^c	-
	46,80 ^d	5,90 ^d	45,70 ^d	0,50 ^d	0,30 ^d
Casca de arroz	38,50 ^c	5,20 ^c	34,61 ^c	0,45 ^c	-
	40,10 ^d	4,70 ^d	38,30 ^d	0,40 ^d	0,20 ^d
Serragem de madeira	48,10 ^d	6,50 ^d	44,20 ^d	0,80 ^d	0,20 ^d
	48,80 ^e	6,00 ^e	-	<0,50 ^e	-
Palha de milho	45,40 ^d	6,70 ^d	45,10 ^d	0,90 ^d	0,30 ^d
	42,60 ^f	5,06 ^f	36,52 ^f	0,83 ^f	0,09 ^f

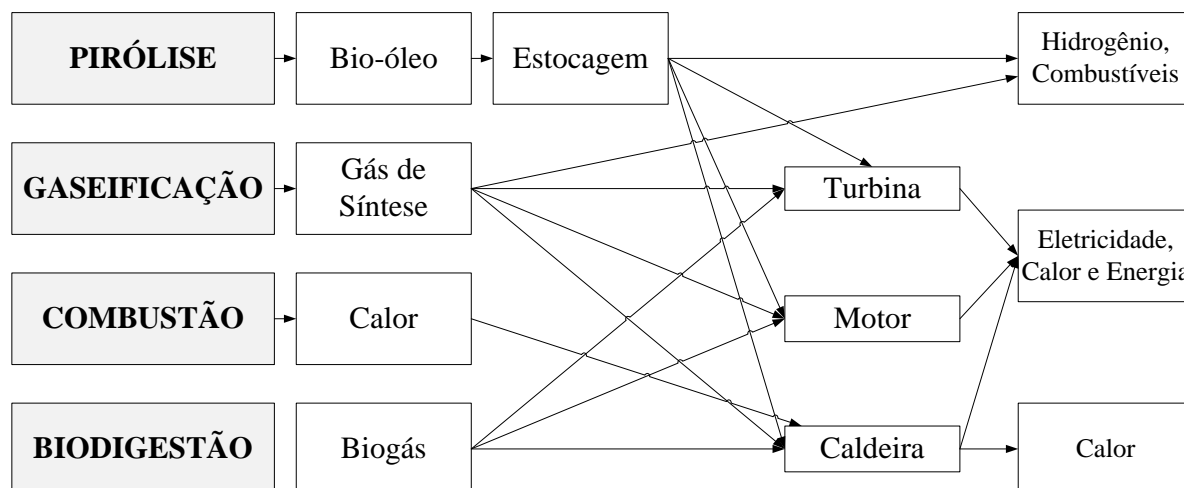
Fonte: Adaptado de ^aDomínguez *et al.* (2007); ^bWerther *et al.* (2000); ^cChaniwala e Parikh (2002); ^dHorst (2013); ^eRabello e Pécora (2011); ^fTumuluru *et al.* (2011).

2.3 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA EM ENERGIA

Atualmente, a biomassa pode ser utilizada de forma direta ou por meio da conversão em um produto intermediário, como combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos que possuem a finalidade de gerar eletricidade, fornecer calor ou mover automóveis. Esta conversão pode ser feita por meio de um vasto conjunto de tecnologias que incluem diferentes tipos de reatores, caldeiras, motores, turbinas, entre outros (ARAÚJO, 2008).

A tecnologia de aproveitamento dos resíduos tem grande valor para a preservação ambiental, tanto pela utilização de matéria-prima abundante e renovável como pela redução da poluição atmosférica e a redução do volume de lixo depositado no meio ambiente. Os principais processos tecnológicos que utilizam biomassa em suas conversões são digestão anaeróbia, combustão direta, gaseificação e pirólise. Cada um desses processos conduz a um conjunto de produtos que utilizam diferentes configurações de equipamentos, operando de modo particular. Na Figura 2.3 observa-se os principais produtos gerados em cada um desses processos.

Figura 2.3 – Esquema geral dos produtos obtidos por conversão tecnológica da biomassa.

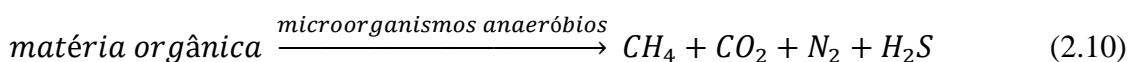


Fonte: Adaptado de Bridgwater (2003).

2.3.1 Biodigestão Anaeróbia

A biodigestão anaeróbia é um processo biológico que envolve a decomposição da matéria orgânica e inorgânica, por diferentes microrganismos, na ausência de oxigênio livre (DEMIRBÁS, 2001). Essa decomposição se dá por diversas reações bioquímicas, cujo produtos

finais são a liberação de biogás e a produção de biofertilizantes. A degradação microbiológica da matéria em um ambiente anaeróbio só pode ser obtida por microorganismos capazes de utilizar moléculas, ao invés de oxigênio, como receptores de hidrogênio, conforme mostra a reação completa representada pela Equação 2.10 (PINTO, 2008).



A decomposição bacteriana da matéria orgânica sob condições anaeróbias é constituída de três etapas. Na *etapa 1* (hidrólise enzimática) as bactérias liberam no meio as enzimas extracelulares que irão promover a hidrólise de partículas (quebra de partículas no meio aquoso), transformando moléculas grandes em menores e mais solúveis. Na *etapa 2* (fase ácida) as substâncias formadas anteriormente são atacadas pelas bactérias acetogênicas e acidogênicas (bactérias produtoras de ácidos) formando ácidos orgânicos, dióxido de carbono, acetatos e H₂. Por fim, na *etapa 3* (fase metanogênica), as bactérias metanogênicas atuam sobre o hidrogênio e o dióxido de carbono transformando-os em biogás, sendo formado principalmente por metano e dióxido de carbono (DOTTO; WOLFF, 2012; BONTURI; DIJK, 2012).

Após a produção de biogás, principal produto da digestão anaeróbia, a biomassa fermentada deixa sob a forma líquida, rica em material orgânico (húmus), o biofertilizante que, se aplicado ao solo, melhora as qualidades físicas, químicas e biológicas deste material (DOTTO; WOLFF, 2012).

Segundo Pinto (2008), os grupos bacterianos envolvidos nos processos que estão misturados e essa diversidade depende basicamente do tipo de matéria orgânica adicionada ao digestor. As bactérias formadoras de ácidos são bastante resistentes e capazes de suportar súbitas mudanças das condições externas e de alimentação, ao contrário das bactérias metanogênicas, bastante suscetíveis a alterações nas condições. Existem diversos fatores que influenciam no desempenho de processos de digestão anaeróbia e nenhum parâmetro pode ser considerado isoladamente no monitoramento destes sistemas. Entre os parâmetros de controle mais relevantes, estão: temperatura, pH e alcalinidade.

A *temperatura*, considerada como um dos fatores ambientais mais importantes na digestão anaeróbia, afeta os processos biológicos de diversas maneiras. Ela atua na velocidade do metabolismo das bactérias, no equilíbrio iônico e na solubilidade dos substratos. Em geral, quanto menor a temperatura, menor a velocidade das reações e, portanto, maior o tempo

necessário para a digestão anaeróbia, devido a menor atividade dos microrganismos (CASSINI, 2008).

A *acidez e alcalinidade* são fatores importantes para um bom funcionamento do processo anaeróbio, uma vez que afetam o equilíbrio entre as espécies e todo sistema de degradação da digestão anaeróbia. Segundo Cassini (2008), o pH do processo deve ser mantido entre 6 e 8, podendo ser considerado ótimo de 7 a 7,2. Para valores de pH inferiores a 6, a atividade das bactérias formadoras de metano cai rapidamente, interrompendo sua atividade em um pH por volta de 5,5. Já a elevação do pH dificulta a multiplicação dos fungos patogênicos.

As principais vantagens dos sistemas anaeróbios são o reduzido consumo de energia por unidade de matéria orgânica removida, a baixa produção de lodo e a geração de biogás. Dentre as principais desvantagens estão o longo período de partida, longo tempo de retenção requerido, sensibilidade as variações de parâmetros tais como pH, temperatura e alcalinidade, sensibilidade dos microrganismos à toxicidade de alguns compostos e a possível emissão de odores ofensivos (CASSINI, 2008).

Os reatores de biodigestão anaeróbia são compostos, basicamente, de duas partes: um recipiente (tanque) para abrigar e permitir a digestão da biomassa, e o gasômetro (campânula), para armazenar o biogás. É uma tecnologia simples, na qual a principal preocupação é a manutenção das propriedades fermentativas da biomassa bacteriana. O modelo de biodigestor depende do tipo de aplicação, e também, do nível tecnológico disponível. No geral, o biodigestor deve ser concebido com o objetivo de satisfazer determinadas demandas específicas, como, por exemplo, o saneamento, o atendimento de uma demanda energética e a utilização do material biodegradado como fertilizante (PINTO, 2008).

Segundo Pinto (2008), os biodigestores podem ser classificados de acordo com o tipo de construção, modo de operação, a forma de armazenamento do gás, fluxo das substâncias em fermentação, temperatura de operação, com ou sem agitação e com ou sem dispositivos para agregar a biomassa bacteriana. As alternativas de construção de biodigestores são muitas e se resumem, de maneira geral, em uma combinação das diferentes características, como tipo de operação, forma de construção, armazenamento de biogás, faixa de temperatura e fluxo do material.

2.3.2 Combustão

A combustão direta é a tecnologia mais comum de aproveitamento da biomassa, ocorre em temperaturas elevadas ($>800^{\circ}\text{C}$), por meio de um conjunto de reações de radicais livres mediante as quais o carbono e o hidrogênio no combustível reagem com o oxigênio formando calor, gases e água (ABREU; OLIVEIRA; GUERRA, 2010). Segundo Loo e Koppejan (2008), o processo de combustão é normalmente muito ineficiente, sendo que sua eficiência depende de vários fatores tais como, o combustível, umidade, poder calorífico e densidade energética do combustível.

A combustão, quando comparada com outras formas de disposição final, como pirólise, gaseificação e/ou biodigestão, apresenta vantagens, tais como: redução do volume de sólidos descartados e custos de eliminação, e a destruição ou redução da matéria orgânica presente por meio do potencial de recuperação da energia que permite a venda a preços atraentes. Por outro lado, a combustão pode resultar em emissões gasosas poluentes o que exige elevado investimento de capital para a eliminação de cinzas e monitoramento da composição (MAGALHÃES *et al.*, 2008)

Segundo Soares (1995), quando a combustão da biomassa é completa, as substâncias liberadas são H_2O e CO_2 , além do calor. Entretanto, na prática, a combustão dificilmente é completa e, com isso, existe liberação também de material particulado, CO e outros produtos considerados poluentes. Cieslinski (2014) afirma que as emissões desses poluentes pela combustão incompleta são, em grande parte, influenciadas pelo equipamento e pelo processo, ou seja, curto tempo de residência na câmara de combustão, baixa temperatura de combustão ou insuficiente mistura combustível-ar (carência de oxigênio).

A combustão direta da biomassa pode ser dividida em secagem, pirólise e oxidação, sendo que durante essas etapas ocorrem: (i) evaporação da água; (ii) queima dos compostos voláteis; e (iii) queima do carbono fixo. Segundo Loo e Koppejan (2008), o processo em geral pode ser contínuo ou em bateladas, e a adição de ar pode ser efetuada por circulação forçada de ar ou de forma natural.

2.3.3 Gaseificação

A gaseificação pode ser definida como o processo de conversão térmica mediante o qual a biomassa sólida se converte em um gás (comumente denominado gás de síntese ou *syngas*)

por meio da oxidação parcial a temperaturas elevadas (Gómez, 2002). O gás produzido é classificado quanto ao poder calorífico em: baixo (até 5 MJ/Nm³), médio (5 a 10 MJ/Nm³) e alto (10 a 40 MJ/Nm³) (KINTO, 2001; FIGUEIREDO, 2012).

É um processo termoquímico de decomposição da matéria orgânica, de fluxo contínuo ou batelada, sendo a técnica mais comum a oxidação parcial utilizando um agente de gaseificação (oxigênio, ar ou vapor quente), em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para combustão), para a produção de *syngas* cujos principais componentes são monóxido de carbono e hidrogênio (HIGMAN; BURGT, 2008; ABREU; OLIVEIRA; GUERRA, 2010).

No processo de gaseificação ocorrem complexas reações ainda não bem conhecidas em sua totalidade. O processo ocorre em uma atmosfera pobre em oxigênio, com temperaturas de reação diferentes, onde o substrato orgânico passa por quatro etapas físico-químicas distintas: (i) secagem, (ii) pirólise, (iii) redução e (iv) combustão (HENRIQUES, 2004).

A composição dos gases e a produção concomitante de combustíveis sólidos (carvão) e líquidos condensáveis (pirolenhosos) dependem de diversos fatores, como por exemplo: tipo de forno de gaseificação, forma de fornecimento de energia ao processo, introdução ou não de vapor de água junto com o comburente (ar, O₂), tempo de residência, sistema de retirada de gases e outros produtos, além do tipo de matéria orgânica utilizada no processo (FEAM, 2012).

Os gaseificadores para a produção de *syngas* têm maior custo, pois o gás deve ser limpo e de alta qualidade, com baixos teores de alcatrão e pirolenhosos, exigindo unidades especiais de limpeza (BRAND, 2010; FEAM, 2012). Em geral, os reatores de gaseificação podem ser classificados conforme a direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação, em contracorrente, concorrente ou fluxo cruzado, e segundo o tipo do leito utilizado, em fixo, fluidizado ou arrastado (FIGUEIREDO, 2012). Para Cortez, Lora e Gómez (2008), os gaseificadores concorrentes são os mais indicados na produção de gás para alimentação de motores de combustão interna já que reduz o alcatrão da zona de oxidação, devido às altas temperaturas nesta região.

2.3.4 Pirólise

Para Figueiredo (2011), a pirólise, também chamada de carbonização é o mais simples e mais antigo processo de conversão do material orgânico em produto energético. Este é um processo de decomposição térmico que ocorre em atmosfera inerte com elevadas temperaturas,

gerando assim três fases: gases, líquidos e sólidos. A pirólise converte a biomassa de baixa densidade energética e outros materiais orgânicos em uma fração líquida e sólida com alto conteúdo energético e uma fração gasosa com conteúdo relativamente baixo de energia (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Teor energético dos produtos da pirólise comparado a biomassa.

	Biomassa	Fração Líquida (Bio-óleo)	Fração Sólida (Carvão vegetal)	Fração Gasosa
Densidade Energética	~ 1,5 GJ/m ³	~ 22 GJ/m ³ ou ~ 17 MJ/kg	~ 18 MJ/kg	~ 6 MJ/kg

Fonte: Adaptado de Laird *et al.* (2009).

Segundo Stolz (2010), na pirólise os parâmetros de reação variam com a finalidade de definir condições ideais que resultem em altos rendimento da fração desejada e eficácia do processo pirolítico. Leva-se em consideração também o teor de material volátil, as condições e o tipo de pirólise e o modelo do reator (VIEIRA, 2014). A gama dos principais parâmetros operacionais referentes a pirólise convencional, rápida e flash, são dados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Principais parâmetros operacionais para o processo de pirólise.

Parâmetros Operacionais	Pirólise convencional	Pirólise Rápida	Pirólise Flash
Temperatura final de Pirólise (°C)	600	~500	<650
Taxa de Aquecimento (K/s)	0,1 – 1	10 – 200	> 1000
Tamanho da Partícula (mm)	5 – 50	< 1	< 0,2
Tempo de Residência do sólido (s)	300 – 1800	< 2	< 1

Fonte: Adaptado de Demirbás (2002) e Basu (2010).

Segundo Basu (2010), os parâmetros operacionais influenciam diretamente no produto principal. A pirólise convencional favorece a produção de todos os três tipos de produtos da pirólise (carvão, bio-óleo e gás), enquanto que a pirólise rápida maximiza a produção da fração líquida (bio-óleo). A pirólise flash gera três produtos principais, o bio-óleo, químico e gás.

Almeida (2008) afirma que a pirólise rápida para produção de líquidos é uma rota bastante atrativa uma vez que o líquido, de maior densidade, pode ser transportado, estocado e manuseado com maior facilidade e menor custo que a biomassa sólida de menor densidade.

O produto da pirólise depende principalmente da concepção do pirolisador. Segundo Almeida (2008), o reator é o elemento principal no processo de pirólise, e representa 10 a 15% de todo o capital aplicado. Na Tabela 2.7 apresenta-se as características básicas de alguns dos diferentes tipos de reatores e processos em que a reação de pirólise pode ser realizada.

Tabela 2.7 – Características dos reatores de pirólise.

	Leito Fluidizado Borbulhante	Leito Fluidizado Circulante	Leito Fixo	Cone Rotativo (Ablativa)	Vórtice (Ablativa)	Reator a Vácuo
Produto Principal (%)	Líquido (70 – 75)	Líquido (75 - 83)	Carvão (35)	Líquido (60 – 70)	Líquido (65)	Líquido (35–50)
Diâmetro da Partícula (mm)	2 – 6	~2	~1	~0,2	~20	20 – 50
Temperatura (°C)	500 – 550	500	~500	-	625	450
Tempo de Residência (s)	0,5 - 2	0,001 – 5	3600	0,5	0,05 – 0,1	-
Taxa de Aquecimento	-	1000 °C/s	5 – 100 °C/s	5000 K/s	-	-

Fonte: Adaptada de Ringer, Putsche e Scahill (2006); Basu (2010); Gupta e Demirbás (2010); Neves *et al.* (2011).

Os reatores de leito fluidizado são de fácil acesso e construção. O reator que apresenta bom rendimento para a obtenção de líquido é o leito fluidizado borbulhante, bem como o reator de cone rotatório. Entretanto, este segundo apresenta complexidade no sistema de operação, sendo necessário estar conectado a um segundo reator para a queima do material sólido gerado para fornecer calor ao reator de pirólise (STOBBE, 2011).

2.4 SÍNTESE DE PROCESSO

A engenharia de processos é a área da Engenharia Química que surgiu da necessidade de sistematizar o projeto de processos. Segundo Takamatsu (1983), pode ser definida como o campo acadêmico e tecnológico relacionado com metodologias de decisões da engenharia química. Essas metodologias devem ser responsáveis por indicar como planejar, projetar e controlar qualquer tipo de operação da unidade, além de sugerir a forma de operar.

Segundo Klatt e Marquardt (2009), a abordagem de sistemas foi adaptada com sucesso e refinada para atender às necessidades de concepção, controle e operação de sistemas de processos químicos em uma forma holística. Para Perlingeiro (2005) os sistemas de engenharia de processos são formados por elementos (equipamentos) e conexões (correntes), e esses possuem como finalidade a transformação de uma matéria-prima em um produto de interesse.

A criação de um sistema fabril pode ser considerada como um problema de projeto, cuja resolução é constituída dos seguintes subproblemas: geração do conjunto de estruturas viáveis para o sistema e previsão e avaliação do desempenho de cada estrutura gerada. O primeiro subproblema é chamado de Síntese e o segundo de Análise (ZAKON; PESSOA, 2000).

A Síntese é a etapa criativa do projeto, que trata da sua concepção. Essencialmente é um problema combinatório, caracterizado pela multiplicidade de soluções, pois basta trocar um elemento ou uma conexão para se obter um sistema diferente com um desempenho também diferente. Nessa etapa os equipamentos são escolhidos de acordo com as funções exigidas no processo (PERLINGEIRO, 2005). Babi *et al.* (2015) afirmam que o objetivo da síntese de processo é encontrar a melhor rota de processamento, entre inúmeras alternativas, para converter a matéria-prima em produto específico, sujeito a critérios de desempenho pré-definidos.

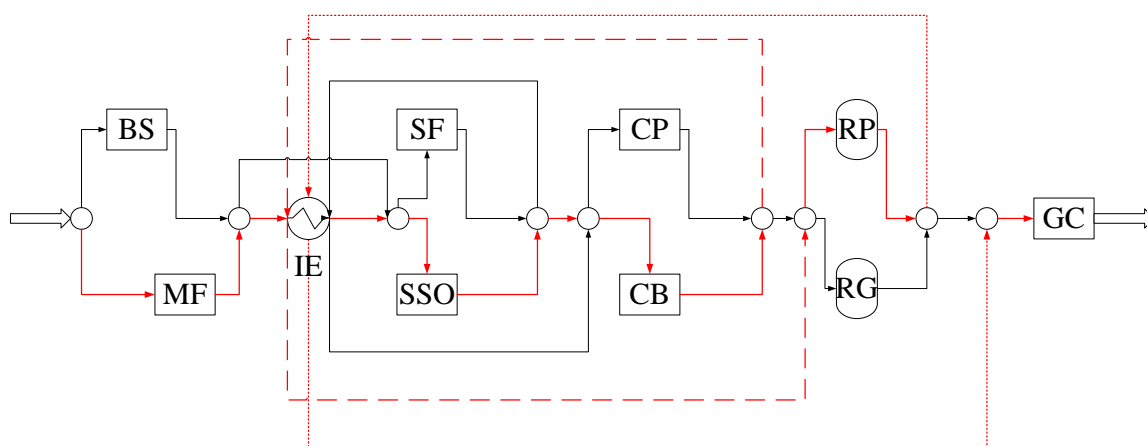
Cada um dos fluxogramas alternativos gerados na etapa de síntese tem que ser submetido a uma análise para se identificar aquele que exhibe o melhor desempenho. Sendo assim a Análise pode ser dada como a divisão de um sistema em um determinado número de subsistemas identificando suas características (TAKAMATSU, 1983; PERLINGEIRO, 2005).

Um dos problemas principais na síntese de novos processos químicos é a quantidade de configurações possíveis, da ordem de 10^4 a 10^9 (DOUGLAS, 1988; MAIA, 2001). Segundo Perlingeiro (2005), uma forma de solução é a possível sistematização do projeto de processos.

Primeiramente, o processo é decomposto em subproblemas tecnológico (rotas), estrutural (síntese) e paramétrico (análise), a serem resolvidos coordenadamente. Em seguida, podem ser representados por superestruturas e por árvores de estado, a qual demonstram todas as possíveis rotas tecnológicas para o aproveitamento residual.

A representação por superestrutura (Figura 2.4) é um fluxograma formado por todos os equipamentos passíveis de utilização num processo, com todas as suas conexões. Para Steimel *et al.* (2014), não é possível representar manualmente as superestruturas para casos mais complexos. Dessa forma utiliza-se uma linguagem baseada em palavras-chave ou de uma interface gráfica denominada *drag-and-drop* para a geração automática de superestruturas do processo. Tula, Eden e Gani (2015) afirmam que o programa gera uma superestrutura que contém todas as combinações de fluxograma do processo, por meio de um algoritmo combinatório. As técnicas de otimização para esse método, como a síntese e a análise, devem ser executadas concomitantemente, resultando no fluxograma ótimo.

Figura 2.4 – Modelo de representação por superestrutura.



Nota: BS, MF, IE, SF, SSO, CO, CB, RP, RG e GC representam britador secundário, moinhos finos, integração energética, secador de leito fluidizado, secagem solar, peletização, briquetagem, reator de pirólise, reator de gaseificação e geração a combustível, respectivamente.

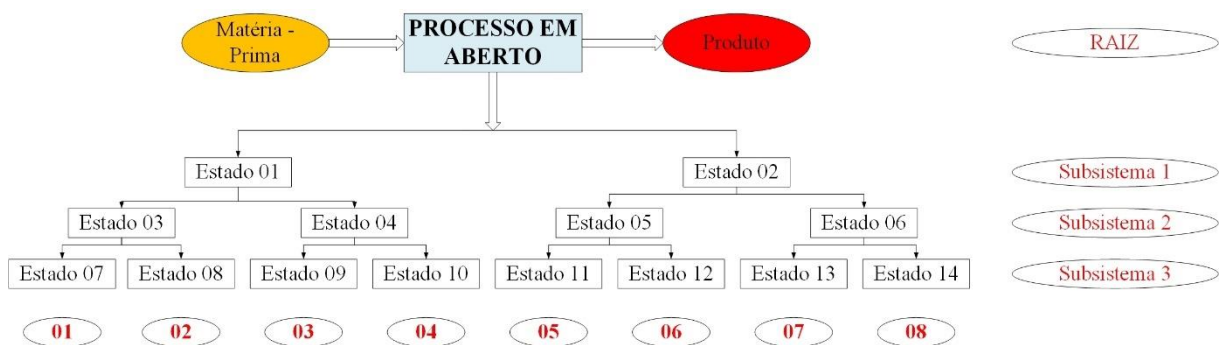
Fonte: O autor.

Perlingeiro (2005) afirma que a partir de um certo nível de complexidade, a abordagem por superestrutura não é recomendada devido aos problemas de convergência resultantes do número de equipamentos, de equações, de variáveis, e de restrições a que estas são submetidas. Assim, a representação gráfica por árvores de estado surge como um recurso para a reprodução do problema. Trata-se de uma representação com a forma de uma árvore invertida com raiz,

ramos e folhas. Na raiz da árvore, encontra-se a finalidade do processo que é a produção de um produto hipotético e nos ramos cada nível corresponde a um subsistema ou etapa do processo.

Na Figura 2.5 tem-se um exemplo de representação gráfica por árvores de estado, em que a raiz (estado 0) representa a matéria-prima para o processo (processo em aberto), e os ramos representam as distintas configurações do processo para chegar ao produto final (por exemplo, estado 7 a 14). Os estados são representados por cada vértice da árvore.

Figura 2.5 – Modelo de representação gráfica por árvore de estados.



Fonte: O autor.

Diante a multiplicidade de soluções, torna-se de suma importância analisar rotas com o auxílio dos métodos heurísticos e evolutivos, desenvolvidos na engenharia de processos. A resolução do problema pode ser orientada pela árvore de estados, por meio de um processo de busca conduzido em cada ramo, a partir da raiz. Segundo Perlingeiro (2005), a importância da representação fica evidente, pois, graças a ela, é possível varrer todas as soluções possíveis sem repetições e sem o risco de omitir a solução ótima.

A análise por meio da busca orientada por árvores de estado tem o intuito de determinar a combinação de processos para a obtenção do produto final. Para Cremaschi (2015), deve-se elaborar uma função objetivo para que seja adotada ao varrer os ramos da árvore. Na maioria dos casos, essa função é dada pelo custo mínimo de cada etapa, mas também pode ser definida por meio do consumo de energia mínimo, rendimento máximo do processo, segurança ou eficiência energética.

2.4.1 Método Heurístico

Segundo Tula, Eden e Gani (2015), a abordagem heurística é o método mais comumente empregado para resolver problemas de processos, devido à facilidade de aplicação. Esse método depende de um conjunto de regras práticas, baseadas na experiência acumulada em projetos e na bibliografia científica sobre o assunto. A busca resulta em apenas um fluxograma a analisar.

Carvalho (1995) afirma que o método heurístico se baseia em regras intuitivas e que proporciona um meio rápido, fácil e simples de seleção. Todavia, podem ocorrer contradições durante a aplicação das regras. Nesse caso, deve-se optar pela heurística que parecer mais conveniente ao processo. A aplicabilidade do método é resultado da simplicidade e da alta capacidade de selecionar as melhores sequências de tecnologias diante da multiplicidade de configurações geradas.

Para Anantharaman (2011), as regras heurísticas e suposições com base na experiência e nos critérios técnicos usuais têm sido usados em todos os aspectos de engenharia, e a síntese de processo não é exceção. O método tem como objetivo reduzir o espaço de solução. Uma desvantagem ao método, é que ao contrário de outras metodologias de projeto de processos, a técnica heurística precisa ser constantemente atualizada, já que a importância relativa dos diversos fatores de concepção será radicalmente alterada no futuro. Dessa forma, será necessário reavaliar continuamente as heurísticas e outras premissas de projeto à luz das práticas de mudança, restrições e economia antes de serem utilizadas.

No geral, a resolução do problema, por meio da técnica heurística consiste em aplicar em cada estado, a regra que se mostra mais apropriada nas circunstâncias vigentes naquele estado, resultando o estado seguinte. Segundo Perlingeiro (2005), a solução obtida não é necessariamente a ótima, mas, dependendo da qualidade das regras utilizadas, ela pode estar próxima da ótima. Dessa forma, o fluxograma-base encontrado por meio das regras heurísticas deve ser submetido a uma análise, por meio do método evolutivo com o intuito de aprimorar a solução já existente.

2.4.1 Método Evolutivo

As regras evolutivas consistem em determinar os fluxogramas vizinhos que diferem apenas por um único elemento estrutural. Em seguida, são submetidos a uma análise de custo, tomando-se como novo fluxograma-base o vizinho de menor custo. Esse processo é repetido

até que não se encontrem mais fluxogramas de menor custo. A estratégia evolutiva serve para guiar a resolução na direção mais promissora, evitando-se a aplicação desordenada das regras evolutiva (PERLINGEIRO, 2005).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A obtenção de energia elétrica a partir da biomassa do café robusta pode ser realizada por diversas estruturas de processo. Dentre as possíveis rotas tecnológicas para o aproveitamento energético da biomassa, foram selecionadas para o estudo as rotas de biodigestão anaeróbia, combustão direta, gaseificação e pirólise. A estruturação do projeto inicia pela organização de suas ações segundo os seus subsistemas.

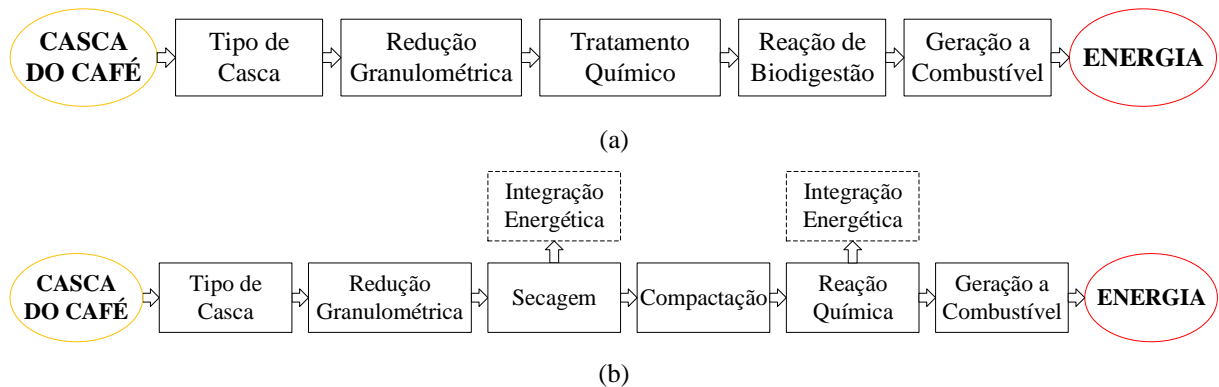
Dessa forma, neste capítulo são apresentadas metodologias para: (i) definição dos subsistemas envolvidos; (ii) elaboração da árvore de estados; (iii) análise experimental, como preparação das amostras da biomassa, determinações das variáveis de processo, composição da casca do café, testes de secagem e combustão; (iv) definição do fluxograma base; e (v) determinação dos vizinhos estruturais.

3.1 SÍNTESE DA ÁRVORE DE ESTADOS

A obtenção da energia elétrica a partir da casca do café pode ser realizada por distintas etapas. Diante da complexidade do projeto em questão e o objetivo de realizar uma análise mais completa das tecnologias de conversão energética, o projeto foi sistematizado por meio da construção de árvores de estados de forma a representar as rotas tecnológicas, os subsistemas envolvidos e os equipamentos utilizados em cada subsistema, conforme pesquisa na literatura.

A confecção da árvore de estados inicia pela raiz (estado 0), seguida dos ramos, os quais representam as distintas configurações do processo para chegar ao produto final (energia). Cada nível abordado corresponde a um subsistema ou etapa do processo e cada vértice corresponde a um estado do problema. Para a representação gráfica, os ramos foram estabelecidos a partir das etapas básicas mostradas na Figura 3.1. Cada etapa (subsistema) foi composta pelas principais tecnologias existentes no mercado.

Figura 3.1 – Etapas básicas para rota de: (a) Biodigestão anaeróbia; (b) Combustão direta, Gaseificação e Pirólise.



Fonte: O autor.

3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos foi utilizado a casca do café robusta, também conhecido como conilon, provenientes de dois tipos de processamento: via úmida – café despulpado, e via seca – palha do café. Na Figura 3.2 tem-se os dois tipos de cascas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 3.2 – Casca do café *in natura*: (a) via úmida; (b) via seca.



Fonte: O autor.

As biomassas foram coletadas no mês de junho de 2015. As cascas provenientes da despulpa foram fornecidas por uma fazenda localizada no interior da cidade de São Gabriel da Palha – ES, e posteriormente foram armazenadas em sacos de polietileno a temperatura de

- 18°C. A casca do café, proveniente da via seca, foi adquirida no interior da cidade de Jaguaré – ES e armazenadas em sacos plásticos a temperatura ambiente.

As cascas de café despulpadas, antes dos experimentos de caracterização e secagem, foram retiradas do freezer e conservadas sob refrigeração por 12 horas para que o descongelamento ocorresse de forma uniforme. Posteriormente, a biomassa foi mantida por 30 minutos em temperatura ambiente para que entrasse em equilíbrio.

3.2.1 Caracterização da casca do café

As cascas do café foram caracterizadas por meio da determinação do diâmetro médio, massa específica, análise imediata (umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) e poder calorífico superior. Todos os testes foram realizados em triplicata para garantir maior confiabilidade nos valores obtidos. As medidas foram submetidas estatisticamente à análise de variância e às médias comparadas pelo teste de Tukey, em nível significância de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Os dados foram analisados por meio do *software* Assistat, versão 7.7 beta 2016.

– Distribuição Granulométrica

O diâmetro médio das partículas foi determinado por meio da técnica de peneiramento em peneiras vibratórias. Primeiramente, as biomassas foram secas em estufa a $105 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Após secagem foram medidos cerca de 100 gramas de amostra e transferida para o topo do conjunto de peneiras. O reostato do equipamento foi ajustado na posição oito e realizou o peneiramento por dez minutos. Para o teste, foi utilizado o conjunto de sete peneiras Tyler de marca Bertel, com aberturas entre 0,18 e 8 mm, mais o fundo, conforme especificações representadas na Tabela 3.1. A partir da obtenção da fração mássica e do diâmetro das partículas retidas em cada peneira, foi possível determinar o diâmetro médio de Sauter (Equação 2.1) para as cascas do café *in natura*.

$$\overline{d_{pS}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{D_i} \right)} \quad (2.1)$$

Tabela 3.1 – Especificações das peneiras.

Número da peneira Tyler (mesh)	Abertura da malha (mm)
--	8
--	6,3
4	4,75
7	2,8
10	1,7
20	0,85
80	0,18
Fundo	< 0,18

Fonte: O autor.

Posteriormente, o resultado da análise granulométrica foi ajustado a modelos de distribuições de tamanho de partículas por meio de análises de regressão não linear. Foram testados os modelos de distribuição Gates, Gaudin e Schumann (GGS), Rosin, Rammler e Bennet (RRB) e Log-normal (LN) apresentados na Tabela 3.2.

A partir do modelo de distribuição granulométrica que melhor representou as amostras de casca de café, foi possível calcular o diâmetro médio de Sauter por meio das expressões apresentadas na Tabela 3.3 e compara-los ao calculado pela Equação 2.1.

$$\overline{d_{ps}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{D_i} \right)} \quad (2.1)$$

Tabela 3.2 – Modelos de distribuição granulométrica.

Método	Equação
Gates, Gaudin e Schumann (GGS)	$X_i = \left(\frac{D_i}{k}\right)^m$ <p>Sendo: $D_i \leq k$; $m > 0$; $k = D_{100}$</p>
Rosin, Rammler e Bennet (RRB)	$X_i = 1 - \exp[-(D_i/D')^n]$ <p>Sendo: $n > 0$; $D' = D_{63,2}$</p>
Log-Normal (LN)	$X_i = \frac{1}{2} [1 + \text{erf}(Z_i)]$ $Z_i = \frac{\ln(D_i/D_{50})}{\sqrt{2} (\ln \sigma)}$ $\text{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z \exp(-y^2) dy$ $\sigma = \frac{D_{84,1}}{D_{50}} = \frac{D_{50}}{D_{15,9}} \geq 1$

Nota: D_i o diâmetro de partícula; X_i a fração cumulativa com diâmetro menor que D ; k e m parâmetros do modelo GGS; n e D' parâmetros do modelo RRB; D_{50} diâmetro médio geométrico; D_{100} diâmetro D para $X = 1$; $D_{63,2}$ diâmetro D para $X = 0,632$; $D_{84,1}$ diâmetro D para $X = 0,841$; $D_{15,9}$ diâmetro D para $X = 0,159$; σ desvio-padrão geométrico.

Fonte: Cremasco (2012).

Tabela 3.3 – Diâmetro médio de Sauter para cada modelo de distribuição de tamanhos.

Modelo	Equação
Gates, Gaudin e Schumann (GGS)	$d_{ps} = k \left(\frac{m-1}{m}\right)$ <p>Sendo: $m > 1$</p>
Rosin, Rammler e Bennet (RRB)	$d_{ps} = \frac{D'}{\Gamma(1 - 1/n)}$ <p>para $n > 1$</p> $\Gamma(r) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{r-1} dx$
Log-normal (LN)	$d_{ps} = D_{50} \exp\left(-\frac{1}{2} \ln^2 \sigma\right)$

Nota: d_{ps} o diâmetro médio de Sauter; k e m parâmetros do modelo GGS; n e D' parâmetros do modelo RRB; D_{50} diâmetro médio geométrico; σ desvio-padrão geométrico; $\Gamma(r)$ função gama.

Fonte: Cremasco (2012).

– *Massa específica*

A massa específica foi determinada pelo método da picnometria. O picnômetro, após ser calibrado com água destilada, foi preenchido com a amostra até aproximadamente um terço de seu volume. Anotou-se a massa do conjunto e em seguida cobriu a amostra com água e deixou de repouso por 72 horas para preenchimento dos poros. Após o período completou o volume do picnômetro e registrou sua massa. O procedimento foi realizado em triplica.

– *Análise imediata*

A análise imediata foi realizada de acordo com a norma E870-82 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Esta análise permite quantificar os teores de água, matéria volátil, cinzas e carbono fixo. A umidade foi determinada em estufa, S250SD *Biopar*, à temperatura de $105 \pm 1^\circ\text{C}$ por 24 horas. O teor de voláteis e cinzas foi realizado em forno mufla *Spencer*.

– *Poder calorífico superior (PCS)*

O poder calorífico superior foi determinado por estimativa, com base nos resultados de carbono fixo, teor de voláteis e cinzas, conforme a Equação 2.8, citada por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005).

$$PCS = 84,5104 \cdot T_{CF} + 37,2601 \cdot T_V - 1,8642 \cdot T_{CI} \quad (2.8)$$

3.2.2 Testes de Secagem

As secagens foram realizadas em um secador convectivo, tipo túnel (Figura 3.3) com medidas de massa automatizada em intervalos de três minutos, até atingir o equilíbrio higroscópico com as condições do ar de secagem. Após o término da secagem, foi medida a massa da amostra e inserida em uma estufa de convecção natural a temperatura de $105 \pm 1^\circ\text{C}$, por um período de 24 horas, para a determinação da massa de sólidos seco, e conseqüentemente, obter o teor de água para cada tempo de secagem.

Figura 3.3 – Bancada para secagem: Secador túnel de vento.

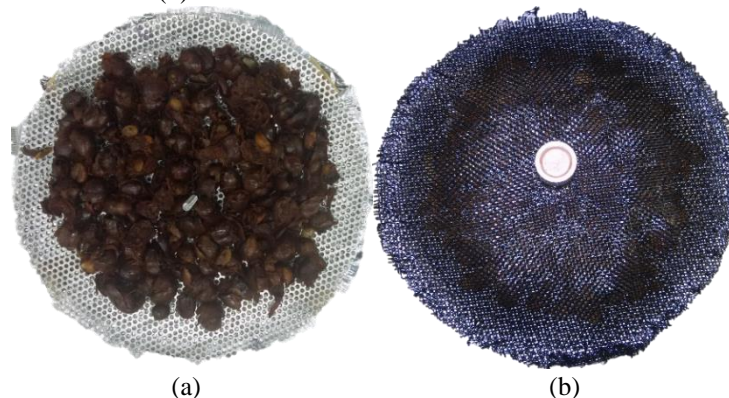


Fonte: O autor.

A temperatura do ar de secagem foi monitorada por sensores tipo Pt100, ligado a um controlador de temperatura que manipula a potência da resistência elétrica ao longo do experimento, mantendo a temperatura do sistema em valor pré-estabelecido (*set point*). A velocidade do ar de secagem foi aferida, para cada teste, mediante um termo anemômetro de ventoinha, com precisão de 3% da leitura 0,05 m/s.

Para a realização dos testes de secagem, foram medidos cerca de 40 gramas de casca de café e distribuídas em camada fina, uniformemente em bandeja inoxidável perfurada, coberta com tela de sombreamento 35% confeccionada em polietileno de alta densidade (Figura 3.4). O envolvimento foi realizado para não ocorrer perda de massa.

Figura 3.4 – Bandeja de secagem utilizada no procedimento – (a) sem envolvimento. (b) com envolvimento.



Fonte: O autor.

O processo de secagem em camada fina foi realizado a partir do planejamento composto central, elaborado no software *Statistica*, para duas variáveis independentes temperatura (50 –

80 °C) e velocidade (0,5 – 2,5 m/s), com o intuito de avaliar de forma mais precisa a influência das variáveis na umidade da casca. O planejamento experimental resultou em quatro testes nos pontos fatoriais (combinações entre os níveis +1 e -1), quatro axiais (combinações entre $\pm 1,15$ e o nível central) e três repetições no ponto central (nível 0), totalizando os 11 experimentos apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Matriz do planejamento fatorial.

Ensaio	Variáveis Reais	
	Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)
1	51,9	0,6
2	51,9	2,4
3	78,1	0,6
4	78,1	2,4
5	50,0	1,5
6	80,0	1,5
7	65,0	0,5
8	65,0	2,5
9	65,0	1,5
10	65,0	1,5
11	65,0	1,5

Fonte: O autor.

Por meio dos dados de secagem obtidos em laboratório e com o auxílio do software *Origin*[®] 8.0 versão demonstração foi determinada a taxa de secagem para a casca do café. Para o ajuste matemático das curvas de secagem, foram testadas equações semi-empíricas (Tabela 3.5), por meio de análises de regressão não linear pelo método *Levenberg-Marquardt*, utilizando o software *Statistica*.

Tabela 3.5 – Equações semi-empíricas de cinética de secagem

Método	Equação
Lewis (1921)	MR=exp(-K.t) Sendo K= a.exp(-b/T)
Page (1949)	MR=exp(-K.t ⁿ) Sendo K= a.exp(-b/T)
Henderson e Henderson (1968)	MR=c.[exp(-K.t) + 1/9.exp(-9.K.t)] Sendo K= a.exp(-b/T)
Overhults <i>et al.</i> (1973)	MR=exp[-(K.t) ⁿ] Sendo K= exp(a + b/T)
Brooker <i>et al.</i> (1974)	MR=c.exp(-K.t) Sendo K= a.exp(-b/T _f)

Nota: T_f a temperatura do ar em Kelvin; t é o tempo em segundos e a, b, c e n parâmetros a serem estimados. MR é o adimensional de umidade, definido como $MR=(M-M_{eq})/(M_0-M_{eq})$, em que M é a umidade em base seca em um dado instante, M₀ e M_{eq} são, respectivamente, as umidades em base seca inicial e de equilíbrio.

Para verificar o grau de ajuste dos modelos considerou a magnitude do coeficiente de determinação (R²), a quantificação do vício relativo de Box (BOX, 1971) e as medidas de curvaturas (BATES & WATTS, 1980). Para o cálculo das medidas de curvatura de Bates e Watts e do vício de Box, foi utilizado o programa Fortran adaptado de Ratkowsky (1983).

Por meio das medidas de curvatura, foi possível avaliar a significância estatística dos componentes intrínseco (IN), associado à característica do modelo, e paramétrico (PE), associado a não linearidade devido ao efeito de parâmetros. Estas medidas baseiam-se na magnitude da derivada segunda do modelo em relação aos parâmetros, o que difere o caso linear do não linear. O vício de Box indica qual o parâmetro é responsável pela não linearidade do modelo (BARROZO, 1995).

A significância estatística de IN e PE foram avaliadas comparando seus valores com o raio de curvatura da região de confiança 100(1 - α)%, que é dado por $\frac{1}{2}\sqrt{F_{(p';n'-p';\alpha)}}$, em que F é a estatística de Fisher (tabelada), α o nível de significância, p' o número de parâmetros e n' o número de pontos experimentais. Valores de IN e PE menores que $\frac{1}{2}\sqrt{F}$, mostram que as medidas de curvatura possuem uma aproximação linear satisfatória sobre a região de 95% de

confiança. Para as medidas de Box considera-se um percentual de vício acima de 1% como indicador de um comportamento não linear dos parâmetros (SOUZA *et al.*, 2012).

O conhecimento da eficiência energética do processo de secagem é indispensável para a otimização dos custos operacionais. Técnicas que visam minimizar os gastos energéticos são recomendadas não somente para aspectos econômicos, mas também para evitar que energia seja dissipada no meio ambiente (STRUMILLO, JONES e ZYLLA, 2006). A eficiência de secagem pode ser estimada por meio de dados obtidos em laboratório e com o auxílio de equações que definem a eficiência como a relação entre a energia utilizada na evaporação da água presente no produto sólido pela diferença de energia na entrada e na saída do secador. Neste trabalho, utilizou-se um secador experimental cuja a eficiência é muito baixa. Porém, o conhecimento da eficiência de secagem do material em estudo será considerado em futuros trabalhos com foco no aumento da eficiência energética durante a secagem da casca do café.

3.2.3 Ensaio de combustão da casca do café

Para os ensaios de combustão foi utilizada a amostra proveniente do processamento de despulpa do café robusta. A combustão foi realizada em mufla *Spencer*, com controle de temperatura e porta semiaberta. Os gases foram medidos na parte superior da mufla em intervalos de um minuto por meio do analisador de gases portátil da marca *ECIL*. A combustão foi realizada em temperatura fixa de 800 °C. Durante os ensaios foram monitoradas as emissões de gases poluentes, como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos (C_xH_y).

3.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL POR MEIO DOS MÉTODOS HEURÍSTICO E EVOLUTIVO

Para Perlingeiro (2005), os fluxogramas alternativos gerados na etapa de síntese precisam ser submetidos a uma análise para identificar aquele que exibe o melhor desempenho. Dessa forma, foram reunidas regras heurísticas para cada subsistema, baseadas nos resultados experimentais e pesquisas na literatura referente ao processamento energético de outras biomassas, com intuito de alcançar o fluxograma próximo ao ótimo. Primeiramente foram

definidas as regras de acordo com as características da casca do café e as restrições técnicas dos equipamentos que compõem cada estado da árvore. Em seguida, fez-se uma varredura em cada ramo, a fim de determinar o fluxograma-base. No subsistema de reação química a função-objetivo analisada foi a maximização da eficiência para a geração de energia.

Logo após, por meio do método evolutivo, foram determinados os vizinhos estruturais, os quais diferem um do outro por apenas um único elemento estrutural, ou seja, aquele ramo que possui apenas um equipamento distinto de todas as etapas do processo.

CAPÍTULO 4

ÁRVORES DE ESTADOS GERADAS

A síntese é a etapa criativa do projeto. A síntese de um processo consiste na seleção dos equipamentos e na definição do fluxograma-base. Diante da complexidade do projeto em questão e o objetivo de realizar uma análise mais completa das tecnologias de conversão energética foi sistematizado, por meio da construção de uma árvore de estados de forma a representar todas as rotas tecnológicas, todos os subsistemas e os equipamentos que poderiam ser utilizados em cada subsistema, conforme pesquisa na literatura.

4.1 SUBSISTEMAS ENVOLVIDOS

Para melhor entendimento, o processo foi decomposto em subsistemas. Para as etapas de secagem e reação química (combustão direta, pirólise e gaseificação) foi adotado a opção de possuir ou não integração energética. Para melhor eficiência do processo, as etapas de secagem e compactação não se aplicam a rota de biodigestão, a etapa de tratamento químico não se aplica as rotas de combustão direta, gaseificação e pirólise, a etapa de geração a combustível não se aplica a rota de combustão e, por fim, a etapa de geração a vapor não se aplica as rotas de biodigestão anaeróbia, pirólise e gaseificação. A seguir são descritos os tipos de equipamentos a serem analisados para cada subsistema em questão.

Beneficiamento do café: Para a rota de biodigestão foi adotado somente a casca úmida (VU), proveniente da despolpa do café. As rotas de combustão, gaseificação e pirólise foram divididas em dois tipos, úmida (VU) e a seca (VS).

Redução granulométrica: Foram verificadas duas rotas, britador secundário (BS) e moinhos finos (MF). Também foi proposta a abolição desta etapa (SRG).

Secagem: Foram analisadas seis rotas, secador agitado a batelada (SAB), com circulação de ar (SCA), de bandejas (SB), fluidizado (SF), pneumático (SP) e secagem solar (SSO). Também foi avaliada a possibilidade de eliminação desta etapa (SSE).

Compactação: Neste procedimento foi abordado as etapas de peletização (CP) e briquetagem (CB), além da possibilidade de não ocorrer compactação (SC).

Tratamento Químico: Para esse subsistema foi estudada a opção com tratamento químico (CTQ) e sem tratamento químico (STQ).

Reação de Biodigestão: Foram analisados seis possíveis reatores de biodigestão, anaeróbio compartimentado (RBAC), em batelada (RBAB) e de fluxo ascendente (UASB), leito expandido (RBLE), horizontal de leito fixo (RBHF) e reator de contato (RBC).

Reação de Combustão: Para a reação de combustão, foram avaliados quatro tipos de reatores de combustão, Stoker (RCS), grelha móvel (RCGM), leito fluidizado borbulhante (RCLB) e circulante (RCLC).

Reação de Gaseificação: Neste subsistema foram avaliados seis tipos de reatores de gaseificação, leito fixo contracorrente (RGCT), concorrente (RGCC) e de fluxo cruzado (RGFC), leito fluidizado borbulhante (RGLB) e circulante (RGLC), e leito em suspensão (RGLS).

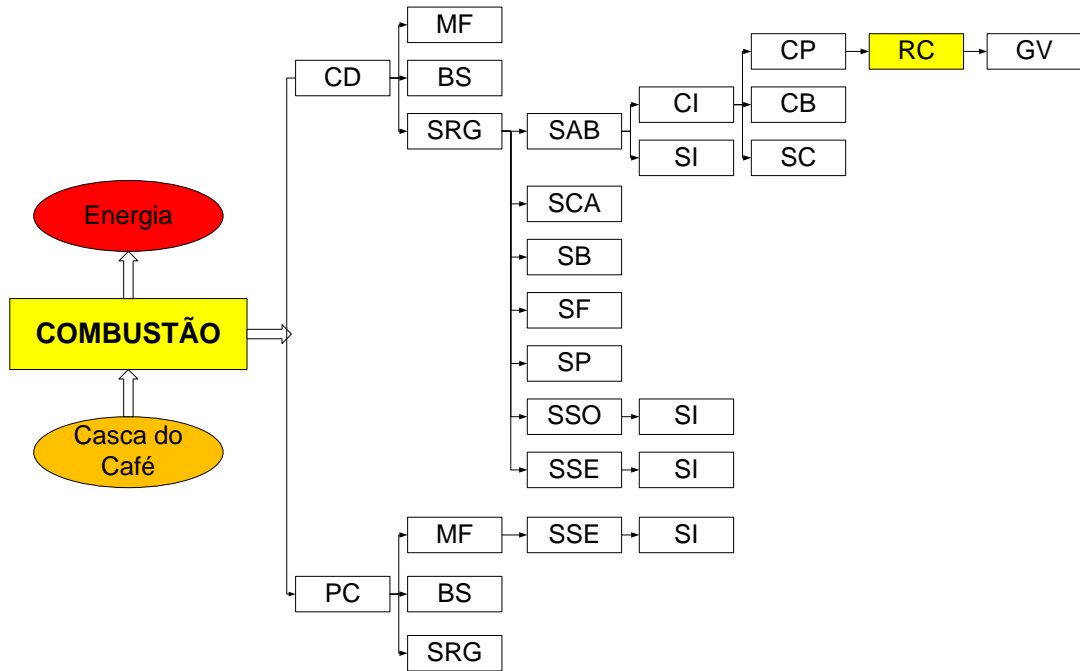
Reação de Pirólise: Para esta etapa, foram avaliados seis possíveis reatores de pirólise, leito fixo (RPLF), leito fluidizado borbulhante (RPLB) e circulante (RPLC), reator ablativo de cone rotativo (RPCR) e de vórtice (RPAV) e reator a vácuo (RPV).

Geração a vapor e Geração a combustível: Não foram verificadas outras possibilidades de geração a vapor (GV) e a combustível (GC).

4.2 REPRESENTAÇÃO POR ÁRVORES DE ESTADOS

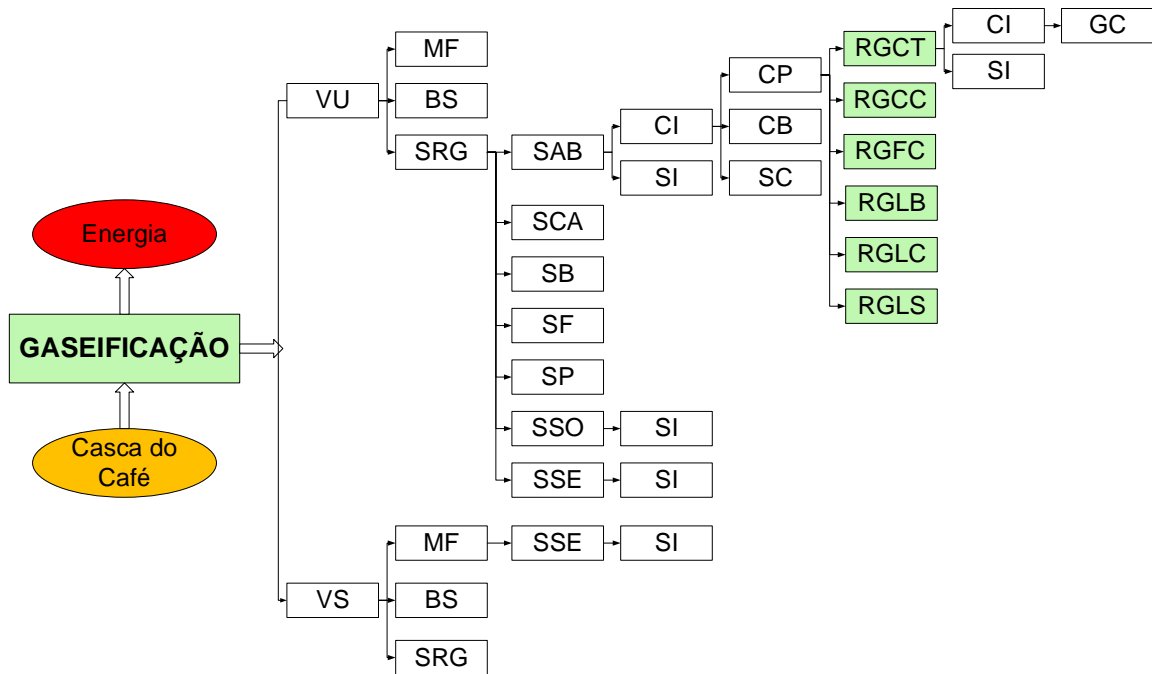
Segundo Perlingeiro (2005), em alguns casos torna-se inviável representar o problema graficamente por árvores de estados, devido a uma explosão combinatória inerente a problemas altamente complexos. Sendo assim, foram estabelecidas árvores de estados reduzida, com base nos subsistemas citados, para as rotas tecnológica de combustão direta (Figura 4.1), gaseificação (Figura 4.2), pirólise (Figura 4.3) e biodigestão anaeróbia (Figura 4.4). Cada ramo é uma possível rota do processamento da biomassa do café e não reflete, ainda, a solução do problema.

Figura 4.1 – Árvore de Estados reduzida – Rota: Combustão direta.



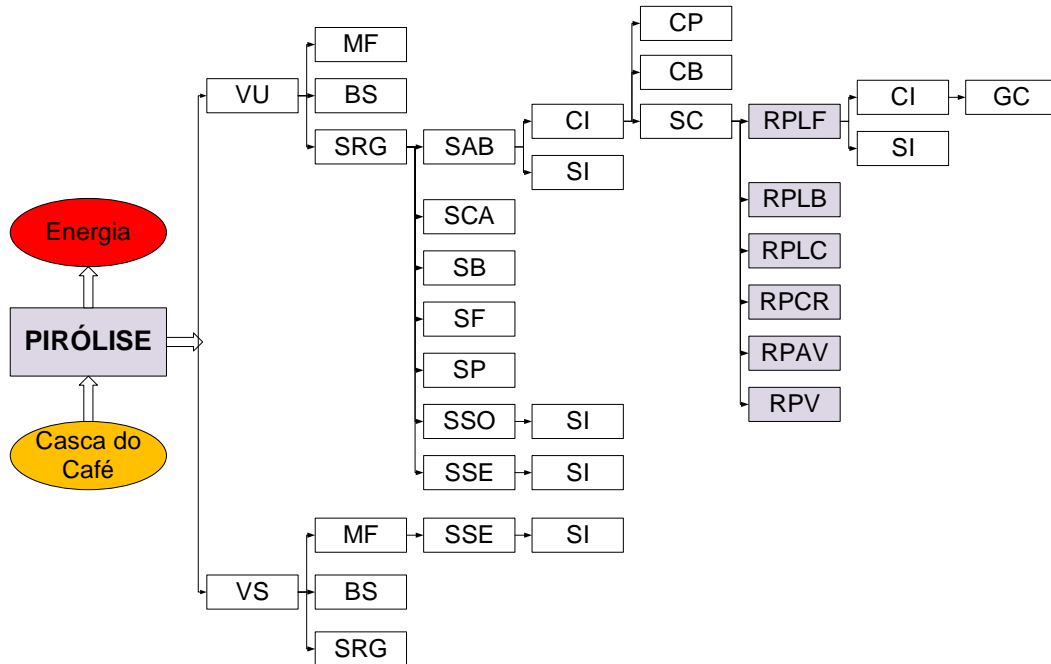
Fonte: O autor.

Figura 4.2 – Árvore de Estados reduzida – Rota: Gaseificação.



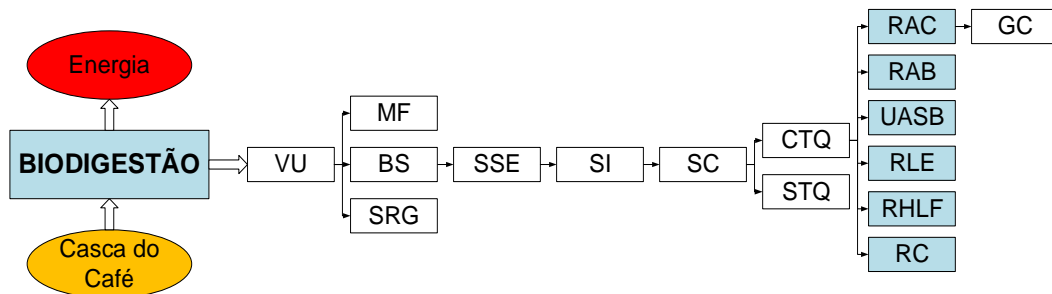
Fonte: O autor.

Figura 4.3 – Árvore de Estados reduzida – Rota: Pirólise.



Fonte: O autor.

Figura 4.4 – Árvore de Estados reduzida – Rota: Biodigestão anaeróbia.



Fonte: O autor.

A contagem dos fluxogramas é feita de acordo com o vértice final de cada ramo, ou seja, soluções completas. Dessa forma, a combinação dos subsistemas gerou 36 ramos para o processo de biodigestão anaeróbia, 936 ramos para a rota de combustão, 1404 ramos para o processo de gaseificação e 1404 ramos para a rota de pirólise, totalizando para as quatro rotas 3780 ramos. Para a rota tecnológica de biodigestão anaeróbia foi elaborada, também, a árvore de estados completa (Apêndice A), tendo em vista o número reduzido de ramos.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE EXPERIMENTAL

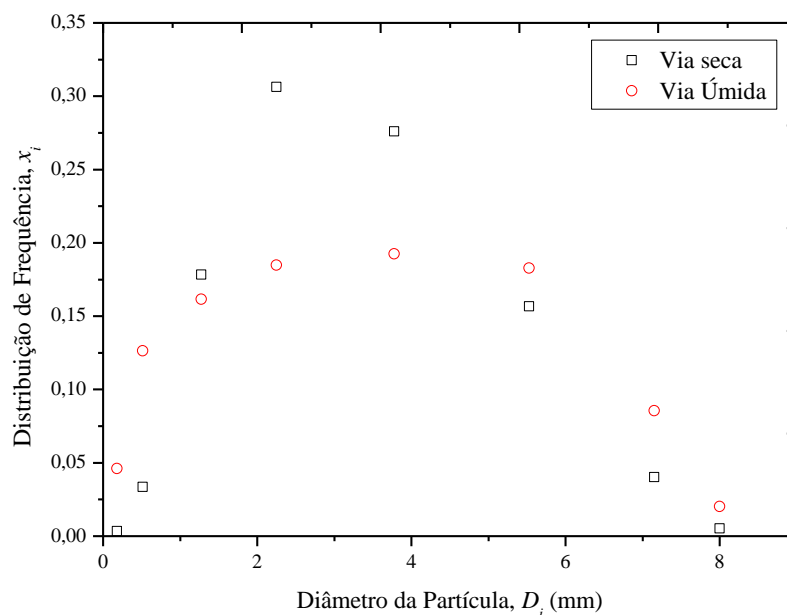
Neste capítulo, são apresentados e discutidos os dados experimentais relativos à caracterização da biomassa *in natura* (granulometria, massa específica, análise imediata e poder calorífico) e cinética de secagem. Por fim, foram analisados os resultados obtidos com a combustão da casca do café e os gases emitidos.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA DO CAFÉ

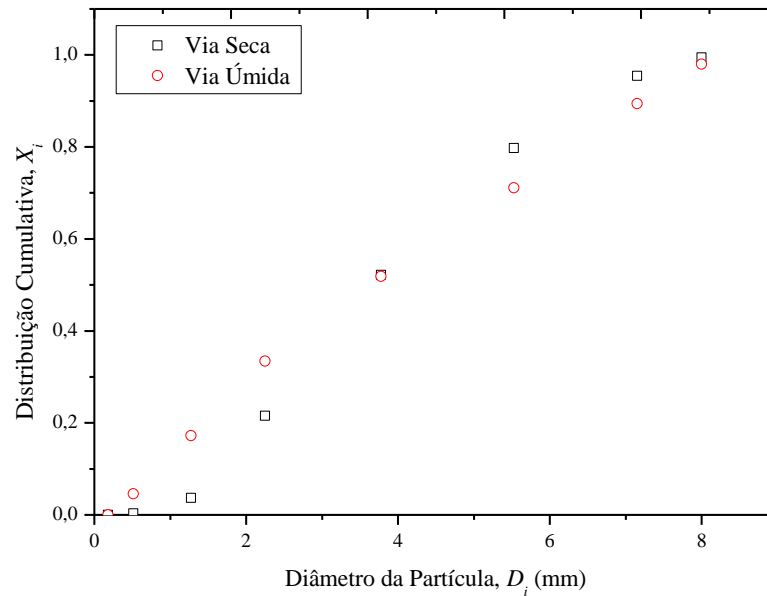
5.1.1 Distribuição granulométrica

A partir dos resultados obtidos para o peneiramento das cascas do café (Apêndice B), foram construídas as curvas de distribuição granulométrica e distribuição cumulativa para os dois tipos de biomassa, apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2, respectivamente.

Figura 5.1 – Distribuição de frequência das partículas da casca do café.



Fonte: O autor.

Figura 5.2 – Distribuição cumulativa das partículas da casca do café.

Fonte: O autor.

Pode-se observar que cerca de 90% da biomassa proveniente da via seca (palha do café) possui partículas menores que a malha 4 porém maiores que 20 (-4 +20). O processamento por via úmida apresentou partículas mais uniformes dentro do intervalo testado. A identificação da granulometria do material é importante, visto que interfere diretamente na zona de combustão, ou seja, quando as partículas não são uniformes estas acarretam queima irregular da carga de zona de combustão. A diferença granulométrica nos dois tipos de cascas analisadas pode ser justificada devido a casca derivada do processamento de despulpa ser mais fibrosa.

Para o ajuste dos dados experimentais, foram testados três modelos de distribuição granulométrica a dois parâmetros: GGS, RRB e LN. A Tabela 5.1 apresenta o coeficiente de correlação e os parâmetros obtidos para cada modelo. O modelo que melhor se ajustou ao peneiramento das cascas do café proveniente do processamento via seca e via úmida foram o RRB e o GGS, respectivamente, visto que apresentaram coeficiente de correlação mais próximo a um. Ao analisar o parâmetro k (modelo GGS) e D' (modelo RRB) verifica-se que os valores 7,545 e 4,370 não estão condizentes com os pontos experimentais (Figura 5.2), já que k refere-se ao diâmetro D para $X = 1$ e D' refere-se ao diâmetro D para $X = 0,632$. Apesar do modelo LN ter apresentado um bom ajuste para o processamento via úmida, o parâmetro D_{50} não apresentou significado físico (erro padrão do parâmetro igual a 10,231). O ajuste também pode ser comprovado por meio das Tabelas ANOVA apresentadas no Apêndice C. Todos os três

modelos testados apresentaram regressão significativa, já que o F calculado é maior que o F tabelado, ao nível de confiança de 95%.

Tabela 5.1 – Valores do coeficiente de correlação e dos parâmetros para os modelos testado.

Tipo de Casca	Modelo	R ²	Parâmetro	Valor	Erro Padrão
Via Seca	GGS	0,972	k	7,545	0,324
			m	1,118	0,139
	RRB	0,999	D'	4,370	0,057
			n	2,230	0,082
	LN	0,983	D ₅₀	74,715	17,814
			n	0,396	0,038
Via Úmida	GGS	0,996	k	8,077	0,157
			m	0,910	0,038
	RRB	0,989	D'	4,370	0,172
			n	1,493	0,120
	LN	0,999	D ₅₀	148,516	10,231
			n	0,313	0,007

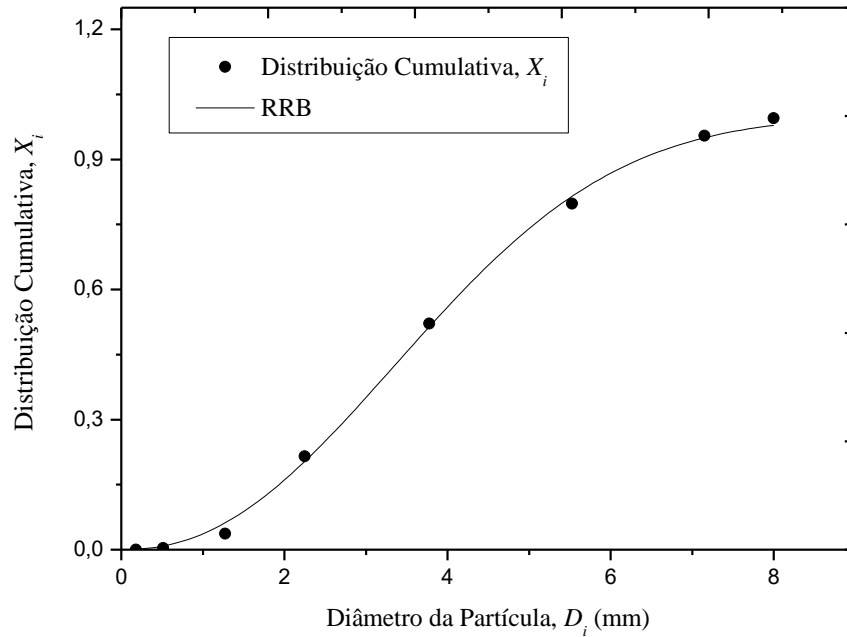
Nota: *m* e *n* [adimensional]; *D'*, *k* e *D*₅₀ [mm].

Fonte: O autor.

O Apêndice D mostra os gráficos da distribuição dos resíduos em função dos valores preditos para os modelos granulométricos GGS, RRB e LN. A aleatoriedade da distribuição nos gráficos dos modelos RRB e GGS para as cascas do café proveniente do processamento via seca e via úmida, respectivamente, indicam a ausência de um comportamento tendencioso, e representam os dados experimentais com adequada precisão, não havendo qualquer inconsistência entre estes e os valores calculados. Para os demais modelos, em ambos os materiais analisados, os gráficos residuais não se comportam de forma aleatória, logo a condição de independência não é satisfeita.

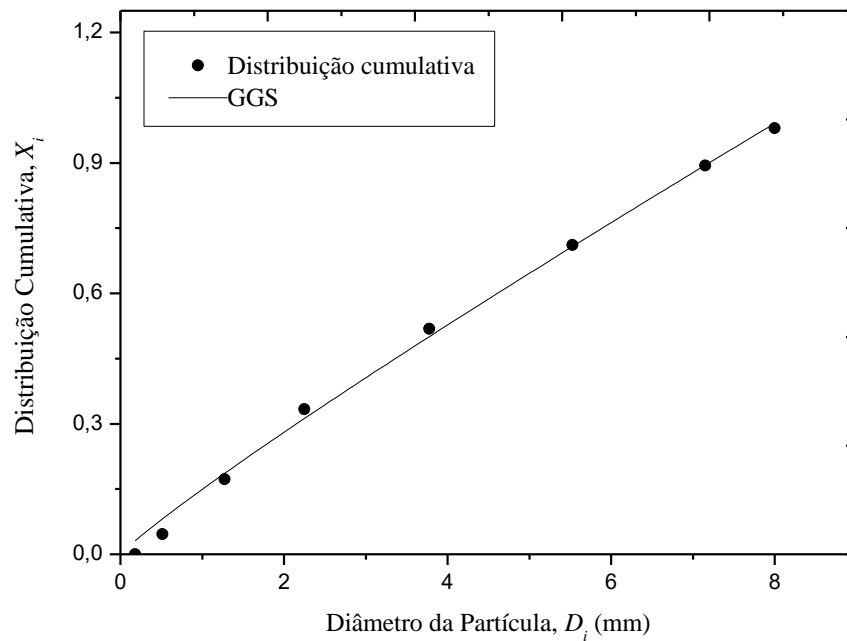
As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam o modelo de distribuição obtido a partir do ajuste dos resultados experimentais (Apêndice B) para os dois tipos de casca.

Figura 5.3 – Ajuste para a casca do café derivada do processamento via seca.



Fonte: O autor.

Figura 5.4 – Ajuste para a casca do café derivada do processamento via úmida.



Fonte: O autor.

A expressão de regressão ajustada para os modelos RRB (processamento via seca) e GGS (processamento via úmida) são dadas pelas Equações 5.1 e 5.2, respectivamente.

$$X_i = 1 - \exp(-(D_i/4,37)^{2,23}) \quad (5.1)$$

$$X_i = (D_i/8,077)^{0,91} \quad (5.2)$$

Com base no ajuste dos modelos, foi possível calcular o diâmetro médio de Sauter da palha do café por meio da equação, para o modelo RRB, apresentada na Tabela 3.3, cujo resultado foi de 2,69 mm. Esse valor é coerente com o calculado pela Equação 2.1 para o intervalo em estudo, 2,14 mm. O valor mostra-se satisfatório também ao observado nas curvas de distribuição de frequência e distribuição cumulativa, onde verifica-se que cerca de 70% das partículas apresentam diâmetro médio maior que 1,00 mm. Para a casca derivada do processamento via úmida não foi possível calcular o diâmetro médio de Sauter para o modelo ajustado (GGS), visto que a equação só possui validade se $m > 1$. Por meio da Equação 2.1, o d_{pS} da casca despulpada foi de 1,24 mm, valor condizente com o observado nas curvas das Figuras 5.1 e 5.2.

5.1.2 Massa específica

O teste de massa específica apresentou valores de $1,43 \pm 0,03$ e $1,05 \pm 0,01$ g/mL para a casca proveniente da via seca e via úmida, respectivamente. A análise estatística realizada confirma que há diferença significativa quanto a massa específica das amostras ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$). Essa variação pode ser justificada devido ao diferente tipo de solo e pelo método de processamento pós colheita.

5.1.3 Análise imediata e poder calorífico

Na tabela 5.2 estão apresentados os valores médios para a análise imediata e poder calorífico das cascas de café com o respectivo desvio-padrão. Por meio da análise estatística verifica-se que houve diferença significativa entre as amostras de casca de café para o teor de umidade ($p < 0,01$), carbono fixo ($0,01 \leq p < 0,05$) e poder calorífico superior ($0,01 \leq p < 0,05$). Para as demais variáveis analisadas as cascas não apresentaram diferença significativas ($p < 0,05$). Quanto ao teor de água a diferença significativa encontrada é devido ao tipo de processamento do grão pós-colheita.

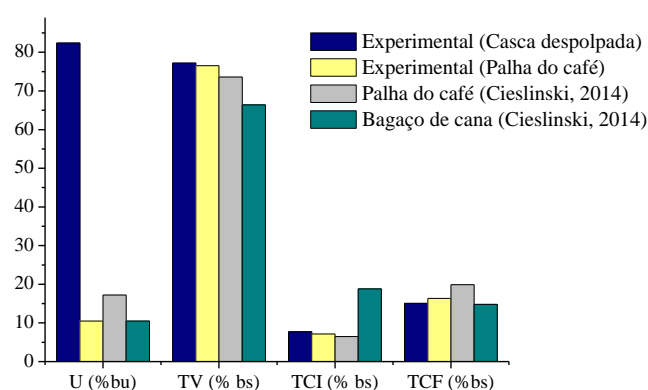
Tabela 5.2 – Características físico-químicas da casca do café.

	Palha do Café	Casca despolpada
Teor de Umidade (% bu)	10,50 ± 0,44 a	82,37 ± 1,03 b
Teor de Voláteis (% bs)	76,53 ± 0,75 a	77,21 ± 0,5 a
Teor de Cinzas (% bs)	7,13 ± 0,21 a	7,73 ± 0,51 a
Teor de Carbono Fixo (% bs)	16,34 ± 0,64 a	15,06 ± 0,13 b
PCS (kcal/kg)	4218,84 ± 27,71 a	4135,46 ± 21,95 b

Nota: Médias na mesma linha, seguidas por letras distintas diferem entre si estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de significância.

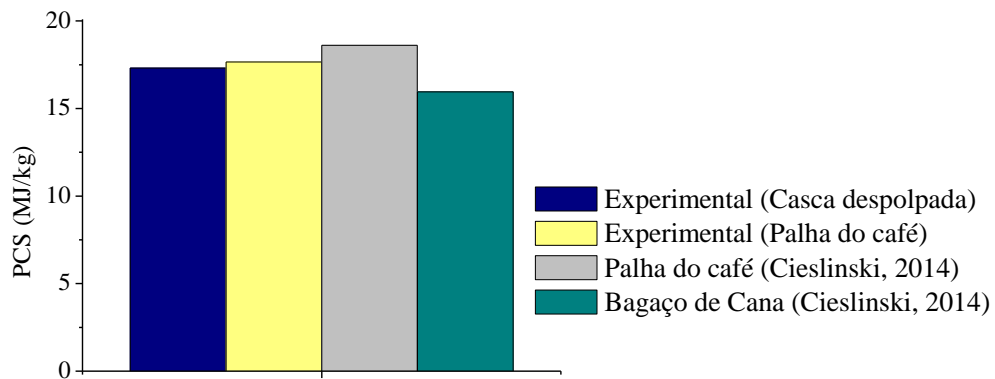
Fonte: O autor.

A palha do café possui algumas vantagens em relação a proveniente da despolda. O baixo teor de água da palha do café, aumenta a eficiência das tecnologias termoquímicas, já que não será necessário o uso da secagem como etapa prévia no processo de conversão energética. Verifica-se também, que o poder calorífico é maior para a via seca o que favorece a aplicação da palha como opção energética. Nas Figuras 5.5 e 5.6, ao comparar os valores obtidos por Cieslinski (2014) para a casca do café e bagaço da cana com os obtidos em laboratório é possível verificar que os resultados para a casca do café mostraram-se um pouco divergentes aos encontrados pelo autor. Esse fato pode ser explicado em função da variedade do café, das características do solo que afetam a composição da biomassa e do tipo de processamento do café. Ao comparar a casca do café com o bagaço da cana, nota-se que o teor de cinzas da casca do café é baixo e o poder calorífico é maior. Os demais parâmetros apresentam similaridade.

Figura 5.5 – Análise imediata.

Nota: U umidade em base úmida; T_V teor de voláteis; T_{CI} teor de cinzas; T_{CF} teor de carbono fixo.

Fonte: O autor.

Figura 5.6 – Poder Calorífico Superior.

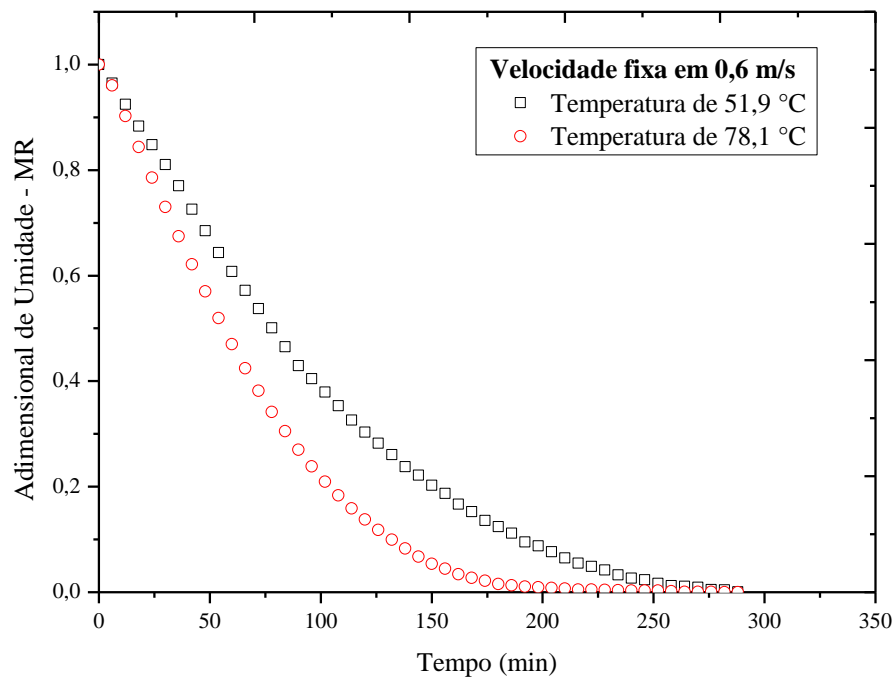
Fonte: O autor.

5.2 CINÉTICA DE SECAGEM

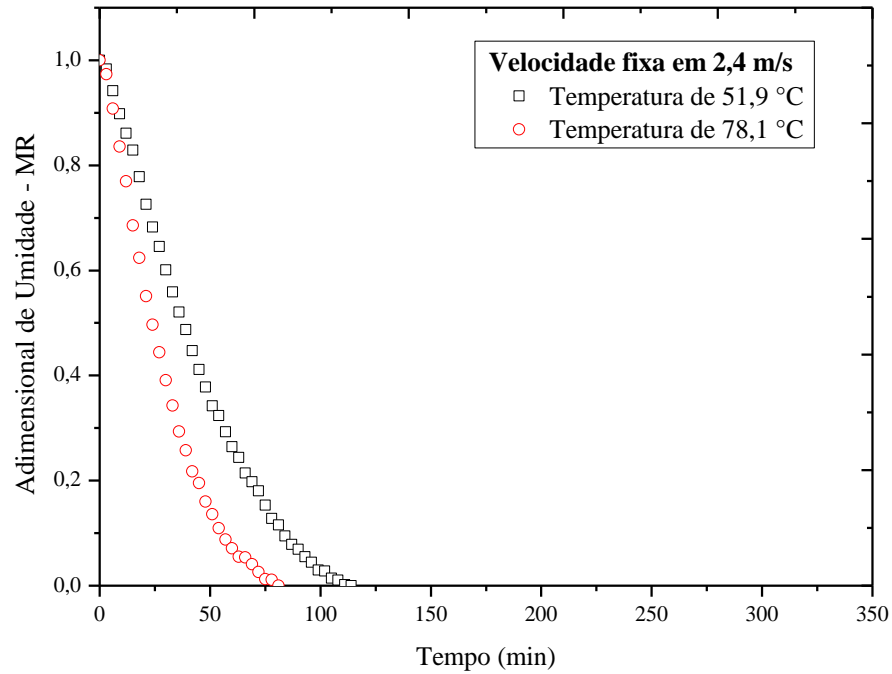
Durante os ensaios de secagem foram monitoradas as temperaturas do ar de entrada e saída e a umidade relativa do processo. A temperatura ambiente média foi de aproximadamente 31 °C e a umidade relativa na entrada e saída do secador foi cerca de 51 e 20%, respectivamente. As curvas de secagem foram representadas 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 5.7, 5.8 e 5.9, é possível observar os efeitos isolados de velocidade e temperatura do ar de secagem. Verifica-se que tanto a temperatura quanto a velocidade influenciam significativamente nos dados de secagem. Os maiores tempos de residência podem ser observados com velocidades menores. Por meio da derivada do adimensional de umidade com o tempo, Apêndice E, nota-se que a taxa de secagem da casca do café é decrescente para as condições experimentais estudadas, predominando a resistência à difusão de umidade. Durante os primeiros 50 minutos de secagem, a taxa média foi cerca de $0,012 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{min}^{-1}$ e em seguida, iniciou-se o período de taxa decrescente.

Figura 5.7 – Adimensional de umidade em função do tempo – (a) Velocidade do ar 0,6 m/s e temperatura do ar 51,9 e 78,1°C; (b) Velocidade do ar 2,4 m/s e temperatura do ar 51,9 e 78,1°C.



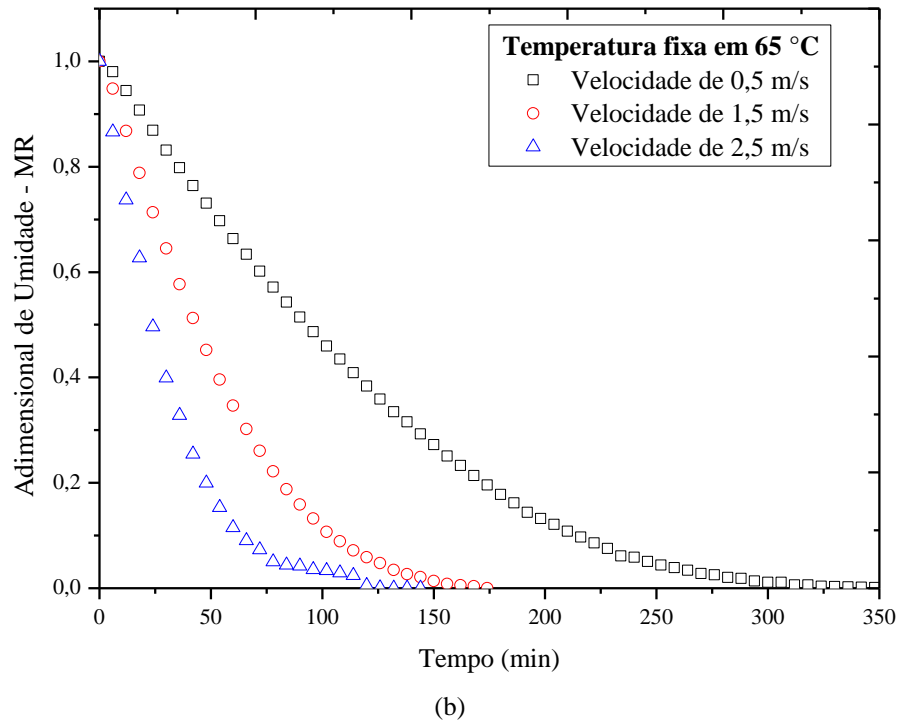
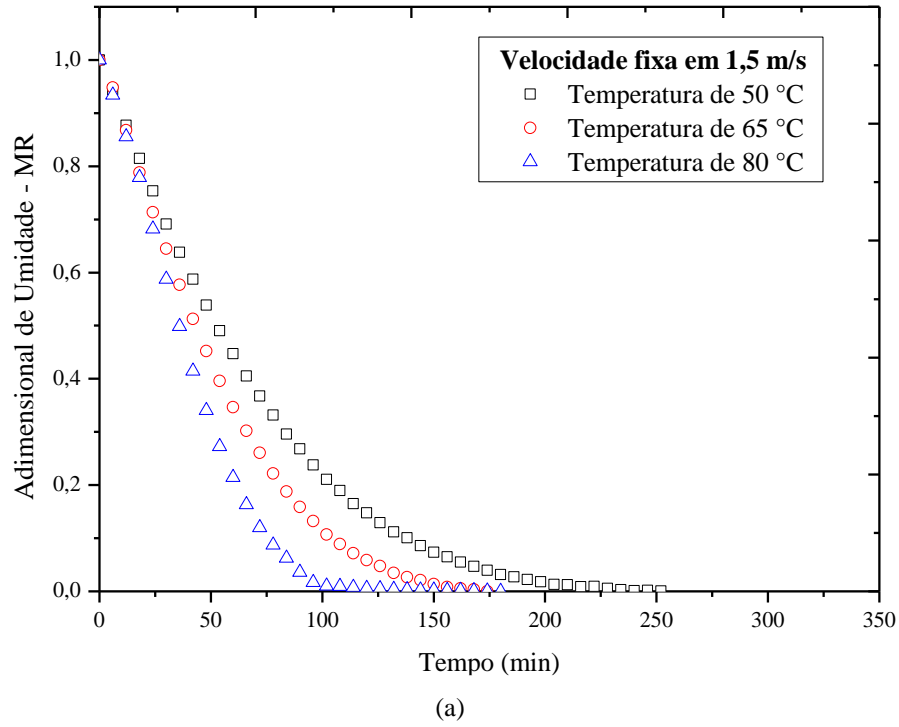
(a)



(b)

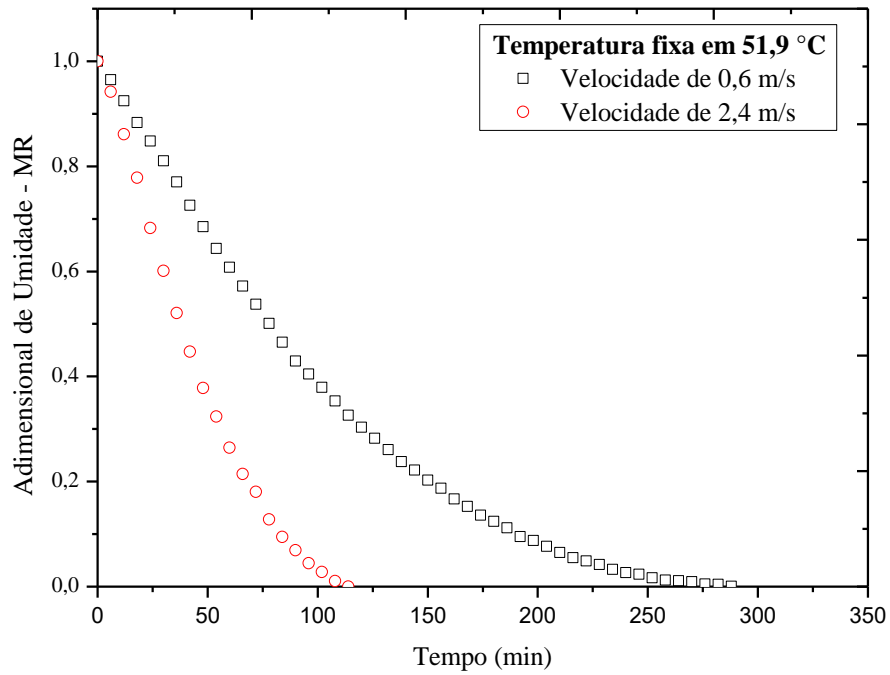
Fonte: O autor.

Figura 5.8 – Adimensional de umidade em função do tempo – (a) Velocidade do ar 1,5 m/s e temperatura do ar 50, 65 e 80°C; (b) Temperatura do ar 65 °C e velocidade do ar 0,5, 1,5 e 2,5 m/s.

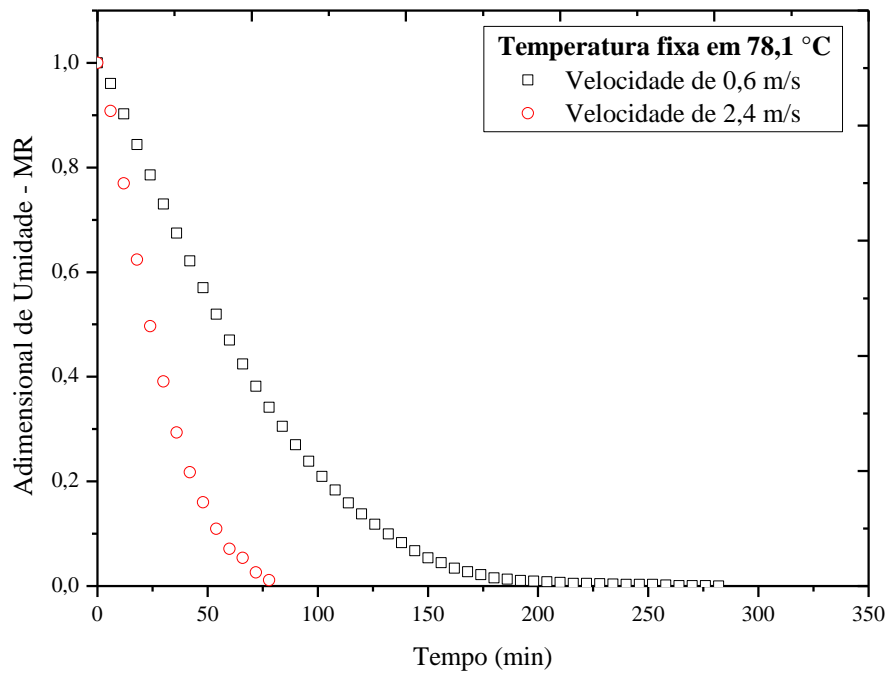


Fonte: O autor.

Figura 5.9 – Adimensional de umidade em função do tempo – (a) Temperatura do ar 51,9 °C e velocidade do ar 0,6 e 2,4 m/s; (b) Temperatura do ar 78,1 °C e velocidade do ar 0,6 e 2,4 m/s.



(a)



(b)

Fonte: O autor.

Diante da influência significativa da velocidade do ar nos experimentos, o tratamento dos dados foi dividido em três velocidades fixas (0,6; 1,5 e 2,4 m/s). Na Tabela 5.3 estão

apresentados os resultados de estimativa de parâmetros dos modelos de cinética de secagem para velocidade do ar de 0,6; 1,5 e 2,4 m/s, respectivamente.

Tabela 5.3 – Parâmetros estimados para os modelos de cinética de secagem.

(continua)

Equações	Vel. do ar (m/s)	Variância	R ²	Curvatura		Parâmetro		% de Vício de Box
				IN	PE	a	b	
Lewis*	0,6 ^(a)	0,076	0,976	IN	0,079	a	0,022	203,30
				PE	74,625	b	1574,77	0,39
	1,5 ^(b)	0,040	0,971	IN	0,049	a	0,091	119,43
				PE	77,394	b	1901,95	0,01
	2,4 ^(c)	0,031	0,961	IN	0,063	a	0,138	197,29
				PE	74,296	b	1932,16	0,23
Brooker**	0,6 ^(a)	0,074	0,985	IN	0,197	a	0,022	172,45
				PE	84,251	b	1549,65	0,37
						c	1,108	0,31
	1,5 ^(b)	0,039	0,981	IN	0,092	a	0,091	102,76
				PE	88,049	b	1869,90	0,00
						c	1,111	0,10
	2,4 ^(c)	0,031	0,977	IN	0,160	a	0,149	168,01
				PE	84,063	b	1920,58	0,24
						c	1,122	0,23
Henderson e Henderson**	0,6 ^(a)	0,073	0,978	IN	0,198	a	0,022	179,07
				PE	85,828	b	1556,65	0,39
						c	1,058	0,30
	1,5 ^(b)	0,038	0,974	IN	0,112	a	0,089	105,22
				PE	89,057	b	1876,70	0,00
						c	1,056	0,10
	2,4 ^(c)	0,031	0,965	IN	0,157	a	0,142	178,89
				PE	86,701	b	1921,61	0,25
						c	1,061	0,22

Fonte: O autor.

Tabela 5.3 – Parâmetros estimados para os modelos de cinética de secagem.

								(conclusão)
Page**	0,6 ^(a)	0,070	0,999	IN	0,271	a	0,004	239,33
				PE	107,173	b	2049,71	1,86
						c	1,344	1,60
	1,5 ^(b)	0,038	0,993	IN	0,172	a	0,033	1511,4
				PE	108,975	b	2534,41	0,62
						c	1,350	0,63
	2,4 ^(c)	0,035	0,998	IN	0,257	a	0,048	302,93
				PE	116,322	b	2754,95	2,23
						c	1,447	2,01
Overhults**	0,6 ^(a)	0,032	0,999	IN	0,194	a	-4,030	-0,18
				PE	0,201	b	-1525,3	0,14
						c	1,340	0,79
	1,5 ^(b)	0,040	0,993	IN	0,176	a	-2,520	-0,02
				PE	0,189	b	-1877,1	-0,01
						c	1,350	0,66
	2,4 ^(c)	0,049	0,998	IN	0,301	a	-2,10	-1,15
				PE	0,347	b	-1904,4	0,37
						c	1,450	2,76

Nota: ^{*(a)} $\frac{1}{2} \sqrt{F_{(2;194;0,95)}} = 2,207$; ^{*(b)} $\frac{1}{2} \sqrt{F_{(2;343;0,95)}} = 2,208$; ^{*(c)} $\frac{1}{2} \sqrt{F_{(2;67;0,95)}} = 2,207$

^{***(a)} $\frac{1}{2} \sqrt{F_{(3;193;0,95)}} = 1,461$; ^{***(b)} $\frac{1}{2} \sqrt{F_{(3;342;0,95)}} = 1,461$; ^{***(c)} $\frac{1}{2} \sqrt{F_{(3;66;0,95)}} = 1,464$

Fonte: O autor.

Ao analisar a Tabela 5.3 nota-se que para as equações analisadas a curvatura intrínseca (IN) não possui valor significativo, visto que apresenta valores menores do que $\frac{1}{2}\sqrt{F}$. Para a curvatura paramétrica (PE), apenas a equação de Overhults apresentou valor menor que $\frac{1}{2}\sqrt{F}$. Os valores paramétricos superiores a $\frac{1}{2}\sqrt{F}$, indicaram a não linearidade de pelo menos um dos parâmetros. Por meio do percentual de vício de Box maior do que 1 % foi possível identificar o parâmetro *a* como responsável pelo comportamento não linear das equações de Lewis, Brooker, Henderson e Henderson e Page.

Analisando o coeficiente de determinação (R^2), as cinco equações apresentaram valores próximos, sendo o modelo de Overhults o qual melhor representou os dados de cinética de secagem da casca do café. Observa-se também, que a cinética de secagem para o modelo de

Overhults na velocidade do ar de 2,4 m/s apresentou vício de Box maior que 1% para o parâmetro c . Dessa forma, dentro do intervalo de velocidade de secagem analisado experimentalmente, velocidades de 0,6 e 1,5 m/s favorecem na definição do modelo de secagem.

A performance energética de um secador convectivo é representada por um período de taxa constante de secagem, quando a eficiência energética alcança o ponto máximo. Esse comportamento é explicado pelo fato de que todo o calor sensível a ser utilizado para evaporar a água e a taxa de secagem é limitado pela convecção. A medida que a temperatura de saída do gás aumenta a eficiência energética diminui, visto que o calor sensível é utilizado para superaquecer o material e retirar a água contida no interior do sólido (FERNANDES, 2005).

De acordo com Grabowsk *et al.* (2002); Fernandes (2007) e Jesus (2015) os valores da eficiência energética para secador convectivo experimental encontram-se na faixa de 19 a 40%. Jesus (2015) afirma que a eficiência energética decresce com o decorrer da secagem, já que a quantidade de água a ser evaporada na amostra diminui e conseqüentemente ocorre o aumento a resistência interna à transferência de calor e massa. Sendo assim, em temperaturas e velocidades menores, a secagem apresenta uma maior eficiência por um período de tempo mais duradouro devido a maior quantidade de água presente na amostra. A secagem da casca do café ocorreu predominantemente em período de taxa decrescente de secagem, para as condições estudadas, caracterizando um processo de baixa eficiência. Isso indica a necessidade de estudos posteriores direcionados à otimização do processo em termos de eficiência.

5.3 COMBUSTÃO DA CASCA DO CAFÉ

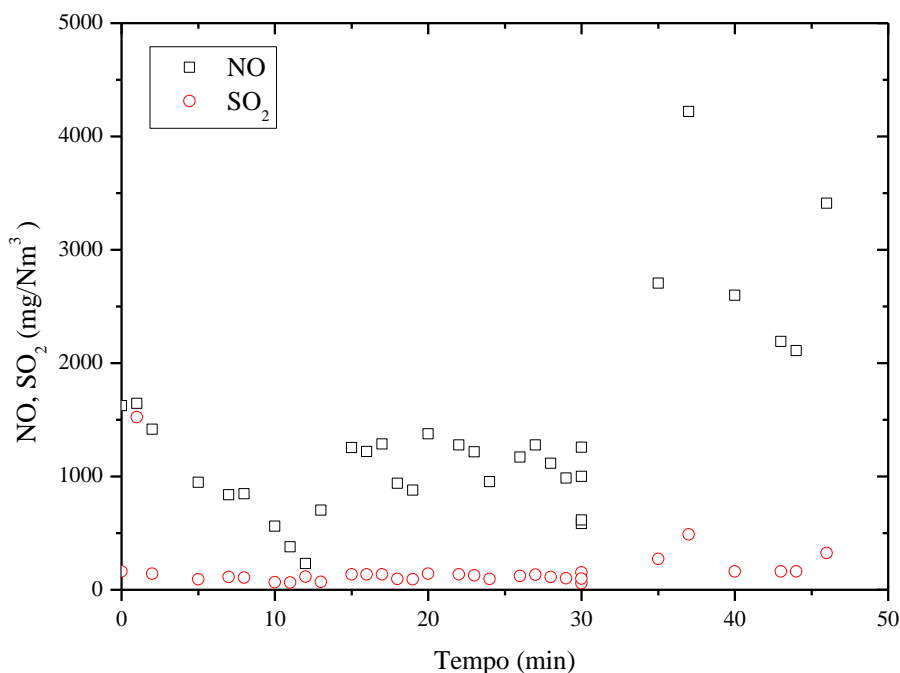
Nas Figuras 5.10 e 5.11 e 5.12 é possível verificar a evolução das emissões de CO, CO₂, NO_x, SO_x e C_xH_y durante o teste de combustão da casca do café. A fim de comparar os diferentes valores dos gases de combustão com os limites de emissão permitidos pelo Conama, as concentrações foram corrigidas para 8% de excesso de oxigênio conforme critérios estabelecidos pela resolução 382/06 do CONAMA.

A curva de concentração de CO₂ para a casca do café em função do tempo, mostrou-se próxima a alcançada por Bäfver *et al.* (2011), para toras de madeira. A concentração de NO_x

foi superior aos valores encontrados por Limousy *et al.* (2013), para a combustão de pastilhas de pinho, e Cieslinski (2014), para queima da casca do café. As emissões de SO_x também ultrapassaram valores citados por Verma *et al.* (2012), para madeira, pastilhas de grama, casca de girassol, pastilhas de resíduos de pectina cítrica e palha. A concentração de hidrocarbonetos teve um pico no início do processo e depois obteve valores baixos em quase toda a queima da biomassa.

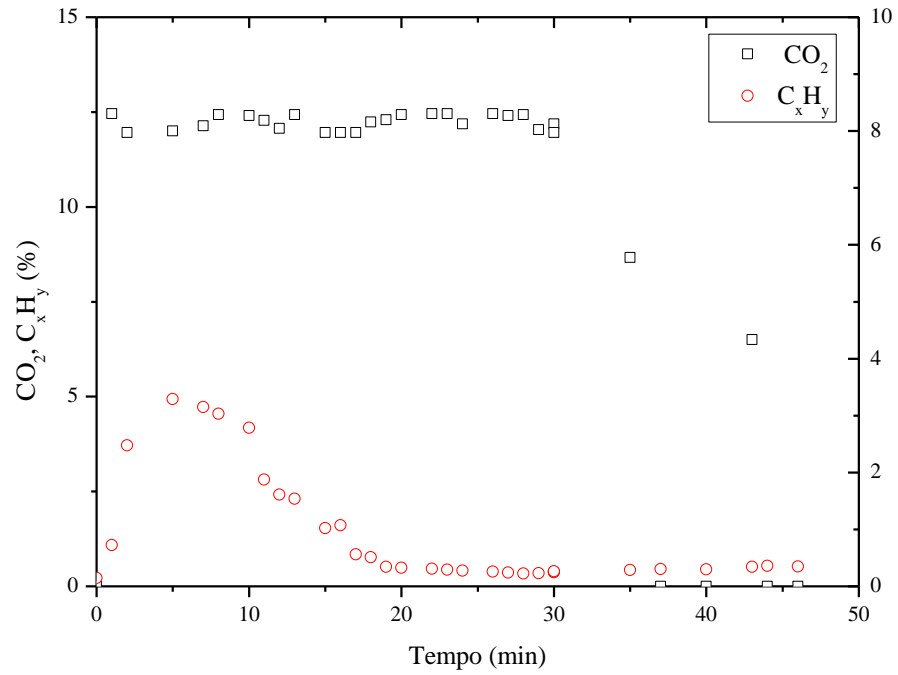
A partir da Figura 5.12, nota-se que a concentração de CO atingiu valores altos no início da combustão. Segundo Fernández *et al.* (2012), concentrações elevadas de CO demonstram que há combustão incompleta e que a biomassa necessita de grande quantidade de ar para combustão. Os valores mostraram-se próximo aos alcançados por Cieslinski (2014) e Bäfver *et al.* (2011). As emissões de CO ultrapassaram os limites estabelecidos pela resolução 382/06 do CONAMA para a cana de açúcar, de 6500 mg/Nm³ (5204 ppm).

Figura 5.10 – Emissões de: NO_x, e SO_x em mg/Nm³ durante o teste de combustão da casca do café..



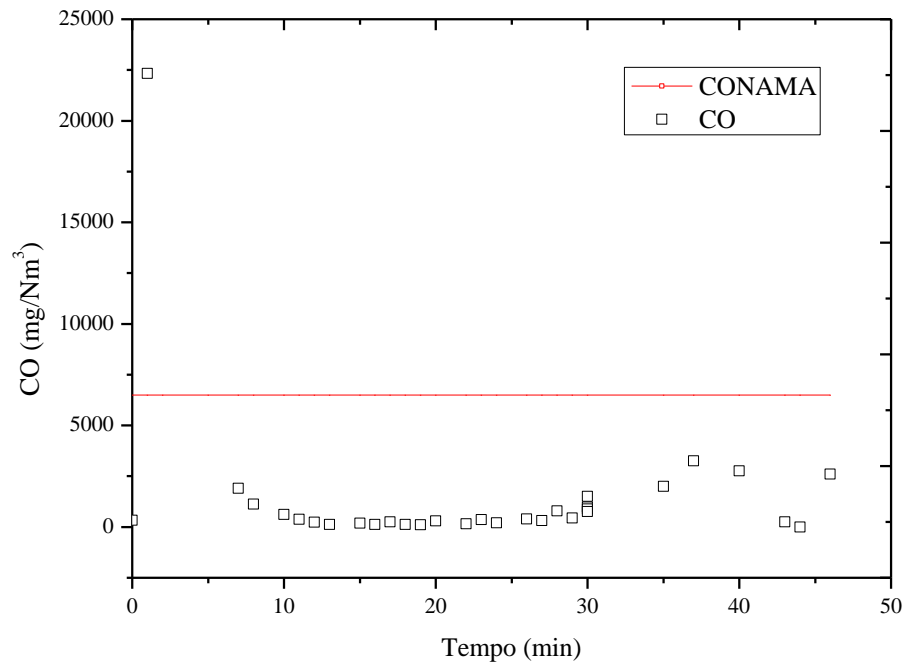
Fonte: O autor.

Figura 5.11 – Emissões de: CO_2 e C_xH_y , em percentual, durante o teste de combustão da casca do café.



Fonte: O autor.

Figura 5.12 – Emissões de Monóxido de Carbono durante o teste de combustão da casca do café.



Fonte: O autor.

CAPÍTULO 6

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL POR MEIO DOS MÉTODOS HEURÍSTICO E EVOLUTIVO

Neste capítulo, os fluxogramas alternativos, gerados na etapa de síntese, são submetidos a uma análise, por meio dos métodos heurístico e evolutivo para identificar aquele que exibe o melhor desempenho.

6.1 REGRAS HEURÍSTICAS

Foram criadas regras heurísticas para cada subsistema envolvido, com intuito de alcançar o fluxograma próximo ao ótimo. As regras foram baseadas nos resultados experimentais e pesquisas na literatura referente ao processamento energético de outras biomassas conforme demonstrado no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Fonte das regras heurísticas

Subsistema	Referências
Beneficiamento do café	Resultados experimentais
Redução Granulométrica	Carvalho (2012); Gomide (1983)
Secagem	Alonso (2001); Alonso e Park (2005); Park <i>et al.</i> (2007)
Compactação	Chrisostomo (2011); Tumuluru <i>et al.</i> (2011)
Reação Química	Loo e Koperjan (2008); Basu (2010)
Reação de Pirólise	Bridgwater (2002); Ringer, Putsche e Scahill (2006); Gupta e Demirbás (2010); Neves <i>et al.</i> (2011)

Fonte: O autor.

Para geração de energia a partir da casca do café, tem-se como primeiro subsistema o *beneficiamento do café*, o qual pode ser realizado por via úmida ou via seca. O processamento por via úmida gera maiores quantidade de resíduos, pois utiliza elevado volume de água durante a despolpa. Já o processamento por via seca, gera apenas a palha como resíduo, a qual possui umidade de aproximadamente 10,50% em base úmida. Perante os fatos, o processamento por via seca torna-se mais vantajoso, pois não há dependência de recurso hídrico para a separação do resíduo casca de café em relação ao fruto (polpa). Outra vantagem de realizar o processamento por via seca é devido ao maior valor do poder calorífico superior, comprovado estatisticamente pelo teste de Tukey.

A etapa de *redução granulométrica* tem por finalidade aumentar a relação superfície/volume, elevando a eficiência de posteriores operações. Segundo Carvalho (2012), o tamanho da partícula a ser processado é um dos parâmetros na seleção do equipamento adequado e deve ser considerado junto a relação de redução desejada. Com base na alimentação dos moinhos finos e dos britadores, foram estabelecidas duas regras heurísticas.

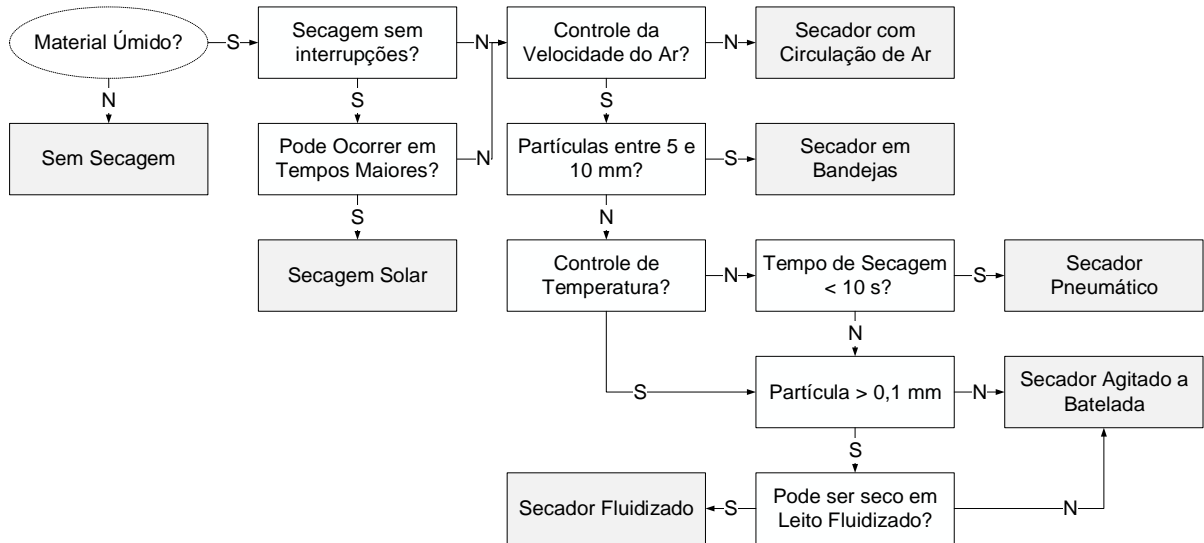
Regra 1 – Se o tamanho das partículas na alimentação for maior que 5 cm, aplicar britadores primários. Se não, aplicar britadores secundários ou moinhos finos.

Regra 2 – Se a partícula de alimentação estiver entre 0,5 e 5 cm, aplicar britadores secundários. E se for menor que 0,5 cm aplicar moinhos finos.

A melhor rota para esse subsistema é a utilização dos moinhos finos, pois a partícula *in natura* da casca do café proveniente do processamento via seca possui granulometria de aproximadamente 2,5 mm, conforme caracterização física realizada experimentalmente.

A etapa de *secagem* é realizada a fim de reduzir a umidade do material a ser analisado. Utiliza-se exposição ao sol ou técnicas que utilizam ar aquecido, ou ainda à possibilidade de não ocorrer secagem dependendo da umidade da biomassa, quantidades de casca e condições climáticas. As regras heurísticas para a escolha do tipo de secagem estão representadas no fluxograma decisório da Figura 6.1. Admitindo umidade da palha do café em torno de 11%, despreza-se a secagem.

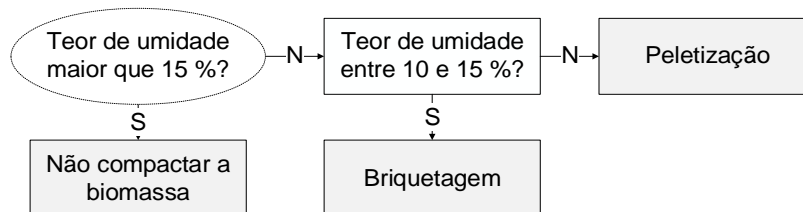
Figura 6.1 – Algoritmo decisório para a escolha do tipo de secador.



Fonte: O autor.

Após o estudo do subsistema de secagem, foi realizada uma análise da etapa de *compactação*, a qual tem por finalidade aumentar a densidade (em kg/m³) e a densidade energética (em kcal/m³) da biomassa. Segundo Tumuluru *et al.* (2011), a briquetadeira e a pelletizadora são os principais equipamentos de qualquer planta de compactação de biomassa. A principal diferença entre os pélletes e os briquetes está nas dimensões. De acordo com as regras heurísticas (Figura 6.2) estabelecidas para esse subsistema com base na umidade da biomassa, chega-se a rota de briquetagem.

Figura 6.2 – Algoritmo decisório para a escolha do tipo de compactação.



Fonte: O autor.

A quinta etapa do processamento da casca do café para a geração de energia é determinada pelo subsistema de *reação química*, a qual é a etapa principal para este processo. Com base na literatura, foram elaboradas três regras heurísticas para definir a rota química:

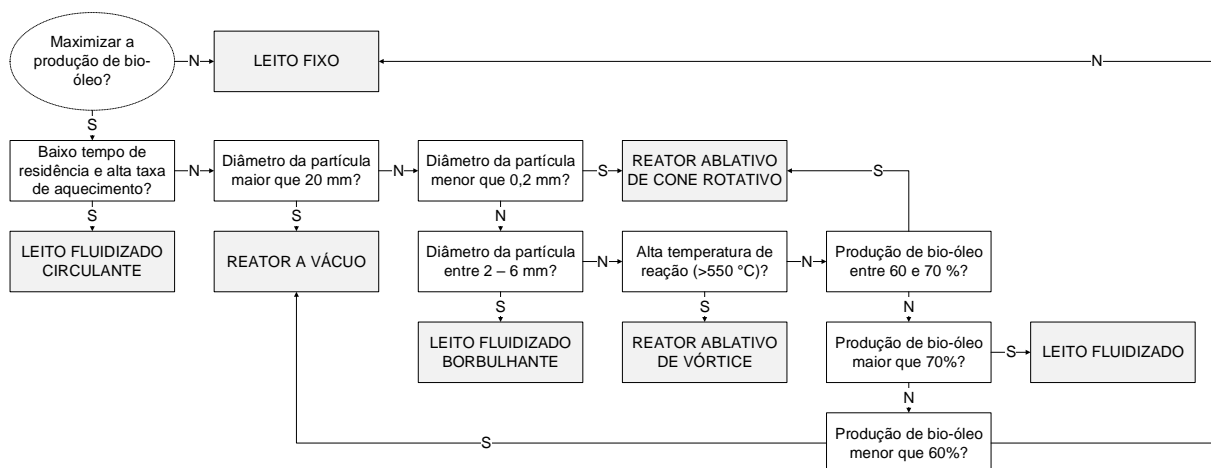
Regra 1 – Se o resíduo apresentar teor de água maior que 80%, aplicar biodigestão anaeróbia. Caso contrário, aplicar combustão direta, gaseificação ou pirólise.

Regra 2 – Se houver interesse em maximizar a eficiência de geração de energia elétrica, aplicar gaseificação ou pirólise. Caso contrário aplicar combustão direta.

Regra 3 – Se houver a necessidade de maximizar a produção de gás de síntese, aplicar gaseificação. Se houver a necessidade de maximizar a produção de bio-óleo aplicar pirólise.

Diante das regras estabelecidas, determinou-se pirólise como etapa promissora devido a facilidade de transporte e armazenamento do bio-óleo. Na Figura 6.3 verificam-se as regras heurísticas para a escolha do tipo de reator de pirólise, obtendo como melhor alternativa o reator de leito fluidizado circulante. O tempo baixo de residência e a taxa alta de aquecimento favorecem a produção de bio-óleo.

Figura 6.3 – Algoritmo decisório para a escolha do tipo de reator de pirólise.



Fonte: O autor.

6.2 ESCOLHA DO FLUXOGRAMA-BASE

Diante do exposto foi possível determinar o fluxograma-base pela ordenação das tecnologias apresentadas em cada subsistema. Sendo assim os estados que maximizam a geração de energia para a rota termoquímica de pirólise são:

- Subsistema de Beneficiamento do Café: Via Seca.
- Subsistema de Redução Granulométrica: Moinhos Finos.

- Subsistema de Secagem: Sem Secagem.
- Subsistema de Integração Energética: Sem Integração.
- Subsistema de Compactação: Briquetagem.
- Subsistema de Reação de Pirólise: Leito Fluidizado Circulante.
- Subsistema de Integração Energética: Com Integração.
- Subsistema de Geração a combustível: Geração a combustível.

O fluxograma-base do processo, ou seja, aquele que possui maior eficiência e atende aos objetivos propostos, é correspondente a ordenação VS – MF – SSE – SI – CB – RPLC – CI – GC, o qual equivale ao fluxograma de número 1313 da árvore de estados da rota termoquímica de pirólise. O fluxograma-base pode ser constantemente atualizado, podendo chegar ou não a mesma solução, já que a importância relativa dos diversos fatores de concepção pode ser radicalmente alterada no futuro.

6.3 DETERMINAÇÃO DOS VIZINHOS ESTRUTURAIS

Segundo Perlingeiro (2005), os fluxogramas vizinhos diferem um do outro, por apenas um único elemento estrutural. No Quadro 6.2 tem-se os vizinhos estruturais, suas respectivas variações e o número de cada fluxograma vizinho para o processo de pirólise da biomassa. O subsistema de geração a combustível não gerou vizinhos, pois nesta etapa não foram avaliados diferentes tipos de equipamentos. Sendo assim foram gerados 11 vizinhos estruturais, que são em ordem crescente os fluxogramas de número: 413 – 1301 – 1309 – 1311 – 1314 – 1315 – 1317 – 1319 – 1325 – 1349 e 1385.

Quadro 6.2 – Vizinhos Estruturais

SUBSISTEMA	FLUXOGRAMAS VIZINHOS	NÚMERO DO FLUXOGRAMA VIZINHO
Beneficiamento do Café	VU – MF – SSE – SI – CB – RPLC – CI – GC	413
Redução Granulométrica	VS – BS – SSE – SI – CB – RPLC – CI – GC	1349
	VS – SRG – SSE – SI – CB – RPLC – CI – GC	1385
Compactação	VS – MF – SSE – SI – CP – RPLC – CI – GC	1301
	VS – MF – SSE – SI – SC – RPLC – CI – GC	1325
Reação de Pirólise	VS – MF – SSE – SI – CB – RPLF – CI – GC	1309
	VS – MF – SSE – SI – CB – RPLB – CI – GC	1311
	VS – MF – SSE – SI – CB – RPCR – CI – GC	1315
	VS – MF – SSE – SI – CB – RPAV – CI – GC	1317
	VS – MF – SSE – SI – CB – RPV – CI – GC	1319
Integração Energética	VS – MF – SSE – SI – CB – RPLC – SI – GC	1314

Fonte: O autor.

Por meio do método evolutivo torna-se possível guiar a resolução na direção promissora, evitando-se a aplicação desordenada das regras evolutivas. Segundo Perlingeiro (2005), o fluxograma-base (determinado por meio das regras heurísticas) pode ser submetido a uma análise de custo, tomando-se como novo fluxograma-base o vizinho de menor custo. O processo é repetido até que não se encontrem mais fluxogramas de menor custo. Dessa forma é possível aprimorar a solução heurística de forma a encontrar a solução ótima, a qual pode ser a rota que maximiza a produção energética com o menor custo possível.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a realização deste trabalho. A metodologia aplicada mostrou-se adequada para a resolução do problema de síntese de processo para a geração de energia. O estudo realizado em laboratório serviu como base para a definição das regras heurísticas para a otimização estrutural.

A síntese estrutural para a geração de energia, por meio de árvores de estados resultou em 3780 fluxogramas plausíveis a serem analisados para as quatro rotas tecnológicas abordadas, sendo 36 ramos para o processo de biodigestão anaeróbia, 936 ramos para a rota de combustão direta, 1404 ramos para a rota de gaseificação e 1404 ramos para o processo de pirólise.

Com a análise dos dados experimentais coletados, conclui-se que os resultados da caracterização da casca do café foram próximos aos encontrados na literatura por diversos autores. Por meio dos ensaios de distribuição granulométrica foi possível definir o diâmetro médio de Sauter para as duas amostras de casca do café robusta, via úmida (2,69 mm) e via seca (1,24 mm). A análise granulométrica permitiu identificar o modelo que melhor se ajustou aos dados, sendo o RRB e GGS para as cascas provenientes do processamento via úmida e via seca, respectivamente. Por meio da análise estatística verifica-se que houve diferença significativa entre as amostras de casca de café para a massa específica, teor de umidade, carbono fixo e poder calorífico superior. Para as demais variáveis analisadas as cascas não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$). A biomassa apresentou elevado poder calorífico (4218,84 kcal/kg) e baixo teor de cinzas (7,13 %) quando comparados ao bagaço da cana.

Para as condições utilizadas no estudo de cinética de secagem, a temperatura e a velocidade do ar tiveram influência significativa sobre a umidade final da casca do café. O modelo de Overhults ($MR = \exp[-(K \cdot t)^n]$, sendo $K = \exp(a + b/T)$) foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, visto que não apresentou significância na sua curvatura, o vício de Box foi menor do que 1 %, para condições de velocidades do ar de 0,6 e 1,5 m/s, e obteve o maior valor de R^2 (0,999 e 0,993 para as velocidades de 0,6 e 1,5 m/s, respectivamente). Para o intervalo de confiança de 95%, os parâmetros estimados por meio do

modelo na velocidade do ar de secagem de 0,6 m/s foram $a = -4,03 \pm 0,07$, $b = -1525,28 \pm 23,23$ e $c = 1,34 \pm 0,01$ e na velocidade de 1,5 m/s foram $a = -2,52 \pm 0,16$, $b = -1877,09 \pm 55,42$ e $c = 1,35 \pm 0,01$. A técnica de discriminação de modelos rivais, a partir das medidas de não linearidade, permitiu obter as equações mais apropriadas para representar os dados cinéticos.

A combustão da casca do café apresentou alta emissão de monóxido de carbono (concentrações maiores que 20000 mg/Nm^3 , para 8% de oxigênio), o que pode estar relacionado a uma baixa temperatura de combustão, oxigênio insuficiente, mistura incompleta do combustível com o ar de combustão, ou até mesmo um tempo de residência curto dos gases na zona de combustão. Dessa forma, fica evidente a necessidade a realização da combustão em um reator com controle adequado de ar de combustão, de modo a otimizar o processo e avaliar de forma mais precisa os gases gerados.

Com a aplicação do método heurístico foi definido a rota de pirólise como promissora. O estudo apontou o fluxograma-base de número 1303, que compõe o processamento por via seca, moinhos finos, sem secagem, briquetagem, pirólise em leito fluidizado circulante, com integração energética, precedido de geração a combustível para o resíduo estudado.

Pelo método evolutivo determinou-se 11 fluxogramas vizinhos como alternativas ao fluxograma heurístico, os quais devem ser submetidos a uma análise de custo para definir o fluxograma ótimo. Sob a ótica interdisciplinar, foi possível verificar os efeitos de diferentes rotas tecnológicas e o impacto da combinação dos diferentes equipamentos no processo de conversão energética. A otimização estrutural, por meio dos métodos heurístico e evolutivo, aplicada neste trabalho mostrou-se adequada para a resolução do problema de síntese de processo de produção de energia a partir da casca do café.

O tema proposto contribui para o desenvolvimento sustentável e incentiva o desenvolvimento de novas tecnologias para o aproveitamento de biomassa. A aplicação da casca do café como fonte energética é uma das alternativas viáveis para atender aos pequenos produtores, sem comprometer o meio ambiente para as gerações futuras.

CAPÍTULO 8

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de dar continuidade a este trabalho, sugere-se:

- Aperfeiçoar as árvores de estados;
- Aprimorar a síntese estrutural, por meio de métodos heurístico e evolutivo;
- Reproduzir em *scale-up* o fluxograma-base;
- Realizar um estudo de viabilidade econômico-financeira para o fluxograma-base e analisar os fluxogramas vizinhos gerados pelo método evolutivo;
- Realizar ensaios da análise elementar da casca do café;
- Realizar ensaios complementares de compactação da casca do café;
- Realizar ensaios complementares de combustão com controle da entrada de oxigênio;
- Realizar ensaios complementares de pirólise, gaseificação e biodigestão anaeróbia da casca do café para auxiliar na definição das regras heurísticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Y. V. de; OLIVEIRA, M. A. G. de; GUERRA, S. M. G. (Orgs.). *Energia, Economia, Rotas Tecnológicas*. Málaga, Espanha: Eumed.Net, Universidade de Málaga, 2010

AÇMA, H. H. Combustion characteristics of different biomass materials. *Energy Conversion e Management*. Istanbul: Pergamon, v. 44, p. 155-162, 2003.

ALMEIDA, M. B. B. de. *Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gás-óleo em craqueamento catalítico*. 2008. 149p. Dissertação (Mestrado em Ciências em tecnologia de processos químicos e bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ALONSO, L. F. T. *Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores*. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2001.

ALONSO, L. F. T.; PARK, K. J. Métodos de seleção de secadores. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* v. 25, n. 2. p. 208-216, 2005.

ANANTHARAMAN, R. *Energy Efficiency in Process Plants with emphasis on Heat Exchanger Networks: Optimization, Thermodynamics and Insight*. 2011. 187p. Thesis (Philosophæ Doctor) - Department of Energy and Process Engineering Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2011.

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

ARAÚJO, D. de S. S. de. *Co-Combustão de biomassa e carvão em leito fluidizado: Impactos nas emissões atmosféricas de NOx, SO2, CO, dioxinas e furanos e material particulado*. 2008. 141p. Dissertação (Mestrado em Bioenergia), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

ASTM INTERNATIONAL. *E870-82: Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels*. West Conshohocken, PA, 2006.

BABI, D.K.; HOLTBRUEGGE, J.; LUTZE, P.; GORAK, A. WOODLEY, J. M.; GANI, R. Sustainable process synthesis–intensification. *Computers and Chemical Engineering*, v. 81, p. 218-244, 2015.

BÄFVER, L. S; LECKNER, B.; TULLIN, C.; BERNTSEN, M. Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 3648-3655, 2011.

BARBOSA, M. R. *Pirólise rápida de resíduo urbano*. 2009. 82p. Monografia (Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

BARRETO, E. J. F (Coord.). *Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia*. 1ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

BARROZO, M. A. S. *Transferência de calor e massa entre o ar e amêndoas de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados*. 1995. 163p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

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

BATES, D. M.; WATTS, D. G. Relative curvature measures of nonlinearity. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, vol. 42, p. 1-25, 1980.

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*. 90p. Dissertação (Mestrado em Energia), Centro Universitário Norte do Espírito Santo. São Mateus. 2014.

BONTURI, G. de L.; DIJK, M. V. Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais. *Revista Ciências do Ambiente On-Line*. v. 8, n.2, p. 88-95, out. 2012

BOX, M.J. Bias in nonlinear estimation. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, vol. 33, p. 171-201, 1971.

BRAND, M.A. *Energia de biomassa florestal*. 1ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

BRIDGWATER, A. V. *Fast pyrolysis of biomass: a Handbook*. CPL Press: Nwebury, U.K., 2002. 432p. Vol.2.

BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemical by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, n.91, p. 87-102, 2003.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. *IPEF*, São Paulo, Circular Técnica, n.52, PBP/3.1.8, 7p. jun. 1979

BRITO, L. F. *Evolução da lesão aterosclerótica e perfil lipídico de camundongos knockout apo e alimentados com resíduo de café seco e fermentado*. 2008. 57p. Dissertação (Magister Scientiae) – Programa de Pós Graduação em Bioquímica Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W., *Drying cereal grains*. The Avi Publissinging Company Inc., 1974. 265p.

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

BRUNO, M.; OLIVEIRA, R. A. de. Tratamento anaeróbio de águas residuárias do beneficiamento de café por via úmida em reatores UASB em dois estágios. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.28, n.2, p. 364-377, abr./jun. 2008.

CAMPANHA, F. G. *Discriminação de espécies de café (Coffea arabica e coffea canéfora) pela composição de diterpenos*. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

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.

CARVALHO, M. X. S. de. *Equipamentos de fragmentação: Uma revisão avaliando circuitos alternativos para a moagem dos finos*. 2012. 70p. Monografia, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.

CASSINI, A. S. Estudo de processos alternativos no pré-tratamento de efluentes provenientes da produção de isolados proteicos. 2008. 179p. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

CIESLINSKI, J. E. F. *Estudo da emissão e do controle dos gases e particulados provenientes da queima da biomassa*. 2014. 157p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2014.

CHANNIWALA, S. A.; PARIKH, P. P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, v. 81, p. 1051-1063, 2002.

CHRISOSTOMO, W. *Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido*. 2011. 67p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2011.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. *Levantamento de Safra*. 2016. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>>. Acesso em: 09 set. 2016.

CONAMA. *Resolução Conama nº 382/06: Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas*, 2006.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (Orgs). *Biomassa para energia*. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008.

COUTO, C. M. *Estimativa do poder calorífico de madeiras de acácia-negra e eucalipto do Município de Pelotas - RS*. 2014. 55p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitarista) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

CREMASCHI, S. A perspective on process synthesis: Challenges and prospects. *Computers and Chemical Engineering*. v.81, p. 130-137, 2015.

CREMASCO, M. A. *Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos*. 2ed. São Paulo: Blucher, 2012.

DEMIRBÁS, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, v. 42, n. 11, p. 1357-1378, 2001.

DEMIRBÁS, A. ARIN. G. An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources*. n.24, p. 471-482, 2002.

DOMÍNGUEZ, A.; MENÉNDEZ, J. A.; FERNÁNDEZ, Y.; PIS, J. J.; VALENTE NABAIS, J. M.; CARROT, P. J. M.; RIBEIRO CARROT, M. M. L. Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. v. 79, p. 128-135, 2007.

DOTTO, R. B.; WOLFF, D. B. Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos. *Disciplinarum Scientia*. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 13-26, 2012

DOUGLAS, J. M. *Conceptual Design of Chemical Processes*. McGraw-Hill Book Company, 1988.

EROL, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; KÜÇÜKBAYRAK, S. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable Energy*, Istanbul, Turkey, v.35, p. 170-173, 2010.

ESTEVES, B. N. *Influência do processo de secagem por pulverização mecânica (spray dryer) no tamanho de partícula e densidade aparente do café solúvel*. 2006. 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163p.

FERNANDES, C. F. *Análise da eficiência energética da secagem de pasta em leito de jorro*. 2005. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

FERNANDES, M. L. M. *Produção de lipases por fermentação no estado sólido e sua utilização em biocatálise*. 2007. 131 p. Dissertação (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

FERNÁNDEZ, R. G.; GARCÍA, C. P.; LAVÍN, A. G.; HERAS, J. L. B. de L. Study of main combustion characteristics for biomass fuels used in boilers. *Fuel Processing Technology*, v. 103, p. 16-26, 2012.

FIGUEIREDO, A. L. *Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo*. 2011. 113p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

FIGUEIREDO, F. L. *Avaliação de uma unidade autônoma de produção de energia elétrica composta por sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com capacidade de 50 kVA*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento), Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. *Princípios das operações unitárias*. Traduzido por Horácio Macedo. 2ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FRARE, L.M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C.; MENDES, E. S. Linearização do modelo log – normal para distribuição de tamanho de partículas. *Acta Scientiarum*. v. 22, n. 5, p. 1235 – 1239, 2000.

FRIEDL, A.; PADOUVAS, E.; ROTTER, H.; VARMUZA, K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*. v. 544, p. 191-198, 2005.

GÓMEZ, E.O. *Estudo da pirólise rápida do capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão*. 2002. 369p. Tese (Doutorado em Energia), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

GOMIDE, R. *Operações unitárias: Operações com sistemas sólidos granulares*. v.1, São Paulo: Edição do autor, 1983.

GRABOWSKI, S., MARCOTTE, M., POIRIER, M., KUDRA, T. Drying Characteristics of Osmotically Pretreated Cranberries – Energy and Quality Aspects. *Drying Technology*. v. 20, n. 10, p.1989-2004. 2002.

GUPTA, R. B.; DEMIRBÁS, A. *Gasoline, Diesel, and Ethanol Biofuels from Grasses and Plants*. Cambridge University Press, New York, 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.

HENRIQUES, R. M. *Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica*. 2004. 189p. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

HIGMAN, C. BURGT, M. V. D. *Gasification*. 2ed. Gulf Professional Publishing, 2008.

HORST, D. J. *Avaliação da produção energética a partir de ligninas contidas em biomassas*. 2013. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2013.

JESUS, P. A. de. *Síntese e análise do processo de secagem artificial de amêndoas de cacau*. 2015. 90p. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus. 2015.

KINTO, O. T. *Produção Local de Energia através da Gaseificação da Biomassa para Geração de EE no MPP*. 2001 - Relatório Final do Projeto de Formatura. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

KLASS, D. L. *Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals*. San Diego: Academic Press, 1998.

KLATT, K. U.; MARQUARDT, W. Perspectives for process systems engineering – Personal views from academia and industry. *Computers and Chemical Engineering*. n.33, p. 536-550, 2009.

KLAUTAU, J. V. P. *Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente para secagem de grãos*. 2008. 193p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba: 2008.

KUNII, D; LEVENSPIEL, O. *Fluidization engineering*. 2 ed. Stoneham: Butterworth – Heinemann, 1991.

LAIRD, D. A.; BROWN, R. C.; AMONETTE, J. E.; LEHMANN, J. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* n.3, p. 547-562, 2009.

LEITE, E. R. da S. *Madeira e carvão de Coffea arabica L.: Caracterização para uso energético*. 2013. 157p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

LEWIS, W. K. *The rate of drying of solids materials. The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v.13, nº 5, p.427-432, 1921.

LIMOUSY, L.; JEGUIRIM, M.; DUTOURNIÉ, P.; KRAIEM, N.; LAJILI, M.; SAID, R. Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel*, v. 107, p. 323-329, 2013.

LIRA, C. S. *Pirólise rápida da semente de tucumã-do-Amazonas (Astrocaryum aculeatum): caracterização da biomassa in-natura e dos produtos gerados*. 2012. 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

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

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V. Geração de energia e a gaseificação de biomassa. *Biomassa & Energia*, Viçosa, v.1, n.3, p. 311-320, jul./set. 2004.

MACÍAS-GARCÍA, A.; CUERDA-CORREA, E. M.; DÍAZ-DÍEZ, M. A. Application of the Rosin–Rammler and Gates–Gaudin–Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork. *Materials Characterization* v.52, p.159–164, 2004.

MAGALHÃES, W. L. E.; JOB, A. E.; FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. Pyrolysis and combustion of pulp Mill lime sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 82, n. 2, p. 298-303, 2008.

MAIA, M. de L. O. *Síntese e otimização de sistemas de destilação utilizando a análise exergética*. 2001. 163p. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2001.

MATIELLO, J. B. *O café do cultivo ao consumo*. São Paulo: Globo, 1991. 320p.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. n. 83, p. 37-46, 2002.

MELO, F. A. de O.; SILVA, J. N. da.; SILVA, J. S. e.; DONZELES, S. M. L. Avaliação da utilização da palha de café para o aquecimento indireto de ar para secagem de produtos agrícolas, *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.13, n.1, p. 49-54, Jan./mar., 2005.

NASCIMENTO, R. F. *Síntese da estrutura de processamento de um produto à base de cacau: maximização de componentes antioxidantes*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Centro Universitário Norte do Espírito Santo, São Mateus, 2014.

NEVES, D.; THUNMAN, H.; MATOS, A.; TARELHO, L.; GÓMEZ-BAREA, A. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. *Progress in Energy and Combustion Science*. v. 37, p. 611-630, 2011

OIC – International Coffee Organization. *Trade Statistics Tables*. 2016. Disponível em: <http://www.ico.org/trade_statistics.asp>. Acesso em: 09 set. 2016.

OLIVEIRA, R. A. F. de. *A geração de energia elétrica através do uso de biomassa na Bahia: condicionantes e oportunidades*. 2006. 211p. Dissertação (Mestrado em Regulação da Indústria de Energia), Universidade Salvador, Salvador, 2006.

ORSINI, R. dos R. *Estudo do aproveitamento do resíduo da lavoura cafeeira como fonte de biomassa na produção de hidrogênio*. 2012. 142p. Tese (Doutorado em Ciências Naturais na Tecnologia Nuclear – Materiais), Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo, 2012.

OVERHULTS, D. G.; WHITE, G.M.; HAMILTON, H.E.; ROSS, I.J. “Drying Soybeans with Heated Air”. *Transactions. of the American Society of Agricultural Engineer*, v.16, n.2, p.195-200, 1973.

PAGE, G.E. *Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layer*. 1949. Dissertação (mestrado) - Purdue University, Lafayette: Indiana, 1949.

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.

PARK, K. J. B.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D.; PARK, K. J. Seleção de secadores: fluxograma. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. v. 9, n. 2, p. 179-202, 2007.

PERLINGEIRO, C. A. G. *Engenharia de processos: Análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos*. São Paulo: Blucher, 2005. 198p.

PINTO, L. R. de M. *Análise da Viabilidade da Geração de Energia Elétrica Descentralizada a partir de resíduos agrícolas no estado de Goiás e Estudo de Caso do Município de Rio Verde*. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia), Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2008.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. *Seleção de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas*. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 42, n. 97, p.15-28, 2013.

RABELLO, R. B.; PÉCORA, A. A. B. Caracterização de serragem de madeira para geração de energia em sistemas fluidizados. In: Congresso Interno de Iniciação Científica. XIX, 2011, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Unicamp, 2011. Disponível em: <<http://www.prp.rei.unicamp.br/pibic/congressos/xixcongresso/paineis/084009.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2016.

RATKOWSKY, D.A. *Nonlinear Regression Analysis*. Nova York: Marcel Dekker Inc., 1983.

RINGER, M.; PUTSCHE, V.; SCAHILL, J. *Large-scale pyrolysis oil production: A technology assessment and economic analysis*. United States: NREL, 2006.

SAATH, R. *Qualidade do café natural e despulpado em diferentes condições de secagem e tempos de armazenamento*. 2010. 229p. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, 2010.

SAENGER, M.; HARTGE, U., E.; WERTHER, J.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of Coffee Husks. *Renewable Energy*, v. 23, n.1, p. 103-121, 2000.

SAITER, O. *Utilização de resíduos agrícolas e florestais como fonte de energia para a secagem de grãos de Coffea canephora var. Conilon*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.

SÁNCHEZ, C. G. (Org.). *Tecnologia da gaseificação de biomassa*. Grupo Átomo e Alínea, 2010.

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

SOARES, R.V. Queimas Controladas: Prós e Contras. In: Fórum Nacional sobre Incêndios Florestais, 1., p. 6-10, 1995, São Paulo. *Anais eletrônicos...* Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/forum_incendios/cap03.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2015.

SOCOL, C. R. Resíduo de café um substrato promissor para a produção industrial de bioprodutos com alto valor agregado. *Pesquisa dos cafés do Brasil*. 1ed. Brasília: Embrapa, v.1, p. 83-98, 2002.

SOUZA, G. de F. M. V.; BARROZO, M. A. de S.; ARRUDA, E. B.; CARVALHO, L. R. da S.; MIRANDA, R. F. de. Estudo da Discriminação Estatística das Equações de Cinética de Secagem de Sílica-gel. In: *SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA*, 20., 2012, Uberlândia. Disponível em: <<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/20/PDF/Fortes-POSMEC20GlauciadeFMVeSOUZA.pdf>>. Acesso em 01 jul. 2016.

SOUZA, S. N. M. de; SORDI, A.; OLIVA, C. A. Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná. In: *ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 4., 2002, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200042&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 15 nov. 2015.

STEIMEL, J.; HARRMANN, M.; SCHEMBECKER, G.; ENGELL, S. A framework for the modeling and optimization of process superstructures under uncertainty. *Chemical Engineering Science*. v.115, p. 225–237, 2014.

STOBBE, A. Q. *Caracterização qualitativa preliminar dos componentes dos bio-óleos de palha de milho e bagaço de casca de acácia negra*. 2011. 31p. Trabalho de Conclusão de curso (Químico Industrial), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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.; JONES, P. L.; ZYLLA, R. *Energy aspects in drying*. In: MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*, 3ª Edição. London – UK: Taylor and Francis, 1075-1099, 2006.

TAKAMATSU, T. The nature and role of process systems engineering. *Computers & Chemical Engineering*, Kyoto, v. 7, n. 4, p. 203-218, 1983.

TULA, A. K.; EDEN, M. R.; GANI, R. Process synthesis, design and analysis using a process-group contribution method. *Computers and Chemical Engineering*. v.81, p. 245–259, 2015.

TUMULURU, J. S.; SOKHANSANJ, S.; WRIGHT, C. T.; BOARDMAN, R. D.; YANCEY, N. A. A Review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods. *Paper number 1110458*, Louisville, Kentucky, 2011.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr*, Hoboken, v.5, n.6, p. 683-707, 2011.

VALE, A., T.; GENTIL, L., V.; GONÇALEZ, J., C.; COSTA, A., F. Caracterização energética e rendimento de carbonização e resíduos de grãos de café (coffea arábica,L) e de madeira (Cedrelinga catenaeformis), DUKE. *Cerne*, Lavras, v.13, n.4, p. 416-420; 2007.

VAN WYLEN. G. J.; SONNTAG. R. E.; BORGNAKKE. C. *Fundamentos da termodinâmica*. 5ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1998. 538p. p385-400.

VELEZ, J., F.; CHEJNE, F.; VALDEZ, C.; EMERY, E., J.; LONDOÑO, C., A.; Cogasification of colombian coal and biomass in fluidized bed: an experimental study. *Fuel*, v.88, n.3, p. 424-430; 2009.

VENTURIM, J. B. *Gestão de resíduos orgânicos produzidos no meio rural: o caso do beneficiamento do café*. 2002. 102p. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

VERMA, V. K.; BRAM, S.; DELATTIN, F.; LAHA, P.; VANDENDAEL, I.; HUBIN, A.; RUICK, J. de. Agro-pellets for domestic heating boilers: standard laboratory and real life performance. *Applied Energy*, v. 90, p. 17–23, 2012.

VIEIRA, A. C. *Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas*. 2012. 56p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2012.

VIEIRA, N. A. D. *Obtenção de briquetes a partir da casca do arroz e avaliação do seu potencial energético*. 2014. 124p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Centro Universitário Univates, Lajeado, 2014.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*. v. 26, p. 1-27, 2000.

ZAKON, A.; PESSOA, F. L. P. As engenharias de processo, projeto e processos químicos industriais. In: COBENGE - Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 28., 2000, Ouro Preto. *Anais eletrônicos...* Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2000/artigos/068.PDF>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

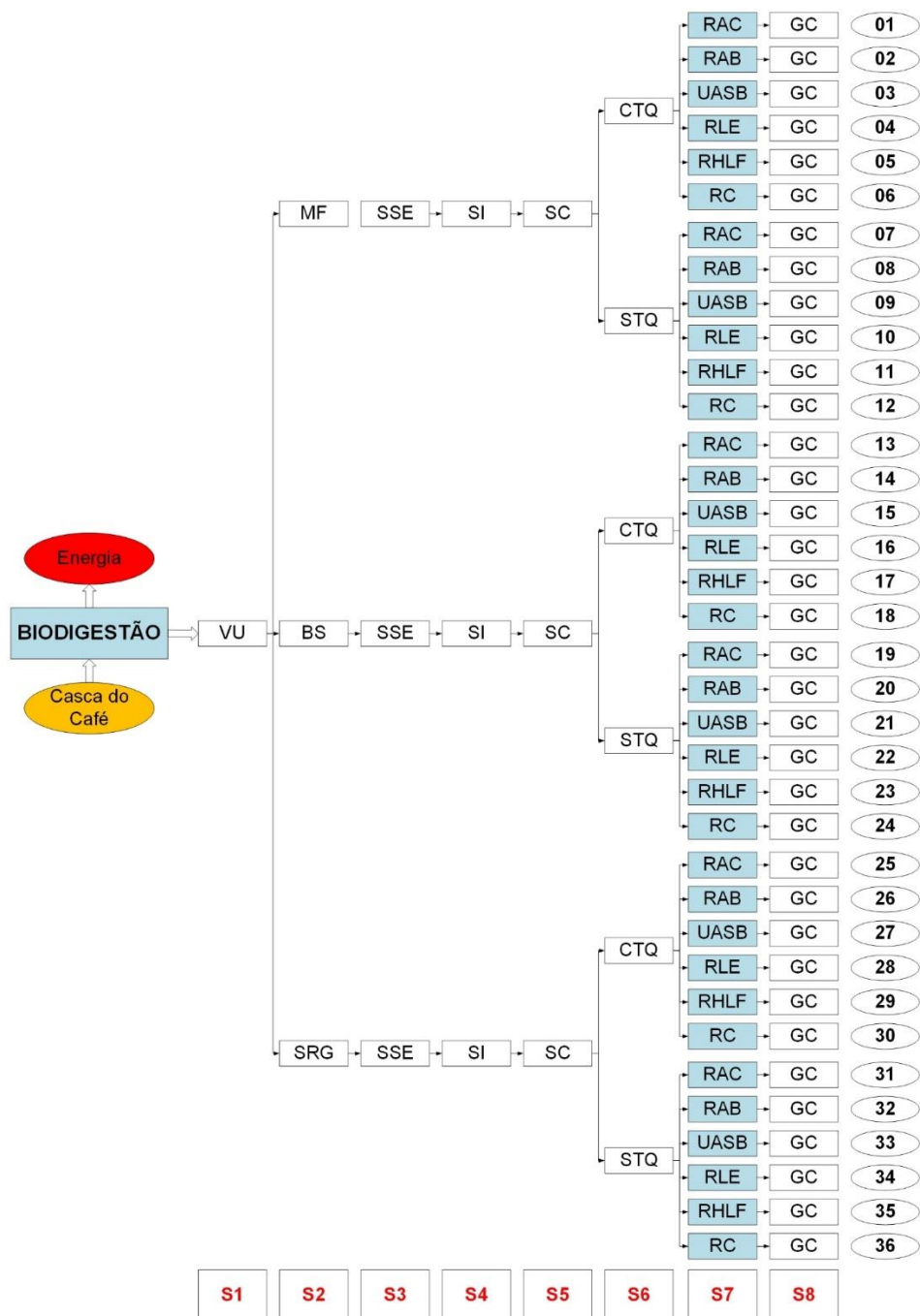
ZANETTE, A. L. *Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil*. 2009. 97p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZOCA, S. M. *Avaliação da liberação de potássio por resíduos do benefício de café*. 2012. 229p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, 2012.

APÊNDICE A

ÁRVORE DE ESTADOS – ROTA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Figura A.1 – Árvore de estados do processamento da casca do café para a geração de energia.



Nota: S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 e S8 representam os subsistemas de beneficiamento do café, redução granulométrica, secagem, integração energética, compactação, tratamento químico, reação química e geração a combustível, respectivamente.

Fonte: O autor.

APÊNDICE B

DADOS EXPERIMENTAIS REFERENTES A ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS BIOMASSAS DO CAFÉ

Tabela B.1 – Análise granulométrica das biomassas do café.

Tyler (Mesh)	Abertura da malha (mm)	Casca via seca		Casca via úmida	
		x_i (%)	X_i	x_i (%)	X_i
--	8,00	0,52	0,995	2,03	0,980
--	6,30	4,02	0,955	8,56	0,894
4	4,75	15,68	0,798	18,28	0,711
7	2,80	27,61	0,522	19,26	0,519
10	1,70	30,64	0,215	18,48	0,334
20	0,85	17,84	0,370	16,15	0,172
80	0,18	3,35	0,350	12,64	0,046
Fundo	< 0,18	0,35	0,000	4,60	0,000

Nota: x_i e X_i é fração retida e cumulativa, respectivamente.

Fonte: O autor.

APÊNDICE C

TABELAS ANOVA PARA A ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Tabela C.1 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via seca: modelo GGS.

	Grau de Liberdade (DF)	Soma dos Quadrados (SQ)	Média Quadrática (MQ)	F	p-valor
Regressão	2	2,82554	1,41277	266,10265	3,37854E-6
Resíduos	6	0,03185	0,00531		
Total não corrigido	8	2,8574			
Total Corrigido	7	1,30436			

Fonte: O autor.

Tabela C.2 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via seca: modelo RRB.

	Grau de Liberdade (DF)	Soma dos Quadrados (SQ)	Média Quadrática (MQ)	F	p-valor
Regressão	2	2,85597	1,42798	6004,5877	3,1097E-10
Resíduos	6	0,00143	2,37816E-4		
Total não corrigido	8	2,8574			
Total Corrigido	7	1,30436			

Fonte: O autor.

Tabela C.3 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via seca: modelo LN.

	Grau de Liberdade (DF)	Soma dos Quadrados (SQ)	Média Quadrática (MQ)	F	p-valor
Regressão	2	2,83838	1,41919	447,76686	7,26057E-7
Resíduos	6	0,01902	0,00317		
Total não corrigido	8	2,8574			
Total Corrigido	7	1,30436			

Fonte: O autor.

Tabela C.4 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via úmida: modelo GGS.

	Grau de Liberdade (DF)	Soma dos Quadrados (SQ)	Média Quadrática (MQ)	F	p-valor
Regressão	2	2,67466	1,33733	2363,5280	5,07845E-9
Resíduos	6	0,00339	5,6582E-4		
Total não corrigido	8	2,67806			
Total Corrigido	7	1,00678			

Fonte: O autor.

Tabela C.5 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via úmida: modelo RRB.

	Grau de Liberdade (DF)	Soma dos Quadrados (SQ)	Média Quadrática (MQ)	F	p-valor
Regressão	2	2,66891	1,33446	875,32908	9,88556E-8
Resíduos	6	0,00915	0,00152		
Total não corrigido	8	2,67806			
Total Corrigido	7	1,00678			

Fonte: O autor.

Tabela C.6 – Tabela ANOVA para a distribuição granulométrica da casca do café proveniente do processamento via úmida: modelo LN.

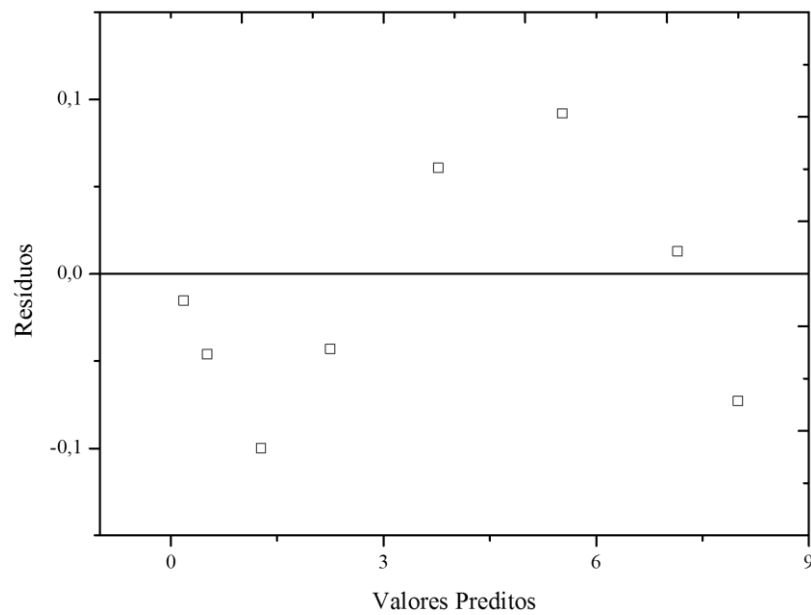
	Grau de Liberdade (DF)	Soma dos Quadrados (SQ)	Média Quadrática (MQ)	F	p-valor
Regressão	2	2,67719	1,33859	9239,9759	8,5418E-11
Resíduos	6	8,6922E-4	1,4487E-4		
Total não corrigido	8	2,67806			
Total Corrigido	7	1,00678			

Fonte: O autor.

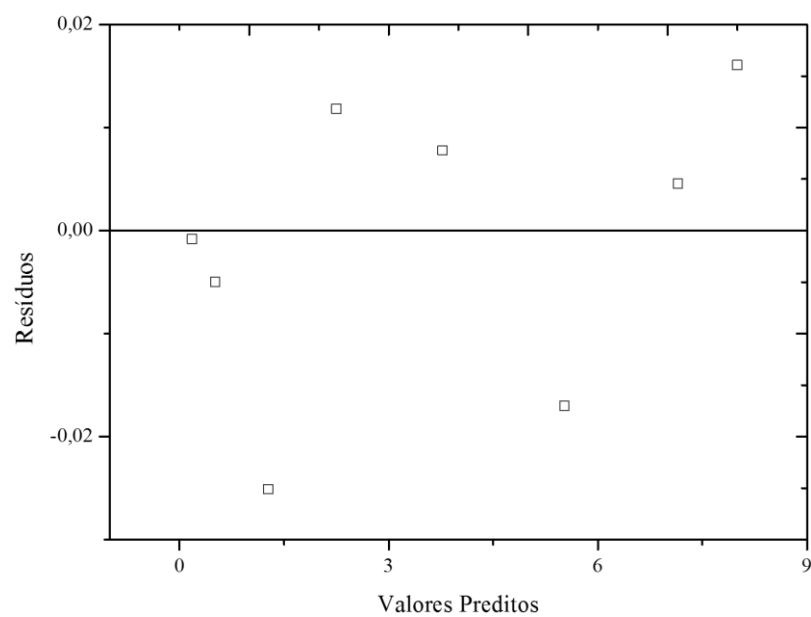
APÊNDICE D

DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS REFERENTES ÀS EQUAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Figura D.1 – Resíduos como função dos valores preditos para a casca do café derivada do processamento via seca – (a) GGS; (b) RRB.



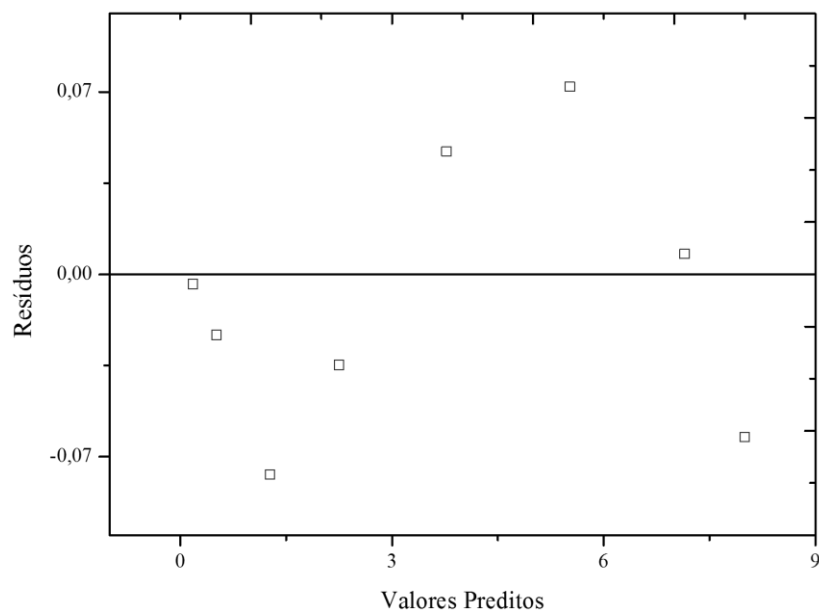
(a)



(b)

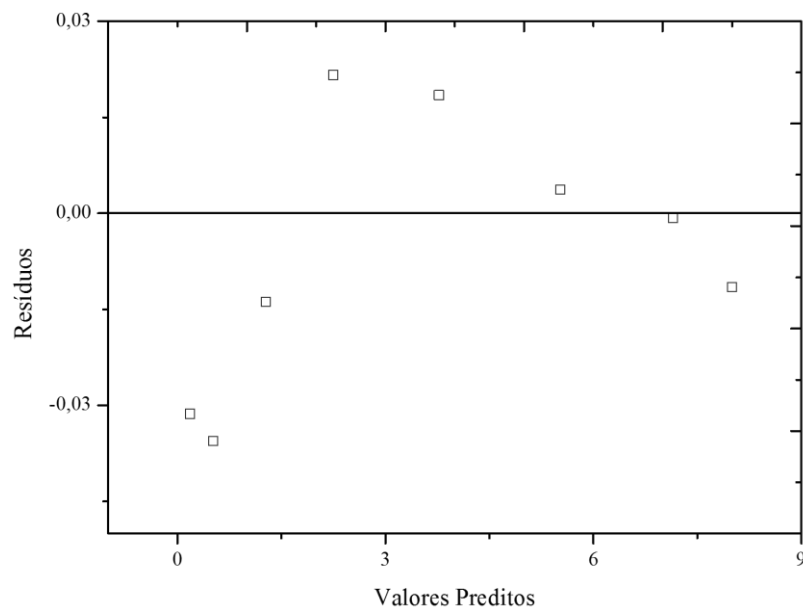
Fonte: O autor.

Figura D.2 – Resíduos como função dos valores preditos para a casca do café derivada do processamento via seca – LN.



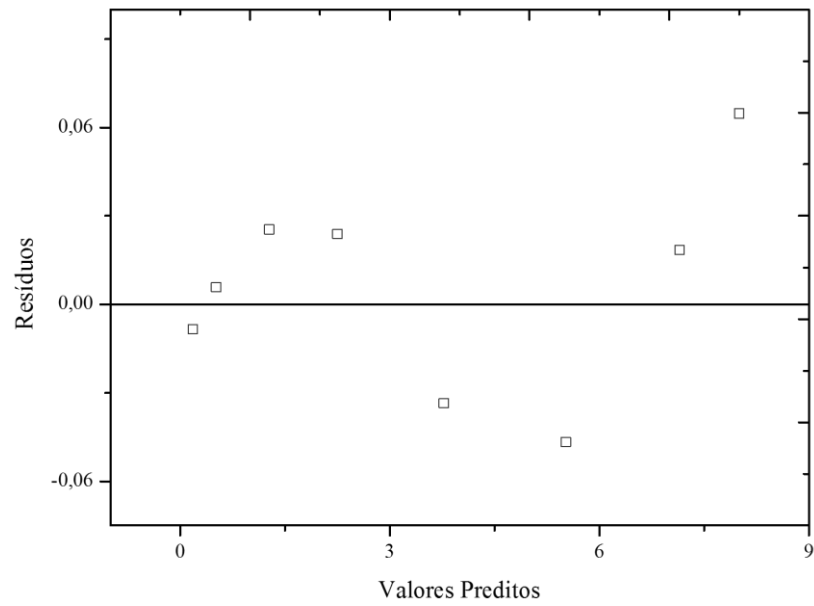
Fonte: O autor.

Figura D.3 – Resíduos como função dos valores preditos para a casca do café derivada do processamento via úmida – GGS.

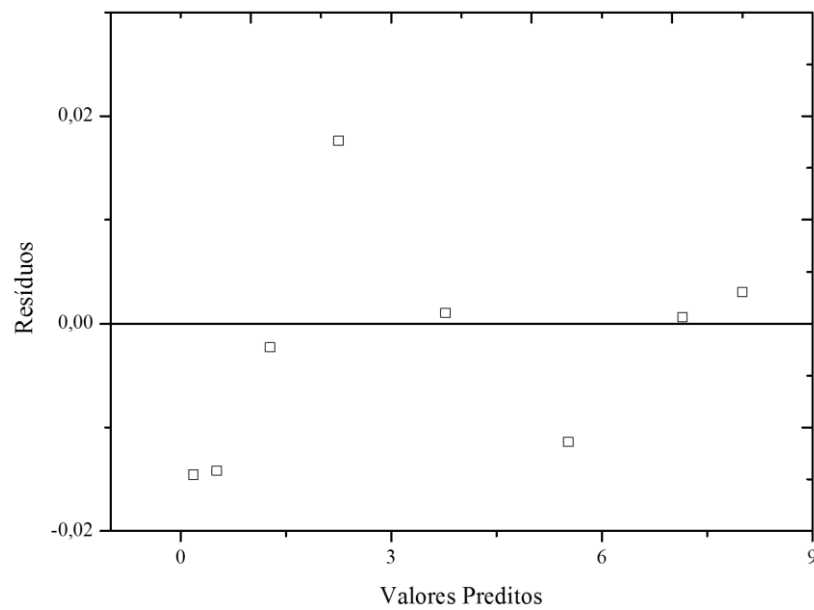


Fonte: O autor.

Figura D.4 – Resíduos como função dos valores preditos para a casca do café derivada do processamento via úmida – (a) RRB; (b) LN.



(a)



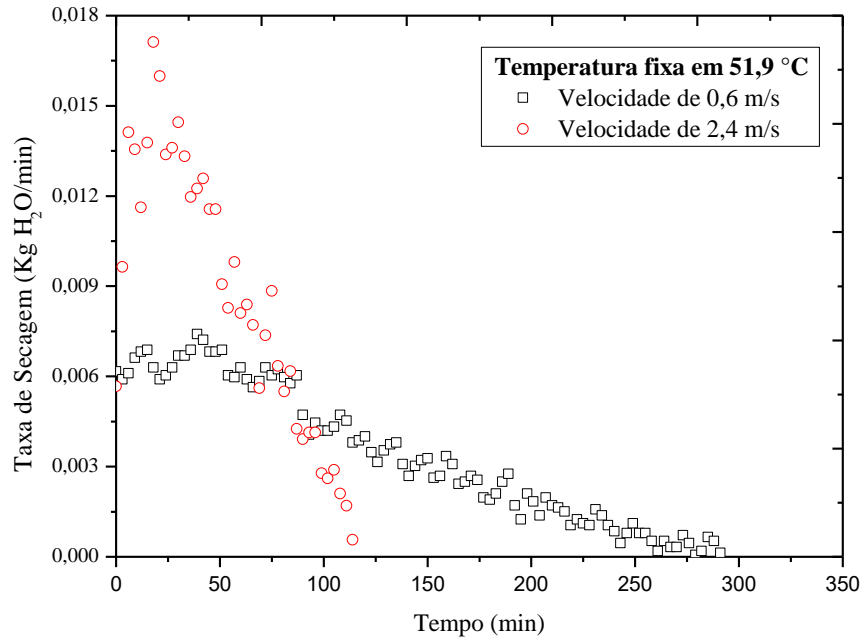
(b)

Fonte: O autor.

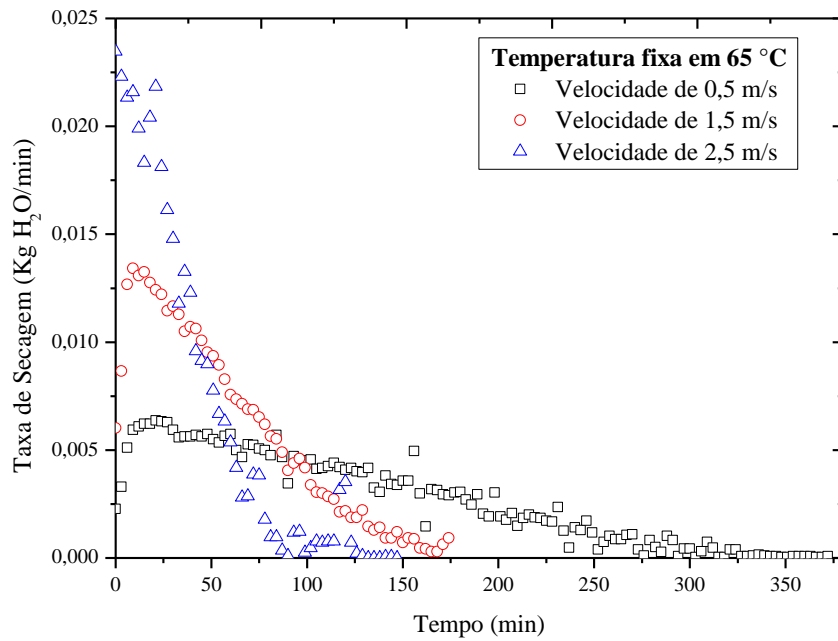
APÊNDICE E

TAXA DE SECAGEM

Figura E.1 – Curvas das taxas de secagem em função da umidade da casca do café para temperatura fixa do ar de secagem de: (a) 51,9°C; (b) 65°C.



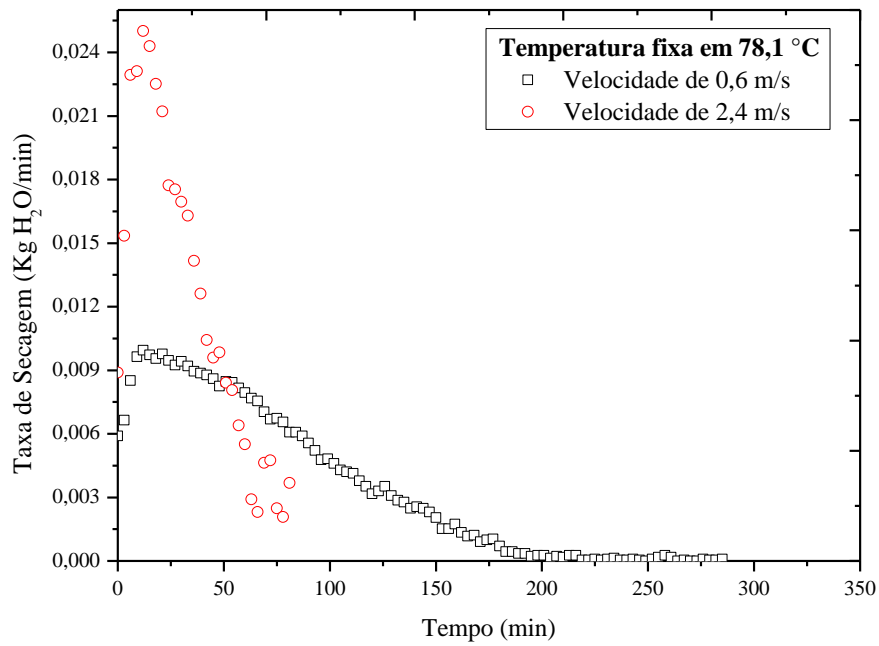
(a)



(b)

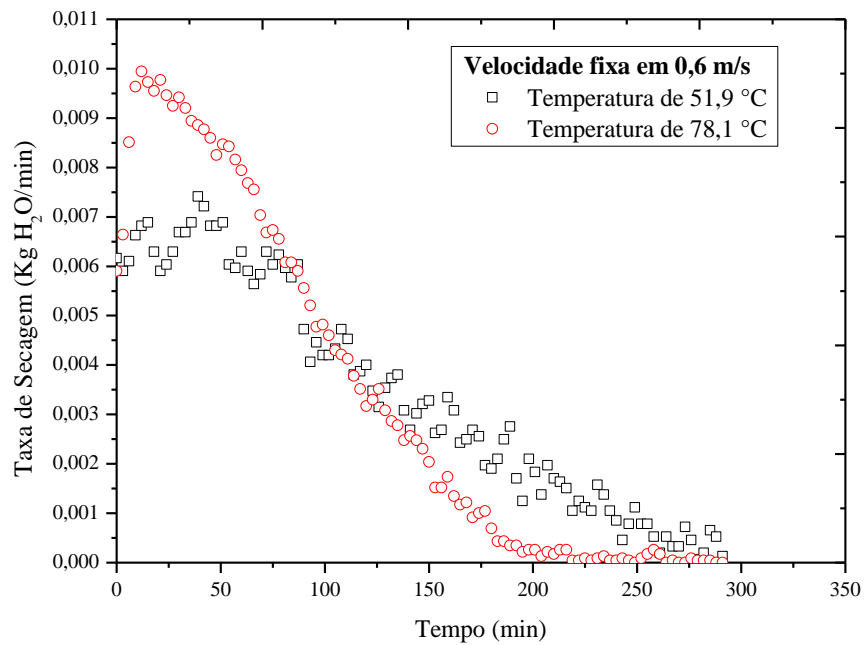
Fonte: O autor.

Figura E.2 – Curvas das taxas de secagem em função da umidade da casca do café para temperatura fixa do ar de secagem de 78,1°C.



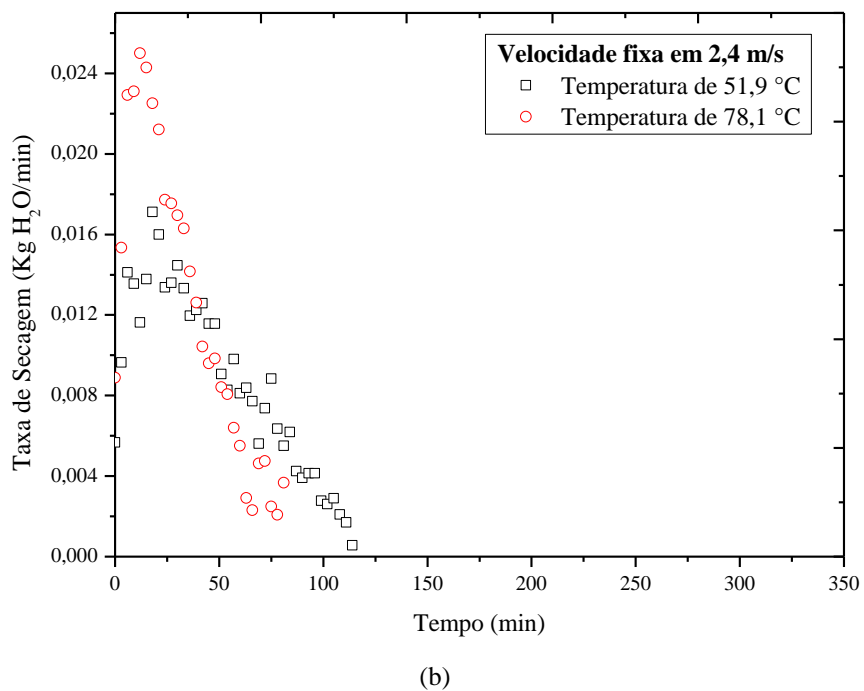
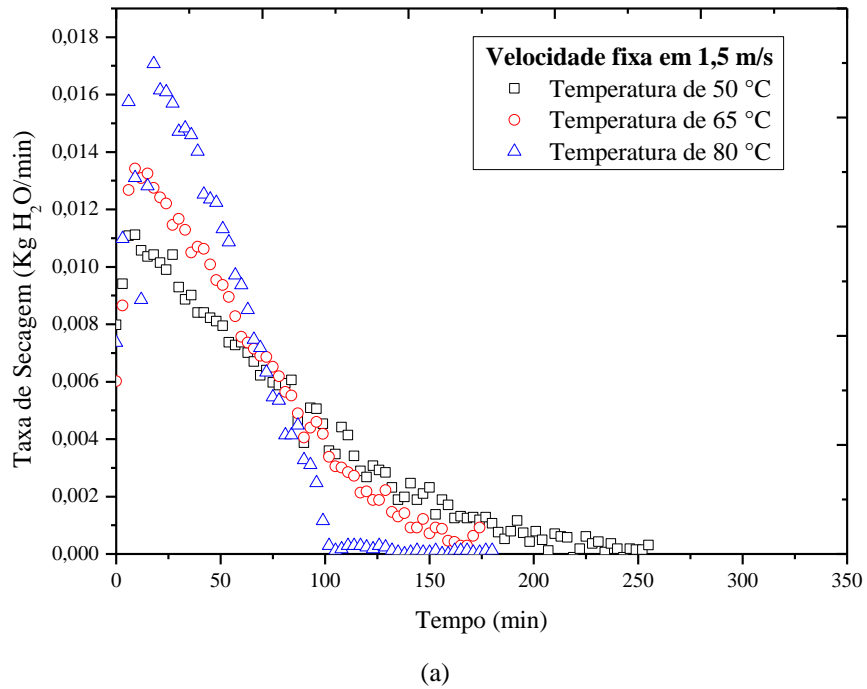
Fonte: O autor.

Figura E.3 – Curvas das taxas de secagem em função da umidade da casca do café para velocidade fixa do ar de secagem de 0,6 m/s.



Fonte: O autor.

Figura E.4 – Curvas das taxas de secagem em função da umidade da casca do café para velocidade fixa do ar de secagem de: (a) 1,5 m/s e (b) 2,4 m/s.



Fonte: O autor.