

IVAN DE OLIVEIRA PEREIRA

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DA CASCA DE CACAU COMO
COMBUSTÍVEL NO AQUECIMENTO DE AR PARA SECAGEM DE
AMÊNDOAS DE CACAU**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

P436v
2013

Pereira, Ivan de Oliveira, 1981-
Viabilidade da utilização da casca de cacau como combustível
no aquecimento de ar para secagem de amêndoas de cacau
/ Ivan de Oliveira Pereira. – Viçosa, MG, 2013.
xv, 123 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Jadir Nogueira da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 113-123.

1. Biomassa vegetal. 2. Energia - Fontes alternativas.
3. Secagem. 4. Cascas (Engenharia). 5. Cacau - Qualidade.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 633.74

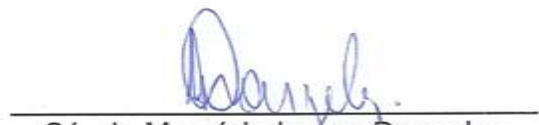
IVAN DE OLIVEIRA PEREIRA

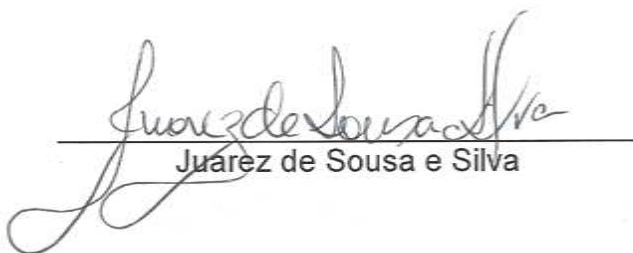
**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DA CASCA DE CACAU COMO
COMBUSTÍVEL NO AQUECIMENTO DE AR PARA SECAGEM DE
AMÊNDOAS DE CACAU**

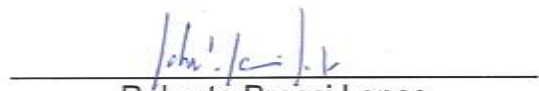
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

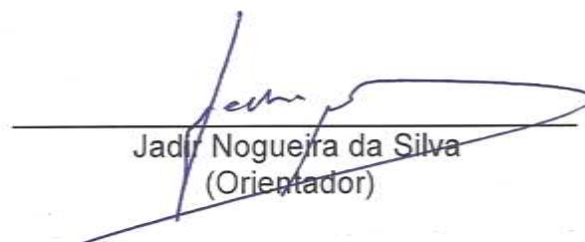
APROVADA: 17 de maio de 2013.


Geovane Barbosa do Nascimento


Sérgio Maurício Lopes Donzeles


Juárez de Sousa e Silva


Roberto Precci Lopes
(Coorientador)


Jadir Nogueira da Silva
(Orientador)

Aos meus queridos pais, Waldomiro e Carmélia, que lutaram tanto para proporcionar-me esse bem tão valioso: a educação.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola e aos seus servidores, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao IF Baiano Campus Uruçuca, Fazenda Riachuêlo, em nome do Sr. Geraldo e CEPLAC, pelo apoio técnico e contribuições a este trabalho.

Ao professor Jadir Nogueira da Silva, pela amizade, orientações, confiança e apoio nas horas mais difíceis.

Aos coorientadores professores Roberto Precci, José Helvécio e Evandro Freire, pelo apoio e pelas valiosas contribuições ao trabalho.

Aos professores Sérgio Donzeles, Juarez Silva e Geovane Barbosa, pelo apoio, amizade e pelas valiosas contribuições no trabalho.

À minha esposa, Simone, pelo carinho, dedicação e atenção.

Ao pesquisador, parceiro e amigo Raimundo Mororó e a toda sua equipe, pelos serviços prestados e apoio durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

À minha família, em especial Sergio Marins, pais, padrinhos (Marlene e José Fortunato), minha querida avó Maria, afilhadas e à minha irmã, Milena, pelo exemplo, amor e apoio.

Aos meus amigos Felipão, Tiago Macedo, Humberto, Reginaldo Jr., David, Jofran, Zanata, Daniel Rizzo, Cassio, Oscar, Esvete, Roberta, Cissa, Maycon, Moysés, Roney, Rita, Janaina, Rafael Lira, Leozinho, Rogerio, Victor, Andreia Cesário, Elvanio, Saulo, Marco Antônio, Wmekson e Carlindo, pelo apoio e por dividirem parte dos problemas enfrentados durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos e colegas de trabalho Josué, Piauí, Nilde, Gildecio, Bianco, Elck, Cristiane, Flavinha, Taís, Valdecio, Júnior, Luís e Raimunda, Zé Rodrigues, Paulo e Saionara Sabione, Geovane e Elizene, Leandro, Wanessa, Euro, Daniel, Diogo e Danila, Tiago, Menandro, Renata Reis e Durval Libânio

À colega de trabalho e amiga Eliane Matos, pelo apoio, pela força, pela mão amiga e pelos conselhos, quando esteve “in” vida, mas que deixou suas palavras vivas em minha mente.

Aos meus queridos alunos do IF Baiano, Campus Uruçuca, turmas de 2010, 2011, 2012 e 2013, pelo apoio nos momentos difíceis.

A todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste sonho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1. O cacau	8
2.1.1. Aspectos gerais	8
2.1.2. Produção de cacau no Brasil.....	12
2.1.3. Potencial da casca de cacau como combustível	14
2.2. Sistemas para geração de calor	16
2.3. Secadores de amêndoas de cacau.....	18
2.4. Tecnologias para produção de energia a partir da biomassa	22
2.4.1. Processos termoquímicos	22
2.4.1.1. Combustão	22
2.4.1.2. Gaseificação.....	23
2.4.1.3. Pirólise.....	27
2.4.2. Processos biológicos.....	29
2.4.2.1. Biodigestão.....	29
2.4.2.2. Hidrólise da lignocelulose.....	30
2.5. Sistema gaseificador/combustor	32
2.5.1. Estequiometria das reações envolvidas	36
2.5.1.1. Combustão	36
2.5.1.2. Reação de Boudouard.....	36
2.5.1.5. Reações homogêneas de conversão água/gás	37
2.5.1.6. Reações em materiais diversos	37
CAPÍTULO 1 - APROVEITAMENTO DA CASCA DE CACAU PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA NA REGIÃO SUL DA BAHIA	40
1. INTRODUÇÃO	40
2. MATERIAIS E MÉTODOS	42
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4. CONCLUSÕES	48

CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DA CASCA DO CACAU PROVENIENTE DA AGROINDÚSTRIA VISANDO SUA UTILIZAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL EM SISTEMAS GERADORES DE AR QUENTE	50
1. INTRODUÇÃO	50
2. MATERIAIS E MÉTODOS	55
2.1. Obtenção das amostras	55
2.2. Análises físicas do combustível	56
2.3. Análise química imediata	58
2.4. Teor de cinzas	58
2.5. Sólidos voláteis	59
2.6. Carbono fixo	59
2.7. Composição elementar	59
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4. CONCLUSÕES	63
CAPÍTULO 3 - OBTENÇÃO E APLICAÇÃO DA CASCA DE CACAU EM <i>CHIP</i> COMO COMBUSTÍVEL EM SISTEMA GASEIFICADOR/COMBUSTOR/SECADOR	65
1. INTRODUÇÃO	65
2. MATERIAIS E MÉTODOS	66
2.1. Processamento para obtenção das cascas secas	66
2.2. Eficiência do sistema de secagem	69
2.3. Sistema gaseificador/combustor/secador	70
2.3.1. Ignição	73
2.3.2. Aquisição de dados da temperatura	73
2.3.3. Análise do ar de secagem	76
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4. CONCLUSÕES	82
CAPÍTULO 4 - DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA PARA SECAGEM DE AMÊNDOAS DE CACAU UTILIZANDO COMO COMBUSTÍVEL A CASCA DO FRUTO	83
1. INTRODUÇÃO	83
2. MATERIAIS E MÉTODOS	86
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
4. CONCLUSÕES	100
CAPÍTULO 5 - EFEITO DO AQUECIMENTO DIRETO DO AR UTILIZANDO UM SISTEMA GASEIFICADOR/COMBUSTOR NA QUALIDADE DAS AMÊNDOAS DE CACAU	101
1. INTRODUÇÃO	101

2. MATERIAIS E MÉTODOS	104
2.1. Obtenção das amostras de amêndoas de cacau.....	104
2.2. Análise de HPAs nas amêndoas.....	106
2.2.1. Extração e limpeza	106
2.2.2. Análise cromatográfica	107
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
4. CONCLUSÕES	110
3. CONCLUSÕES GERAIS.....	111
REFERÊNCIAS.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores aproximados de algumas características físicas do fruto do cacauero maduro e seus componentes	12
Tabela 2 - Produção brasileira de cacau em amêndoas por estados produtores	14
Tabela 1.1 - Parâmetros do processo de secagem artificial convencional.....	44
Tabela 1.2 - Estimativa do potencial energético da casca de cacau no estado da Bahia de 2004 a 2011	46
Tabela 1.3 - Quantidade da casca de cacau por tonelada de amêndoas secas para suprir a demanda energética da secagem convencional	47
Tabela 1.4 - Potência capaz de ser gerada por meio de sistemas básicos de cogeração disponíveis no mercado por meio de unidade centralizada (UC) e unidades descentralizadas (UD)	48
Tabela 2.1 - Composição elementar de alguns tipos de biomassa	53
Tabela 2.2 - Poder calorífico superior de algumas biomassas.....	54
Tabela 2.3 - Composição química e mineral da casca de cacau	55
Tabela 2.4 - Valores médios apresentados, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) da caracterização físico-química das amostras de casca de cacau coletadas durante os meses de março a maio	61
Tabela 3.1 - Resultados obtidos do processo de secagem da casca de cacau utilizando secador tubular de convecção natural	77
Tabela 3.2 - Consumo de lenha, propriedades da lenha, e energia requerida para a secagem da casca de cacau.....	78
Tabela 3.3 - Dados coletados durante os testes I e II, utilizando casca de cacau como combustível	79
Tabela 3.4 - Dados coletados durante os testes, utilizando eucalipto em chip como combustível	80
Tabela 4.1 - Propriedades do ar utilizado para a secagem das amêndoas de cacau nos diferentes pontos de estado (PE)	89
Tabela 4.2 - Composição do ar ambiente, em % de volume e massa	90
Tabela 4.3 - Propriedades da biomassa	91
Tabela 4.4 - Parâmetros do processo de secagem das amêndoas de cacau..	97

Tabela 4.5 - Composição química elementar da casca de cacau, base seca, em unidades de massa e volume.....	98
Tabela 4.6 - Dados e resultados do dimensionamento do gaseificador.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corte transversal do fruto do cacau (a) e corte longitudinal, apresentando a fração de casca do fruto (b).	10
Figura 2 - Gaseificador de fluxo concorrente.	26
Figura 3 - Reator de gaseificação. (a) base do reator; (b) tubos de ferro; (c) entrada de ar primário; (d) tampa do reator.	33
Figura 4 - Combustor dos gases: (a) saída dos gases produzidos no reator para o combustor; (b) tubo metálico; (c) câmara de combustão e (d) finalização do combustor.	33
Figura 5 - Grupo aerotérmico do sistema gaseificador/combustor. (a) dimensões da grelha; (b) entrada lateral de ar; (c) entradas de ar sob o combustor; (d) entrada de ar no reator e (e) conjunto motor/ventilador centrífugo.	34
Figura 2.1 - Relação entre poder calorífico inferior e teor de água para a casca de cacau.	63
Figura 3.1 - Fluxograma do processo de obtenção da casca de cacau seca para ser utilizada como combustível sólido.	67
Figura 3.2 - Secador tubular utilizado na secagem da casca de cacau triturada (a) desenho ilustrativo do secador tubular e (b) foto da parte superior do secador utilizado.	68
Figura 3.3 - Diagrama esquemático do reator de gaseificação utilizado no experimento com o detalhamento das dimensões das diferentes zonas do reator (secagem, pirólise, combustão e redução), entradas de ar, compartimento de depósito das cinzas, disposição da grelha e saída do gás de síntese.	72
Figura 3.4 - Esquema experimental do sistema gaseificador/combustor/secador.	74
Figura 3.5 - Biomassas, reator de gaseificação e instrumentação utilizada para o controle do processo experimental.	75
Figura 4.1 - Sistema proposto: secador de cacau (5) com aquecimento direto do ar utilizando um reator de gaseificação concorrente (1) acoplado a um combustor (2) e a um misturador (3).	86
Figura 4.2 - Esquema de como foi obtida as propriedades do ar para os pontos de estado (PE) 1, 2 e 3 por meio da Carta Psicométrica.	89
Figura 4.3 - Gaseificador de biomassa; (VCa) volume de controle do gaseificador; (VCb) volume de controle do combustor de gases.	93

Figura 5.1 - Esquema experimental para obtenção das amostras de amêndoas de cacau por meio dos diferentes tratamentos. 105

Figura 5.2 - Cromatogramas por CLAE e concentrações: (a) soluções-padrões: B(a)A - benzo(a)antraceno, Chy - criseno, B(b)F - benzo(b)fluoranteno, B(a)P - benzo(a)pireno; (b) amostra do T1 detectando presença de Chy e B(b)F; (c) amostra do T2 detectando B(b)F; e (d) amostras do T3 detectando B(b)F e Tabela com o teor de HPAs nas amêndoas secas por meio dos tratamentos empregados. 109

RESUMO

PEREIRA, Ivan de Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2013. **Viabilidade da utilização da casca de cacau como combustível no aquecimento de ar para secagem de amêndoas de cacau.** Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Coorientadores: Roberto Precci Lopes, José Helvécio Martins e Evandro Sena Freire.

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a viabilidade técnica do aproveitamento da casca de cacau para fins energéticos, em processos de conversão termoquímica. Para atingir este objetivo, fizeram-se o levantamento do potencial de geração de energia e das tecnologias disponíveis para transformação da biomassa; a caracterização da casca de cacau; o dimensionamento de um sistema gaseificador/combustor/secador; a obtenção e utilização da casca de cacau em *chip* como combustível na secagem de amêndoa de cacau; e a avaliação da qualidade da amêndoa processada quanto à presença de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs). Com base na produção de amêndoas secas acumulada da região cacaeira da Bahia, a quantidade de casca gerada é equivalente a 107,6 MW e pode ser utilizada para gerar calor em sistemas geradores de calor e também para gerar energia elétrica em sistemas de cogeração disponíveis no mercado, como turbina a vapor, microturbina e turbina a gás. Além desse potencial, a casca de cacau apresentou condições favoráveis para ser transformada em combustível, em razão de os resultados da caracterização terem sido equivalentes aos de outros resíduos que já vêm sendo transformados em combustível sólidos, líquidos ou gasosos. Porém, o teor de água (84,2%) e a quantidade de cinzas (12,63%) presentes nessa biomassa podem contribuir negativamente para a sua utilização como combustível sólido. No beneficiamento da casca de cacau em secador tubular de convecção natural, o balanço energético foi negativo e o uso dessa como combustível no sistema gaseificador/combustor/secador proposto foi realizado normalmente, pois a temperatura foi efetivamente controlada, assim como os níveis de contaminação do ar de secagem; quando se utilizou a casca de cacau, mantiveram-se próximos à outra biomassa, que geralmente é utilizada para esse fim. Além desses, testes realizados com a

casca de cacau foram dimensionados para um sistema gaseificador/combustor, que foi acoplado a um secador do tipo Plataforma CEPEC, verificando-se similaridade a outros sistemas empregados nesse tipo de transformação da biomassa. Portanto, esses sistemas podem ser utilizados, pois os níveis de HPAs nas amêndoas processadas apresentaram-se abaixo dos permitidos pela legislação europeia. Dessa forma, a casca de cacau pode ser utilizada como combustível em sistemas de geração direta de calor criado por sistemas gaseificador/combustor, substituindo as fornalhas, geralmente empregadas em secadores de cacau.

ABSTRACT

PEREIRA, Ivan de Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2013. **Viability of using the cacao pod husks (CPHs) as fuel in heating air of drying cocoa beans.** Adviser: Jadir Nogueira da Silva. Co-advisers: Roberto Precci Lopes, José Helvécio Martins and Evandro Sena Freire.

The overall objective was to study the technical feasibility of the use of cocoa husks for energy in thermochemical conversion processes. To achieve this objective a survey was made of the potential for power generation and technologies available for biomass conversion; characterization of cocoa husks; designing a system gasifier/combustor/dryer; obtaining and using the bark of cocoa chip as a fuel in the drying of cocoa beans and evaluate the quality of processed nuts for the presence of polycyclic aromatic hydrocarbons (HPAs). Based on the accumulated production of dry beans of the cacao region of Bahia the amount of generated bark is equivalent to 107.6 MW and can be used for the generation of heat in the heat-generating systems and also for the generation of electric power systems CHP available in the market as steam turbine, gas turbine and microturbine. Beyond this potential cocoa husks presented favorable conditions for transformation into fuel, that because the characterization results were equivalent to those of other residues that have already been transformed into solid fuel, liquid or gaseous. However, the water content (84.2%) and ash content (12.63%) present in this biomass can contribute negatively to their use as solid fuel. In the processing of cocoa husk dryer tubular convection energy balance was negative and its use as fuel in the system gasifier/combustor/dryer proposed was normally performed, this because the temperature has been effectively controlled, and the levels of air contamination drying when using the cocoa husks remained near other biomass, which is usually used for this purpose. In addition to these tests performed with the cocoa shell scaled up system gasifier/combustor to be coupled to a platform type dryer and found CEPEC similarity to other systems used in this type of transformation of biomass. Therefore, these systems can be used, because the levels of HPA's in processed almonds were below those allowed by European legislation. Thus, the cocoa shell may be used as fuel for

systems of direct generation of heat generated by systems gasifier/combustor replacing furnaces, dryers commonly used in cocoa.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Com a inevitável diminuição da disponibilidade dos recursos energéticos não renováveis, vários países passaram a investir em pesquisa com fontes renováveis de energia. Dentre essas fontes, merece destaque a biomassa, por possibilitar sua transformação em combustíveis sólido, líquido ou gasoso.

O Brasil, em razão da sua grande área territorial, do clima e da variedade de recursos naturais, tem se destacado no desenvolvimento de estudos relacionados à geração de energia alternativa, por meio do uso de energias limpas, como a solar, eólica e hidráulica. Porém, a energia que está mais ao alcance do produtor rural é a energia da biomassa; a sua utilização torna-se interessante, quando essa vem das atividades agrícolas e florestais, principalmente quando são geradas como resíduos do pré-processamento e processamentos agrícolas e florestais (LORA; ANDRADE, 2009).

A disponibilidade de resíduos provenientes do pré-processamento de produtos agrícolas como café, arroz e cacau, entre outras culturas, é grande. No pré-processamento do café, por exemplo, aproximadamente 21% desse produto são transformados em resíduos, que apresentam poder calorífico de $17.500 \text{ kJ.kg}^{-1}$ (MAGALHÃES et al., 2007). Já no pré-processamento do cacau são produzidas toneladas de casca do fruto, fração essa que representa 80% do fruto (SILVA NETO et al., 2001).

Cerca de 6 toneladas, em média, de casca fresca, oriunda do processo de quebra dos frutos de cacau são produzidas anualmente por hectare de cacau cultivado (SODRÉ et al., 2012). A cultura do cacau ocupa 500 mil ha de área plantada, em sua maioria em pequenas e médias propriedades, e, atualmente, 25 mil produtores se dedicam a essa produção. Portanto, há grande produção de casca de cacau nas propriedades rurais e o aproveitamento dela como fonte de energia é bastante promissor (COMISSÃO EXECUTIVA DO PLANO DA LAVOURA CACAUEIRA – CEPLAC, 2012).

Durante muitos anos, a prática adotada nas propriedades, após a retirada das sementes do cacau, era deixar as cascas na plantação para serem utilizadas como adubo e, assim, disponibilizar seus nutrientes para o solo. No entanto, pesquisadores observaram que essa prática proporcionava ainda mais

a proliferação de fungos na lavoura, prejudicando a produção por causa da elevada umidade da casca que, somada à elevada umidade, que é característica das regiões de Mata Atlântica, tornava o meio propício ao crescimento de fungos (EFRAIM, 2010).

Pode-se destacar que na região sul da Bahia, produtora de cacau, o sistema tradicional de secagem de cacau é composto por secadores artificiais, que utilizam fornalhas a lenha. Durante um ano, uma fazenda com produção de 500 arrobas (amêndoa seca), por exemplo, consome cerca 30 m³ de madeira, geralmente de espécies nativas (CUNHA; SERÔDIO, 1991). Portanto, o aproveitamento da casca do cacau, além de contribuir para a manutenção da mata nativa, também evitará a proliferação de doenças e pragas na lavoura.

O aproveitamento energético desse resíduo se reveste de notável importância, uma vez que se apresenta como promissora fonte de energia alternativa e sustentável, que pode substituir a lenha geralmente utilizada como combustível nos secadores de cacau. Sendo assim, o aproveitamento desse resíduo e a implantação de sistemas de secagem diferentes dos convencionais podem aumentar a eficiência do processo, a qualidade das amêndoas e, conseqüentemente, a qualidade dos produtos derivados da amêndoa de cacau.

As novas tecnologias de conversão da biomassa em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos de alto valor agregado vêm atualmente despertando grande interesse mundial, podendo ser confirmado com o número de recursos que vêm sendo destinados para pesquisas nessa área.

A combustão ou queima direta é a forma mais tradicional de uso de energia da biomassa; entretanto, a gaseificação é um processo termoquímico que recebe especial atenção nessa linha de aplicação. Com isso, a gaseificação de biomassa surge como opção tecnológica para o produtor de cacau, podendo contribuir para a inclusão social, o meio ambiente e o desenvolvimento econômico regional.

A grande quantidade de casca gerada no pré-processamento do cacau e a exigência do mercado por amêndoas de qualidade são os dois motivos que despertaram o desenvolvimento deste trabalho. Sendo assim, a utilização da casca como combustível pode contribuir positivamente para o melhor aproveitamento dos recursos naturais, para o melhor manejo das operações

das propriedades, para a inserção de novas tecnologias e, conseqüentemente, para a qualidade das amêndoas de cacau.

O aproveitamento da casca de cacau fresca como fonte energética pode reduzir as emissões de metano (CH_4) à atmosfera, decorrente da liberação dessa casca, quando deixada no solo ou durante a compostagem, pois esse gás possui um potencial de aquecimento global maior que o gás carbônico (CO_2) liberado em processos termoquímicos de transformação da biomassa em energia. Salienta-se que o aproveitamento da casca pode, ainda, substituir a lenha geralmente utilizada em secadores artificiais de cacau, contribuindo para a manutenção da mata nativa. Portanto, são inúmeras as vantagens quando se pensa no uso da casca de cacau como combustível para o aquecimento de ar de secagem.

Como potencialidades de aproveitamento da casca do fruto, destacam-se o uso na alimentação animal (ABIOLA, 1991; DONKOH et al., 1991; AREGHEORE, 2002), na extração de pectinas (BERBERT, 1972; VRIESMANN et al., 2011), nas gomas (FIGUEIRA et al., 1993), na produção de fertilizantes orgânicos por compostagem (CHEPOTE et al., 1990; SODRÉ et al., 2012) e como fonte de energia renovável (AGYEMAN; OLDHAM, 1986; CEPLAC, 2010; SYAMSIRO et al., 2011). A biodigestão com casca fresca do cacau apresenta baixa conversão, conforme resultados encontrados em CEPLAC (2012).

Os processos termoquímicos como combustão e a gaseificação são outra forma de transformar a biomassa em energia útil. Esses processos são os mais indicados para esse caso, pois apresenta transformação mais rápida e com maior facilidade de ser controlada (SYAMSIRO et al., 2011).

A gaseificação, além de se apresentar como processo de conversão (biomassa-gás) mais eficiente que o processo de biodigestão, evidencia alta eficiência térmica, pois o gás produzido, dependendo da sua composição, pode ser queimado e, assim, realizar o aquecimento direto ou indireto do ar de secagem. Portanto, dependendo do combustível utilizado, a gaseificação pode conferir às amêndoas atributos sensoriais diferenciados do convencional, podendo melhorar a qualidade dos produtos derivados do cacau e atender às exigências do mercado; entretanto, para isso, precisam-se controlar os processos envolvidos para evitar a contaminação do produto com compostos

presentes na fumaça como os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) (TFOUNI et al., 2007; UNION EUROPEIA – UE, 2011).

É de suma importância o desenvolvimento de alternativas aos sistemas tradicionais para aquecimento de ar de secagem das amêndoas de cacau, visando inserir cada vez mais as energias renováveis na cadeia produtiva dessa cultura, além da busca pela diminuição dos custos operacionais associados a essa operação unitária.

Desta forma, pretende-se avaliar a viabilidade técnica do aproveitamento da casca do fruto do cacau, por meio da transformação termoquímica. Para tanto, foi proposto, neste trabalho, utilizar a casca de cacau como combustível em processos termoquímicos, visando o aquecimento direto de ar para utilização na secagem de amêndoas de cacau, ou seja, realizar a secagem das amêndoas de forma sustentável, aproveitando um resíduo da própria cadeia produtiva.

Uma revisão sobre as alternativas para a produção de bioenergia a partir da biomassa foi disponibilizada, nela, foram apresentados conceitos e tecnologias disponíveis mundialmente, destacando-se as tendências para a consolidação da biomassa como alternativa energética para substituir, em parte, o petróleo, o fim de minimizar os impactos ambientais desse combustível.

No Capítulo 1, está apresentada uma estimativa do aproveitamento da casca de cacau gerada na região sul da Bahia para a cogeração de energia. Neste Capítulo, o potencial energético da casca de cacau foi avaliado, com base nas eficiências energéticas disponíveis das tecnologias, geralmente utilizadas para transformar a biomassa em calor e energia elétrica.

A caracterização físico-química da casca do cacau proveniente da agroindústria, visando sua utilização como combustível, está evidenciada no Capítulo 2.

No Capítulo 3, estão expostas as operações para obter a casca de cacau em *chip*, a partir de uma análise desse processo e um comparativo entre a gaseificação da casca de cacau e a gaseificação do *chip* de eucalipto, com relação às variáveis do processo de gaseificação e secagem das amêndoas de cacau. Este capítulo evidencia detalhadamente o processo para conseguir a casca de cacau seca - do fruto ao produto final (casca de cacau em *chip*), a

sua gaseificação e o seu aquecimento direto de ar por meio desse processo em um sistema gaseificador/combustor/secador em fluxo concorrente.

O dimensionamento de um gaseificador de biomassa em fluxo concorrente, para utilizar a casca de cacau como combustível no aquecimento direto de ar de secagem em secadores de cacau, é o que está demonstrado no Capítulo 4.

O efeito da gaseificação da casca de cacau e do *chip* de eucalipto na qualidade das amêndoas de cacau, quanto à presença de HPAs, está exibido no Capítulo 5.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O desenvolvimento econômico do Brasil vem promovendo um aumento no consumo de energia em todos os setores da atividade econômica. Porém, o Brasil é um dos poucos países com potencial de continuar crescendo sem causar grandes impactos ao meio ambiente, isso porque pode substituir as energias fósseis por fontes renováveis como a biomassa, com participação de 30,2% na matriz energética, situa-se como a segunda fonte energética primária, atrás do petróleo e derivados, que representam 37,7% (LORA; ANDRADE, 2009), porém a maioria da biomassa disponível ainda é subutilizada e, na maioria dos casos quase totalmente desperdiçada.

A biomassa geralmente é definida como toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal, formada pelo processo de fotossíntese que ocorre na presença da luz solar. Ao contrário da energia dos combustíveis fósseis, a biomassa é renovável e não contribui para o acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera terrestre, ou seja, todo CO₂ liberado durante o uso da biomassa é absorvido novamente no processo de fotossíntese para formação da mesma.

Nos países em desenvolvimento, a biomassa apresenta-se como uma importante fonte de energia, principalmente em áreas rurais que a utilização da biomassa é, por vezes, a forma mais viável de produzir calor para a secagem de produtos agrícolas e, ou, gerar eletricidade. O Brasil, por exemplo, precisa implantar unidades descentralizadas de cogeração de energia para aproveitar todo o potencial existente de biomassa (resíduos) gerada na produção rural e agroindustrial. Em países industrializados, a cogeração já vem sendo realizada com sucesso em unidades compactas (potências menores que 4 MW) em diferentes setores de atividade.

A cogeração constitui-se em uma forma de uso racional da energia, uma vez que o rendimento do processo de produção de energia é significativamente aumentado a partir da produção combinada de energia térmica e elétrica, dando-se um melhor aproveitamento ao conteúdo energético do combustível básico (JANNUZZI; SWISHER, 1997). O uso da biomassa na geração de calor e eletricidade a partir de sistemas térmicos e elétricos vem crescendo continuamente ao longo da última década, incentivado

principalmente pelas pressões ambientais, no sentido de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e aumentar o uso de fontes renováveis.

Outro fator estimulante para novas fontes de energia alternativa é a desregulamentação das atividades do mercado de energia elétrica, que incrementa o desenvolvimento de pequenos produtores e também a competitividade entre as grandes concessionárias (JANNUZZI; SWISHER, 1997).

Em unidades armazenadoras e agroindustriais a cogeração é um meio alternativo de destaque para gerar calor e potência a partir da biomassa. No Brasil, pode-se citar o exemplo do aproveitamento de resíduos da cana-de-açúcar, onde temos usinas com possibilidade de venda de energia para o setor elétrico, o que ainda não aconteceu de maneira mais acentuada pela falta de regulamentação no setor elétrico.

Nas propriedades agrícolas, onde o pré-processamento do cacau é realizado, geram-se como resíduos, toneladas da casca do fruto na etapa de partição e obtenção das amêndoas frescas. Cerca de 6 toneladas, em média, de casca fresca, oriundas do processo de partição dos frutos, são produzidas anualmente por hectare, esta grande quantidade de biomassa ainda não é aproveitada para fins energéticos (SODRÉ et al., 2012). O aproveitamento deste resíduo pode refletir no aumento da receita do produtor e, portanto, devem ser avaliadas.

Algumas pesquisas já foram realizadas visando o aproveitamento integral do cacau e principalmente da casca. Dentre estas se destacam o uso na alimentação animal (ABIOLA; TEWE, 1991; DONKOH et al., 1991; AREGHEORE, 2002), produção de fertilizantes orgânicos por compostagem (CHEPOTE et al., 1990; SODRÉ et al., 2012) e como fontes de energias renováveis (AGYEMAN; OLDHAM, 1986; SYAMSIRO et al., 2011; CEPLAC, 2012).

Referente à aplicação como fonte de energia renovável, foi estudada por pesquisadores da CEPLAC a produção de biogás a partir da casca de cacau triturada em dimensões de 2 mm, misturada com água na proporção de 1 ton m⁻³ respectivamente, em seguida realizaram uma pré-fermentação aeróbica na mistura por 24 horas. Nestas condições, a produção média de biogás foi 45 m³dia⁻¹ apresentando de 53 a 55% de metano (CH₄), que equivale

aproximadamente a 20 kg GLP e a produção média de biofertilizante foi 2,5 m³dia⁻¹. Para estes valores foi necessária uma taxa de alimentação de 2,5 toneladas de substrato a cada 24 h (CEPLAC, 2012).

Além do potencial energético, o cacau possui importância ecológica por contribuir na preservação das florestas, pois o cacauzeiro necessita de sombra e a mata proporciona as condições adequadas para o seu cultivo. Sob este aspecto a cacauicultura difere de outros cultivos brasileiros que empobrecem e degradam o ambiente. O cacauzeiro, embora mais exigente quanto às condições de clima e solo, restitui à terra grande parte daquilo que dela retira, mantém o equilíbrio ecológico e se constitui num cultivo perene, renovável e permanente. Este caráter de lavoura eminentemente estável confere ao cacau uma significativa importância ambiental (EFRAIM, 2004).

A produção de eletricidade a partir da biomassa, no Brasil, se dá essencialmente pelo aproveitamento de resíduos (de cultivo ou de processos industriais). Dentro desse contexto, o aproveitamento energético de resíduos (biomassa), lixo etc.; se reveste de notável importância, uma vez que consiste na geração de uma fonte alternativa de energia, bem como na solução de um grande problema ambiental e econômico, que é a disposição final de resíduos gerados nas cadeias produtivas dos setores agrícola, florestal, residencial etc.

Processos como biodigestão, pirólise, combustão, gaseificação e hidrólise da celulose podem ser utilizados para a geração de energia útil na forma de calor e potência a partir de diferentes tipos de biomassa (WANG et al., 2008; FERREIRA et al., 2009). Baseado nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo apresentar os recentes avanços para aproveitamento da biomassa, os quais podem ser utilizados para transformar a casca de cacau e outros subprodutos do cacau em bioenergia de forma sustentável.

2.1. O cacau

2.1.1. Aspectos gerais

O cacauzeiro é uma planta nativa das matas equatoriais da região amazônica. Pertence à família *Esterculiaceae*, gênero *Theobroma*, espécie

Theobroma cacao. Contêm 50 ou mais sementes envoltas por uma polpa mucilaginosa. O cacauzeiro pode viver mais de cem anos, começando a frutificar no terceiro ano, produzindo abundantemente a partir do oitavo e mantendo produção satisfatória até cerca dos trinta anos. Regiões com temperaturas médias anuais entre 24 e 28°C possuem as melhores condições para o cultivo. Temperaturas inferiores a 12°C impedem ou reduzem a frutificação (LAJUS, 1982; EFRAIM, 2004).

Cultivado oficialmente no Brasil desde o século XVII, inicialmente na região norte, sobretudo no Estado do Pará, o cacau, *Theobroma cacao*, chegou ao sul da Bahia a partir do século XVIII, estado onde encontrou condições favoráveis ao seu desenvolvimento e que viria a se tornar, nos anos seguintes, o maior produtor nacional do fruto (GONÇALVES et al., 2009).

Originário da América Central, o cacau era cultivado pelos nativos, principalmente astecas e maias desde épocas antes da colonização europeia. O cacauzeiro, conhecido por essas civilizações como *cacahuatl*, era considerado sagrado e possuía alto valor de troca, servindo inclusive para o pagamento de impostos (CEPLAC, 2012). A denominação científica, *Theobroma cacao* L., que significa “manjar dos deuses”, estabelecida pelo botânico sueco Carolus Linneu (1707-1778), supostamente faz referência ao simbolismo religioso que o cacauzeiro representava para essas civilizações.

O cacauzeiro é uma árvore proveniente de regiões de clima tropical quente e úmida estável, melhor adaptado às temperaturas médias de 25°C e precipitação anual variando de 1.500 a 2.000 mm. Necessita de solos com fertilidade de média a alta, profundos e bem drenados. A planta alcança normalmente de 4 a 8 metros de altura e copa variando de 4 a 6 metros de diâmetro. São reconhecidos três grupos botânicos do cacau, o Forasteiro Amazônico, Crioulo e o Trinitário, sendo o primeiro comumente cultivado no Brasil (CEPLAC, 2012).

Na Bahia, maior produtor nacional deste fruto, existe duas fases principais de colheita do cacau: a safra “temporão”, de março a julho e a “safra” de novembro a dezembro. Dá-se o nome de “catagem” à colheita feita dos frutos produzidos e amadurecidos isoladamente no pé, fora das épocas principais de colheita (EFRAIM, 2004).

O cacaueteiro começa a produzir no segundo ano após o plantio, porém, somente entra no regime de franca produção a partir do quinto ano. No estado da Bahia, considera-se normal uma produtividade de 400 a 500 kg hec⁻¹ (CEPLAC, 2012).

O cacaueteiro é uma árvore proveniente de regiões de clima tropical quente e úmida estável, melhor adaptado às temperaturas médias de 25°C e precipitação anual variando de 1.500 a 2.000 mm. A planta alcança normalmente de 4 a 8 metros de altura e copa variando de 4 a 6 metros de diâmetro (SENA, 2011).

O fruto é composto por casca, entrecasca, polpa, sementes e placenta (Figura 1). Segundo Silva Neto et al. (2001), a casca é a maior fração do fruto (80%), sendo o restante (20%), referente às sementes, as quais são transformadas em amêndoas (10%) e destinadas na forma de nibs (8%) para a fabricação do chocolate. Portanto, apenas uma fração de 8% do fruto é aproveitada para o processamento dos derivados do cacau e uma fração de 92% ainda não tem um destino comercial efetivo.



Figura 1 - Corte transversal do fruto do cacaueteiro (a) e corte longitudinal, apresentando a fração de casca do fruto (b).

Na Bahia, o estado de maior produção nacional de cacau, a safra é dividida em duas fases principais de colheita do cacau: “temporão”, de março a julho e “safra” de novembro a dezembro. Dá-se o nome de “catagem” à colheita

feita dos frutos produzidos e amadurecidos isoladamente no pé, fora das épocas principais de colheita (SENA, 2011).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil em 2011 produziu 248,6 mil toneladas de cacau em amêndoas, sendo as regiões Norte/Nordeste, responsáveis por mais de 97% dessa produção. Nesse mesmo ano, o Nordeste produziu 156,57 mil toneladas da amêndoa do fruto, respondendo a Bahia por 100% da produção regional e cerca de 63% da nacional (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2012).

No mercado internacional, atribui-se ao cacau comercializado duas categorias, a Bulk (representando uma amêndoa regular), utilizada na fabricação de manteiga, torta e pó de cacau; e o cacau do tipo Fino ou *Flavor*, que na fabricação do chocolate, confere ao produto aroma e sabor característicos. A produção brasileira de cacau é basicamente do tipo Bulk, sendo normalmente a qualidade da amêndoa proveniente da espécie botânica Forasteiro, a mais plantada no País. Esse tipo de cacau é utilizado na fabricação do chocolate apenas para enchimento de formulação. Tais características resultam numa menor remuneração ao cacau brasileiro no mercado mundial. De acordo com a CEPLAC, o comércio de cacau fino, representa 5% do comercializado mundialmente, o que implica forte demanda (CEPLAC, 2012).

O mercado apresenta-se promissor para a cultura do cacau, mas os produtores precisam estar atentos para as exigências do mercado em termos de produtos de maior valor agregado e apelo ecológico, bem como preocuparem-se com o uso de técnicas adequadas de plantio e controle de pragas e doenças, se valendo de cultivares já disponíveis pelos centros de pesquisas.

A Tabela 1 apresenta as características físicas do cacau. Dentre os componentes apresentados, a casca é a maior fração do fruto, cerca de (80%), ou seja, o volume gerado deste resíduo agrícola é dez vezes maior que a quantidade do produto de maior interesse, o nibs, matéria-prima do chocolate e outros derivados do cacau.

Tabela 1 - Valores aproximados de algumas características físicas do fruto do cacauero maduro e seus componentes

Componentes	Peso (g)	Componente/fruto (%)
Fruto	500	100,0
Casca do fruto	400	80,0
Sementes frescas	100	20,0
Amêndoas	50	10,0
Nibs	40	8,0
Testas	7,5	1,5
Outros	2,5	0,5

Fonte: Silva Neto et al. (2001).

2.1.2. Produção de cacau no Brasil

O beneficiamento primário do cacau é basicamente composto por duas operações: a fermentação e a secagem. A fermentação é feita geralmente em cochos de madeira que devem ser protegidos do vento e da chuva. Essa operação tem como finalidade criar condições favoráveis para acontecer a fermentação alcoólica (aeróbica) e a fermentação acética (anaeróbica) ambas responsáveis pela formação dos precursores de aroma e sabor característico dos derivados do cacau. O processo de fermentação dura aproximadamente uma semana. A etapa de secagem deve ser iniciada imediatamente após a fermentação e não deve ser lenta ou mal conduzida para evitar o desenvolvimento de fungos que podem conferir sabor e aromas desagradáveis ao produto final ou produzir toxinas prejudiciais à saúde do consumidor (EFRAIM et al., 2010). A secagem pode ser realizada, ao sol, em barcaça, terreiros ou estufas e em secadores com aquecimento de ar utilizando fornalhas como gerador de calor do tipo Tubular, Plataforma CEPEC, rotativos Pinhalense, Zaccaria e Burareiro. A secagem é realizada até as amêndoas atingirem teor de água de 7% a 8% (b.u), podendo durar de 3 a 10 dias a depender do método utilizado e das condições climáticas.

Segundo dados do IBGE, o Brasil produziu em 2011 248,6 mil toneladas de cacau em amêndoa, sendo as Regiões Norte/Nordeste,

responsáveis por mais de 97% dessa produção. Nesse mesmo ano, o Nordeste produziu 156,570 mil toneladas da amêndoa do fruto, respondendo a Bahia por 100% da produção regional e cerca de 63% da nacional (IBGE, 2012).

No que diz respeito à produção internacional, segundo a FAO, desde meados da década de 1990, o Brasil vem ocupando a sexta maior produção entre os países produtores, atrás de Costa do Marfim, Indonésia, Gana, Nigéria e Camarões (INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION – ICCO, 2012).

A participação do Brasil na produção mundial de cacau já foi de 12,07% antes do primeiro foco da “vassoura-de-bruxa” (praga que destruiu plantações inteiras). Atualmente essa participação fica em torno de 5% (ICCO, 2012). A Tabela 2 apresenta a produção de cacau desde 1990 e as oscilações da produção. Pode-se notar que a produção brasileira nos últimos anos vem apresentando uma recuperação, essa recuperação se deve principalmente aos novos clones produtivos, resistentes a “vassoura de bruxa”, distribuídos pela CEPLAC e a força e dinamismo dos produtores de cacau em acreditar e implantá-los em sua propriedade.

O Estado da Bahia produz atualmente cerca de 63% do cacau do Brasil, mas esse percentual já foi de 83,7% antes do primeiro foco da vassoura-de-bruxa na região sul da Bahia em 1989, quando a região produzia cerca de 360 mil toneladas de cacau por ano. Esta produção era suficiente para abastecer todo o mercado interno e ainda exportar. Hoje a produção anual fica em torno de 250 mil toneladas e 60% da matéria-prima usada pela indústria nacional tem que ser importada da África e da Ásia (ICCO, 2012).

Alguns trabalhos mostram que o mercado de cacau brasileiro vem passando por transformações importantes nos últimos anos. Com o aumento do consumo per capita global e redução no preço da amêndoa, o País passou a importar matéria-prima e exportar produtos beneficiados. Além disso, em consequência à tendência declinante da redução da produção e da área colhida de cacau no Nordeste, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para aumentar as possibilidades de uso e agregação de valor aos subprodutos como a polpa, mel e também a casca do fruto (CEPLAC, 2012).

Tabela 2 - Produção brasileira de cacau em amêndoas por estados produtores

Safra	(ton)	(%)					
	Brasil	BA	PA	RO	ES	AM	MT
1990	356.246	83,70	8,18	5,71	1,82	0,04	0,47
1991	320.967	81,00	8,75	7,11	2,33	0,04	0,67
1992	328.518	80,20	8,96	6,22	3,75	0,21	0,50
1993	340.885	81,50	9,72	5,93	1,93	0,19	0,65
1994	330.577	82,20	10,43	4,79	2,07	0,17	0,21
1995	296.705	83,00	9,92	5,35	1,30	0,19	0,14
1996	256.777	79,50	12,53	1,97	5,50	0,19	0,19
1997	277.966	81,10	11,09	2,29	5,09	0,16	0,18
1998	280.801	83,70	11,62	2,46	1,62	0,35	0,27
1999	205.003	77,70	14,80	3,30	3,20	0,60	0,19
2000	196.788	69,90	14,30	8,70	5,70	0,62	0,52
2001	185.662	68,30	15,60	8,50	6,30	0,56	0,63
2002	174.796	63,00	19,40	9,30	6,70	0,78	0,61
2003	170.004	65,10	18,50	10,50	5,00	0,72	0,12
2004	196.005	69,50	16,70	9,40	3,50	0,61	0,12
2005	208.620	65,90	18,20	9,40	5,60	0,57	0,13
2006	212.270	70,10	17,20	7,40	4,40	0,67	0,13
2007	201.651	66,40	21,40	7,80	3,70	0,45	0,15
2008	202.030	64,90	23,30	8,60	2,20	0,70	0,23
2009	218.487	63,20	24,80	8,00	3,40	0,39	0,13
2010	235.389	63,00	25,30	7,40	2,60	1,37	0,27
2011	248.524	63,00	25,60	6,30	3,20	1,51	0,28

Fonte: IBGE (2012).

2.1.3. Potencial da casca de cacau como combustível

Combustíveis em termos práticos são as substâncias que podem queimar liberando calor. Os combustíveis podem ser classificados em sólidos, líquidos e gasosos e, cada um desses pode ser natural ou derivado. Naturais são aqueles usados nas mesmas condições em que são extraídos da natureza, por exemplo a lenha, carvão de pedra, gás natural, resíduos agrícolas. Derivados são aqueles que resultam de algum processo de preparação, como por exemplos: carvão vegetal, coque, derivados de petróleo, álcool, etc.

Dentre as características dos combustíveis oriundos da biomassa a mais importante é o poder calorífico que depende do teor de água, material volátil e quantidade de carbono fixo presentes na biomassa. Dentre estes, os parâmetros de maior influência no poder calorífico dos combustíveis é o teor de água da biomassa. Elevados teores de água aumenta a energia necessária à pré-ignição e diminui o calor liberado pela combustão (MAGALHÃES, 2007). Os combustíveis utilizados como fonte de energia para secagem pode compreender dois grupos: os fósseis e os provenientes da biomassa. Os combustíveis fósseis são esgotáveis e seus preços estão sujeitos às oscilações do mercado internacional; já os provenientes da biomassa são considerados fontes renováveis de energia, as quais podem ser encontradas no próprio local de utilização, não dependendo de influências externas. Esta fonte, se racionalmente explorada, pode garantir, por muitos anos, o suprimento de energia para a secagem de produtos agrícolas.

A maioria dos sistemas agrícolas produz grande quantidade de resíduos que oferecem amplo potencial energético, e geralmente em áreas com escassez de fontes convencionais de energia é que os resíduos agrícolas são utilizados, principalmente com objetivo de fornecimento de energia para preparação de alimentos em zonas rurais (LORA; ANDRADE, 2009). O Brasil, devido à sua área territorial e condições climáticas, apresenta grande potencial de recursos naturais, que podem gerar energia para minimizar a necessidade de suprimento de energia convencional em áreas de difícil acesso.

O aproveitamento direto da biomassa em processos de conversão termoquímica, embora seja ainda a forma mais utilizada para aproveitamento energético de resíduos agrícolas e agroindustriais, apresenta algumas desvantagens. Os resíduos vegetais possuem baixa densidade e geralmente se encontram em pequenas granulometrias, o que dificulta o seu transporte, manuseio e armazenamento. Outro aspecto que dificulta a combustão direta dos resíduos agrícolas e agroindustriais é o seu elevado teor de água. Segundo Lora e Andrade et al. (2009) 18 a 20% do calor gerado na combustão é consumido para secar a própria biomassa, fazendo com que a mesma reduza grande parte do seu potencial energético.

A disponibilidade de resíduos provenientes da indústria madeireira, carvoeira e do beneficiamento de produtos agrícolas como café e arroz é muito

grande. Do total de resíduos gerados pelas atividades agrícolas e florestais, aproximadamente 65% vem da indústria. Somente na indústria madeireira, a produção de serragem pode alcançar 16% do total em volume da madeira original. Na produção do café, aproximadamente 21% são transformados em resíduos sólidos (palha de café), que possuem poder calorífico de 17.500 kJkg^{-1} (MAGALHÃES, 2007).

Há grande questionamento sobre a utilização da palha de café como fonte de energia em processos termoquímicos, devido à rica fonte de potássio presente neste resíduo, o qual é agregado ao solo como fertilizante. Entretanto, sabe-se que o potássio estará presente nas cinzas produzidas, o que possibilitará seu aproveitamento agrícola com a aplicação na lavoura (MELO et al., 2005).

A produção de amêndoas de cacau segue o mesmo caminho, onde cerca de 6 toneladas, em média, de casca fresca, oriundas do processo de quebra dos frutos, são produzidas anualmente por hectare, as quais não são aproveitadas comercialmente na maioria das fazendas produtoras de cacau. Normalmente, essas cascas são deixadas em montes nas plantações para que, após sua decomposição, sirva como fertilizante para o cacauzeiro ou outras culturas, pois assim como o café é rica em potássio e pode ser agregado ao solo como fertilizante. Apesar do seu conhecido valor como fonte nutricional essas cascas, sem um tratamento adequado, podem em determinadas situações, disseminar doenças como podridão parda e vassoura-de-bruxa. Pode requerer, portanto, tratamento com produtos químicos, onerando ainda mais o custo de produção do cacau (SILVA NETO et al., 2001).

2.2. Sistemas para geração de calor

Os sistemas de aquecimento de ar para secadores de produtos agrícolas podem ser agrupados, quanto à operação, em dois grupos: com aquecimento direto do ar e com aquecimento indireto do ar. Os sistemas de aquecimento indireto apresentam menor eficiência energética quando comparada aos sistemas de aquecimento direto do ar ou fogo direto, por ocorrerem maiores perdas de energia térmica.

Entre os diversos equipamentos usados para o aquecimento do ar, destacam-se:

- **Fornalhas:** é a unidade onde se queima o combustível, convertendo a energia química do mesmo em energia térmica. Sendo composta de duas partes principais: a grelha, onde ocorre a pirólise ou volatilização (liberação dos voláteis) e a combustão do coque e; câmara de combustão, onde ocorrem as reações do ar de combustão com os voláteis emitidos na pirólise (LORA; HAAP, 1997).
- **Queimadores:** Conforme o tipo de combustível empregado, os queimadores podem ser: queimadores para combustíveis líquidos; queimadores de combustíveis gasosos e queimadores de combustíveis sólidos.
- **Caldeiras:** É um dispositivo para geração de vapor. Constitui-se, basicamente, de um trocador de calor que trabalha com pressão superior à pressão atmosférica, produzindo vapor a partir da energia térmica fornecida por uma fonte qualquer (PERA, 1990).
- **Gaseificadores:** São os reatores para gaseificação de biomassa, associados a combustores do gás produzido, também são utilizados na geração de ar quente bem como para diversos fins, porém no Brasil ainda são pouco difundidos (OLIVEIRA, 2010).

Os equipamentos citados podem ser acoplados em secadores de alimentos para o fornecimento de calor. Secadores são os equipamentos que expõem o alimento à determinada vazão de ar (aquecido ou a temperatura ambiente), propiciando a retirada de vapor de água dos alimentos e consequente redução do teor de água. Estes secadores podem ser dos mais variados tipos e modelos, conforme a necessidade de secagem e as características do produto.

Nos secadores com sistema de aquecimento direto, apesar de sua maior eficiência no uso de energia, os produtos da combustão permanecem no gás quente, que depois de diluído com o ar natural (temperatura ambiente), atravessa diretamente a camada de grãos. Nos secadores com sistema de aquecimento indireto, o calor é transferido do combustível queimado para o ar de secagem através de um trocador de calor (NELLIST; BRUCE, 1995; MELO et al., 2010). Dessa forma, os produtos da combustão não entram em contato com a massa de grãos. A escolha de um ou outro sistema dependerá da

capacidade dos grãos a serem secos em absorver resíduos da combustão e do nível de exigência de qualidade do produto para a sua comercialização.

2.3. Secadores de amêndoas de cacau

No Brasil, segundo os aspectos tecnológicos envolvidos, utilizam-se basicamente os seguintes métodos ou a combinação destes para a secagem do cacau: secagem com energia natural (Barcaças, Terreiros e Estufa solar) e secagem com energia artificial (Secador Tubular, Plataforma CEPEC, Secadores rotativos Pinhalense, Secador Zaccaria, Secador Burareiro 2 x 2 m com fornalha de alvenaria, Secador Burareiro 2 x 2 m com fornalha de ferro, Secador Burareiro 3 x 3 m com fornalha de ferro).

Para os secadores citados, segundo Cunha e Serôdio (1991), com exceção dos secadores destinados para a secagem com energia natural, todos os demais operam acoplados a uma fornalha com sistema de aquecimento indireto do ar de secagem para evitar a contaminação das amêndoas de cacau com fumaça.

A secagem por meio de secadores acoplados a fornalhas tem a vantagem de reduzir o tempo de secagem, viabilizar a secagem em regiões úmidas, em períodos de chuvas e reduzir a interferência de condições climáticas sobre a qualidade do cacau quando comparada com a secagem solar e de convecção natural, porém, se mal conduzida, pode comprometer a qualidade das amêndoas em relação à desigualdade de secagem ou comprometer os atributos sensoriais característico das amêndoas de cacau pela impregnação de odores provenientes dos diferentes tipos de combustíveis usados para o aquecimento das fornalhas.

A utilização de fornalhas a lenha com sistema de aquecimento indireto é um método comum na maioria das propriedades pré-processadoras de cacau. Estas fornalhas são destinadas a produtos agrícolas que requerem temperatura controlada e não muito alta durante a secagem (CUNHA; SERÔDIO, 1991). A temperatura ideal da massa de amêndoas de cacau deve ser mantida em temperatura entre 35 e 40°C (EFRAIM, 2004).

O aquecimento do ar de secagem também pode ser utilizado por meio do vapor gerado em caldeiras. Para outras matérias-primas, como o café, por

exemplo, pesquisas constataram que o consumo de lenha neste sistema é de 50% inferior aos verificados nos secadores que utilizam fornalhas convencionais, com aquecimento. Sistemas como estes, que operam com caldeira, apresentam menor custo com mão-de-obra. Embora seja uma tecnologia disponível e que resulta em produto de boa qualidade, o uso de caldeira só é economicamente recomendável para grandes unidades processadoras, que utilizam um grande número de secadores.

Para evitar os problemas com o uso de fornalhas, as seguintes recomendações devem ser obedecidas:

- utilização eficiente dos combustíveis;
- alimentação constante das fornalhas para equilíbrio da temperatura do ar de secagem;
- padronização do tamanho e diâmetro do combustível sólido;
- limpeza e manutenção de todos os componentes da fornalha e do secador.

Além disso, deve ser observado o tipo de combustível a ser empregado na secagem das amêndoas de cacau, pois apresentam importância significativa na qualidade do produto final e no custo da secagem (CUNHA; SERÓDIO, 1991).

Os combustíveis, que podem ser utilizados como fonte de energia para a secagem, compreendem dois grupos: fósseis (Gás Natural, GLP, diesel) cujos preços estão sujeitos às oscilações do mercado internacional e os provenientes da biomassa (lenha, resíduos agrícolas, carvão vegetal), que são provenientes de fontes renováveis de energia, as quais podem ser encontradas no próprio local de utilização, não dependendo de influências externas e se, racionalmente exploradas, garantirá o suprimento de energia para a secagem de produtos agrícolas, pois se apresentam nos dias de hoje como as melhores opções, por serem fontes renováveis de energia.

Na escolha de um combustível devem ser consideradas as vantagens e desvantagens de cada um e analisadas as questões como quantidade de calor produzido; custo; segurança; condições de armazenamento e transporte; emissão de poluentes; mão-de-obra para manipulação; influência sobre a qualidade do produto; equipamento necessário; dimensionamento dos mesmos e; o tipo de sistema para transformá-lo em calor (gaseificador, queimador, fornalha, etc.).

O uso de queima direta ocasiona economia de energia, mas pode provocar contaminação do produto com compostos presentes na fumaça, reduzindo a sua qualidade (MELO et al., 2010). Já o gás liquefeito de petróleo-GLP resulta em energia limpa, mas o seu custo é cerca de três vezes superior ao da lenha de eucalipto, usada em fornalhas com trocadores de calor (SOBRINHO et al., 2001). Por estas e outras razões, as tecnologias que utilizam fontes energéticas provenientes da biomassa, como a da lenha e, em especial, dos resíduos agroindustriais, constituem as melhores opções para os produtores e agroindústrias (SILVA et al., 2004)

Experimentalmente, é conhecida a viabilidade do emprego do carvão vegetal como fonte de energia limpa. Em geral, o carvão vegetal, proveniente da carbonização de eucalipto, é livre de alcatrão, óleos e água presentes na madeira natural que são responsáveis pela formação da fumaça densa e contaminante. Por este motivo, há a necessidade de se empregar esse combustível ou outro tipo de biomassa para viabilizar a utilização desses na obtenção do cacau em sistemas mais eficientes mantendo os atributos de sabor e aroma característicos do cacau.

A lenha é a principal biomassa utilizada na secagem do cacau e juntamente com a energia solar são as fontes de energia mais utilizadas na secagem do cacau. Outra opção de biomassa são as cascas dos frutos, geradas durante o pré-processamento do cacau, que podem ser utilizadas como combustível em sistemas de transformação.

Sobrinho et al. (2001) projetaram uma fornalha para queimar palha de café, com grelha inclinada e um trocador de calor de tubo aletado duplo, obtendo eficiência de 54%. A fornalha operou com vazão de $1,084 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, aquecendo o ar ambiente de 23°C para 92°C . Neste experimento, consumiram-se $36 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ de combustível.

A baixa eficiência energéticas, de 30 a 54%, das fornalhas que queimam biomassa (VALARELLI, 1991; SANTOS, 2003) e dos sistemas de secagem do cacau dificultam a substituição total da lenha por casca de cacau, isso porque esses sistemas são de baixa eficiência e existe no mercado outras opções mais eficientes. Como alternativa pode-se utilizar a gaseificação, já que segundo Silva et al. (2000), a gaseificação proporciona entre outras vantagens:

alta eficiência térmica, variando de 60 a 90%, somada aos aspectos econômicos, sociais e ambientais.

O processo de gaseificação, apesar de antigo, ainda necessita de desenvolvimento visando minimizar perdas da eficiência energética decorrentes da formação de alcatrão, teor de água da biomassa e consumo em equipamentos secundários.

A formação de alcatrão é um dos maiores problemas a ser enfrentado durante a gaseificação de biomassas destinada para a geração de calor em processos de secagem de produtos agrícolas, pois pode promover o câncer se ingerido em altas concentrações. O alcatrão condensa sob temperaturas reduzidas, polimerizando-se nos equipamentos e produtos alimentícios, mas existem tecnologias capazes de renovarem o alcatrão durante o processo de gaseificação (OLIVEIRA, 2010).

As tecnologias de remoção de alcatrão podem ser divididas em duas categorias: limpeza do gás aquecido após a gaseificação (método secundário), e tratamentos internos no gaseificador (método primário). Apesar dos métodos secundários terem provado eficácia, os métodos primários têm chamado bastante atenção, uma vez que eliminam a necessidade de limpeza do gás (DEVI et al., 2003; OLIVEIRA, 2010).

Os parâmetros operacionais como temperatura, agente gaseificador, razão de equivalência, e tempo de residência são de extrema importância para a formação e decomposição do alcatrão. Além disso, existe um potencial para o uso de aditivos no leito como dolomita, olivina e carvão. Catalisadores a base de níquel, também vêm sendo reportados por serem muito eficazes, não apenas para redução de alcatrão, mas também para a diminuição da quantidade de compostos nitrogenados como amônia. O conceito de gaseificação em dois estágios e injeção de ar secundário no gaseificador é de grande importância para a evolução da tecnologia (DEVI et al., 2003).

Li e Suzuki (2009) apresentaram uma revisão sobre propriedades físicas e químicas do alcatrão, indicando que o controle e a conversão do alcatrão é uma questão chave para uma aplicação bem sucedida do gás derivado da biomassa. Sun et al. (2009) realizaram uma pesquisa experimental sobre a gaseificação de casca de arroz com ar circulante, e um dos parâmetros estudados foi o efeito do ar secundário na quantidade de alcatrão do gás de

síntese. Os resultados obtidos mostraram que a quantidade de alcatrão é, principalmente, função da temperatura de gaseificação, decrescendo quando a temperatura no gaseificador está aumentando.

Skoulou et al. (2009) analisaram as características do processo e o produto da gaseificação das amêndoas da oliva com vapor a alta temperatura. Amêndoas de oliva contêm metais como o Fe e, esse metal apresenta um efeito catalisador na destruição do alcatrão, dentro do gaseificador devido às reações produzidas com o vapor em alta temperatura.

2.4. Tecnologias para produção de energia a partir da biomassa

2.4.1. Processos termoquímicos

2.4.1.1. Combustão

A combustão é utilizada para converter quimicamente a energia armazenada na biomassa em calor, potência ou eletricidade. Para transformar a biomassa em energia útil, a mesma precisa passar por equipamentos como fornos, fornalhas caldeiras, turbinas, geradores, etc. A combustão de biomassa produz gases com temperaturas em torno de 800 a 1000°C e é possível ser realizada com qualquer tipo de biomassa, mas este processo só é confiável para teores de umidade menores que 50% (McKENDRY, 2002).

A combustão, assim como em qualquer processo, pode ser aplicada em grande ou pequena escala, sendo que em escalas menores como a cocção e aquecimento de ambientes as perdas são maiores (30 a 90%). Por outro lado, as operações em grande escala são capazes de produzir entre 100 e 3000 MW utilizando resíduos sólidos urbanos, resíduos florestais, lenha e resíduos do próprio processo de produção como, por exemplo, as usinas sucroalcooleiras, e a possibilidade iminente das unidades produtoras de cacau realizarem o mesmo procedimento, produzir calor ou vapor e por meio de sistemas turbina - gerador transformar o trabalho de eixo de uma turbina em energia elétrica utilizando um gerador. As eficiências de conversão para as centrais de combustão de biomassa variam de 20% a 40%. As maiores

eficiências são obtidas em centrais com capacidade de produzir energia com mais de 100 MW de potência (DEMIBARS, 2001; FERREIRA, 2009).

2.4.1.2. Gaseificação

Gaseificação é o processo pelo qual a biomassa por oxidação parcial é convertida em uma mistura gasosa, também conhecida por gás de síntese (syngas) que apresenta em sua composição hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2) (HAM, 2005; HIGMAN; BURGT, 2003; WANG et al., 2008). O agente oxidante ou gaseificante podem ser o ar, O_2 puro, vapor, CO_2 ou a mistura destes. O ar é o agente gaseificante mais barato e disponível, com isso é muito usado, mas o mesmo possui elevada concentração de nitrogênio, diminuindo assim o poder calorífico do gás produzido, ou seja, a concentração de N_2 é inversamente proporcional ao poder calorífico do gás produzido. Se O_2 puro for usado como o agente gaseificante, o valor de aquecimento do gás aumentará, mas os custos operacionais também aumentarão devido à produção de O_2 . A combustão parcial de biomassa com ar ou O_2 pode ser realizada e o calor direcionado para a secagem de biomassa. A secagem da biomassa aumenta o poder calorífico, além dessa vantagem a combustão parcial ainda pode gerar água e CO_2 que podem ser utilizadas nas reações endotérmicas da gaseificação e reações adicionais de redução (BASU, 2006; WANG et al., 2008).

Utilizando vapor como agente gaseificante o valor de aquecimento e conteúdo de H_2 no gás pode ser aumentado, ou seja, com a utilização de vapor como agente gaseificante pode-se aumentar em até 3 vezes o valor de aquecimento quando comparado com a gaseificação de biomassa utilizando o ar como agente gaseificante (RAPAGNA et al., 2000; GIL et al., 1999; GABRA et al., 2001; WANG et al., 2008). O uso de CO_2 como o agente gaseificante seria outra alternativa de aproveitamento dos gases da gaseificação já que o mesmo compõe o gás em altas concentrações. O CO_2 com catalisadores como Ni/Al pode transformar material particulado, alcatrão e CH_4 em H_2 e, ou, CO, aumentando o conteúdo destas frações no gás (DEVI et al., 2003; OLLERO et al., 2003; WANG et al., 2008).

Para a utilização de vapor puro ou CO₂ é preciso calor de forma indireta, ou seja, externa, para promover as reações endotérmicas da gaseificação (HOFBAUER et al., 1997; CUMMERA; BROWN, 2005; WANG et al., 2008). Alternativamente, pode-se usar uma mistura de vapor ou CO₂ com ar ou O₂ como agente gaseificante, e a combustão parcial da biomassa com ar/O₂ gerando o calor requerido para a gaseificação (GIL et al., 1999; HANAOKA et al., 2005; LUCAS et al., 2004; WANG et al., 2008). Há três tipos principais de gaseificadores: leito fixo, leito móvel e leito fluidizado (HAM, 2005; BASU, 2006; WANG et al., 2008). Gaseificador de leito fixo e móvel produzem gases com elevadas concentrações de alcatrão devido o calor desuniforme e baixo e; transferência de massa entre biomassa sólida e agente gaseificante. Porém, ambos são simples econômicos, seguros e podem ser usados para gaseificar biomassa com alto teor de água e em processos de pequena escala (BASU, 2006; WANG et al., 2008). Gaseificação em leito fluidizado demanda uma grande quantidade de calor e baixo percentual de biomassa 1-3%, sendo assim grande parte do leito é composto por calor inerte (BASU, 2006; WANG et al., 2008). Por outro lado, a gaseificação com leito fluidizado promove aquecimento uniforme, alta produtividade e altas taxas de aquecimento (VAN et al., 2001; WANG et al., 2008).

Na gaseificação da casca de arroz em leito fluidizado em escala industrial Yin et al. (2002) obtiveram uma produção de gás de síntese, faixa de poder calorífico e eficiência, respectivamente, 960 kg m⁻²h⁻¹, 4.6 - 6.3 MJNm⁻³ e 65%, respectivamente, enquanto em leito fixo foi 127 kg m⁻²h⁻¹, 3.8 - 4.6 MJNm⁻³ e 47%.

Os gases obtidos pelo processo de gaseificação podem ser usados para gerar calor e potência semelhante ao gás natural (RODRIGUES et al., 2003; KINOSHITA et al., 1997; WANG et al., 2008) e síntese de outras substâncias químicas em combustíveis líquido (TIJMENSEN et al., 2002; GRETHLEIN; JAIN, 1993; WANG et al., 2008), ou produzir H₂ (RAPAGNA et al., 2000; HANAOKA et al., 2005; WANG et al., 2008). A aplicação da tecnologia de gaseificação de biomassa depende fortemente da qualidade do gás produzido e das tecnologias de controle empregadas (DEVI et al., 2003; GERHARD et al., 1994; AZNAR et al., 1998 WANG et al., 2008).

Os gaseificadores basicamente são desenvolvidos de acordo com as seguintes configurações:

- **Fluxo contracorrente:** largamente utilizado para gaseificação de combustíveis não voláteis como o carvão. No entanto, a alta taxa de produção de alcatrão (5% - 20%) torna seu uso questionável para secagem de alimentos e impraticável quando o gás gerado é destinado à combustão interna em motores.
- **Leito fluidizado:** possui maior capacidade de geração de energia termoquímica (mais que 40GJ/h) e pode ser alimentado com combustíveis de partículas finas, porém demanda maior despesa em seu desenvolvimento. O ar quente em alta velocidade atravessa o gaseificador levantando as partículas, formando deste modo um leito fluidizado.
- **Fluxo cruzado:** é um dos mais simples e leve. O ar entra sob alta velocidade através de uma única entrada lateral, induz uma circulação substancial que por sua vez produz altas temperaturas em pequenos volumes de biomassa. Geralmente é utilizado para combustíveis com baixa capacidade de geração de alcatrão.
- **Fluxo concorrente:** este foi desenvolvido para converter biomassas com alto teor de compostos voláteis em um gás com baixo teor de alcatrão e, portanto tem provado ser o modelo que obtém melhores resultados em termos de conversão em energia térmica para uso em sistemas de secagem e para a geração de energia elétrica (Figura 2).

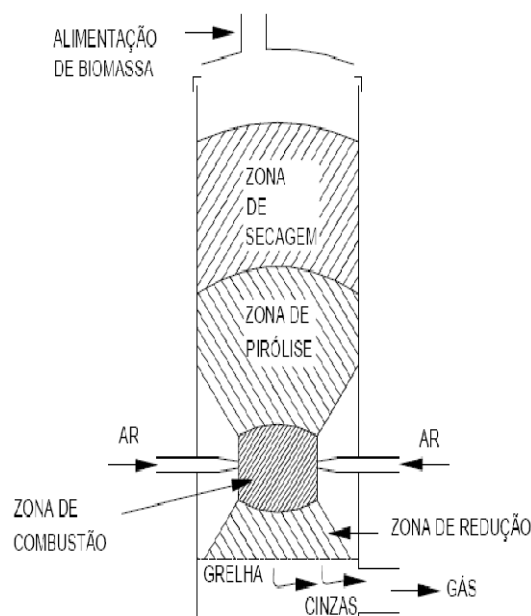


Figura 2 - Gaseificador de fluxo concorrente.

Segundo Silva et al. (2000), a gaseificação proporciona as seguintes vantagens: alta eficiência térmica, variando de 60% a 90%, dependendo do sistema implementado; energia produzida com a queima dos gases produzido é menos poluente; a demanda de energia pode ser controlada e, conseqüentemente, a taxa de gaseificação pode ser monitorada; e o uso da biomassa, quando associado ao manejo sustentável dos recursos, trás um impacto nulo ao meio ambiente, pois o carbono lançado para a atmosfera é absorvido pelas plantas durante seu crescimento.

Entretanto, apresenta as seguintes desvantagens: a biomassa deverá ser limpa, sem a presença de elementos que possam comprometer o processo de gaseificação; o tamanho da biomassa deverá ser adequado ao gaseificador, devendo ser cortada anteriormente; há o risco de fusão de cinzas que poderá alterar o desempenho do gaseificador quando se usa a biomassa com alto teor de cinzas; se não completamente queimados o alcatrão formado durante o processo de gaseificação poderá gerar monóxido de carbono (CO); e devido à geração de gases tóxicos, o processo de gaseificação deve ser realizado em área aberta e ventilada.

Silva et al. (2004) estudaram a viabilidade de um gaseificador/combustor utilizando eucalipto em pedaços, resíduos de serraria,

cavacos de lenha e sabugo de milho como combustíveis na secagem de produtos agrícolas. Os autores concluíram que o gaseificador, usando cavacos de eucalipto como combustível, consumiu entre 15,3 e 18,8 kg h⁻¹ de biomassa, o equipamento mostrou-se viável tecnicamente e economicamente para a secagem de café despulpado e para outros produtos agrícolas.

A utilização de reatores para gaseificação de biomassa, acoplados a combustores do gás é também uma alternativa energeticamente eficiente e funcional para aquecimento de galpões avícolas. A utilização do sistema de gaseificação se baseia na hipótese desta tecnologia poder apresentar ao avicultor redução no custo de produção, comparativamente aos sistemas tradicionais de aquecimento de galpões avícolas (ZANATTA et al., 2008).

Zanatta (2007), em testes usando gaseificador-combustor para o aquecimento do ar em aviários, com fogo direto, durante um período de 25 dias e funcionando 24 horas por dia, obteve uma economia de 26% de lenha em relação à fornalha a fogo indireto.

A gaseificação da biomassa desempenha um papel de extrema importância para o desenvolvimento energético de forma sustentável, apresenta boa eficiência, traz benefícios como a redução no balanço de emissões de gases do efeito estufa, desenvolvimento econômico regional, desenvolvimento social e agrícola e fornecimento regular de energia, o que a faz bastante promissora, principalmente em áreas com necessidade energética cada vez mais intensa.

Além do tipo de sistema de aquecimento utilizado na geração de energia para sistemas de secagem. O desempenho dos secadores é função de fatores como: teor de água inicial e final do produto, temperatura do ar, resistência oferecida ao fluxo de ar, temperatura e umidade relativa do ambiente, natureza da fonte de energia, sistema de carga do secador e características do ventilador (SILVA et al., 1995; SOBRINHO et al., 2001).

2.4.1.3. Pirólise

Pirólise é o processo pelo qual a biomassa é convertida em uma fração líquida, gasosa e sólida numa temperatura próxima a 500°C e na ausência de oxigênio ou combustão parcial com quantidade limitada de O₂ (McKENDRY,

2002; FAAIJ, 2006; DEMIBARS, 2001; FERREIRA et al., 2009). O processo pode ser ajustado para produzir carvão, óleo pirolítico, gás ou produzir metanol com 95,5% de eficiência. A pirólise também pode ser usada para produzir bioóleo a partir da pirólise “flash”, também conhecida como pirólise rápida. Com esta técnica é possível atingir quantidades grandes de combustível líquido de uma biomassa triturada e exposta a altas temperaturas por um curto período de tempo, quase um segundo, seguido de um resfriamento rápido. Este processo é cuidadosamente controlado para alcançar rendimentos altos de líquido. Em resumo, as características principais de um processo de pirólise rápida são: (1) taxas de transferência de calor e aquecimento muito rápido, com isso a biomassa precisa ser triturada; (2) temperatura de reação da pirólise deve ser cuidadosamente controlada com temperaturas ao redor 500°C na fase vapor, com residência de vapor, geralmente, menos de 2 segundos; (3) resfriamento dos vapores da pirólise para obtenção do bioóleo. O produto principal geralmente é bioóleo (corrosivo e ácido), sendo o mesmo obtido com rendimento de até 80% para a biomassa alimentada seca. O bioóleo pode ser usado em máquinas e turbinas e seu uso como matéria-prima para refinarias também está sendo considerado (BRIDGWATER et al., 1999; FERREIRA et al., 2009). Entretanto, a pirólise é uma tecnologia não muito desenvolvida quando comparada com a gaseificação, embora com o passar do tempo vem crescendo a pesquisa e a aplicação desta tecnologia, mas em escala piloto e industrial pouco foi realizado. Pirólise recebe atenção maior como uma alternativa de pré-tratamento para transportar o combustível para longas distâncias, sendo assim o bioóleo pode ser usado como combustíveis para caldeiras e gaseificadores, para geração de potência ou gaseificação do óleo para produção de syngas (FAAIJ, 2006; FERREIRA et al., 2009). No Brasil a experiência nesta tecnologia vem sendo pesquisada e desenvolvida por pesquisadores da UNICAMP e pela BIOWARE empresa que trabalha com energia renováveis, para transformar biomassa em diferentes combustíveis. A Bioware desenvolveu a tecnologia de Pirólise Rápida em Leito Fluidizado Borbulhante Atmosférico (PRLFA) para a produção de bioóleo, um combustível que substitui o diesel e o óleo combustível, podendo ser usado como insumo químico. A empresa, em conjunto com a Unicamp, dispõe de uma planta

demonstrativa com capacidade para processar 200 kg h⁻¹ de biomassa seca para produzir bioóleo (ROCHA et al., 2002).

2.4.2. Processos biológicos

2.4.2.1. Biodigestão

A biodigestão é um processo de digestão anaeróbia o qual promove a conversão de material orgânico, em biogás, uma mistura composta principalmente de metano e de dióxido de carbono com pequenas quantidades de outros gases como o sulfureto de hidrogênio (COMMISSION OF THE EUROPEAN UNION – CEU, 2003; FERREIRA et al., 2009). O biogás pode ser obtido por digestão anaeróbia de esgotos e de resíduos animais e por digestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos e de processos agroindustriais. O gás produzido geralmente é utilizado para geração de eletricidade, através de grandes motores de combustão interna ou turbinas. A utilização do biogás como combustível em motores a gás para produzir eletricidade, apresenta geralmente eficiência global na conversão de biomassa em eletricidade de 10 a 16% (McKENDRY, 2002; FERREIRA et al., 2009). A digestão anaeróbia é uma tecnologia bem estabelecida e sistemas avançados de grande escala são desenvolvidos e disponíveis comercialmente. As plantas deste processo passaram de pequenas centrais agrícolas para grandes escalas, ou seja, as plantas já dispõem de reatores com mais de 7000 m³ e potência superiores a 14 MW (CEU, 2003; FERREIRA et al., 2009).

A Holanda, Alemanha e Dinamarca são os países que dominam as tecnologias de produção do biogás e são os maiores produtores desse combustível. O biogás tem um poder calorífico relativamente baixo (cerca de metade do valor do calor do gás natural) e contém vestígios de impurezas que causam corrosão e desgaste em tempos menores. O uso de materiais resistentes ao desgaste, o desenvolvimento de lubrificantes especiais e o cuidado com a manutenção têm aumentado a confiabilidade dos motores alimentados a biogás nesses países (CEU, 2003; FERREIRA et al., 2009).

No Brasil, a digestão anaeróbia é ainda limitada em relação ao potencial existente para esta tecnologia. Os resíduos da plantação e do

processamento do cacau poderiam ser aproveitados assim como outros resíduos das propriedades rurais produtoras, para a produção de biogás por digestão anaeróbia. Esta exploração não é feita ainda, mas para isso é preciso determinar parâmetros operacionais e a viabilidade do processo de biodigestão.

Os resíduos, provenientes da criação animal, tal como avicultura, aquicultura e suinocultura, assim como, no beneficiamento das carnes têm alto potencial para poluição. Tradicionalmente, esses têm sido lançados diretamente ao solo como fertilizantes, mas, em algumas situações, esses métodos podem causar problemas ambientais, como odor desagradável e contaminação da água.

Sabe-se que o metano possui maior influencia no efeito estufa quando comparado com o dióxido de carbono e, portanto, é melhor queimá-lo que deixá-lo na atmosfera, mas quando queimado o metano, diferente do dióxido de carbono, pode ser usado para produzir energia. Portanto, para evitar problemas ambientais seria importante criar uma legislação para forçar o aproveitamento energético do gás de aterros e de resíduos agroindustriais para diminuir os níveis de gases responsáveis pelo efeito estufa. A partir destas iniciativas diminuem-se as emissões de gases de efeito estufa e, por outro se aproveita o potencial energético em sistemas térmicos e elétricos para a geração de calor e energia elétrica.

2.4.2.2. Hidrólise da lignocelulose

Produção de etanol combustível a partir da biomassa lignocelulósica vem se destacando como uma das tecnologias de maior importância para o desenvolvimento sustentável na produção de combustíveis renováveis. O etanol possui maior octanagem que a gasolina com isso as emissões são reduzidas, com isso vem sendo amplamente reconhecido como um substituto e/ou aditivo para gasolina (WYMAN, 1999; WATANABE et al., 2002; SUKUMARAN et al., 2009). Devido a estas vantagens aparentes e por ser uma alternativa renovável aos combustíveis de transporte, há um aumento no interesse por tecnologias para a produção de etanol a partir da biomassa com baixo custo (SCHELL et al., 2004; SUKUMARAN et al., 2009). A maior parte do

etanol combustível produzido atualmente no mundo é proveniente da biomassa rica em amido ou sacarose (melaço ou caldo de cana), mas o maior interesse hoje são as tecnologias para a produção de etanol a partir de fontes não alimentícia, as quais estão sendo estudadas por vários pesquisadores em todo mundo para que a produção em larga escala se tornar uma realidade nos próximos anos (VAN et al., 2003; SUKUMARAN et al., 2009).

A produção de etanol a partir da biomassa lignocelulósica envolve diferentes etapas de pré-tratamento: hidrólise (sacarificação) e fermentação (VAN et al., 2003; SUKUMARAN et al., 2009). Hidrólise da biomassa é especial para a produção de açúcares fermentáveis, que são depois convertidos em etanol por ação microbiana. Dois métodos, ou seja, hidrólise ácida e hidrólise enzimática são empregadas principalmente para realizar a hidrólise da biomassa e podem apresentar eficiências diferentes em função das condições de tratamento, tipo de biomassa e propriedades dos agentes da hidrólise. A hidrólise ácida é uma tecnologia já bem conhecida, mas apresentam desvantagens por gerar resíduos ácidos perigosos e por apresentar dificuldades técnicas na recuperação do açúcar neste meio ácido. Por outro lado, a hidrólise enzimática é mais eficiente e menos agressiva às condições ambientais, sem geração de qualquer resíduo tóxico. Por isso, este método vem apresentando um rápido desenvolvimento, por apresentar potencial para reduzir custo e aumentar a eficiência (MISHIMA et al., 2006; SUKUMARAN et al., 2009).

A produção comercial de etanol a partir da biomassa lignocelulósica é ainda dificultada principalmente pelo custo elevado das celulasas, enzimas usadas para sacarificação. A redução no custo das celulasas só pode ser alcançado através de esforços concentrados visando a otimização da produção de enzimas. A utilização de matéria-prima mais barata e estratégias de fermentação em estado sólido podem viabilizar a produção das celulasas. A redução no custo de produção de bioetanol também poderá ser alcançada através de tecnologias mais eficientes de sacarificação, que inclui a utilização de melhores estirpes enzimáticas e das condições de hidrólise (SUKUMARAN et al., 2009).

Celulase refere-se a uma classe de enzimas que são produzidas essencialmente por fungos, bactérias e protozoários, que catalisam a hidrólise

da celulose. No entanto, existem outras celuloses produzidas por outros tipos de organismos, como plantas e animais. Diversos tipos de celulasas são conhecidos, as quais são diferenciadas pela estrutura e pelo mecanismo de ação. Dentro desta classe de enzimas incluem endoglucanases que hidrolisam a estrutura polimérica da celulose expondo os radicais redutores e não redutores nas extremidades das cadeias lineares compostas por unidades de glicose. Em seguida, as exoglucanases e *exocelobiohidrolases* atuam sobre as cadeias menores de celulose produzindo celobiose, celooligossacarídeos e β -glicosídeses (BGL) que clivam as unidades de celobiose produzindo glicose como produto final (SUKUMARAN et al., 2009).

2.5. Sistema gaseificador/combustor

Santos (2003) apresentou o dimensionamento de um gaseificador de fluxo concorrente conectado a um combustor, utilizando como combustível lenha de eucalipto em pedaços (aproximadamente 4,0 cm de largura). A construção conforme o dimensionamento do gaseificador realizado pelo autor foi o seguinte:

O combustor foi construído sobre uma base de tijolo refratário, de 1,0 m² e 0,20 m de altura com revestimento de argamassa refratária Figura 3 (a).

O reator do gaseificador foi construído utilizando dois tubos de ferro de diferentes diâmetros (Figura 3b). A uma altura de 0,8 m foram colocadas quatro entradas de ar primário (Figura 3c).

A tampa do reator foi feita de ferro de 0,60 m de diâmetro e 0,10 m (Figura 3d).

As entradas de ar primário foram feitas utilizando tubo metálico de 0,05 m de diâmetro interno (Figura 3c).

A saída dos gases do reator para o combustor foi feita por meio de uma abertura de 0,10 m de altura e 0,30 m de comprimento, perpendicular ao combustor e paralelo ao cinzeiro (Figura 4a).

A queima do gás de síntese foi realizada numa célula feita de vergalhão de 0,02 m de diâmetro de 0,31 m de comprimento; 0,20 m de altura e 0,30 de largura (Figura 4c).



Fonte: Modificado de Santos (2003).

Figura 3 - Reator de gaseificação. (a) base do reator; (b) tubos de ferro; (c) entrada de ar primário; (d) tampa do reator.



Fonte: Modificado de Santos (2003).

Figura 4 - Combustor dos gases: (a) saída dos gases produzidos no reator para o combustor; (b) tubo metálico; (c) câmara de combustão e (d) finalização do combustor.

Após a câmara de combustão foi colocado um tubo metálico de 0,40 m de diâmetro e 2 m de comprimento, que teve como função manter a queima do gás e melhor direcionar a saída do ar quente para o ventilador. O tubo foi colocado dentro de uma caixa de alvenaria, onde foram feitas as aberturas para entrada do ar primário e do ar secundário no combustor (Figura 4b).

Para a construção do teto do combustor foram colocadas telhas apoiadas sobre as paredes do combustor para que uma laje de cimento de 0,10 m de espessura fosse construída (Figura 4d).



Fonte: Modificado de Santos (2003).

Figura 5 - Grupo aerotérmico do sistema gaseificador/combustor. (a) dimensões da grelha; (b) entrada lateral de ar; (c) entradas de ar sob o combustor; (d) entrada de ar no reator e (e) conjunto motor/ventilador centrífugo.

As quatro entradas de ar primário a 0,60 m de altura da base do reator foram feitas utilizando um tubo metálico de 0,05 m de diâmetro interno (Figura 5.3d). E a grelha foi construída com vergalhão de 0,02 m de diâmetro, tendo 0,42 m de altura e 0,20 de diâmetro. A área livre da grelha foi de 0,0167 m² (Figura 5a).

Para auxiliar na combustão dos gases e no controle da temperatura do ar de exaustão foram construídas no sentido vertical duas entradas de ar nas

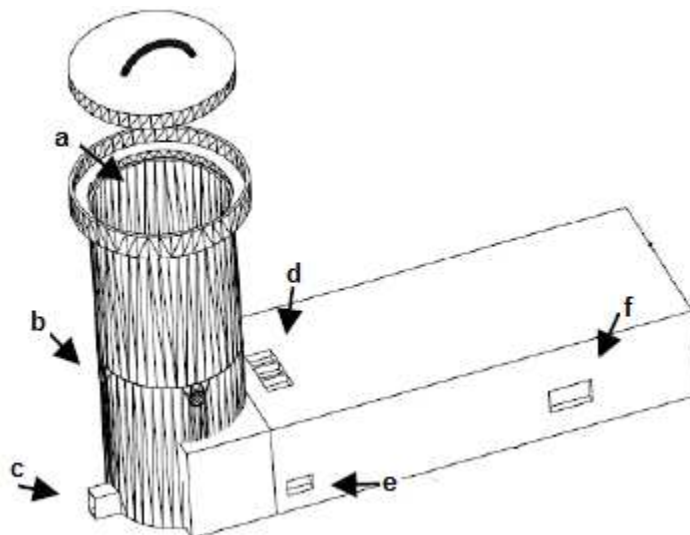
laterais do combustor de 0,19 m de largura e 0,16 m de altura com aberturas tipo comportas (Figura 5b ou Figuras 6e e 6f).

Na lateral da câmara de combustão foi feito uma abertura de 0,10 m de largura e 0,10 m de altura, protegido por um vidro refratário para facilitar a visualização da chama.

Para conduzir uma queima completa dos gases produzidos no reator foi construída uma abertura para entrada de ar primário sob o combustor. A largura da janela central foi de 0,145 m e as demais 0,11 m (Figura 5b ou Figura 6d).

Um ventilador centrífugo, com capacidade para $20 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ foi acoplado a um motor elétrico trifásico de 220 V e com potência de 552 W. O eixo do ventilador foi acoplado a um mancal que por meio de uma polia e correia foi ligado ao motor elétrico (Figura 5e).

A Figura 6 ilustra o croqui do sistema gaseificador/combustor para o melhor entendimento do dimensionamento, apresentado por Santos (2003), do gaseificador estudado pelo autor: de fluxo concorrente conectado a um combustor, utilizando lenha de eucalipto em pedaços (aproximadamente 4,0 cm de largura) como combustível.



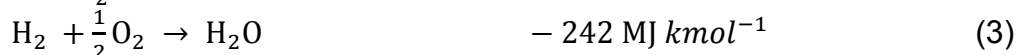
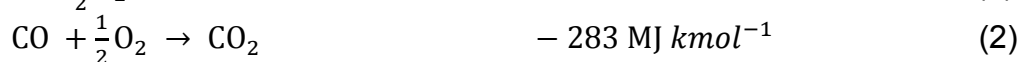
Fonte: Modificado de Santos (2003).

Figura 6 - Conjunto gaseificador/combustor. (a) topo do reator – entrada do combustível; (b) entrada de ar primário no reator; (c) cinzeiro; (d) entrada de ar primário no combustor; (e) entrada de ar secundário no combustor e (f) visor das chamas do reator e do combustor.

2.5.1. Estequiometria das reações envolvidas

2.5.1.1. Combustão

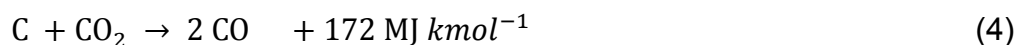
A combustão é uma reação química exotérmica, ou seja, libera calor para o ambiente, e ocorre na presença de oxigênio conforme as reações 1 a 3. A liberação de calor é crucial para que as reações subseqüentes sejam realizadas com êxito.



2.5.1.2. Reação de Boudouard

A reação de Boudouard é possivelmente a reação mais importante no processo de gaseificação de biomassa. É uma reação heterogênea de redução-oxidação (redox) de uma mistura de monóxido de carbono e dióxido de carbono a uma determinada temperatura. Nesta, ocorre a desproporcionalização do monóxido de carbono em dióxido de carbono e carbono, e vice-versa.

A reação de Boudouard implica que, sob baixas temperaturas, o equilíbrio é deslocado para a reação exotérmica de formação de dióxido de carbono, e sob altas temperaturas, a formação endotérmica de monóxido de carbono é o produto dominante (OLIVEIRA, 2010).



2.5.1.3. Reação de gás de água ou carbono-vapor

É uma reação química endotérmica e heterogênea, na qual o carbono reage com o vapor de água para formar monóxido de carbono e hidrogênio como apresentada na reação 5.



2.5.1.4. Reação de formação de metano

É uma reação química exotérmica e heterogênea, onde o carbono reage com o hidrogênio para a formação do metano.



2.5.1.5. Reações homogêneas de conversão água/gás

Em geral, quando se pretende situações onde a conversão do carbono é praticamente completa. Desta forma, pode-se reduzir as reações heterogêneas 4, 5 e 6, em:



Esta é uma reação exotérmica, onde o monóxido de carbono reage com o vapor de água para formar dióxido de carbono e hidrogênio.



O metano reage com o vapor de água para formação de monóxido de carbono e hidrogênio, sendo esta uma reação endotérmica.

2.5.1.6. Reações em materiais diversos

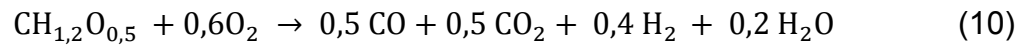
Para combustíveis reais, os quais também contêm hidrogênio, a reação completa pode ser descrita pela reação 9.



2.5.1.7. Razão estequiométrica e razão de equivalência

Para a combustão completa de 1 kg de biomassa ($\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,6}$) é necessário 6,5 kg de ar (N_2 -78%, O_2 -21%, CO_2 -0,03%). Esta é chamada razão estequiométrica. Na prática, processos que envolvem combustão asseguram excesso de ar, com o objetivo de forçar a combustão completa mesmo em casos de deficiência na mistura, e manter o baixo nível de emissão de CO. Para reações de gaseificação utiliza-se a razão de equivalência, ou seja, uma fração da quantidade estequiométrica de ar aplicado. Melhores resultados são obtidos com razões de equivalência de aproximadamente 0,25. Razões inferiores são indicativas de predominância de pirólise, com produção de um gás mais rico, porém com mais alcatrão. Razões superiores a 0,25 são indicativas de combustão excessiva, com produção de um gás mais fraco (OLIVEIRA, 2010). O processo de gaseificação basicamente divide o processo de combustão em duas partes. A combustão da biomassa: 1 kg biomassa + 6,5 kg ar \rightarrow 7,5 kg de gás (N_2 , H_2O , CO_2). Adotando um processo de gaseificação com razão de equivalência igual a 0,25 tem-se: 1 kg biomassa + 1,6 kg de ar \rightarrow 2,6 kg de gás (H_2 , CO , CH_4 , N_2 , CO_2). Para realizar a combustão deste gás é necessário: 2,6 kg de gás combustível + 4,9 kg de ar \rightarrow 7,5 kg de gás (N_2 , CO , H_2O). Pode-se observar que o valor final do produto da combustão do gás combustível é idêntico ao valor final do produto da combustão da biomassa (OLIVEIRA, 2010).

Considerando que uma biomassa apresenta em média 80% de voláteis e 20% de carbono fixo, em 1 kg de biomassa tem-se 0,8 kg de material volátil, o qual originará os vapores condensáveis, comumente conhecidos como alcatrão. Carbono puro apresenta uma razão estequiométrica de 12,7, o que significa que são necessários 2,5 kg de ar para combustão. Portanto, para a combustão do material volátil será necessário uma quantidade de 4 kg de ar (6,5 kg de ar para combustão da biomassa – 2,5 kg de ar para combustão do carbono fixo), ou seja, aproximadamente 60% do ar disponível. Considerando a fórmula para vapor de alcatrão sendo $\text{CH}_{1,2}\text{O}_{0,5}$, a combustão parcial destes gases pode ser aproximadamente representada pela reação abaixo (OLIVEIRA, 2010):



A razão O₂/vapor de alcatrão dependerá da exata composição do vapor e das condições de operação do gaseificador. Gaseificadores concorrentes produzem geralmente combustíveis com baixo teor de alcatrão, em torno de 1%, o que os tornam uma excelente escolha como fonte de calor para produtos alimentícios.

CAPÍTULO 1

APROVEITAMENTO DA CASCA DE CACAU PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA NA REGIÃO SUL DA BAHIA

1. INTRODUÇÃO

A demanda mundial por energia elétrica cresce rapidamente, mesmo considerando os impactos negativos que acompanham algumas formas de geração convencional, tais como a energia elétrica gerada por meio de usinas nucleares e a proveniente de combustíveis fósseis. Tal fato conduz à necessidade de se gerar eletricidade a partir de fontes renováveis de energia e, por meio destas promover a redução de impactos ambientais.

Outro fator estimulante para o uso de novas fontes de energia alternativa é a desregulamentação das atividades do mercado de energia elétrica, pois a introdução de novas fontes energéticas promove o desenvolvimento de pequenos produtores e também a competitividade entre as grandes concessionárias (JANNUZZI; SWISHER, 1997). No caso do Brasil, a biomassa pode ter papel muito importante para realizar esta função, entretanto ainda é subutilizada e na maioria dos casos é quase totalmente desperdiçada.

A biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal, formada pelo processo de fotossíntese. Ao contrário dos combustíveis fósseis, a biomassa é renovável e não contribui para o acúmulo de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera terrestre, ou seja, todo CO₂ liberado durante o uso da biomassa é absorvido novamente no processo de fotossíntese para formação da mesma (McKENDRY, 2002).

A biomassa representa uma importante fonte de energia, principalmente em áreas rurais da Alemanha, Holanda e Noruega, onde a utilização da biomassa é geralmente a forma mais viável para a produção de calor ou para geração de eletricidade (LORA; ANDRADE, 2009). Nesses países sistema de cogeração de energia já vem sendo empregado com sucesso em diferentes setores de atividade, mas, geralmente, são instaladas em unidades compactas e descentralizadas. O Brasil precisa seguir esse exemplo e, incentivar a implantação de unidades descentralizadas de

cogeração para aproveitar todo o potencial energético existente em biomassa proveniente de resíduos gerados na produção rural e agroindustrial.

A cogeração consiste na produção simultânea de calor e eletricidade e, de um modo geral, é uma forma de evitar por parte de um consumidor a compra de eletricidade de uma concessionária e também de garantir para o mesmo fornecimento confiável de energia. O uso da biomassa na geração de calor e eletricidade a partir de sistemas térmicos e elétricos vem crescendo continuamente ao longo da última década, incentivado principalmente pelas pressões ambientais, no sentido de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e aumentar o uso de fontes renováveis (JANNUZZI; SWISHER, 1997). Pode-se considerar ainda que a energia gerada por estes sistemas apresenta menor custo quando comparado com outros sistemas de energia como hidroelétricos e nucleares (LORA; ANDRADE, 2009). No Brasil, pode-se citar o exemplo do aproveitamento de resíduos da cana-de-açúcar, que além de suprir a demanda de vapor para realizar as operações unitárias do processo de obtenção do açúcar e do álcool, apresenta, também, a possibilidade de gerar a sua própria energia elétrica e vender excedente para as concessionárias energéticas.

Nas propriedades agrícolas do Sul da Bahia, onde o pré-processamento do cacau é realizado, são geradas toneladas da casca do fruto na etapa de partição e obtenção das amêndoas frescas. Segundo Silva Neto et al. (2001), em média, cerca de 6 toneladas de casca fresca por hectare são produzidas anualmente, as quais ainda não são aproveitadas para fins energéticos. O aproveitamento deste resíduo pode refletir no aumento da receita do produtor e, portanto, deve ser avaliado.

Pensando no aproveitamento integral do cacau e principalmente da casca, pesquisas vêm sendo desenvolvidas em todo o mundo na tentativa de descobrir as potencialidades da casca de cacau. Dentre estas se destacam o uso na alimentação animal (ABIOLA, 1991; DONKOH et al., 1991; AREGHEORE, 2002), produção de fertilizantes orgânicos por compostagem (CHEPOTE et al., 1990; SODRÉ et al., 2012) e como fontes de energias renováveis (AGYEMAN; OLDHAM, 1986; CEPLAC, 2012; SYAMSIRO et al., 2011).

O aproveitamento das cascas geradas durante o processamento de amêndoas de cacau apresenta inúmeras vantagens para o produtor e para as regiões produtoras, pois pode ser mais uma alternativa para estimular a geração de renda, contribuir para a preservação das florestas e para o controle de pragas.

Combustíveis em termos práticos são as substâncias que ao entrar em combustão liberam calor. Os combustíveis podem ser classificados em sólidos, líquidos e gasosos e, cada um desses pode ser natural ou derivado. Combustíveis naturais são aqueles usados nas mesmas condições em que são extraídos da natureza, a exemplo lenha, carvão de pedra, o gás natural e os resíduos agrícolas. Derivados são aqueles que resultam de algum processo de preparação a exemplos: carvão vegetal, coque, os derivados de petróleo, álcool, etc. (HAM, 2005; BASU, 2006).

Processos como biodigestão, pirólise, combustão, gaseificação e hidrólise de biomassa podem ser utilizados para a geração de energia útil na forma de calor e, ou, potência a partir de diferentes tipos de biomassa (WANG et al., 2008; FERREIRA et al., 2009). A produção de eletricidade a partir da biomassa, no Brasil, se dá essencialmente pelo aproveitamento de resíduos de cultivo ou de processos agroindustriais. Neste contexto, o aproveitamento energético de resíduos se reveste de notável importância, uma vez que consiste na geração de energia alternativa, bem como na solução de problemas ambientais e econômicos. Desta forma objetiva-se com o presente trabalho avaliar o potencial energético da casca de cacau quando se utilizam as tecnologias disponíveis no mercado, capazes de transformar a energia presente na casca em calor e, ou, energia elétrica em unidade centralizada ou unidades descentralizadas de cogeração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A quantidade de casca de cacau gerada, no estado da Bahia, durante o pré-processamento do cacau foi determinada a partir da Equação 1.1 utilizando os dados da produção anual brasileira e dos estados produtores de amêndoas secas de cacau (IBGE, 2012) e; dos percentuais referentes às frações do fruto

(100%), amêndoas secas e casca do fruto úmida, de 10% e 80% respectivamente (SILVA NETO et al., 2001).

$$M_c = \frac{M_a \cdot f_c}{f_a} \quad (1.1)$$

em que:

M_c – Massa de casca gerada (kg);

M_a – Massa de amêndoas produzidas (kg);

f_a – Fração das amêndoas secas relacionada ao fruto (%);

f_c – Fração de casca úmida relacionada ao fruto (%).

O potencial energético da casca do cacau foi determinado utilizando a Equação 1.2 considerando o poder calorífico superior de 15 MJ.kg^{-1} (LORA; ANDRADE, 2009) e que apenas 20% da casca de cacau correspondem a sua massa sólida, pois a casca apresenta um teor de água (b.u) de 80 a 90% (CHEPOTE et al., 1990; SODRÉ et al., 2012).

$$PEC = \frac{(M_c \cdot 0,2) \cdot PCI_r}{10^6} \quad (1.2)$$

em que:

PEC – Potencial energético da casca de cacau (TJ);

PCI_r – Poder calorífico inferior da biomassa de resíduos agrícolas (MJ.kg^{-1}).

A demanda energética para a secagem de amêndoas de cacau foi determinada a partir da Equação 1.3, utilizando os resultados obtidos por Silva Neto et al. (2001) referente ao consumo de lenha (poder calorífico de $17.616,3 \text{ kJ.kg}^{-1}$ e densidade de $(600 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1})$), em diferentes secadores, durante a obtenção de uma tonelada de amêndoas secas (Tabela 1.1).

$$DES = (v_L \cdot \rho_L) \cdot PCI_L \quad (1.3)$$

em que:

DES – Demanda energética para a secagem de amêndoas de cacau (MJ.ton^{-1});

v_L – Volume de lenha consumida na secagem por tonelada de amêndoas ($\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$);

ρ_L – massa específica da lenha ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$);

PCI_L – poder calorífico inferior da lenha (MJ.kg^{-1}).

Os dados apresentados na Tabela 1.1 foram utilizados como parâmetros do processo de secagem para diferentes secadores a energia artificial, gerada a partir da lenha, que é o combustível geralmente utilizado na secagem de amêndoas de cacau.

Tabela 1.3 - Parâmetros do processo de secagem artificial convencional

Parâmetros	Secadores				
	Tubular 6x6 m	Pinhalense	Plataforma CEPEC	Fornalha de tijolo*	Fornalha de ferro*
Eficiência (%)	17,6	12,2	17,7	16,5	41,8
Área de lastro (m^2)	36	3,80	16	4	4
Amêndoas fermentadas (kg)	2700	2700	4000	400	400
Amêndoas (kg)	1.450	1.490	2.150	215,2	215,2
Produto seco/úmido (%)	53,7	55,2	53,8	53,8	53,8
Tempo secagem (h)	40	51	45	58	32
Consumo lenha (kg)	1.200	1.530	1.530	186	66
Lenha/amêndoas secas (kg ton^{-1})	828	1.027	712	864	307

Fonte: Silva Neto et al. (2001).

* Secador Burareiro.

A partir dos dados apresentados na Tabela 1.1 (consumo de lenha, quantidade de amêndoas secas e poder calorífico da lenha) determinou-se a demanda de energia para secar uma tonelada de amêndoa de cacau em diferentes secadores de cacau. Em seguida, determinou-se a partir da Equação 1.4 a quantidade de casca de cacau, em kg.ton^{-1} de amêndoas secas, que seria necessária para realizar a mesma operação, em substituição da lenha.

$$DCP = \frac{DES}{PCIr} \quad (1.4)$$

em que:

DCP – Demanda de casca de cacau por tonelada de amêndoa produzida (kg.ton^{-1});

DES – Demanda energética para a secagem de amêndoas de cacau (kJ.ton^{-1});

PCIr – Poder calorífico inferior da biomassa de resíduos agrícolas (MJ.kg^{-1}).

Os potenciais de cogeração, em MW, para uma unidade descentralizada (UD) e uma unidade centralizada (UC), foram calculados considerando as eficiências das tecnologias disponíveis e, em seguida as tecnologias mais adequadas foram selecionadas por meio das faixas de potência.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1.2 encontram-se os dados da quantidade de energia presente na casca de cacau e que foi desperdiçada durante as safras de 2004 a 2008.

Como os dados são da produção acumulada na Região Sul da Bahia, a geração de energia para este caso, deve ser centralizada, numa central termoelétrica à biomassa, podendo a casca de cacau, no período analisado, gerar por ano, em média, 3.391 TJ (943GW.h) de energia, equivalente a 107,6 MW, podendo em sistemas de cogeração produzir anualmente 21,52 MW, considerando a menor eficiência para sistemas básicos de cogeração disponíveis no mercado (20%).

O potencial energético da casca de cacau pode ser aproveitado, também, na própria unidade processadora de cacau para suprir a demanda de calor e, em alguns casos, ainda, gerar energia elétrica. O aproveitamento na própria unidade reduz custos com transporte quando comparada com uma produção centralizada.

Tabela 1.4 - Estimativa do potencial energético da casca de cacau no estado da Bahia de 2004 a 2011

Safra	Cacau		PCI (MJ.kg ⁻¹)	Potencial**	
	Fruto (ton)	Casca (ton)		TJ	GW.h
2004	1.361.550	1.089.240		3.268	907,7
2005	1.374.590	1.099.672		3.299	916,4
2006	1.487.030	1.189.624		3.569	991,4
2007	1.339.430	1.071.544	15*	3.215	893,0
2008	1.310.600	1.048.480		3.145	873,7
2009	1.380.838	1.104.670		3.314	923,1
2010	1.482.951	1.186.361		3.559	991,4
2011	1.565.701	1.252.560		3.758	1.047
Média	1.412.836	1.130.269		3.391	943

* PCS - Poder Calorífico Superior de Resíduos Agrícolas (LORA; ANDRADE, 2009).

** Considerando 20% de aproveitamento em cogeração.

Nas propriedades processadoras de cacau, a etapa de secagem é a que demanda mais energia, e o combustível geralmente utilizado para tal processo é a lenha (secagem convencional). Para determinar a quantidade de energia necessária na secagem do cacau, precisa-se conhecer a quantidade de amêndoas e seu teor de umidade inicial e a umidade final desejada. Além disso, precisa-se conhecer a vazão mássica e algumas propriedades como o poder calorífico e massa específica do combustível.

A demanda energética da secagem por tonelada de grãos secos e a quantidade de casca necessária para suprir esta demanda foram calculadas e apresentadas na Tabela 1.3, para os diferentes tipos de secadores avaliados neste estudo (SILVA NETO et al., 2001).

A demanda de energia foi menor para os secadores Burareiro com fornalha de ferro seguido do secador Plataforma CEPEC, porém o secador Plataforma CEPEC apresentou melhor fluxo operacional. Segundo Silva Neto et al. (2001) o secador do tipo Burareiro, com fornalha de ferro é um secador de escala piloto e necessita de inúmeras secagens, inviabilizando o processo em escala maior.

Tabela 1.5 - Quantidade da casca de cacau por tonelada de amêndoas secas para suprir a demanda energética da secagem convencional

Parâmetros	Secadores				
	Tubular 6x6 m	Pinhalense	Plataforma CEPEC	Fornalha de tijolo*	Fornalha de ferro*
Demanda de energia**(MJ ton ⁻¹)	14.579	18.089	12.536	15.226	5.404
Poder calorífico (MJ kg ⁻¹)			15,0		
Casca/grãos secos (kg ton ⁻¹)	972	1.206	836	1.015	360,3

* Secador Burareiro.

** Demanda energética da secagem utilizando como combustível a lenha (secagem convencional).

Por meio da quantidade de casca de cacau gerada 8.000 kg (matéria seca + úmida) por tonelada de amêndoas secas ou 1.600 kg (matéria seca), foi possível verificar que o processo de secagem demanda uma energia equivalente à metade da massa de casca seca gerada durante esse processo, quando se utiliza secador plataforma CEPEC (Tabela 1.3), sendo assim, a outra metade pode ser convertida em energia elétrica por meio de sistemas básicos de cogeração existentes no mercado (Tabela 1.4). Considerando 1600 kg de casca seca, gerada durante o processo produtivo de uma tonelada de amêndoas secas, tem-se uma energia de 24 GJ. Portanto, uma fazenda de capacidade produtiva de aproximadamente 1tonano⁻¹ pode apresentar uma potência de 0,76 kW. Porém, essa potência é considerada baixa para a produção de calor e energia elétrica em sistemas básicos de cogeração apresentados na Tabela 1.4.

A faixa de potência, segundo Corrêa Neto (2001), é o primeiro fator a ser avaliado durante a escolha da tecnologia de cogeração a ser empregada e, em seguida, a eficiência dos sistemas de cogeração, as quais devem ser compatíveis com o sistema de cogeração e aos custos de implantação, manutenção e depreciação do sistema.

Sendo assim, a aplicação das tecnologias de cogeração poderia ser realizada para uma fazenda de capacidade produtiva a partir de 187,5 ton.ano⁻¹, que por meio da casca gerada pode apresentar uma potência de 0,143 MW.

Tabela 1.6 - Potência capaz de ser gerada por meio de sistemas básicos de cogeração disponíveis no mercado por meio de unidade centralizada (UC) e unidades descentralizadas (UD)

Tecnologias	Potência* (MW)	Eficiência* (%)	Potência disponível (MW/ton de amêndoas processada)	
			UD	UC
Turbina a vapor	Qualquer	30 – 42	0,051	37,6
Motor a gás	0,05 – 5	25 – 45	0,05	36,6
Turbina a gás	3 – 200	25– 40	0,046	34,0
Microturbina	0,025 - 0,25	20 – 30	0,036	26,1

* Corrêa Neto (2001).

Portanto, as tecnologias que se adequaram para as situações estudada, referente a unidades descentralizadas e uma unidade centralizada, foram as de turbina a vapor, motor a gás e microturbinas para as unidades descentralizadas (UD) e as de turbina a vapor e turbina a gás para a unidade centralizada, pois apresentaram valores dentro do intervalo de potência recomendado pela literatura consultada (Tabela 1.4).

Portanto, com base nos dados, apresentados na Tabela 1.4, de potências recomendadas e eficiências das principais tecnologias geralmente empregadas na cogeração de energia, determinou-se a potência disponível, que pode ser gerada da casca de cacau, obtida durante o processamento de amêndoas secas, em unidades descentralizadas (UD) e em unidades centralizadas (UC), considerando a produção de cacau na Bahia.

4. CONCLUSÕES

Com base nas estimativas apresentadas para gerar energia a partir da casca do cacau, foi possível confirmar o potencial dessa casca para a cogeração de energia; ou seja, com esse resíduo foi possível suprir parte da demanda energética de uma unidade produtora de amêndoas de cacau, durante a secagem dessas, e, ainda, gerar eletricidade a partir da energia excedente, por meio de turbina a vapor ou microturbinas em unidades descentralizadas. Todavia, para o aproveitamento da casca de cacau como

combustível, precisam-se realizar estudos adicionais e detalhados para determinar a viabilidade técnica e econômica da geração de energia elétrica, em duas situações: a partir de toda produção de cacau da região; e da geração de forma descentralizada, em regiões específicas, por meio da criação de cooperativas.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZAÇÃO DA CASCA DO CACAU PROVENIENTE DA AGROINDÚSTRIA VISANDO SUA UTILIZAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL EM SISTEMAS GERADORES DE AR QUENTE

1. INTRODUÇÃO

O aumento mundial da demanda de energia acarretou o aumento da dependência dos combustíveis fósseis, ocasionando uma urgente busca por uma solução sustentável. Nesse contexto, a biomassa tem sido uma alternativa cogitada. O uso da biomassa proporciona menor emissão dos gases de efeito estufa quando comparado aos combustíveis fósseis, vantagem esta que desperta o interesse na disseminação dessa fonte energética, uma vez que a preocupação ambiental é um dos pilares da sustentabilidade tão almejada a nível mundial (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2010).

A biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Os resíduos agrícolas são fontes de biomassa produzidas no campo, resultantes das atividades da colheita e beneficiamento da produção agrícola. O Brasil é um grande produtor agrícola, e nos últimos anos a área plantada e a produção agrícola tiveram um crescimento importante (LORA; HAPP, 1997).

Os diversos resíduos das atividades agrícolas, agropecuárias, agroindustriais e urbanas, tais como cascas e outros resíduos lignocelulósicos, podem ser utilizados como combustíveis. O potencial disponível nestes resíduos nem sempre é bem conhecido, porém corresponde a volumes significativos de energia subaproveitada. Atualmente, o Brasil não aproveita mais de 200 milhões de toneladas de resíduos agroindustriais. Parte dos resíduos não aproveitados energeticamente é geralmente utilizado em outras aplicações como alimentação animal e adubação (LORA; ANDRADE, 2009).

Há pouco mais de 100 anos a energia da biomassa começou a perder sua liderança histórica para a energia do carvão mineral e, como consequência do crescimento contínuo do petróleo e do gás natural, a sua utilização reduziu-

se praticamente às residências populares em regiões agrícolas (CORTEZ et al., 2009).

No entanto, a exemplo da cana de açúcar que utiliza o bagaço como fonte de energia, o Brasil é um grande produtor de amêndoas de cacau, que apresenta em sua cadeia produtiva, resíduos que, assim como os resíduos da cana, apresentam potencial energético.

Nas propriedades agrícolas e agroindústrias processadoras de cacau e derivados, a casca dos frutos frescos é o principal resíduo, sendo esse gerado após a quebra e separação das sementes. Esse resíduo representa 80% do fruto do cacau e como potencialidades de aproveitamento da casca do fruto, destacam-se o uso na alimentação animal (ABIOLA; TEWE, 1991; DONKOH et al., 1991; AREGHEORE, 2002), extração de pectinas (BERBERT, 1972; VRIESMANN et al., 2011), gomas (FIGUEIRA et al., 1993), produção de fertilizantes orgânicos por compostagem (CHEPOTE et al., 1990; SODRÉ et al., 2012) e como fonte de energia renovável (AGYEMAN; OLDHAM, 1986; SYAMSIRO et al., 2011).

A biodigestão da casca fresca do cacau apresenta baixa conversão conforme resultados encontrados em CEPLAC (2012). Para este caso, os processos termoquímicos (combustão e a gaseificação) são mais indicados como foi relatado por SYAMSIRO et al. (2011), com isso precisam ser investigados para avaliar o comportamento dessa biomassa nos processos termoquímicos usuais.

Além dos processos termoquímicos precisa-se investigar a biomassa que se pretende utilizar por meio da caracterização. Sendo assim é de suma importância avaliar as características da biomassa para direcionar a melhor tecnologia de conversão e sua utilização como combustível.

A caracterização da biomassa é realizada por meio da obtenção das Propriedades Físicas (granulometria e massa específica), na Análise Imediata (teor de água, voláteis, cinzas e carbono fixo), Análise Elementar (elementos químicos presentes na biomassa, teor de lignina, celulose e hemicelulose) e Poder Calorífico.

Dentre as características dos combustíveis a mais importante é o poder calorífico. Sendo o mesmo definido como a quantidade de energia desprendida na combustão completa de uma unidade em peso (ou em volume) de

determinado combustível. Quanto maior for o poder calorífico maior é a energia do combustível. O poder calorífico é classificado em poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico superior (PCS). A diferença entre os dois está no fato de no PCI não computar a energia devido à condensação da água formada, o que é considerado no PCS. A diferença em valor entre os dois é a quantidade de calor necessária para evaporar a água contida nos gases de exaustão. Tanto o PCS quanto o PCI são obtidos através de calorimetria (PERES et al., 2008).

O poder calorífico depende do teor de umidade, material volátil e quantidade de carbono fixo presentes na biomassa, sendo o parâmetro de maior influência no poder calorífico dos combustíveis é o teor de umidade (HAM, 2005; BASU, 2006).

Denominam-se, cinzas, os resíduos inorgânicos remanescentes da queima da matéria orgânica, sem resíduo de carvão. É importante observar que a composição das cinzas corresponde à quantidade de substâncias minerais presentes nos combustíveis, devido às perdas por volatilização ou mesmo pela reação entre os componentes. As cinzas são consideradas como medida geral de qualidade e frequentemente são utilizadas como critério para definir a potencialidade de um combustível para uma determinada aplicação. O método para obtenção do teor de cinzas fundamenta-se na perda de peso que ocorre quando o material é incinerado, com destruição da matéria orgânica, sem apreciável decomposição dos constituintes do resíduo mineral ou perda por volatilização. A cinza é constituída principalmente de grandes quantidades de K, Na, Ca e Mg; pequenas quantidades de Al, Fe, Cu, Mn e Zn, entre outros (CHAVES et al., 2004).

Para determinar a potencialidade de um combustível e avaliar a sua melhor aplicação, devem-se primeiramente conhecer as suas características fundamentais, ou seja, a composição elementar, composição imediata e o poder calorífico. Segundo Jenkins et al. (1990) a composição elementar de amostras é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N) e material residual (cinzas).

Segundo Reed e Das (1988), na maioria das biomassas, as cinzas são compostas por sais. Quando em grande quantidade, acima de 5%, as cinzas

podem causar sérios prejuízos aos equipamentos em processos de transformação termoquímica da biomassa.

As Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam alguns resultados de um levantamento realizado por Jenkins et al. (1990) referente à composição elementar e poder calorífico de diferentes biomassas, onde carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N) e material residual (cinzas).

Tabela 2.7 - Composição elementar de alguns tipos de biomassa

Tipos de biomassa	Composição elementar (%)					
	C	H	O	N	S	cinzas
Pinus	49,25	5,99	44,36	0,06	0,03	0,30
Eucalipto	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	0,72
Casca de arroz	40,96	4,30	35,86	0,40	0,02	18,34
Bagaço de cana	44,80	5,35	39,55	0,38	0,01	9,79
Casca de coco	48,23	5,23	33,19	2,98	0,12	10,25
Sabugo de milho	46,58	5,87	45,46	0,47	0,01	1,40
Ramas de algodão	47,05	5,35	40,77	0,65	0,21	5,89

Fonte: Jenkins et al. (1990)

Os combustíveis utilizados como fonte de energia para secagem compreendem dois grupos: os fósseis e os provenientes da biomassa. Os combustíveis do primeiro grupo são não-renováveis e seus preços estão sujeitos às oscilações do mercado internacional. Já os combustíveis do segundo são provenientes de fontes renováveis de energia, as quais podem geralmente ser encontradas no próprio local de produção, sendo que o seu preço sofre menos influências externas. Esta fonte, se racionalmente explorada, pode garantir, por muitos anos, o suprimento de energia para a secagem de produtos agrícolas (HAM, 2005; BASU, 2006).

A lenha é a principal biomassa utilizada pela população mundial, devido ao seu baixo custo, facilidade de armazenagem, baixo teor de cinzas e enxofre. A sua composição elementar apresenta os seguintes valores médios: carbono (47,5%), hidrogênio (6%), oxigênio (44%), nitrogênio (1%) e cinzas

(1,5%) (VLASSOV, 2001) e a análise imediata, a seguinte composição: materiais voláteis (70 a 75%), carbono fixo (20 a 27%) e cinzas (0,5 a 2%) (FIGUEIREDO et al., 2012).

Tabela 2.8 - Poder calorífico superior de algumas biomassas

Tipos de biomassa	Poder Calorífico Superior (PCS)
	(MJ kg ⁻¹)
Pinus	20,02
Eucalipto	19,42
Casca de arroz	16,14
Bagaço de cana	17,33
Casca de coco	19,04
Sabugo de milho	18,77
Ramas de algodão	18,26

Fonte: Jenkins et al. (1990).

A Tabela 2.3 apresenta alguns resultados da composição química e mineral da casca de cacau realizado por Vriesmann et al. (2011).

Dessa forma, objetiva-se caracterizar o resíduo, casca do fruto de cacau, com vistas ao seu uso para fins energéticos. Para tanto, determinou-se propriedades físicas, teor de água, voláteis, cinzas, carbono fixo, elementos minerais e poder calorífico das biomassas a fim de, posteriormente, direcionar a melhor tecnologia de conversão.

Tabela 2.9 - Composição química e mineral da casca de cacau

Componentes	%
Teor de água	8,5
Cinzas	6,7
Proteína	8,6
Lipídios	1,5
Carboidrato total	32,3
Carboidrato de baixa massa molar	19,2
Lignina	21,4
Fibras insolúveis	27
Fibras solúveis	9,6
Fibra total	36,6
Minerais	%
Ca	0,254
K	2,768
Mg	0,1109
Fe	0,0058
Na	0,0105

Fonte: Vriesmann et al. (2011).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Obtenção das amostras

Foram obtidas três amostras com aproximadamente 5 kg de casca de cacau fresca. As amostras foram coletadas na região produtora de cacau da Bahia, sendo que, duas das amostras foram coletadas na fazenda Riachuelo (Rod. Ilhéus-Uruçuca), durante a etapa de quebra dos frutos em março/2010 e uma na CEPLAC (Rod. Itabuna-Ilhéus) no mesmo mês. Imediatamente após a coleta das amostras realizaram-se análises do teor de água com auxílio de uma balança determinadora de teor de água por infravermelho e, em seguida, foram embaladas a vácuo e enviadas para o Departamento de Engenharia

Agrícola da UFV para realizar as análises físicas, imediatas e elementares da biomassa. O mesmo procedimento foi realizado nos meses de abril e maio.

O beneficiamento das amostras (corte, secagem e moagem) foi realizado na área de armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, Viçosa, MG. Inicialmente realizou-se o corte das cascas para reduzir o tamanho e, em seguida, foi realizada a secagem das cascas ao sol durante duas semanas aproximadamente. Após a secagem, determinou-se a massa específica aparente da biomassa (ρ_{ap}).

Em seguida, as amostras foram trituradas e peneiradas em um conjunto de peneiras, coletando apenas as partículas que passaram pela peneira de malha 60 (250 μm) e depois foram embaladas e destinadas para os laboratórios, onde foram realizadas as análises de poder calorífico, composição elementar e de análise imediata.

2.2. Análises físicas do combustível

O teor de água dos combustíveis, após secagem, foi determinado utilizando-se uma estufa com ventilação forçada a $103\pm 2^\circ\text{C}$ até atingir peso constante. Foram coletadas pequenas porções de amostras, aproximadamente 500 g e, em seguida, foram separadas três amostras de 50 gramas. As análises foram realizadas de acordo com padronização da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pela norma NBR 8112/86 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1986).

A massa específica aparente da biomassa (ρ_{ap}) representa a quantidade de biomassa que ocupa uma unidade de volume, sendo esta determinada por meio de uma balança com um cilindro de capacidade de 1,399 L e massa de 201,98 g. Esse recipiente foi preenchido apenas com a biomassa, em três repetições, sendo os resultados expressos em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

As análises para determinação do poder calorífico superior (PCS) da casca do cacau foram realizadas no Laboratório de Energia da Madeira, no Departamento de Engenharia Florestal da UFV, segundo as normas da American Society for Testing and Materials – ASTM (1977) D-2015-66, por meio de uma bomba calorimétrica, a qual quantificou o calor liberado pela biomassa. Cerca de 0,5 g desse material seco e moído foi colocada em um

cilindro e, em seguida, o cilindro com a amostra foi colocado na bomba calorimétrica. Inicialmente o conjunto (cilindro-amostra), recebeu de forma gradual 25 atm de oxigênio na bomba calorimétrica e, após esse procedimento a bomba foi acoplada ao calorímetro. No calorímetro esperou-se a temperatura estabilizar e, em seguida, deu-se a ignição, aguardou-se 3 minutos e removeu-se a bomba calorimétrica do calorímetro. O poder calorífico superior foi calculado de acordo com a Equação 2.1.

$$PCS = \frac{C \cdot \Delta t - (C_1 + C_2)}{m} \quad (2.1)$$

em que:

C = Constante de valor = 2577,98;

Δt = Variação de temperatura fornecida pelo calorímetro;

$-(C_1 + C_2)$ = (- 22 para material não-carbonáceo e - 23 para materiais carbonáceos);

m = Massa da amostra.

A determinação do poder calorífico inferior (PCI) da casca de cacau foi determinada a partir da Equação 2.2 conforme Zanatta (2011), subtraindo-se do PCS (obtido analiticamente) a entalpia de vaporização da água devido ao vapor d'água formado na reação do hidrogênio com o oxigênio.

$$PCI = PCS - h_v (9.H_2) \quad (2.2)$$

em que:

PCS = Poder Calorífico Superior, [kJ.kg⁻¹];

PCI = poder calorífico inferior, [kJ.kg⁻¹combustível seco];

h_v = entalpia de vaporização da água, [kJ.kg⁻¹] na temperatura de referência de 25°C, equivalente a 2.440 kJ.kg⁻¹; e

9.H₂ = parcela de vapor d'água formado pela combustão do hidrogênio.

Para calcular o PC_{lu} (Poder Calor Inferior do combustível, considerando o teor de água) utilizou-se a Equação 2.3 de Mendeliev conforme Cortez et al. (2009).

$$PC_{lu} = 339 C + 1030 H - 109 (O - S) - 24 W \quad (2.3)$$

em que:

PC_{lu} = Poder calorífico inferior, em MJ.kg⁻¹, base úmida;

C = Quantidade de Carbono na biomassa, em base úmida;

H = Quantidade de Hidrogênio na biomassa, em base úmida;

O = Quantidade de Oxigênio na biomassa, em base úmida;

S = Quantidade de Enxofre na biomassa, em base úmida;

W = Teor de água da biomassa.

A partir do PC_{lu} e dos teores de água que a casca de cacau pode assumir durante o seu processo de beneficiamento obteve-se um gráfico apresentando a relação entre o poder calorífico inferior e teor de água que a casca de cacau pode assumir.

2.3. Análise química imediata

A análise química imediata das biomassas citadas foi realizada de acordo com padronização da Associação Brasileira de Normas Técnicas, pela norma NBR 8112/86: teor de cinzas (CZ), teor de sólidos voláteis (SV) e carbono fixo (CF) (ABNT, 1986).

2.4. Teor de cinzas

O teor de cinzas é uma medida aproximada da quantidade de minerais e outros materiais inorgânicos, restante após a oxidação, do material a ser analisado.

As amostras, com aproximadamente 1 grama, foram previamente secas em estufa a 103±2°C, até peso constante. Em seguida, foram levadas à mufla 650±10°C por seis horas. Após este procedimento as amostras foram

retiradas da mufla, resfriadas em dessecador até atingir temperatura ambiente, e por diferença de peso foi determinado o teor de cinzas.

2.5. Sólidos voláteis

O percentual de material volátil determina a quantidade de produtos gasosos, sem presença de umidade, que é liberado da amostra analisada sob condições específicas. As amostras, com aproximadamente 1 grama, foram previamente secas em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, até peso constante. Em seguida foram levadas à mufla $950\pm 10^{\circ}\text{C}$ por nove minutos. Após este procedimento as amostras foram retiradas da mufla, resfriadas em dessecador até atingir temperatura ambiente, e por diferença de peso é determinado o teor de sólidos voláteis.

2.6. Carbono fixo

Carbono fixo é um valor calculado, que representa a quantidade de carbono quimicamente ligado a outro carbono. Este é resultante do somatório dos percentuais de umidade, cinzas e material volátil, subtraído de 100 de acordo com a norma ABNT/NBR 8112/86.

2.7. Composição elementar

Para determinação da composição elementar (Carbono-C, Hidrogênio-H e Oxigênio-O) foi utilizada a metodologia proposta por Parikh et al. (2007), onde utilizaram as seguintes equações algébricas (2.4, 2.5 e 2.6) levando em consideração os teores carbono fixo (CF) e materiais voláteis (SV), determinados de acordo com a norma ABNT/NBR 8112/86.

$$C = 0,637 CF + 0,455 SV (\%) \quad (2.4)$$

$$H = 0,052 CF + 0,062 SV (\%) \quad (2.5)$$

$$O = 0,304 CF + 0,476 SV (\%) \quad (2.6)$$

As equações 2.4, 2.5 e 2.6 são válidas para materiais sólidos lignocelulósicos com valores de carbono fixo na faixa entre 4,7 a 38,4%, teor de sólidos voláteis entre 57,2 a 90,6% e teor de cinzas entre 0,12 a 77,7%, em base seca. O erro médio absoluto destas correlações é 3,21%, 4,79% e 3,40% para os valores medidos de C, H e O respectivamente (PARIKH et al., 2007).

O carbono orgânico total foi determinado via oxidação úmida (YEOMANS; BREMMER, 1988) e a quantificação de nitrogênio total foi realizada após digestão sulfúrica e destilação Kjeldahl (TEDESCO et al., 1995). As concentrações de potássio e fósforo foram determinadas por espectrofotômetro de absorção atômica e espectrofotometria na região do visível, respectivamente e; cálcio e magnésio por titulação em EDTA conforme normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz – IAL (2004).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2.4 são apresentadas as propriedades físicas, os resultados da análise imediata, os elementos minerais e a composição elementar da casca de cacau. Os valores obtidos estão dentro das faixas encontradas na bibliografia consultada para outros resíduos agroindustriais.

Na caracterização da casca de cacau (Tabela 2.4), houve diferenças quanto aos resultados ao comparar com a literatura consultada, principalmente da análise imediata, os quais podem variar com o local onde foi plantado, com o tipo de solo ou com adubação empregada. Portanto, por esses motivos, a faixa de valores encontrados aqui podem ser considerados próximos aos apresentados por Vriesmann et al. (2011).

O teor de Carbono Fixo presente na casca de cacau apresentou, em média, 23,34%, enquanto que outros resíduos agroindustriais como a casca de arroz, resíduos de soja, sabugo de milho assumem valores menores, ou seja, a casca de cacau nas condições avaliadas e ao compará-la aos demais resíduos da agroindústria, por apresentar maior percentual, queimará mais lentamente.

Tabela 2.10 - Valores médios apresentados, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) da caracterização físico-química das amostras de casca de cacau coletadas durante os meses de março a maio

Caracterização da biomassa		Média	DP	CV
Propriedades físicas	Ui – Umidade inicial (%)	84,2	0,137	± 0,45
	Uf – Umidade final (%)	12,01	0,56	± 1,48
	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	221,37	6,78	± 30,72
	Poder calorífico superior (MJ.kg ⁻¹)	17,33	0,13	± 0,43
	Poder calorífico inferior (MJ.kg ⁻¹)	16,04	-	-
	PClu (MJ.kg ⁻¹)	13,94	-	-
Análise imediata (b.s)	Cinzas (%)	12,63	0,24	± 0,79
	Material volátil (%)	64,03	0,28	± 0,92
	Carbono fixo (%)	23,34	-	-
Elementos minerais (b.s)	K (%)	1,16	0,12	± 0,397
	Mg (%)	0,305	0,23	± 0,76
	Ca (%)	0,267	0,25	± 0,827
	P (%)	0,16	0,13	± 0,43
Composição elementar (b.s)	*Carbono (%)	44,0	-	-
	*Hidrogênio (%)	5,18	-	-
	*Oxigênio (%)	37,57	-	-
	**Carbono Total (%)	36,75	0,18	± 0,59
	**Nitrogênio Orgânico (%)	0,98	0,051	± 0,167

* dados obtidos por equações conforme Parikh et al. (2007).

** dados obtidos analiticamente.

As composições químicas imediatas da biomassa estudada apresentaram valores similares à literatura quanto ao teor de carbono total, nitrogênio orgânico, carbono fixo e material volátil (Tabela 2.4). Porém houve uma diferença mais considerável entre os teores de cinzas das biomassas praticamente o dobro do valor encontrado por Vriesmann et al. (2011) e próximo do teor de cinzas de outras biomassa provenientes de resíduos agrícolas como bagaço de cana e casca de coco que apresentam, respectivamente, 9,79%, e 10,25% (JENKINS et al., 1990). Já a casca de arroz assumiu teor de cinza superior ao da casca de cacau, segundo Jenkins (1990) a casca de arroz apresenta 18,34% de cinzas. Segundo Reed e Das (1988) teores de cinzas acima de 5%, as biomassa podem causar problemas durante os processos de transformação termoquímica. Portanto, para realizar a transformação da casca de cacau em processos termoquímicos serão

necessárias modificações nos projetos dos equipamentos para minimizar o efeito dos minerais presentes na composição dessa biomassa. Já o teor de água ficou dentro do limite estabelecido por Brammer e Bridgwater (2002), inferior a 30%, para que o processo de gaseificação opere de forma adequada.

O poder calorífico superior (PCS) foi condizente com valores citados na literatura (15 MJ.kg^{-1}), geralmente atribuído para os resíduos agrícolas (LORA; ANDRADE, 2009). O poder calorífico superior da casca de cacau, $17,33 \text{ MJ.kg}^{-1}$, foi similar ao poder calorífico superior do bagaço da cana de açúcar, superior ao da casca de arroz, $16,14 \text{ MJ.kg}^{-1}$, e inferior ao da casca de coco, $19,04 \text{ MJ.kg}^{-1}$, e sabugo de milho, $18,77 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

A partir dos dados da análise imediata, foram obtidos os valores referentes à composição elementar e poder calorífico dos resíduos, apresentados na Tabela 2.4. Observou-se uma composição elementar similar a outras biomassas provenientes de resíduos agroindustriais (JENKINS et al., 1990).

A concentração de K foi superior aos demais nutrientes, seguido pelo Mg e Ca, sendo o P a menor fração. Conforme os teores de cinzas e minerais apresentados na Tabela 2.4, a concentração dos minerais K, Mg, Ca e P assumiram 9,2%, 2,4%, 2,1% e 1,3% respectivamente do teor de cinzas. Segundo Vriesmann et al. (2011), a casca de cacau apresenta para um teor de cinzas de 6,7%, as frações de 2,76% e 0,254% de potássio e cálcio, respectivamente. Por apresentarem uma composição mineral e orgânica interessante, a utilização da casca de cacau como fonte de energia em processos termoquímicos é questionada, isso porque a concentração de potássio presentes neste resíduo e outros minerais como Mg e Ca, podem ser agregados ao solo quando aproveitado para este fim (CHEPOTE et al., 1990; SODRÉ et al., 2012). Porém, sabe-se que o potássio, magnésio, cálcio entre outros estarão presentes nas cinzas produzidas durante os processos termoquímicos como resíduo, o que possibilitará seu aproveitamento agrícola e facilitará a incorporação desses minerais no solo como adubo.

Por meio dos valores encontrados de teor de água da casca fresca, 84,2% (b.u) e da casca após secagem, 12,01% (b.u) obteve-se a relação entre o poder calorífico inferior e teor de água da casca de cacau, Figura 2.1, por meio da Equação 2.3 de Mendeliev.

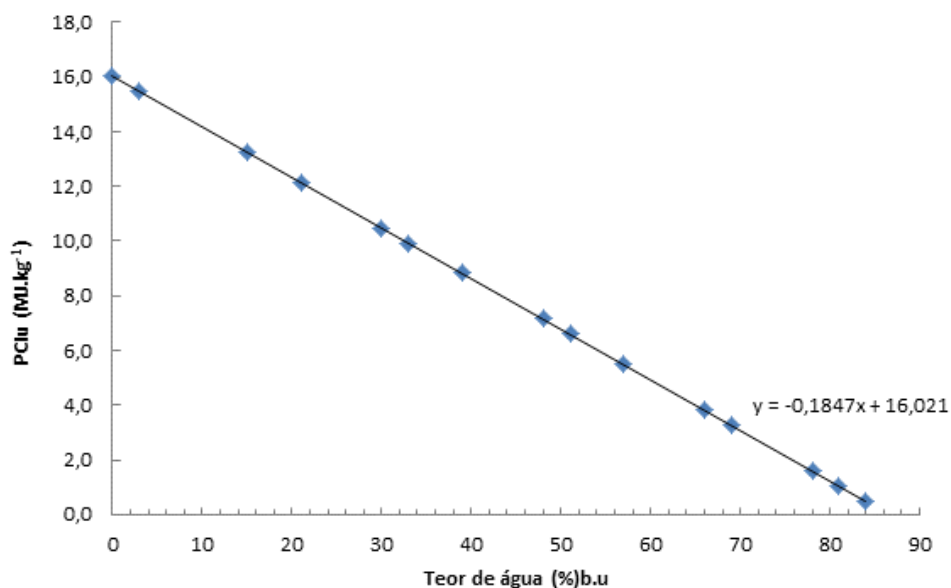


Figura 2.6 - Relação entre poder calorífico inferior e teor de água para a casca de cacau.

Por meio da equação obtida a partir do gráfico, Figura 2.1, determinou-se o PCIu apresentado na Tabela 2.4. A relação apresentada também serve para estimar os potenciais caloríficos para qualquer teor de água que a casca de cacau apresente durante o seu beneficiamento.

4. CONCLUSÕES

A biomassa apresentou condições para ser transformada em combustível, em razão de os resultados da caracterização terem sido equivalentes aos de outros resíduos que já vêm sendo transformados em combustível sólidos, líquidos ou gasosos. Porém, intervenções precisam ser feitas para evitar problemas nos equipamentos que vão compor o sistema de transformação da biomassa, pois o teor elevado de cinzas apresentado pela casca do cacau pode reduzir a vida útil das partes do sistema de transformações termoquímicas a ser empregado para essa biomassa. Com o resíduo (cinzas) gerado dos processos termoquímicos, como a combustão e gaseificação, outro potencial foi identificado, pois nas cinzas identificou-se

importante concentração de minerais, possibilitando a sua utilização como fonte de minerais para o solo.

Além do inconveniente do elevado teor de cinzas, a casca de cacau também evidenciou elevado teor de água, o que pode comprometer e inviabilizar o seu aproveitamento por vias termoquímicas, sendo mais indicado para esses casos os pré-processamentos como secagem, briquetagem ou utilização de vias bioquímicas como a biodigestão para produção de biogás e a hidrólise da celulose, seguida da fermentação para a produção de bioetanol.

CAPÍTULO 3

OBTENÇÃO E APLICAÇÃO DA CASCA DE CACAU EM *CHIP* COMO COMBUSTÍVEL EM SISTEMA GASEIFICADOR/COMBUSTOR/SECADOR

1. INTRODUÇÃO

A gaseificação consiste na conversão termoquímica de materiais carbonáceos em combustível gasoso rico em CO e H₂, por meio da oxidação parcial, em reatores, sob elevada temperatura (HIGMAN; VAN DER BURGT, 2008). A gaseificação de biomassas vem atraindo a atenção mundial em virtude das variadas utilidades e benefícios. Os resíduos, que atualmente são um problema mundial, principalmente em países industrializados, podem ser aproveitados de forma sustentável através da gaseificação (CZERNIK; FRENCH, 2006). O processo de gaseificação geralmente acontece na faixa de temperatura entre 800 e 1800°C, sendo esta temperatura influenciada pelas características do combustível utilizado. As principais reações químicas decorrentes do processo de gaseificação são as que envolvem carbono, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, metano e água (HIGMAN; VAN DER BURGT, 2008).

Na produção de calor várias pesquisas vêm sendo desenvolvidos, principalmente na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG: Silva et al. (2000), Santos (2003), Martin et al. (2005), Magalhães (2007), Zanata (2008 e 2011) e Rezende (2012), os quais utilizaram gaseificadores de fluxo concorrente ou contracorrente utilizando diferentes biomassas como combustível, acoplados a um combustor de gás, com o objetivo de produzir ar quente para a secagem de grãos e para outros fins como aquecimento de aviários.

Diversos tipos de biomassa podem ser utilizados no processo de gaseificação: a lenha, o carvão vegetal, os resíduos florestais, os resíduos agrícolas, o bagaço de cana, a casca de arroz. O teor de água das biomassas é uma variável importante para o processo de gaseificação. Segundo Mendes et al. (1998), em gaseificadores de fluxo concorrente, só é possível produzir

gás de materiais com até 30% de teor de água, pois o excesso de água prejudica a qualidade do gás, por tornar a zona de combustão instável.

O processo de gaseificação produz uma mistura gasosa especial, conhecida como gás de síntese ou syngas. Quando o comburente é o ar atmosférico, o gás produzido é de baixo poder calorífico, aproximadamente $5\text{MJ}/\text{Nm}^3$, devido à presença de nitrogênio na mistura gasosa de saída do reator (base seca), de aproximadamente 50% do volume. Quando a gaseificação é realizada na presença de oxigênio puro ou ar com vapor de água, o gás obtido tem maior poder calorífico, aproximadamente 10 a 15 MJ/Nm^3 , e baixo teor de nitrogênio livre na mistura (LORA; ANDRADE et al., 2009).

Com base nos trabalhos mencionados, a gaseificação da biomassa apresenta-se como boa alternativa econômica e ambiental na produção de energia para ser utilizada em diversos setores industriais e agrícolas, principalmente quando se trata da transformação de um resíduo agroindustrial como a casca de cacau, que, além disso, apresenta-se como alternativa para suprir a demanda energética na própria fazenda, onde esse resíduo é gerado.

Desta forma, neste trabalho o objetivo foi desenvolver um processo de beneficiamento da casca de cacau para ser utilizada como combustível sólido em um sistema gaseificador/combustor concorrente para aquecimento de ar em secadores de cacau.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Processamento para obtenção das cascas secas

O processo de obtenção da casca de cacau seca ou em *chips* foi realizado na Fazenda Riachuelo, situada no km 20 da rodovia Ilhéus-Uruçuca.

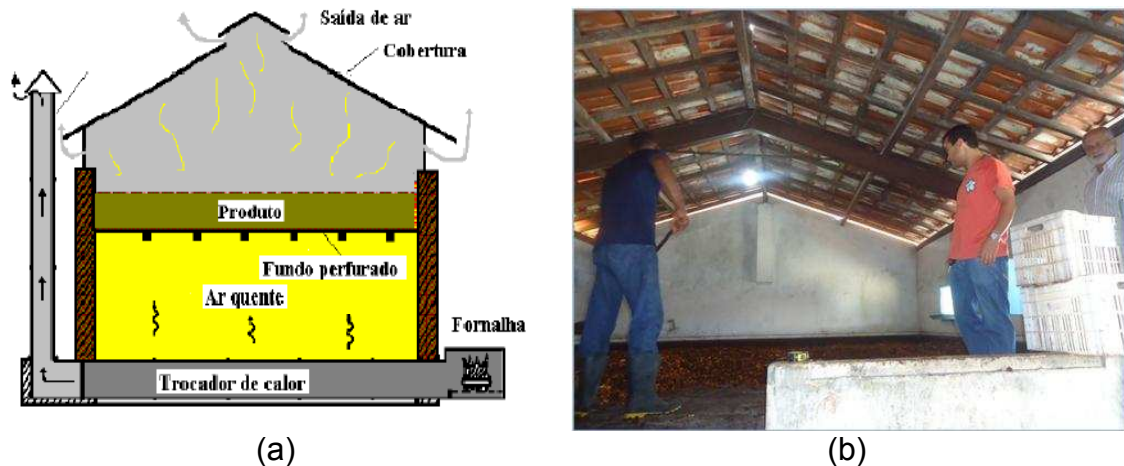
Os frutos colhidos foram transportados da lavoura para um galpão, onde foram quebrados com auxílio de uma faca apropriada para o corte da casca do fruto, denominado de “cutelo” (facão curto e cego) e, em seguida obtiveram-se duas frações dos frutos: cascas e sementes, as quais foram separadas e dispostas em recipientes diferentes (Figura 3.1). As sementes foram conduzidas para o processo de obtenção das amêndoas e as cascas

foram reduzidas de tamanho com auxílio de um triturador de capim de 1,5 cv de potência, o qual foi adaptado para reduzir casca de cacau a partículas de dimensões entre 2 e 8 cm. Depois de triturada as cascas foram coletadas por meio de uma caçamba de caminhão, colocada sob o sistema triturador (Figura 3.1).



Figura 3.7 - Fluxograma do processo de obtenção da casca de cacau seca para ser utilizada como combustível sólido.

As cascas trituradas foram transportadas até a área de secagem da fazenda, onde assim como a lenha, as cascas foram pesadas em balança digital comercial com capacidade de 300 kg. Após pesagem, a massa de cascas foi disposta sobre a plataforma metálica e perfurada do secador tubular (Figura 3.2) com auxílio de caixas plásticas e espalhadas com auxílio de um rodo de madeira.



Fonte: Silva et al. (2008).

Figura 3.8 - Secador tubular utilizado na secagem da casca de cacau triturada (a) desenho ilustrativo do secador tubular e (b) foto da parte superior do secador utilizado.

O secador utilizado foi um secador tubular com convecção natural e o combustível utilizado foi a lenha, obtida de resíduos florestais. Toda lenha adicionada na fornalha foi pesada para determinar o gasto energético ao final do processo.

A alimentação do secador foi realizada com 3.000 kg de casca com teor de água de 84,5% (b.u). A espessura da camada de secagem no secador foi de 13 cm, as dimensões do lastro foram 5,6 m x 5,5 m (comprimento x largura), referente a uma área de 30,8 m².

A massa de casca foi revolvida uma vez por dia durante o processo de secagem com auxílio de um rodo de madeira para garantir a remoção mais uniforme da água presente no material.

O tempo de secagem foi determinado quando a massa de casca atingiu o teor de água médio de 7,4% (b.u), que foi determinado a partir de 5

amostras da massa de casca, coletadas em pontos diferentes do lastro do secador. Em seguida, determinou-se a massa de casca seca produzida pesando toda a massa com o auxílio de uma balança digital comercial com capacidade de 300 kg.

O produto final (casca de cacau em *chip*) obtido por meio da secagem foi separado em granulometrias diferentes com auxílio de uma peneira com poros de diâmetro de 2 cm. Após a separação obtiveram-se biomassa de ± 5 cm de comprimento e ± 4 cm de largura e biomassa de ± 2 cm de comprimento e ± 1 cm de largura, Figura 3.1. Para um melhor controle experimental o tamanho de partícula utilizado na gaseificação foi a maior, pois apresentou dimensões mais uniformes e similares às dimensões do *chip* de eucalipto, que foi obtido com outro sistema de redução de tamanho.

2.2. Eficiência do sistema de secagem

A eficiência do sistema de secagem utilizado na secagem da casca de cacau foi determinada utilizando Equação 3.1

$$\eta = \frac{DEP}{E_r} \cdot 100 \quad (3.1)$$

em que:

η – eficiência do secador tubular utilizado na secagem da casca de cacau (%);

DEP – demanda de energia para a secagem da casca de cacau (kJ);

E_r – energia requerida para secagem da casca de cacau (kJ).

A demanda de energia do processo (DEP) foi determinada utilizando a Equação 3.2 que levou em consideração as trocas de calor sensível e latente que ocorreram durante o processo de aquecimento e evaporação da água presente na casca do cacau.

$$DEP = Q_s + Q_L = ma_s \cdot c_p \cdot \Delta\theta + ma_s \cdot h_{ev} \quad (3.2)$$

em que:

Q_s – calor sensível (kJ);

Q_L - calor latente (kJ);

ma_s – massa de água removida da casca durante a secagem (kg);

c_p – calor específico da água ($\text{kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$);

$\Delta\theta$ – variação de temperatura durante o aquecimento da água (K);

h_v – entalpia de vaporização da água na temperatura de secagem (kJ.kg^{-1}).

A energia requerida para a secagem da casca (E_r) foi determinada utilizando a Equação 3.3.

$$E_r = PCI_L \cdot M_{cb} \quad (3.3)$$

em que:

PCI_L – poder calorífico inferior da lenha (kJ.kg^{-1});

M_{cb} - massa de lenha consumida durante a secagem da casca (kg).

2.3. Sistema gaseificador/combustor/secador

A gaseificação foi realizada utilizando os seguintes tratamentos: T1 - gaseificação utilizando casca de cacau como combustível (22 kg de casca de cacau com tamanho de partícula médio de ± 5 cm de comprimento e ± 4 cm de largura, teor de água de 13,3 %(b.u) e de massa específica de $221,37 \text{ kg.m}^{-3}$) e T2 - gaseificação utilizando *chip* de eucalipto como combustível (17,5 kg de eucalipto em *chip* com tamanho de partícula médio de ± 4 cm de comprimento e ± 2 cm de largura, teor de água de 12,1 %(b.u) e massa específica de $215,7 \text{ kg m}^{-3}$). O esquema do reator de gaseificação utilizado no experimento foi apresentado na Figura 3.3, a qual mostra em detalhe as suas principais dimensões e nas Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente, o esquema experimental do sistema gaseificador/combustor/secador e o fluxograma experimental dos procedimentos de coletados dos dados de temperatura (T_{ar}) e de umidade relativa (UR_{ar}) do ar ambiente; temperatura na câmara de combustão do gás

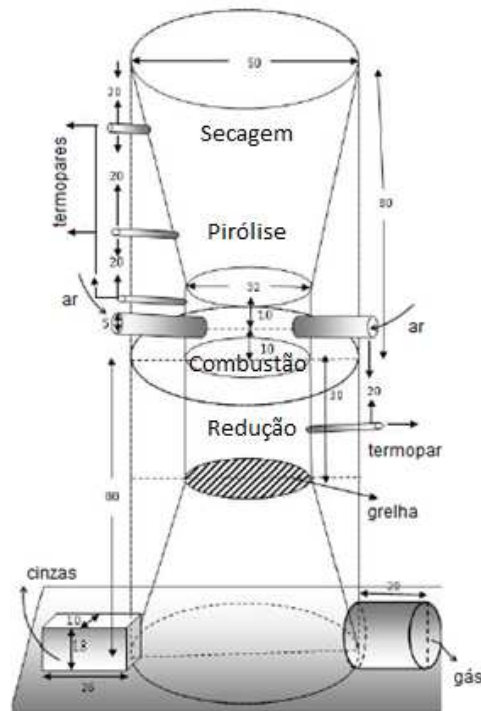
(TCgás); temperatura na zona de combustão do reator (TZcomb); temperatura do ar na exaustão do combustor (Texaustão); temperatura do ar de secagem (Tsecador) e; a composição do ar de secagem.

Para cada tratamento (T1 e T2) realizaram-se dois testes (I e II) e, por meio destes, obtiveram-se os seguintes dados: temperatura (Tar) e de umidade relativa (URar) do ar ambiente; temperatura na câmara de combustão do gás (TCgás); temperatura na zona de combustão do reator (TZcomb); temperatura do ar na exaustão do combustor (Texaustão); temperatura do ar de secagem (Tsecador).

Para obter esses dados, inicialmente realizou-se a ignição no reator com carvão e, em seguida foi adicionada a biomassa até completar o volume do reator, conforme esquema experimental apresentado na Figura 3.5. Para cada biomassa realizou-se duas bateladas (Teste I e II) e, a partir destas foram coletados os dados do processo de gaseificação e de secagem (Temperatura (Tar) e de umidade relativa (URar) do ar ambiente; temperatura na câmara de combustão do gás (TCgás); temperatura na zona de combustão do reator (TZcomb); temperatura do ar na exaustão do combustor (Texaustão); temperatura do ar de secagem (Tsecador) e; a composição do ar de secagem) com auxílio dos instrumentos apresentados na Figura 3.5.

O gaseificador empregado na gaseificação da casca de cacau e da lenha de eucalipto em *chips* foi do tipo concorrente e a alimentação do combustível foi realizada pelo topo do reator. A entrada de ar ocorreu em fluxo descendente, passando pelas zonas de oxidação (combustão) e redução.

O reator utilizado foi desenvolvido por Rezende (2012), o qual foi construído em aço inox refratário 310, com 3 mm de espessura, na forma geométrica de dois troncos de cone, simétricos, acoplados a um cilindro, com tampa e base construídas também em aço inox refratário 310 com 3 mm de espessura. No topo do cilindro, que compõe a parte interna do gaseificador foram incorporados quatro tubos de aço inox 304 de 5 cm de diâmetro para compor o dispositivo de entrada do ar primário (Figura 3.3); e no corpo do reator foram incorporados longitudinalmente quatro tubos de aço inox 304 com 1cm de diâmetro para realizar a coleta de temperaturas nas diferentes zonas do reator (Figura 3.3).



Fonte: Adaptado de Rezende (2012).

Figura 3.9 - Diagrama esquemático do reator de gaseificação utilizado no experimento com o detalhamento das dimensões das diferentes zonas do reator (secagem, pirólise, combustão e redução), entradas de ar, compartimento de depósito das cinzas, disposição da grelha e saída do gás de síntese.

A grelha do gaseificador encontrava-se na base do cilindro com a finalidade de apoiar a biomassa a ser gaseificada e permitir o fluxo de saída do gás produzido na zona de redução. Logo abaixo, no tronco do cone inferior do reator, encontra-se o cinzeiro onde as cinzas oriundas do processo foram depositadas. A separação das cinzas e do gás foi realizada com o auxílio de dois dispositivos conectados na base do reator: um para a remoção das cinzas e outro para a saída do gás gerado no processo de gaseificação.

O reator apresentava uma camada de lã de rocha internamente para o isolamento térmico, composta por uma chapa cilíndrica de aço galvanizado, com 2 mm de espessura. Na Figura 3.3 foi apresentado um esquema do sistema composto por gaseificador, combustor e secador.

O sistema de ventilação utilizado para produzir o ar da gaseificação foi composto por um motor elétrico trifásico da marca Weg, de 0,5 CV, acoplado a

um ventilador de pás radiais a um inversor de frequência para controlar a velocidade do motor elétrico, conforme Rezende (2012).

2.3.1. Ignição

Após acondicionar o carvão no interior do gaseificador até encher a parte cilíndrica, realizou-se a ignição do combustível utilizando-se um lança-chamas de gás GLP até a queima do carvão se manter estável. Nesse instante, removeu-se o lança-chamas, e o sistema de ventilação foi ligado. Em seguida, o restante do reator foi carregado com a biomassa (casca de cacau ou *chip* de eucalipto) e vedado com uma tampa de aço.

2.3.2. Aquisição de dados da temperatura

A Figura 3.4 apresenta o esquema experimental do sistema gaseificador/combustor/secador.

O reator de gaseificação utilizado foi operado em fluxo concorrente apresentando zona de secagem (z.s), zona de pirólise (z.p), zona de combustão (z.c) e zona de redução (z.r). O combustor foi acoplado a um misturador de ar e a um secador (Figura 3.4). No misturador foi realizada a mistura do ar quente produzido com o ar frio do ambiente.

Os fluxos de massa envolvidos no processo foram apresentados na Figura 3.4 e indicados por setas na direção que a massa foi transportada (alimentação de biomassa, remoção de cinzas, gás de síntese produzido e entradas de ar no reator - $m_{z.ca}$, no combustor - $m_{z.c(a)}$ e no secador - $m_{s(a)}$).

Para a aquisição de dados das temperaturas nas diversas zonas do gaseificador foram utilizados quatro termopares do tipo k - Tp(1), Tp2, Tp3 e Tp4 (Figura 3.4). O Tp(1) foi introduzido no interior do gaseificador, por meio de um tubo construído para esse fim, localizado na regiões de combustão da biomassa. O segundo termopar – Tp(2) foi introduzido na câmara de combustão, localizada na saída do gás de síntese, o terceiro – Tp(3) na linha de exaustão do ar quente produzido no combustor e o quarto – Tp(4) no secador de bandejas.

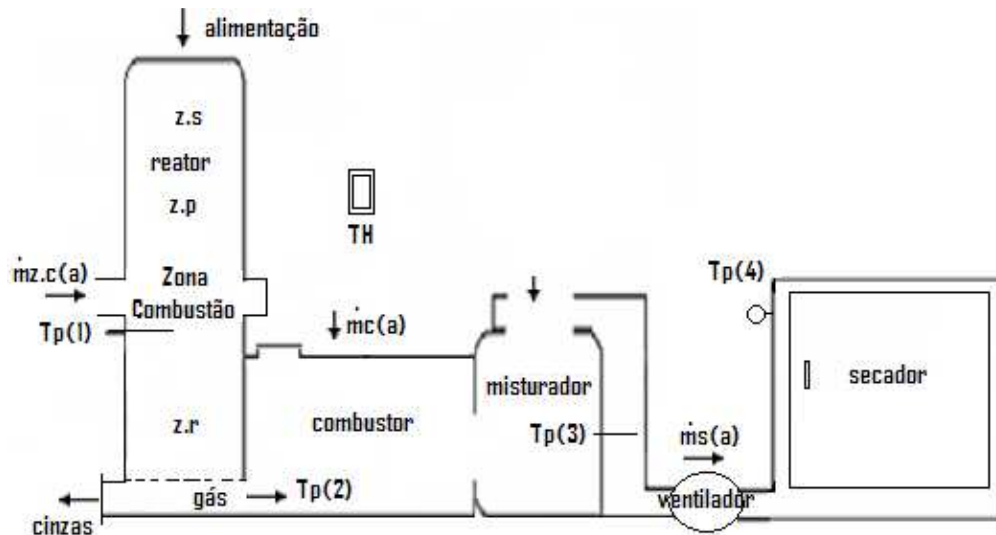


Figura 3.10 - Esquema experimental do sistema gaseificador/combustor/seca-dor.

A Figura 3.5 apresenta algumas etapas e equipamentos utilizados na gaseificação realizada com as diferentes biomassas (casca de cacau e eucalipto) e os instrumentos utilizados para o controle do processo experimental.

Os termopares foram conectados a uma central de aquisição de dados, constituída por um computador e uma placa ou módulo de aquisição de dados (Figura 3.5), programada para registrar e controlar as medidas das temperaturas na zona de combustão do gaseificador e de exaustão na saída do sistema gaseificador/combustor (REZENDE, 2012).

A umidade relativa do ar atmosférico foi medida por um termohigrômetro (TH) digital, Instrutemp modelo HT-270, localizado esquematicamente sobre o sistema gaseificador/combustor (Figura 3.4) e sua imagem encontra-se na Figura 3.5.



Figura 3.11 - Biomassas, reator de gaseificação e instrumentação utilizada para o controle do processo experimental.

O secador utilizado foi um secador de bandejas, modelo PD-15 da Polidryer de convecção forçada com área de secagem de 2,0 m³ e dimensões (largura x altura x profundidade) de 660 x 960 x 920 mm. A temperatura de secagem foi controlada utilizando o termômetro do secador – Tp(4) e um

termopar tipo k – Tp(3), que foi posicionado na tubulação situada entre o misturador e o secador (Figura 3.4).

O ar quente produzido no sistema gaseificador/combustor foi transportado para o interior do secador por meio de um sistema de ventilação composto por um motor elétrico trifásico da marca Weg, de 1,5 cv, acoplado a um ventilador centrífugo radial (Figura 3.4), sendo sua velocidade controlada por um inversor de frequência, conforme Rezende (2012). Os inversores de frequência foram instalados nos dois sistemas de ventilação (zona de combustão do reator – $\dot{m}_{zc}(a)$ e ventilador centrífugo – $\dot{m}_{s}(a)$, Figura 3.4) montados para controlar a temperatura do ar de secagem, assim como a temperatura da zona de combustão, conforme Rezende (2012).

Na entrada do secador foi instalada uma chapa metálica para conter o fluxo de ar nos momentos que a temperatura do ar e as concentrações de CO₂ e CO apresentaram valores elevados. Esse procedimento foi realizado durante o início da tomada de dados para evitar a coleta em condições de instabilidade do sistema.

Utilizou-se para controlar os processos de gaseificação e combustão do gás produzido um sistema de automação desenvolvido por Resende (2012), que controlou a quantidade de ar na zona de combustão do reator com auxílio de um inversor de frequência instalado a um ventilador, interligado a um termopar localizado no duto de exaustão do combustor. Esse sistema foi o responsável por todo controle operacional de geração de calor, nas condições desejadas para a secagem de amêndoas de cacau, que segundo Efraim et al. (2010) a temperatura, considerada ideal, para ser aplicada no processo de secagem de amêndoas de cacau, situa-se na faixa de 45 – 50°C.

2.3.3. Análise do ar de secagem

A qualidade do ar de secagem foi avaliada utilizando um analisador de gás comercial Wuhan CubicOptoelectronics, modelo Gasboard 3300 (Figura 3.5). Avaliou-se a presença de CO₂, CO, CH₄ e H₂ no ar de exaustão que foi utilizado na secagem das amêndoas.

As amostras do ar de exaustão foram coletadas dentro do secador PD-50 da Polydrier com uma bomba elétrica de inflar, a qual bombeou o ar quente

de exaustão produzido pelo conjunto gaseificador/combustor por meio de um tubo plástico até o analisador de gás, conforme Rezende (2012).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3.1 apresenta os resultados obtidos no final da secagem da casca de cacau utilizando um secador tubular de convecção natural, onde $m_{c(e)}$ – massa que entra no secador; % b.u (i) – teor de água inicial da casca; $m_{c(s)}$ – massa de casca que sai; % b.u (f) – teor de água final da casca; m_{a_s} – massa de água removida durante a secagem da casca; h_v – calor latente de vaporização da água na temperatura de secagem e DEP – demanda de energia para o processo de secagem.

O tempo de secagem foi de aproximadamente 4 dias (86h) e a massa de casca seca processada com o teor de água de 7,4 %(b.u) foi de 519,2 kg (Tabela 3.1). Considerando, que a massa de casca que entrou no secador foi de 3.000 kg com teor de água (%b.u) de 84,5%, determinou-se por diferença, a quantidade de água removida, $m_{a(sai)}$. Em seguida, utilizando a Equação 3.2 determinou-se a demanda de energia para o processo de secagem - DEP (Tabela 3.1).

Tabela 3.11 - Resultados obtidos do processo de secagem da casca de cacau utilizando secador tubular de convecção natural

Variáveis	Valor	Unid.
m_{c_e}	3000	kg
% b.u (i)	84,5	%
% b.u (f)	7,4	%
m_{c_s}	519,2	kg
m_{a_s}	2480,8	kg
*Calor específico da H ₂ O (c_p)	4,1819	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
*Calor latente da água (h_v) 60°C	2.358,48	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Calor sensível (Q_s)	363.106	kJ
Calor latente (Q_L)	5.850.917	kJ
DEP	6.214.023	kJ

* Fonte: Van Wylen et al. (2009).

A Tabela 3.2 apresenta as propriedades da lenha, os dados do consumo de lenha e a energia requerida durante a secagem.

A massa de lenha consumida durante o processo de secagem da casca foi de 1.827 kg. Considerando o poder calorífico inferior da lenha (PCI) determinou-se a energia requerida (E_r) para secar a casca de cacau (Tabela 3.2).

Tabela 3.12 - Consumo de lenha, propriedades da lenha, e energia requerida para a secagem da casca de cacau

Variável	Valor	Unid.
Tempo de secagem (t_s)	86	h
Massa de Lenha (M_{cb})	1.827	kg
Consumo de Lenha (\dot{m}_{cb})	21,24	kg.h ⁻¹
*Massa específica da lenha	700	kg.m ⁻³
*PCI da lenha (PCI_L)	18.000	kJ.kg ⁻¹
Energia requerida (E_r)	32.886.000	kJ
Eficiência do sistema (η)	19	%

* Fonte: Magalhães (2007).

A eficiência do sistema secador encontrado (Tabela 3.2) foi compatível com a eficiência de 17,6%, determinado por Silva Neto et al. (2001) durante a secagem de amêndoas de cacau em um secador similar.

A Tabelas 3.3 apresenta os dados de Temperatura (T_{ar}) e de umidade relativa (UR_{ar}) do ar ambiente; temperatura na câmara de combustão do gás ($TC_{gás}$); temperatura na zona de combustão do reator (TZ_{comb}); temperatura do ar na exaustão do combustor ($T_{exaustão}$); temperatura do ar de secagem ($T_{secador}$) e a composição do ar de secagem referente aos dois testes realizados utilizando a casca de cacau (T1) como combustível.

Tabela 3.13 - Dados coletados durante os testes I e II, utilizando casca de cacau como combustível

Teste	Coletas	Tar (°C)	URar (%)	TCgás (°C)	TZcomb (°C)	Texaustão (°C)	Tsecador (°C)	CO ₂ (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	H ₂ (%)
I	00:00	30,5	42	148	700	80	-	0,85	0,14	0	0
	00:13	31,3	43	148	698	78	-	0,83	0,13	0	0
	00:28	33,6	45	147	690	70	-	0,8	0,12	0	0
	00:58	32	43	136	790	59	52	0,4	0,14	0	0
	01:13	31,7	42	120,2	789,3	44	42	0,37	0,08	0	0
	01:23	32,1	45	120,6	831	46	45	0,26	0,05	0	0
	01:33	33,1	44	118,4	805,7	48	45	0,34	0,12	0	0
	01:48	32	43,5	132	800	53	-	-	-	-	-
	Média	32	43,4	134	763	60	46	0,55	0,11	0	0
II	00:00	31,5	43	149	690	70	-	0,85	0,12	0	0
	00:13	32,3	44	152	700	75	-	0,8	0,11	0	0
	00:28	33,6	45	150	750	78	58	0,81	0,13	0	0
	00:58	32	43	121	790	60	52	0,45	0,14	0	0
	01:13	31,7	42	123	789	49	43	0,34	0,08	0	0
	01:23	32,1	45	120	820	48	46	0,30	0,10	0	0
	01:33	33,1	44	117	800	50	43	0,28	0,13	0	0
	01:48	33,1	40	132	790	49	-	-	-	-	-
	Média	32,4	43,2	133	766	59,9	48,4	0,76	0,12	0	0
MÉDIA	32,2	43,3	133,5	764,5	59,9	47,2	0,66	0,11	0	0	

Os valores médios obtidos de TZcomb, TCgás, Texaustão e Tsecador foram respectivamente 764,5°C, 133,5°C, 60°C e 47,2°C utilizando a casca de cacau como combustível e os valores da composição média do ar de secagem referente à presença de CO₂ e CO foram respectivamente 0,56 e 0,11 %.

A Tabelas 3.4 apresenta os dados de Temperatura (Tar) e de umidade relativa (URar) do ar ambiente; temperatura na câmara de combustão do gás de síntese (TCgás); temperatura na zona de combustão do reator (TZcomb); temperatura do ar na exaustão do combustor (Texaustão); temperatura do ar de secagem (Tsecador) e a composição do ar de secagem referente aos dois testes realizados utilizando *chips* de eucalipto (T2) como combustível.

Os valores médios obtidos de TZcomb, TCgás de síntese, Texaustão e Tsecador foram respectivamente 760,25°C, 135,6°C, 86,4°C e 57,3°C utilizando o *chip* de eucalipto como combustível e os valores da composição média do ar de secagem referente à presença de CO₂ e CO foram respectivamente 0,67 e 0,0605%.

Tabela 3.14 - Dados coletados durante os testes, utilizando eucalipto em chip como combustível

Testes	Corridas	Tar (°C)	URar (%)	TCgás (°C)	TZcomb (°C)	Texaustão (°C)	Tsecador (°C)	CO ₂ (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	H ₂ (%)
I	0:00	29	61	148	700	100	-	0,57	0,03	0	0
	0:15	29	58	146,5	698	96	-	0,96	0,03	0	0
	0:30	30	57	130,8	690	95,2	60	0,82	0,04	0	0
	0:45	30,5	58	147	790	95	60	0,71	0,04	0	0
	1:00	31	58,5	136	789,3	93,4	50	0,87	0,03	0	0
	1:15	31	58	129	831	82,1	60	0,86	0,03	0	0
	1:30	31,3	56	125,8	805,7	69	50	0,82	0,04	0	0
	1:45	32	55,5	118,4	800	68,3	-	0,71	0,04	0	0
	Média	30,5	58	135,2	763	87,35	56	0,79	0,035	0	0
II	00:00	28	62	150	705	95	-	0,72	0,03	0	0
	00:15	29	58,6	148	700	92	-	0,8	0,12	0	0
	00:30	31	57	132	695	94,3	65	0,5	0,14	0	0
	01:00	31,5	59	145	760	94	58	0,62	0,08	0	0
	01:15	31	58	138	780	92	52	0,46	0,05	0	0
	01:25	31,7	58	127	820	83	63	0,34	0,12	0	0
	01:35	32	56	126	800	65	55	0,82	0,04	0	0
	01:45	33	56	120	800	69	-	0,71	0,04	0	0
	Média	31	58,1	136	757,5	85,5	58,6	0,55	0,086	0	0
MÉDIA	30,7	58,0	135,6	760,2	86,4	57,3	0,67	0,06	0	0	

O desempenho da gaseificação, por meio da observação visual, ocorreu de forma satisfatória para ambos combustíveis analisados, no entanto a gaseificação do eucalipto em *chip* apresentou melhor desempenho de operação do sistema, quanto à queima do gás produzido e operação inicial do sistema (pouca fumaça).

Com base nos dados de Temperatura (Tar) e de umidade relativa (URar) do ar ambiente; temperatura na câmara de combustão do gás de síntese (TCgás); temperatura na zona de combustão do reator (TZcomb); e temperatura do ar na exaustão do combustor (Texaustão) apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4 a gaseificação ocorreu de forma satisfatória para os combustíveis analisados. A instabilidade observada no início da gaseificação do combustível casca de cacau (fumaça de coloração verde amarelada) pode ter sido devido ao teor de água (13,3%), que foi superior ao teor de água do *chip* de eucalipto (12,1%).

A temperatura de secagem foi mantida próxima da faixa de temperatura desejada para o processo de secagem de amêndoas de cacau (45-50°C), confirmando que o sistema de controle desenvolvido por Resende (2012) funcionou de forma satisfatória. Quando o combustível foi o *chip* de

eucalipto os valores da temperatura de exaustão ($T_{\text{exaustão}}$) e da temperatura de secagem (T_{secador}) foram maiores ao comparar com os resultados assumidos quando o combustível foi a casca de cacau.

A granulometria pode ter sido o fator responsável, pois o tamanho da partícula pode interferir na zona de combustão, ou seja, quando as partículas são desuniformes as mesmas acarretam queima irregular da carga de zona de combustão, conseqüentemente a produção de gás foi irregular quando utilizou-se a casca de cacau conferindo baixas temperaturas no ar de secagem. Foi possível notar esse efeito pela intensidade da chama, no combustor dos gases do sistema, onde a queima do gás produzido utilizando-se o eucalipto em *chip* foi mais intensa e uniforme quando comparada com as características da chama utilizando-se a casca de cacau como combustível. Essa observação pode estar relacionada com a mistura ar-combustível, uma vez que os combustíveis apresentaram características diferentes quanto ao teor de água e dimensões. Mesmo apresentando instabilidade durante a gaseificação com a casca de cacau foi possível atingir as condições de temperatura de secagem desejada para amêndoas de cacau, isso porque as temperaturas de exaustão do sistema gaseificador/combustor e do ar de secagem foram atingidas.

A partir dos valores médios dos testes realizados para cada tratamento (T_1 e T_2), notou-se que as condições do processo de produção do gás de síntese e da combustão do mesmo mantiveram-se próximos, mais uma vez confirmando a eficiência do sistema de automação desenvolvido por Resende (2012).

Com relação à composição do ar de secagem, gerado por meio da gaseificação, utilizando casca de cacau e *chip* de eucalipto, a concentração de CO foi maior quando utilizou-se a casca de cacau e a concentração de CO₂ foi maior quando utilizou-se o *chip* de eucalipto. Como se pretende aplicar o ar quente gerado, em sistemas de secagem de amêndoas de cacau. A presença desses compostos pode comprometer a aplicação do sistema estudado, pois a presença dos mesmos pode contaminar as amêndoas, deixando-as impróprias ao consumo. Além disso, o ar contaminado traz evidências de contaminação com outro grupo de compostos, gerados durante a combustão da biomassa, os HPAs (hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos), que são tóxicos e prejudiciais à saúde dos consumidores de produtos derivados do cacau.

Identificou-se, ainda, durante a análise da composição do ar de secagem, uma relação entre as temperaturas de combustão, na câmara de combustão (TC_{gás}) e, a concentração de metano. Sendo assim, pode-se afirmar que os níveis de metano foram zero porque as temperaturas na câmara de combustão foram suficientes para a queima do metano.

4. CONCLUSÕES

Foi possível realizar o beneficiamento da casca de cacau, utilizando a própria infraestrutura da fazenda. O processo de gaseificação da casca de cacau foi similar à do *chip* de eucalipto, que, neste estudo, serviu de parâmetro. Porém, por meio de avaliação qualitativa, o equipamento operou melhor com *chip* de eucalipto do que com casca de cacau, necessitando de outros ajustes para que o sistema se adeque às características da biomassa e às condições operacionais.

Quanto à qualidade do ar de secagem, ambos os combustíveis produziram um ar de secagem com teores de CO e CO₂ baixos. Os valores apresentados não levam a uma conclusão quanto aos limites estabelecidos para a presença desses gases; portanto, é necessário realizar um estudo mais detalhado e avaliar a presença de compostos do grupo dos HPAs, que podem ser formados durante os processos de combustão, podendo contaminar os alimentos, pois são considerados carcinogênicos.

Para que o uso da casca do cacau seja viável economicamente, devem-se realizar estudos para que a secagem da casca seja realizada utilizando a energia solar ou os sistemas de prensa para remoção de uma fração da água livre antes da secagem solar, porque não é viável secar a casca com a própria casca. Pode-se também transformar a casca de cacau em carvão por meio de diferentes métodos encontrados na literatura, estando a casca triturada, prensada ou na sua forma de obtenção.

CAPÍTULO 4

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA PARA SECAGEM DE AMÊNDOAS DE CACAU UTILIZANDO COMO COMBUSTÍVEL A CASCA DO FRUTO

1. INTRODUÇÃO

A cultura do cacau ocupa 500 mil hectares de área plantada na Bahia, em sua maioria em pequenas e médias propriedades e, atualmente, 25 mil produtores se dedicam à produção de cacau no estado da Bahia. Segundo dados do IBGE (2012), o Brasil produziu 248,6 mil toneladas de cacau (amêndoa) em 2011, sendo as Regiões Norte/Nordeste, responsáveis por mais de 97% dessa produção. Nesse mesmo ano, o Nordeste produziu 156,57 mil toneladas da amêndoa do fruto, respondendo a Bahia por 100% da produção regional e cerca de 63% da nacional.

Durante o beneficiamento do cacau são produzidas toneladas de casca do fruto, fração esta, que representa 80% do fruto. Cerca de 6 toneladas, em média, de casca fresca, oriundas do processo de quebra dos frutos de cacau, são produzidas anualmente por hectare de cacau cultivado (SODRÉ et al., 2012).

Durante muitos anos, a prática adotada nas propriedades, após a retirada das sementes do cacau, era deixar as cascas na plantação para serem utilizadas como adubo e, assim disponibilizar seus nutrientes para o solo. Mas, pesquisadores observaram que essa prática, promove ainda mais a proliferação de fungos na lavoura, prejudicando assim a produção, devido ao elevado teor de água da casca, que somada à elevada umidade característica das regiões de Mata Atlântica torna o meio ainda mais propício ao crescimento de fungos.

Por outro lado, pode-se destacar ainda, que nas regiões produtoras de cacau, o sistema tradicional de secagem é composto por secadores artificiais, que utilizam fornalhas a lenha. Anualmente, uma fazenda com produção de 500 arrobas, por exemplo, consome cerca 30 m³ de madeira, geralmente de espécies nativas (SILVA NETO et al., 2001).

Quanto à qualidade das amêndoas processadas, diferente dos grãos em geral, as amêndoas de cacau apresentam elevado teor de gordura que, dependendo da maneira que são beneficiadas, as suas características sensoriais, química, nutricional e microbiológica são afetadas. Um dos fatores mais relevantes para a manutenção da qualidade das amêndoas de cacau é a temperatura do ar de secagem, que deve ser mantida entre 45 e 50°C, pois fora dessa faixa a qualidade do produto pode ser afetada (EFRAIM et al., 2010).

Vale ressaltar que, devido ao elevado teor de gordura, as amêndoas de cacau, assim como outras amêndoas e, ou, castanhas como a castanha-do-pará, castanha de caju etc., devem ser armazenadas com teores de água menores, quando comparado aos teores de água dos grãos em geral. Porém, as tecnologias para realizar a secagem de tais produtos são praticamente as mesmas e podem ser desde uma simples secagem em terreiros ou barcaças ou até as mais sofisticadas como as que usam secadores contínuos.

A secagem de cacau em barcaça apesar de ser bastante difundida é extremamente dependente das condições climáticas e, em regiões com alta pluviosidade como as regiões produtoras de cacau, muitas das vezes, esse método pode ser impraticável.

Vale ressaltar que as amêndoas de cacau, durante a secagem em barcaças, terreiros e estufas, ficam susceptíveis ao desenvolvimento de fungos que liberam micotoxinas, em especial a aflotoxina. Isso se deve às condições de elevada umidade a que as amêndoas ficam submetidas, principalmente no período da noite e em dias chuvosos que a temperatura tende a cair. Por isso, é desejável que as amêndoas sejam secas, logo após a fermentação, por um processo de secagem contínuo, mantendo a temperatura do ar entre 45-50°C, para evitar a contaminação das mesmas por fungos.

No Brasil, as unidades agrícolas produtoras de cacau, além da secagem em barcaças, terreiros e, ou, estufas solares também são empregados outros métodos como a secagem artificial com convecção natural (Secador Tubular, Secador Zaccaria e Secador Burareiro) e; secagem artificial com convecção forçada (Plataforma do tipo CEPEC e Secadores Rotativos). Segunda Silva Neto et al. (2001), as eficiências desses secadores, que

geralmente utilizam fornalhas como gerador de calor, são inferiores a 20% e o combustível é a lenha, que na maioria das vezes é proveniente da mata nativa.

Desta forma para o desenvolvimento de um secador para amêndoas de cacau, que opere com ar aquecido na faixa de 45 a 50°C, torna-se necessário a utilização de biomassa para ser transformada em geradores de calor como fornalhas e gaseificadores.

Sabendo-se dos problemas financeiros, tecnológicos e ambientais que os produtores de cacau vêm enfrentando nos últimos anos e suas consequências em relação ao desmatamento da mata nativa, bem como da casca do cacau desperdiçada e depositadas na lavoura, que servem como inoculo para o desenvolvimento de doenças e pragas, este resíduo gerado durante o pré-processamento do cacau surge como uma biomassa de grande potencial para a aplicação na secagem das amêndoas, em substituição da lenha.

O aproveitamento energético desse resíduo se reveste de notável importância, uma vez que se apresenta como uma promissora fonte de energia alternativa e sustentável, que pode substituir a lenha geralmente utilizada como combustível nos secadores de cacau. Sendo assim, o aproveitamento deste resíduo e a implantação de sistemas de secagem diferentes dos convencionais podem aumentar a eficiência do processo, a qualidade das amêndoas e, conseqüentemente, a qualidade dos produtos derivados da amêndoa de cacau.

As fornalhas ainda são os geradores de calor mais utilizados na geração de ar quente para secagem artificial das amêndoas de cacau, porém apresentam baixa eficiência energéticas, de 30 a 54% (SANTOS, 2003).

Segundo Silva et al. (2000), a gaseificação proporciona as seguintes vantagens: (i) Alta eficiência térmica, variando de 60% a 90%, dependendo do sistema implementado. (ii) A energia produzida com a queima dos gases produzido é menos poluente. (iii) A demanda de energia pode ser controlada e, conseqüentemente, a taxa de gaseificação pode ser monitorada. (iv) O uso da biomassa, quando associado ao manejo sustentável dos recursos, trás um impacto nulo ao meio ambiente, pois o carbono lançado para a atmosfera é absorvido pelas plantas durante seu crescimento.

Quanto à forma de aquecimento, o aquecimento direto do ar é mais econômico, tanto na instalação, quanto no funcionamento, devido ao

rendimento térmico mais elevado. Segundo Portela e Eichelbrger (2001), sistemas que operam com aquecimento direto do ar são mais econômicos tanto na instalação (10 a 15%) como no funcionamento por apresentar rendimento térmico mais elevado 85 a 95% contra 65 a 85% do aquecimento indireto.

Com base no exposto, este trabalho teve como objetivo dimensionar um secador, adaptado às condições das fazendas produtoras de cacau, que opere com a casca de cacau como fonte de energia e um gaseificador concorrente como sistema gerador de calor, em substituição a fornalha.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Com base em estudos preliminares optou-se por dimensionar um gaseificador de fluxo concorrente para evitar contaminações do ar de secagem com alcatrão, pois os reatores de gaseificação, que operam com fluxo contracorrente, apesar de largamente utilizado para gaseificação de combustíveis não voláteis como o carvão, conferem altas taxas de produção de alcatrão (5% a 20%), portanto, não são indicados para a gaseificação de biomassa em sistemas com aquecimento direto do ar de secagem, principalmente quando pretende-se produzir produtos alimentícios.

A Figura 4.1 apresenta um esquema do sistema gaseificador/combustor/secador que foi dimensionado. O gaseificador dimensionado teve como base o modelo apresentado por Silva (2003).

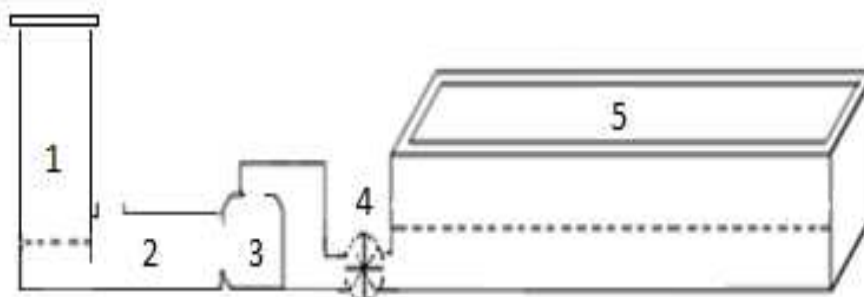


Figura 4.12 - Sistema proposto: secador de cacau (5) com aquecimento direto do ar utilizando um reator de gaseificação concorrente (1) acoplado a um combustor (2) e a um misturador (3).

O esquema idealizado apresentado na Figura 4.1 foi composto por um reator de gaseificação (1), apresentando zona de secagem – z.s, zona de pirólise – z.p, zona de combustão - z.c e zona de redução - z.r; por um combustor dos gases produzidos durante a gaseificação (2); misturador (3), onde o ar frio foi aquecido diretamente pelo ar quente produzido no combustor; um ventilador (4) para transportar o ar produzido pelo sistema; e o secador tipo Plataforma (5), apresentando câmara *plenum* (parte inferior do secador) e câmara de secagem (parte superior do secador). Além desses componentes do sistema apresentado, pode-se destacar a importância do duto de ligação, que faz a ligação entre o grupo aerotérmico e a plataforma de secagem.

O ar, neste sistema, foi conduzido pelo duto de ligação do combustor até a plataforma de secagem e desta para o ambiente exterior. Os difusores precisam ser construídos de maneira a proporcionarem mínima perda de carga, evitando ao máximo, curvas e ângulos. A distância da fonte de calor até a massa de amêndoas deve ser menor possível para evitar grandes perdas de calor.

O secador que foi considerado para dimensionar o sistema gaseificador/combustor foi um secador tipo plataforma, desenvolvido pela CEPLAC/CEPEC, de dimensões de 8 m de comprimento e 2 m de largura, capaz de secar 4.000 kg de amêndoas de cacau fermentadas e produzir 2.150 kg de amêndoas secas em 51 h consumindo 1.530 kg de lenha (SILVA NETO et al., 2001). Para este tipo de secador recomenda-se uma carga média de 200 kg.m⁻², o que permite uma camada de massa de amêndoas de até 27 cm (CUNHA; SERÔDIO, 1991).

Para dimensionar o sistema gaseificador/combustor, foi necessário calcular, inicialmente, a demanda de energia calorífica para o aquecimento do ar de secagem.

A demanda energética foi calculada utilizando a Equação 4.4, mas para obter esse valor foi necessário calcular outros parâmetros como massa de água removida da massa de amêndoas, quantidade de ar seco requerida e vazão de ar seco. Iniciou-se os cálculos utilizando a Equação 4.1, para determinar a massa de água removida das amêndoas durante a secagem de 4.000 kg de amêndoas com teor de água inicial de 53% b.u até o teor de água de armazenamento das amêndoas de 7% b.u.

$$M_a = \frac{U_i - U_f}{100 - U_f} \cdot C_s \quad (4.1)$$

em que:

M_a – Massa de água removida (kg);

U_i – Umidade inicial (% b.u.);

U_f – Umidade final (% b.u.);

C_s – Capacidade do secador.

Em seguida, utilizou-se a Equação 4.2 para determinar a quantidade de ar necessária para remover a massa de água removida para secar os 4.000 kg de massa de amêndoa.

$$q_{ar} = \frac{M_a}{RM_3 - RM_2} \quad (4.2)$$

em que:

q_{ar} – Quantidade de ar requerida para o processo (kg de ar seco);

M_a – Massa de água removida (kg);

RM_3 – Razão de Mistura para o ponto de estado 3 ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{ar seco}}$);

RM_2 – Razão de mistura para o ponto de estado 2 ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{ar seco}}$).

Os valores de RM_1 , RM_2 e RM_3 foram obtidos por meio da Carta Psicométrica com auxílio do programa Grapsi (MELO et al., 2004) nas condições de estado para os pontos 1 (ar ambiente antes de ser aquecido), 2 (ar aquecido antes de passar pela massa de amêndoa) e 3 (ar depois de passar pela massa de amêndoas), conforme Figura 4.2.

Para as condições de secagem das amêndoas de cacau, determinaram-se as propriedades do ar, apresentadas na Tabela 4.1 para os pontos de estados de interesse, conforme esquema apresentado na Figura 4.2 com os pontos de estado (PE) 1, 2 e 3.

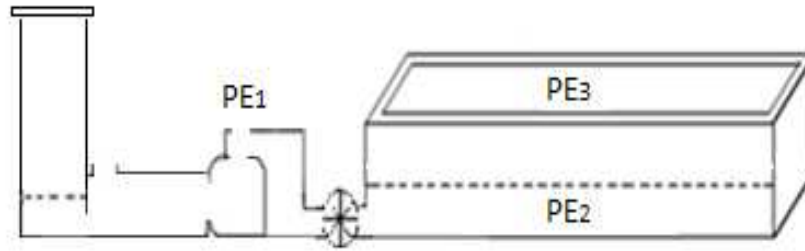


Figura 4.13 - Esquema de como foi obtida as propriedades do ar para os pontos de estado (PE) 1, 2 e 3 por meio da Carta Psicométrica.

Tabela 4.15 - Propriedades do ar utilizado para a secagem das amêndoas de cacau nos diferentes pontos de estado (PE)

Propriedade	Unid.	PE ₁	PE ₂	PE ₃
Temperatura de bulbo seco	°C	33	60	36,9
Umidade relativa	%	65	16,4	75
Razão de mistura	g.kg ⁻¹	20,8	20,8	30,2
Entalpia	kJ.kg ⁻¹	86,4	114,6	114,5
Volume específico	m ³ .kg ⁻¹	0,896	0,975	0,921

Após determinar a quantidade de ar seco requerido para remover a água presente na massa de amêndoas, utilizou-se a Equação 4.3 para determinar a vazão necessária de ar seco.

$$V_{ar} = \frac{Q_{ar}}{t_s} \quad (4.3)$$

em que:

V_{ar} – Vazão de ar seco requerida (m³.min⁻¹);

Q_{ar} - Quantidade de ar seco requerida para o processo (m³);

t_s – Tempo de secagem (min).

Determinou-se a energia requerida para a secagem das amêndoas de cacau utilizando a Equação 4.4.

$$q = m^o (h_2 - h_1) \quad (4.4)$$

em que:

q – energia requerida para o processo de secagem (kJ.h^{-1})

$$m^o = \frac{\text{vazão do ar ser aquecido}}{\text{volume específico do ar seco}};$$

h_2 – entalpia no ponto de estado 2 (kJ.kg^{-1});

h_1 - entalpia no ponto de estado 1 (kJ.kg^{-1}).

E, em seguida, utilizando a Equação 4.4 determinou-se o fluxo de ar de secagem.

$$F_{ars} = \frac{V_{ar}}{A} \quad (4.5)$$

em que:

F_{ars} – Fluxo do ar de secagem no secador ($\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$);

A – Área do lastro do secador (m^2).

Para o dimensionamento do sistema gaseificador/combustor foram necessários estudos prévios sobre o comburente e o combustível a ser utilizado no processo de gaseificação e combustão.

Utilizou-se como comburente o ar ambiente por ser o mais utilizado em processos industriais de combustão como fonte de oxigênio. Na Tabela 4.2 é apresentada a composição em base volumétrica do ar utilizado.

Tabela 4.16 - Composição do ar ambiente, em % de volume e massa

Elemento	Volume (%)	Massa (%)
O ₂	21,0	23,2
N ₂	79,0	76,8

Fonte: Van Wylen et al. (2009).

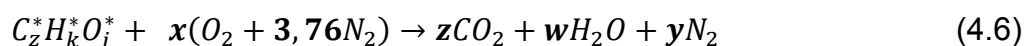
Em seguida, determinou-se a relação N_2/O_2 do ar ambiente, em unidade de volume, a partir dos dados da Tabela 4.2, obtendo $79/21 = 3,76$.

Como pretende-se utilizar a casca de cacau como combustível em um sistema gerador de calor, considerou-se os parâmetros dessa biomassa, apresentados na Tabela 4.3. Como a composição das biomassas geralmente é complexa, poucas das espécies vegetais apresentam composição química precisa publicada na literatura. Sendo assim, foram utilizados os resultados da composição elementar da casca de cacau apresentados na Tabela 4.3 para determinar a quantidade de ar estequiométrico necessário para ocorrer a reação de combustão.

Tabela 4.17 - Propriedades da biomassa

Caracterização da biomassa		Média	DP	CV
Propriedades físicas	Ui – Umidade inicial (%)	84,2	0,137	± 0,45
	Uf – Umidade final (%)	12,01	0,56	± 1,48
	Massa específica aparente ($kg.m^{-3}$)	221,37	6,78	± 30,72
	Poder calorífico superior ($MJ.kg^{-1}$)	17,33	0,13	± 0,43
	Poder calorífico inferior ($MJ.kg^{-1}$)	16,04	-	-
	PClu ($MJ.kg^{-1}$)	13,94	-	-
Análise imediata (b.s)	Cinzas (%)	12,63	0,24	± 0,79
	Material volátil (%)	64,03	0,28	± 0,92
	Carbono Total (%)	36,75	0,18	± 0,59
	Nitrogênio Orgânico (%)	0,98	0,051	± 0,167
	Carbono fixo (%)	23,34	-	-
Composição elementar (b.s)	*Carbono (%)	44,0	-	-
	*Hidrogênio (%)	5,18	-	-
	*Oxigênio (%)	37,57	-	-

Considerando uma massa de 100 kg de casca de cacau (base seca), a estequiometria de reação de combustão pode ser escrita como a Equação 4.6:



em que:

C^* - número de moles de carbono no combustível, em 100 kg de casca de cacau (base seca);

H^* - número de moles de hidrogênio no combustível, em 100 kg de casca de cacau (base seca);

O^* - número de moles de oxigênio no combustível, em 100 kg de casca de cacau (base seca);

x , y , z e w – números de moles necessários para a combustão da casca de cacau.

De posse dos parâmetros referentes à demanda térmica da secagem de amêndoas de cacau, comburente e ao combustível a ser utilizado como fonte de energia, realizaram-se os cálculos para o dimensionamento do reator de gaseificação e da câmara de combustão. Para tanto, foi preciso realizar considerações dos balanços de massa e energia, bem como critérios empíricos para estimativa do diâmetro do reator e sua altura. Os dados inicialmente necessários foram: eficiência do gaseificador (valor adotado, 70 %); valor da razão de equivalência (valor adotado, 25 %); e velocidade do ar primário na superfície da grelha (o valor adotado foi $1,0 \text{ m.s}^{-1}$).

Considerando os princípios e leis da termodinâmica para um sistema em regime permanente e, conforme, a disposição dos equipamentos no sistema realizou-se os balanços de massa e energia para o sistema como um todo e para o gaseificador e combustor conforme volume de controle apresentado na Figura - 4.3.

No dimensionamento não foi considerado a necessidade de utilização de chama piloto (utilização de GLP ou carvão vegetal), nem a possibilidade de acrescentar ar frio, numa câmara de mistura (misturador, Figura 4.1 - 3) ao ar quente gerado pelo processo, antes da passagem pelo ventilador.

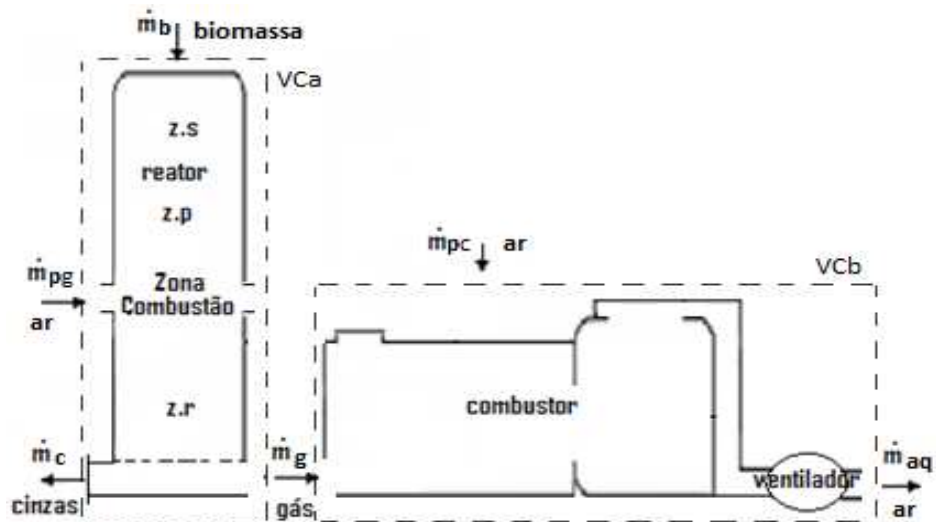


Figura 4.14 - Gaseificador de biomassa; (VCa) volume de controle do gaseificador; (VCb) volume de controle do combustor de gases.

Utilizando o volume de controle apresentado na Figura 4.3, pode-se equacionar o balanço de massa do gaseificador conforme a Equação 4.7 e do combustor de gases conforme a Equação 4.8:

$$\dot{m}_{p_g} + \dot{m}_b = \dot{m}_c + \dot{m}_g \quad (4.7)$$

em que:

\dot{m}_{p_g} - vazão mássica de ar primário no gaseificador, em kg.h^{-1} ;

\dot{m}_b - vazão mássica da biomassa, em kg.h^{-1} ;

\dot{m}_c - vazão mássica das cinzas, em kg.h^{-1} ; e

\dot{m}_g - vazão mássica do gás de síntese, em kg.h^{-1} .

$$\dot{m}_g + \dot{m}_{p_c} = \dot{m}_{a_q} \quad (4.8)$$

em que:

\dot{m}_{p_c} - vazão mássica de ar primário no combustor, em kg.h^{-1} ;

\dot{m}_{a_q} - vazão mássica de ar quente na saída do combustor, em kg.h^{-1} .

Para o balanço de energia, foi desconsiderada a energia utilizada por dispositivos eletromecânicos, sendo descrito o balanço de energia do gaseificador por meio da Equação 4.9.

$$\dot{m}p_g \cdot h_u + \dot{m}b \cdot PCI_u = Q_{V.C.} + \dot{m}c \cdot PCI_c + \dot{m}g \cdot PCI_g \quad (4.9)$$

em que:

$\dot{m}p_g$ – vazão mássica de ar primário no gaseificador, em kg.h^{-1} ;

h_u – entalpia do ar ambiente úmido, em kJ.kg^{-1} ;

$\dot{m}b$ – vazão mássica da casca de cacau, em kg.h^{-1} ;

PCI_u – poder calorífico inferior úmido da casca do cacau, em kJ.kg^{-1} ;

$Q_{V.C.}$ – taxa de transferência de calor entre o sistema e o meio, em kJ.h^{-1} ;

$\dot{m}c$ – vazão mássica das cinzas, em kg.h^{-1} ;

PCI_c – poder calorífico inferior das cinzas, em kJ.kg^{-1} ;

$\dot{m}g$ – vazão mássica do gás de síntese produzido no reator, em kg.h^{-1} ;

PCI_g – poder calorífico inferior do gás produzido no reator, em kJ.kg^{-1} .

Para o combustor, o balanço de energia (Equação 4.10) é definido como:

$$\dot{m}g \cdot PCI_g + \dot{m}p_{(c)} \cdot h_u = Q_{V.C.} + \dot{m}a q \cdot h_{aq} \quad (4.10)$$

em que:

$\dot{m}p_{(c)}$ – vazão mássica de ar primário no combustor, em kg.h^{-1} ;

h_{aq} – entalpia do ar quente, em kJ.kg^{-1} .

Estimou-se a potência requerida no sistema convencional em 669 MJ.h^{-1} (186 kW), valor este, aproximado para o conjunto fornalha/secador (Secador Plataforma CEPEC) usado na secagem de cacau, que segundo Silva Neto et al. (2001) a eficiência do conjunto é de 17,7%.

Empregando a Equação 4.11, calculou-se a taxa de energia total de saída do combustor e do gaseificador. De posse da energia de saída

necessária e desconsiderando-se o poder calorífico das cinzas determinou-se a massa real de ar e de combustível a serem consumidas, por hora, por meio do balanço de energia do combustor (Equação 4.10) e do gaseificador (Equação 4.9). Para tanto, considerou-se o fator de ar igual a 25% (dentro da faixa de 20 a 40% da quantidade estequiométrica, recomendada para a gaseificação) e, em seguida, determinou-se a vazão de gás produzido por meio do balanço de massa do reator (Equação 4.7), considerando que as cinzas correspondem a 12,63% da massa do combustível.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_e} \quad (4.11)$$

em que:

η – eficiência do reator, em decimal;

\dot{Q}_s – taxa de energia total de saída do reator, em kJ.h^{-1} ;

\dot{Q}_e – taxa de entrada do reator, em kJ.h^{-1} .

Estimou-se a velocidade mínima do gás, ao passar pela grelha, como sendo um valor próximo ao de entrada de ar primário no reator, utilizando-se como referência $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Como a vazão do gás produzido no reator é expresso em $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$, determinou-se a abertura requerida da grelha. Adotou-se a proporção de superfície aberta em relação à superfície total da grelha de 20% (equivalente a 1/5), a fim de calcular a área total necessária da grelha, equivalente à área da base do reator projetado.

O dimensionamento da grelha foi feito em função da velocidade de escoamento do ar pelo interstício da grelha (1m.s^{-1}).

Segundo Zanata (2011), o dimensionamento da grelha pode ser feito utilizando a Equação 4.12 com base no consumo de ar necessário à combustão de 1 kg de combustível, considerando o escoamento do ar com certa velocidade pelos interstícios da grelha.

$$S_l = \frac{m_{cb}.V_{ar}^t}{v.3600} \quad (4.12)$$

em que:

S_l – superfície livre da grelha, m²;

m_{cb} - consumo de combustível, kg.h⁻¹;

V_{ar}^t – volume teórico de ar necessário à queima de 1 kg de combustível, m³; e

v – velocidade de escoamento do ar, m.s⁻¹.

Para determinar a superfície total da grelha, S_t , utilizou-se a Equação 4.13, onde m pode variar de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ para carvão e $\frac{1}{7}$ a $\frac{1}{5}$ para biomassa (ZANATA, 2011).

$$m = \frac{S_l}{S_t} \quad (4.13)$$

em que:

m – razão entre a superfície livre da grelha e a área total, adimensional;

S_t – área total da grelha, m².

A eficiência térmica considerando o sistema com um todo foi calculada de acordo com a Equação 4.14, considerando a operação do sistema em regime permanente, que a combustão do gás foi completa, que a quantidade de partículas de carbono arrastadas ou presente nas cinzas foi desprezível e que a vazão mássica do ar que entra no volume de controle é a diferença entre a vazão mássica do ar de saída e a vazão dos combustíveis. Adicionalmente foi considerada a quantidade de carvão vegetal utilizada como chama piloto no início e final da gaseificação.

$$\eta_t = \frac{\dot{m}_{as}(h_{as}-h_u)}{\dot{m}_b PCI_u} \cdot 100 \quad (4.14)$$

em que:

η_t - Eficiência térmica, %

\dot{m}_{as} - Vazão mássica do ar de saída, kg.s⁻¹;

h_{as} - Entalpia do ar de saída, kJ.kg⁻¹;

h_u - Entalpia do ar ambiente, kJ.kg⁻¹;

\dot{m}_b - Vazão mássica da casca de cacau, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; e

PCI_u - Poder calorífico inferior úmido da casca de cacau $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4.4 estão apresentados os parâmetros da secagem e a energia requerida para a secagem de 4.000 kg de amêndoas de cacau com 53,8% b.u até atingir um teor de água de 7% b.u, utilizando duas metodologias.

Tabela 4.18 - Parâmetros do processo de secagem das amêndoas de cacau

Parâmetros da secagem		
Produto	Amêndoa	
Massa inicial – valor nominal	4.000	kg
Teor médio inicial de água	53,8	% b.u
Teor médio final de água	7	% b.u
Teor médio inicial de água	1,1645	decimal, b.s
Teor final de água	0,0753	decimal, b.s
Energia requerida para a secagem		
Massa de água (m_a)	2.152	kg de água
Matéria seca (m_s)	1.848	kg de matéria seca
Massa de água no produto (m_{ap})	139	kg de água
Massa de amêndoas secas (m_p)	1.987	kg de amêndoas
Água a ser evaporada (m_{as})	2.013	kg de água
Calor latente de vaporização da água	2.500	$\text{kJ}(\text{kg})^{-1}$
Energia para evaporar a água	5.032,5	MJ
Energia para evaporar a água ¹	27,41	kw
Massa de ar seco (q_a)	214.149	kg
Volume de ar seco (Q_a)	208.795,3	m^3
Vazão de ar seco requerida (V_{ar})	68,23	$\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$
Fluxo de ar de secagem (F_{as})	3,41	$\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
Vazão mássica ar quente saída combustor	4.259,6	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
Energia requerida para a secagem (q)	118,4	$\text{MJ}\cdot\text{h}^{-1}$
Energia requerida para a secagem (q) ²	33	Kw

¹ Energia requerida determinada por meio das propriedades da água removida (VAN WYLWN, 2009).

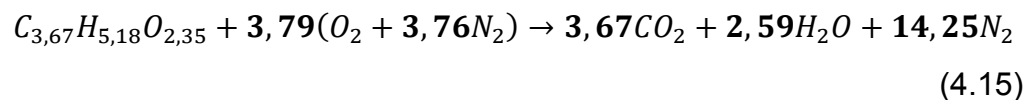
² Energia requerida determinada por meio das propriedades do ar de secagem.

Utilizando os resultados da composição elementar da casca de cacau apresentados na Tabela 4.3, determinou-se a quantidade de ar estequiométrico, em volume (%), necessário para consumir a casca de cacau (Tabela 4.5).

Tabela 4.19 - Composição química elementar da casca de cacau, base seca, em unidades de massa e volume

Composição elementar	Massa (%)	Peso molar (kg.kmol ⁻¹)	Volume (%)
Carbono	44,0	12	3,67
Hidrogênio	5,18	1	5,18
Oxigênio	37,57	16	2,35
Cinzas	12,63		

Sendo que para uma massa de 100 kg de casca de cacau, base seca, a estequiometria da reação de combustão pode ser escrita como a Equação 4.15.



Sendo assim, a razão ar-combustível estequiométrica é de $\lambda_{est} = 5,99$ g de ar/g de casca de cacau.

Na Tabela 4.6 encontram-se os dados utilizados nos cálculos e os resultados encontrados para o dimensionamento.

Tabela 4.20 - Dados e resultados do dimensionamento do gaseificador

Parâmetro	Simbolos	Unidade	Valor
Taxa de energia total de saída do combustor	Q_{sc}	$MJ.h^{-1}$	118,4
Vazão mássica ar quente saída combustor	\dot{m}_{aq}	$kg.h^{-1}$	4.259,6
Eficiência do reator	η	Decimal	0,70
PClu - casca cacau 12% (b.u)	PClu	$MJ.kg^{-1}$	13,94
Vazão mássica de combustível	\dot{m}_b	$kg.h^{-1}$	13,84
Vazão mássica de cinzas	\dot{m}_c	$kg.h^{-1}$	1,53
Taxa de energia de entrada no reator	\dot{Q}_e	$MJ.h^{-1}$	171,6
Taxa total de energia na saída do reator	\dot{Q}_s	$MJ.h^{-1}$	120,12
Fator de ar para a gaseificação	FA	%	25
Vazão mássica de ar primário gaseificador	\dot{m}_{p_g}	$kg.h^{-1}$	13
Vazão mássica do gás de síntese	\dot{m}_g	$kg.h^{-1}$	25,31
Vazão mássica de ar primário no combustor	\dot{m}_{p_c}	$kg.h^{-1}$	4.234,3
Superfície livre da grelha	S_l	m^2	0,022
Área total da grelha	S_t	m^2	0,11
Raio da grelha	r_{gre}	M	0,187
Eficiência térmica do sistema	η_t	%	62,3
Altura mínima do reator (51 h de operação)	H_{min}	M	29

Adotando-se a proporção de superfície aberta em relação à superfície total da grelha de 20% a área livre da grelha e a área total da grelha foram de 0,022 m² e 0,11 m², respectivamente. Santos (2003) obteve área livre da grelha de 0,0167 m² para um reator de gaseificação de fluxo concorrente conectado a um combustor, utilizando lenha de eucalipto em pedaços (aproximadamente 4,0 cm de largura) como combustível.

A eficiência térmica do sistema proposto foi de 62,3%. Segundo Silva Neto et al. (2001), o mesmo secador (Secador Plataforma CEPEC) utilizando uma fornalha como gerador de calor, apresenta eficiência de 17,7%. Santos (2003) usando lenha de eucalipto como combustível, para gerar ar quente em um gaseificador contracorrente, obtiveram eficiência entre 56 a 71% durante operação do sistema.

A altura mínima do reator obtida foi de 29 m, ao considerar uma operação de 51 h, conforme Silva Neto et al. (2001), tempo que obtiveram quando realizaram a secagem das amêndoas de cacau em um secador

plataforma CEPEC (operando com fornalha). Por causa desse valor é impraticável realizar o processo com apenas um carregamento, sendo assim seria mais indicado realizar o processo de geração de calor utilizando um sistema de recarga, que realizasse carregamentos contínuos do reator, possibilitando a construção do reator com uma altura menor.

4. CONCLUSÕES

O dimensionamento apresentou parâmetros como taxas de energias, vazões mássicas, área da grelha e altura mínima do reator em conformidade com os dimensionamentos de sistemas similares utilizando outros combustíveis. Sendo assim, o sistema proposto pode ser construído e empregado como gerador de calor nas unidades produtoras de amêndoas de cacau em substituição às fornalhas. Porém deve-se levar em consideração a necessidade de desenvolver um sistema de recarga da biomassa para atender a demanda energética durante o processo de secagem e de um sistema de limpeza da grelha, devido a grande produção de cinzas.

CAPÍTULO 5

EFEITO DO AQUECIMENTO DIRETO DO AR UTILIZANDO UM SISTEMA GASEIFICADOR/COMBUSTOR NA QUALIDADE DAS AMÊNDOAS DE CACAU

1. INTRODUÇÃO

A formação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) em alimentos tem sido objeto de preocupação nos últimos anos, pois está diretamente relacionado com a segurança alimentar. Os HPAs representam uma importante classe de carcinógenos químicos que fazem parte do dia a dia do homem em função da poluição ambiental, exposição ocupacional e da alimentação (CAMARGO et al., 2006; CAMARGO; TOLEDO, 2002a).

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) representam um importante grupo de compostos químicos, muitos dos quais têm elevado potencial carcinógeno, dentre estas substâncias, destaca-se o benzo(a)pireno, por ter sido o primeiro hidrocarboneto a ser identificado e reconhecido como carcinógeno, e ser considerado um indicador da presença de outros do grupo (CAMARGO; TOLEDO, 2002b; CATON et al., 2010). São formados principalmente devido à combustão incompleta, a altas temperaturas, de matérias orgânicas e estão distribuídos no meio ambiente em baixas concentrações; podem ser encontrados em plantas terrestres e aquáticas, solos, sedimentos, águas e na atmosfera. A contaminação nos alimentos é normalmente resultado da defumação, contaminação dos solos, poluição do ar e da água, processos de cozimento ou preparação de alimentos e dos aditivos alimentares (GARCIA-FALCÓN et al., 1999; KISHIKAWA et al., 2003; LAGE-YUSTY; CORITZO-DAVIÑA, 2005).

Os HPAs são provenientes, principalmente, de processamentos como defumação, secagem, torrefação, alguns tipos de cozimento, material de embalagem, assim como da poluição ambiental (SPEEER et al., 1990; TFOUNI et al., 2007). Esses contaminantes ocorrem em diferentes grupos de alimentos e bebidas incluindo vegetais, frutas, carnes, óleos e gorduras, cereais e derivados, produtos lácteos, café, chá, entre outros (SPEEER et al., 1990;

GARCIA-FALCÓN et al., 1999; CAMARGO; TOLEDO, 2002a; CAMARGO; TOLEDO, 2002b; KISHIKAWA et al., 2003; LAGE-YUSTY; CORITZO-DAVIÑA, 2005; CAMARGO et al., 2006; TFOUNI et al., 2007; CATON et al., 2010).

Recentemente, o Regulamento da União Européia nº 835/2011 da comissão de 19 de Agosto de 2011, publicado no Diário Oficial da União Europeia, alterou o Regulamento (CE) nº 1881/2006 no que diz respeito aos teores máximos de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos presentes nos gêneros alimentícios. Os teores máximos para amêndoas de cacau e produtos derivados permitido pela legislação europeia é de 5 µg/kg de gordura a partir de 01/04/2013 para o benzo(a)pireno; e 35,0 µg/kg de gordura a partir de 01/04/2013 até 31/03/2015 e 30,0 µg/kg de gordura a partir de 01/04/2015 para a soma de benzo(a)pireno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno e criseno (UE, 2011).

O cacauero, planta originária da região amazônica, de onde se obtém o cacau e pertence à família *Esterculiaceae*, gênero *Theobroma*, espécie *Theobroma cacao* L. (EFRAIM et al., 2010).

O Brasil é o sexto maior produtor de amêndoas de cacau do mundo, sendo que a maior parte é proveniente do Estado da Bahia, seguido por Pará e Rondônia. O cacau é comercializado em amêndoas (sementes fermentadas e secas), seja para a exportação ou agroindustrialização. A partir das amêndoas de cacau obtêm-se o líquido, manteiga, torta e pós de cacau, matérias-primas para o processamento do chocolate e outros produtos a base de cacau (EFRAIM et al., 2010).

A produção de amêndoas de cacau no País é estimada em 250 mil toneladas por ano, sendo completamente absorvida pela indústria de alimentos, farmacêutica e cosmética nacional. Atualmente o Brasil não é auto-suficiente, cerca de 60% das amêndoas processadas são importadas de outros países produtores.

Durante o processamento do cacau para a obtenção dos seus derivados, a matéria-prima passa por diversas etapas, entre elas secagem e torrefação, processos estes que podem resultar na formação de HPAs.

Segundo Silva Neto et al. (2001), no Brasil, utilizam-se basicamente os seguintes métodos ou a combinação destes para a secagem do cacau: secagem em Barcaças, Terreiros e Estufa solar e; secagem em Secador

Tubular, Plataforma CEPEC, Secadores rotativos Pinhalense, Secador Zaccaria, Secador Burareiro 2 x 2 m com fornalha de alvenaria, Secador Burareiro 2 x 2 m com fornalha de ferro e Secador Burareiro 3 x 3 m com fornalha de ferro.

Para os secadores citados, segundo Cunha e Serôdio (1991), com exceção dos secadores destinados para a secagem natural, os demais operam acoplados a uma fornalha com sistema de aquecimento indireto do ar de secagem para evitar a contaminação das amêndoas de cacau com fumaça.

A secagem por meio de secadores acoplados a fornalhas tem a vantagem de reduzir o tempo de secagem, viabilizar a secagem em regiões úmidas, em períodos de chuvas e reduzir a interferência de condições climáticas sobre a qualidade do cacau quando comparada com a secagem solar e de convecção natural, porém, se mal conduzida, pode comprometer a qualidade das amêndoas em relação à desigualdade de secagem ou comprometer os atributos sensoriais característico das amêndoas de cacau pela impregnação de odores provenientes dos diferentes tipos de combustíveis usados para o aquecimento das fornalhas.

Os sistemas de aquecimento de ar para secadores de produtos agrícolas podem ser agrupados, quanto à operação, em dois grupos: com aquecimento direto do ar e com aquecimento indireto do ar. Os sistemas de aquecimento indireto apresentam menor eficiência energética quando comparada aos sistemas de aquecimento direto do ar ou fogo direto, por ocorrerem maiores perdas de energia térmica.

A gaseificação é uma alternativa aos sistemas geradores de calor convencionais, utilizados para secar as amêndoas de cacau, pois apresenta alta eficiência térmica e diminui os impactos ambientais, principalmente quando utilizam-se os resíduos da produção como combustível, mas para isso precisa-se controlar os processos envolvidos para evitar a contaminação do produto com compostos presentes na fumaça tanto para sistemas com aquecimento direto do ar como para sistemas com aquecimento indireto do ar .

Com base no exposto é de suma importância o estudo de alternativas aos sistemas tradicionais para aquecimento de ar de secagem das amêndoas de cacau que visem inserir cada vez mais as energias renováveis na cadeia produtiva do cacau, mas para isso precisam-se voltar às atenções para a

qualidade físico-química do produto, principalmente quando se trata de parâmetros que estão relacionados com a saúde do consumidor.

Considerando-se a não disponibilidade de dados quanto à contaminação, por HPAs, em amêndoas de cacau, produzidas em sistemas de secagem convencionais e, principalmente, em sistemas que utilizam geradores de calor alternativos como o gaseificador/combustor, o presente estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a qualidade das amêndoas produzidas, quanto à presença de HPAs, utilizando um sistema alternativo de maior eficiência térmica e dois combustíveis alternativos (casca de cacau e eucalipto em *chips*) para a geração de calor.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Obtenção das amostras de amêndoas de cacau

As amostras de amêndoas de cacau secas foram obtidas conforme fluxograma de beneficiamento experimental do cacau apresentado na Figura 5.1. Esse processo de beneficiamento ou de pré-processamento do cacau iniciou-se com a coleta dos frutos na plantação experimental do IF Baiano/Campus Uruçuca e finalizou-se com a secagem das amêndoas utilizando o sistema de secagem proposto em Viçosa, MG, na Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde os frutos foram beneficiados seguindo o procedimento convencional que os produtores da região Sul da Bahia realizam para obter amêndoas de cacau secas (Figura 5.1).

Na área de armazenamento de produtos agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA/UFV), realizou-se a seleção dos frutos, em seguida os frutos foram cortados com auxílio de uma faca e as sementes separadas, depois foram levadas para um cocho de fermentação adaptado (Figura 5.1), onde ficaram por 48h, sem revolvimento da massa, para que ocorresse a primeira fermentação (anaeróbica) e mais 72h, com revolvimento a cada 24h, para que ocorresse a segunda fermentação (aeróbica). Após as fermentações as amêndoas foram distribuídas sobre as bandejas do secador modelo PD-25 da Polidryer que foi acoplado ao sistema gaseificador/combustor proposto.



Figura 5.15 - Esquema experimental para obtenção das amostras de amêndoas de cacau por meio dos diferentes tratamentos.

A temperatura de secagem foi controlada utilizando o termômetro do secador e um termopar tipo k, que foi posicionado na tubulação de entrada entre o misturador e o secador.

O ar quente produzido no sistema gaseificador/combustor foi transportado para o interior do secador por meio de um sistema de ventilação composto por um motor elétrico trifásico da marca Weg, de 1,5 cv, acoplado a um ventilador radial e a um inversor de frequência para controlar a velocidade do motor elétrico e consequentemente a vazão de ar, conforme Rezende (2012). Os inversores de frequência foram instalados nos dois sistemas de ventilação montados, que indiretamente controlou a temperatura do ar de secagem, assim como a temperatura da zona de combustão, conforme Rezende (2012).

Na entrada do secador foi acoplado uma porta tipo guilhotina para regular o fluxo de ar nos momentos que a temperatura do ar e as

concentrações de CO₂ e CO apresentaram valores elevados. Esse procedimento foi realizado durante a tomada de dados para evitar a contaminação das amêndoas durante as condições de instabilidade do sistema.

As amêndoas ficaram expostas ao ar de secagem proveniente da gaseificação da casca de cacau e de eucalipto por um período de aproximadamente 60 min e finalizou-se a secagem, utilizando a energia solar e a convecção natural, até as amêndoas atingirem o teor de água de 7% (b.u) durante dois dias. Além das amostras referentes ao tratamento 1 (T1) e ao tratamento 2 (T2) uma terceira amostra foi destinada à secagem solar tratamento 3 (T3), a qual foi considerada como amostra branca para identificar contaminações com HPAs proveniente do próprio ambiente.

Os tratamentos de secagem realizados com as amêndoas de cacau foram realizados em três repetições e as análises cromatográficas foram avaliadas em triplicata.

2.2. Análise de HPAs nas amêndoas

As amostras de amêndoas obtidas após a secagem, realizada utilizando casca de cacau e *chip* de eucalipto como combustíveis no sistema gaseificador/combustor, foram avaliadas quanto à presença de HPAs. A determinação foi feita por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE) com Detecção por Fluorescência conforme a metodologia do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2004), composta pelas etapas de extração, limpeza e detecção por CLAE.

2.2.1. Extração e limpeza

As amostras homogeneizadas e pesadas (10g) foram adicionados 100 mL de ciclohexano e a mistura foi homogeneizada por 60 min em um agitador orbital. O material foi filtrado e transferido para um funil de separação onde foram feitas 3 partições sucessivas com dimetilformamida:água (9:1, v/v) (50 mL, 25 mL e 25 mL). A fase orgânica foi descartada e foram adicionados 100 mL de Na₂SO₄a 1%. Foram feitas 3 partições sucessivas com ciclohexano (50 mL, 35 mL e 35 mL). Descartou-se a fase aquosa. Transferiu-se o ciclohexano

para um balão de fundo chato, secando com sulfato de sódio anidro durante a transferência, concentrou-se a solução em evaporador rotativo, a 40°C, até secura total.

Para limpeza do extrato foi utilizada uma coluna de vidro empacotada com sílica gel. A coluna foi empacotada, com auxílio de ciclohexano, utilizando-se 5 g de sílica gel (desativada com 15% de água) e sulfato de sódio anidro no topo da coluna.

O extrato foi suspenso em ciclohexano e aplicado no topo da coluna e eluído com 85 mL de ciclohexano. Descartaram-se os primeiros 10 mL eluídos e o restante foi coletado em balão de fundo chato e concentrado em um evaporador rotativo a 40°C até secura. O resíduo foi então suspenso em 2 mL de acetonitrila e filtrado em filtro de 0,45 µm para posterior injeção no cromatógrafo.

2.2.2. Análise cromatográfica

A técnica empregada para análise foi a cromatografia líquida de alta eficiência com detecção por fluorescência. Foi utilizado um sistema cromatográfico Shimadzu composto de bomba modelo LC-20AT, degaseificador on-line DGU-20A5, injetor automático SIL-20A (volume de injeção de 30 µL), forno de coluna CTO-20A e detector RF-10A xl. Os dados foram adquiridos e processados através do software LCsolution. Para a separação dos compostos foi utilizada uma coluna C18 (Vydac 201 TP54, 25 x 4,6 cm, 5 µm, estabilizada a 30°C) e eluição a uma vazão de 1 mL/min utilizando fase móvel composta por A: acetonitrila, e B: água no seguinte gradiente: 0 a 20 min: 70% a 75% de A, 20 a 35 min: 75% a 100% de A, 35 a 55 min: 100% de A, 55 a 60 min: 100% a 70% de A, 60 a 75 min: 70% de A. A detecção foi feita em comprimentos de onda de 274 nm (excitação) e 414 nm (emissão) para o benzo(a)antraceno e criseno e de 290 nm (excitação) e 430 nm (emissão) para o benzo(b)fluoranteno e benzo(a)pireno.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

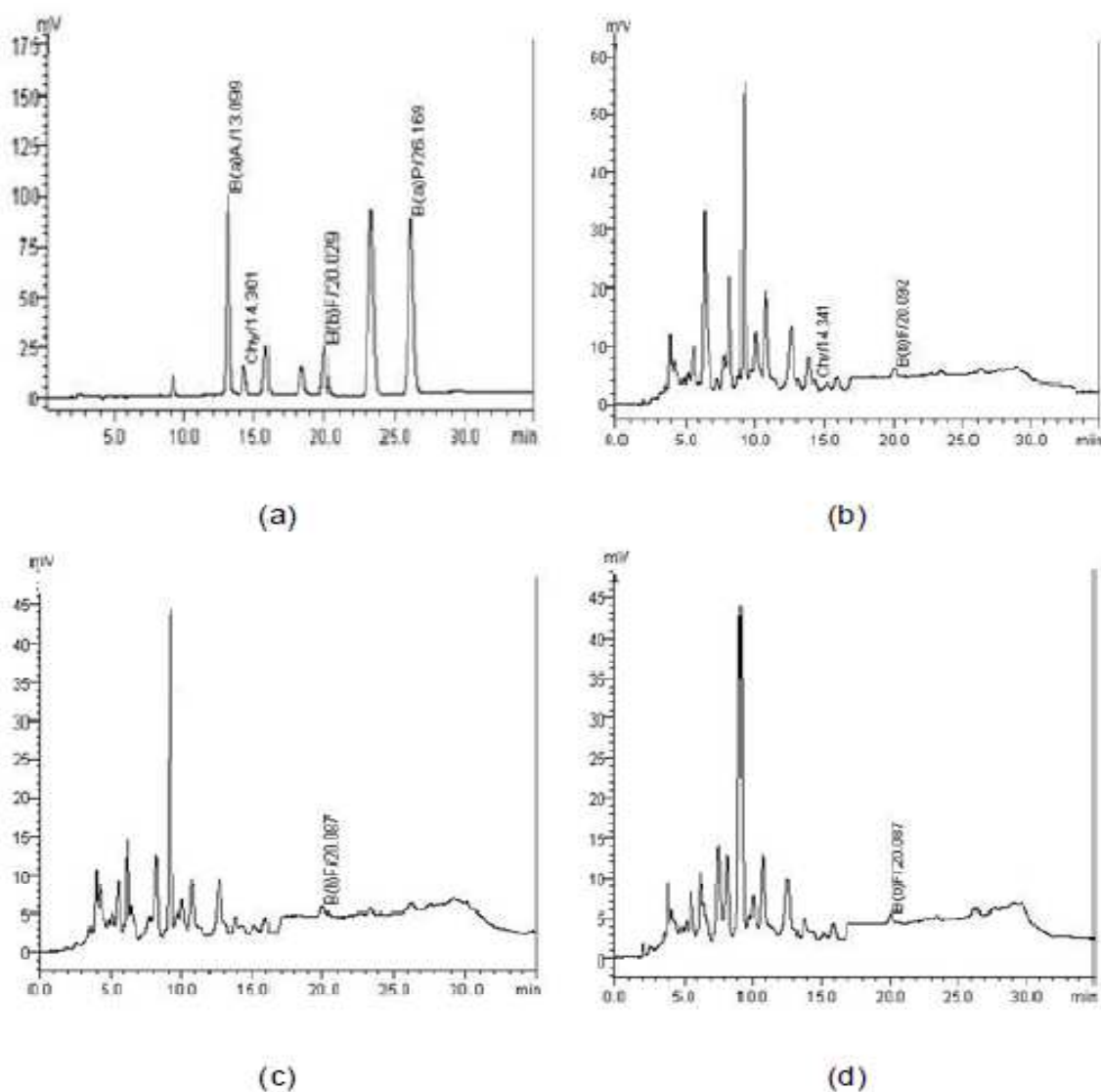
O cromatograma típico das soluções padrões e cromatogramas referentes às detecções de HPAs nas amostras de amêndoa de cacau obtidas por meio dos tratamentos (T1, T2 e T3) foram apresentados na Figura 5.2, em que T1 – secagem das amêndoas por meio do calor gerado de um sistema gaseificador/combustor utilizando casca de cacau como combustível; T2 – secagem das amêndoas por meio do calor gerado de um sistema gaseificador/combustor utilizando *chips* de eucalipto como combustível; e T3 – secagem das amêndoas utilizando apenas a energia solar.

Detectou-se a presença de Benzo(b)fluoranteno nos T1, T2 e T3 apenas nas amostras do T1 foi detectada a presença de Criseno e os demais HPAs (Benzo(a)antraceno, e Benzo(a)pireno) não foram detectados.

O T1 foi o que apresentou maior nível de contaminação referente aos HPAs detectados, com um somatório de $0,26 \mu\text{g.kg}^{-1}$ (B(b)F + Chy), teor médio individual de $0,14 \mu\text{g.kg}^{-1}$ para o B(b)F e $0,12$ para o Chy. Sendo que esses valores e dos demais tratamentos ficaram bem abaixo dos níveis permitidos pela legislação europeia para amêndoas de cacau e produtos derivados.

Nas amostras referentes ao T3 (secagem das amêndoas utilizando apenas a energia solar) foi detectado $0,13 \mu\text{g.kg}^{-1}$ de B(b)F, nas amostras referentes ao T2 (secagem das amêndoas por meio do calor gerado de um sistema gaseificador/combustor utilizando *chips* de eucalipto como combustível) foi detectado $0,13 \mu\text{g.kg}^{-1}$ de B(b)F e nas amostras referentes ao T1 (secagem das amêndoas por meio do calor gerado de um sistema gaseificador/combustor utilizando casca de cacau como combustível) foi detectado $0,14 \mu\text{g.kg}^{-1}$ de B(b)F, ou seja, pode-se afirmar que não houve contaminação por HPAs nos T1 e T2, pois a contaminação detectada foi devido ao ambiente (T3) que foi utilizado como branco e apresentou a mesma concentração de B(b)F das amostras obtidas pelos T1 e T2.

Já o T1 contribuiu para a contaminação de $0,12 \mu\text{g.kg}^{-1}$ de Criseno. Dentre as possibilidades que contribuíram para essa contaminação foi o combustível utilizado, que para o T1 foi a casca de cacau.



Concentração médias de HPAs ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)			
HPA	T1	T2	T3
Benzo(a)pireno - B(a)P	Nd	Nd	Nd
Benzo(a)antraceno - B(a)A	Nd	Nd	Nd
Benzo(b)fluoranteno - B(b)F	0,14 ($\pm 0,06$)	0,13 ($\pm 0,01$)	0,13 ($\pm 0,01$)
Criseno - Chy	0,12 ($\pm 0,03$)	Nd	Nd

Nd (não detectado) $< 0,1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Figura 5.16 - Cromatogramas por CLAE e concentrações: (a) soluções-padrões: B(a)A - benzo(a)antraceno, Chy - criseno, B(b)F - benzo(b)fluoranteno, B(a)P - benzo(a)pireno; (b) amostra do T1 detectando presença de Chy e B(b)F; (c) amostra do T2 detectando B(b)F; e (d) amostras do T3 detectando B(b)F e Tabela com o teor de HPAs nas amêndoas secas por meio dos tratamentos empregados.

4. CONCLUSÕES

As amêndoas de cacau obtidas por meio dos tratamentos avaliados neste estudo não apresentaram níveis elevados de HPAs, mas abaixo do permitido pela legislação europeia para este tipo de produto.

Dessa forma, as biomassas podem ser utilizadas como combustíveis em sistemas com geração direta de calor. O sistema gaseificador/combustor, utilizado como gerador de calor, pode ser alternativa mais eficiente para substituir as fornalhas, geralmente empregadas em secadores de cacau.

O processo de secagem, usando ar aquecido diretamente, precisa ser bem controlado, pois, durante o processo estudado, houve momentos de instabilidade, em que o ar era contaminado com fumaça. Com isso, estudos mais detalhados precisam ser realizados para melhorar os parâmetros do processo de secagem e identificar a qualidade sensorial das amêndoas secas, obtidas por meio do ar aquecido diretamente, ou seja, quando não há utilização de trocadores de calor.

3. CONCLUSÕES GERAIS

Uma das alternativas de aproveitamento energético da casca do fruto de cacau estudada pode solucionar de forma sustentável parte dos problemas relacionados com o não aproveitamento da biomassa. Tal mecanismo pode ser utilizado como alavanca estratégica para erradicar o desmatamento da Mata Atlântica, em razão, principalmente, da necessidade, por exemplo, de se utilizar lenha nos secadores para secar o fruto do cacau como combustível, incentivando a busca por soluções sustentáveis dos problemas econômicos que atualmente os produtores de cacau estão enfrentando.

Conhecendo as particularidades apresentadas sobre o cacau, como a sua cadeia produtiva, as frações que compõem a casca do fruto, e sobre os processos de transformação da biomassa, bem como as tecnologias de conversão de energia mais importantes e pesquisadas mundialmente, pode-se inferir que a transformação da energia presente na casca de cacau em combustíveis e, ou, energia útil é possível.

Nas unidades de beneficiamento do cacau, a etapa do processo que demanda mais energia é a da secagem das amêndoas, sendo as melhores vias para transformar a casca de cacau em calor são a combustão e a gaseificação, pois são as vias de transformação que mais se enquadram à realidade das fazendas.

A gaseificação, em particular, desempenha papel de extrema importância para o desenvolvimento energético de forma sustentável. Apesar de boa eficiência, poucos estudos foram encontrados aplicando a gaseificação como sistema gerador de calor para aquecimento do ar de secagem de produtos agrícolas.

A tecnologia da gaseificação de biomassas pode trazer benefícios, como redução no balanço de emissão de gases do efeito estufa, desenvolvimento econômico regional, desenvolvimento social e agrícola e fornecimento regular de energia à cacaucultura, que necessita de alternativas que agreguem valor aos subprodutos da sua produção.

Dessa forma, a gaseificação da casca de cacau precisa ser aprimorada, principalmente no beneficiamento dessa biomassa para ser

utilizada como combustível, já que a secagem da casca utilizando secadores artificiais torna-se inviável.

Outros processos de beneficiamento da matéria-prima precisam ser estudados como a prensagem, esmagamento, briquetagem, extrusão etc., para reduzir o teor de água da casca de cacau e aumentar a sua densidade, facilitando a utilização dessa casca como combustível.

REFERÊNCIAS

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

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

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica no Brasil**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par1_cap2.pdf>. Acesso em: 09 maio 2010.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: carvão vegetal – análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8633**: carvão vegetal – determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D-2015-66, ASTM D-167-73, D-1762-64**. Philadelphia, PA, 1977.

AZNAR, M.P.; CABALLERO, M.A.; GIL, J.; MARTIN, J.A.; CORELLA, J. Commercial steam reforming catalysts to improve biomass gasification with steam–oxygen mixtures. 2. Catalytic tar removal. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 37, p. 2668-2680, 1998.

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.

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

BRAMMER, J.G.; BRIDGWATER, A.V. The influence of feedstock drying on the performance and economics of a biomass gasifer-engine CHP system. **Biomass and Bioenergy**, v. 22, p. 271-281, 2002.

BRIDGWATER, A.V.; MEIER, D.; RADLEIN, D. An overview of fast pyrolysis of biomass. **Organic Geochemistry**, v. 30, p. 1479-1493, 1999.

CAMARGO, M.C.R.; TFOUNI, S.A.V.; VITORINO, S.H.P.; MENEGÁRIO, T.F.; TOLEDO, M.C.F. Determinação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) em guaraná em pó (*Paullinia cupana*). **Ciênc. Technol. Aliment.**, Campinas, v. 26, n. 1, p. 230-234, 2006.

CAMARGO, M.C.R.; TOLEDO, M.C.F. Avaliação da contaminação de diferentes grupos de alimentos por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 5, n. 76, p. 19-26, 2002a.

CAMARGO, M.C.R.; TOLEDO, M.C.F. Chá-mate e café como fontes de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) na dieta da população de Campinas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 22, n. 1, p. 49-53, 2002b.

CATON, P.A.; CARR, M.A.; KIM, S.S.; BEAUTYMAN, M.J. Energy recovery from waste food by combustion or gasification with the potential for regenerative dehydration: a case study. **Energy Conversion and Management**, v. 51, p. 1157-1169, 2010.

COMISSÃO EXECUTIVA DO PLANO DA LAVOURA CACAUEIRA – CEPLAC. **Cacau - Informações de pesquisa (09/11/2010 a 02/01/2012)**. Brasília, 2012.

CHAVES, M.C.V.; GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.; LEITE, J.C.A.; SILVA, F.L.H. Caracterização físico-química do suco da acerola. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 4, n. 2, 2004.

CHEPOTE, R.E.; SANTANA, J.L.C.; DeLEON, F. Como utilizar composto de casca de cacau na adubação do cacauero. **Difusão Agropecuária**, Ilhéus, v. 2, n. 1, p. 11-17, 1990.

COMMISSION OF THE EUROPEAN UNION – CEU. **Working paper: production capacity of the renewable energies in the European Union.** Commission staff working document. Disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/stoa/publications/studies/stoa115_en.pdf>. Acesso em: 2003.

CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da co-geração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. 2001. 174 f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. Caracterização da biomassa. In: _____. **Biomassa para energia**. 2.ed. Campinas: Unicamp, 2009. Cap. 2, p. 31-62.

CUMMERA, K.; BROWN, R.C. Indirectly heated biomass gasification using a latent-heat ballast - Part 3: refinement of the heat transfer model. **Biomass & Bioenergy**, v. 28, p. 321-330, 2005.

CUNHA, J.; SERÔDIO, R.S. **Tecnologia disponível para o beneficiamento e armazenamento do cacau**. Ilhéus: CEPLAC-CEPEC, 1991. 45 p.

CZERNIK, S.; FRENCH R.J. Production of hydrogen from plastics by pyrolysis and catalytic steam reform. **Energy Fuel**, v. 20, p. 754-758, 2006.

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

DEVI, L.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.J.J.G. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, p. 125-140, 2003.

DONKOH, A.; ATUAHENE, C.C.; WILSON, B.N.; ADOMAKO, D. Chemical composition of cocoa pod husk and its effect on growth and food efficiency in broiler chicks. **Anim. Feed Sci. Technol.**, v. 35, p. 161-169, 1991.

EFRAIM, P. **Estudo para minimizar as perdas de flavonóides durante a fermentação de sementes de cacau para produção de chocolate**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

EFRAIM, P.; PEZOA-GARCÍA, N.H.; JARDIM, D.C.P.; NISHIKAWA, A.; HADDAD, R.; EBERLIN, M.N. Influência da fermentação e secagem de amêndoas de cacau no teor de compostos fenólicos e na aceitação sensorial. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, v. 30, n. 1, p. 142-150, 2010.

EFRAIM, P.; PEZOA-GARCÍA, N.H.; JARDIM, D.C.P.; NISHIKAWA, A.; HADDAD, R.; EBERLIN, M.N. Influência da fermentação e secagem de amêndoas de cacau no teor de compostos fenólicos e na aceitação sensorial. **Ciênc.Tecnol.Aliment.**, v. 30, n. 1, p. 142-150, 2010.

FAAIJ, A.P.C. Bioenergy in Europe: changing technology choices. **Energy Policy**, v. 34, p. 322-342, 2006.

FERREIRA, S.; MOREIRA, N.A.; MONTEIRO, E. Bioenergy overview for Portugal. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 1567-1576, 2009.

FIGUEIRA, A.; JANICK, J.; BEMILLER, J.N. New products from *Theobroma cacao*: seed pulp and pod gum. In: JANICK, J.; SIMON, J.E. **New crops**. New York: Wiley, 1993. p. 475-478.

FIGUEIREDO, F.L.; FERNANDES, F.; PETRUCCI, A.L.; FILHO, R.F.; MARSURA, M. Produção de energia elétrica através da biomassa em sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com capacidade de 50 kVA. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 165-174, 2012.

GABRA, M.; PETTERSSON, E.; BACKMAN, R.; KJELLSTROM, B. Evaluation of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane residue - Part 1: gasification of bagasse. **Biomass & Bioenergy**, v. 21, p. 351-369, 2001.

GARCIA-FALCÓN, M.S.; GONZÁLEZ-AMIGO, S.; LAGE-YUSTY, M.A.; SIMAL-LOZANO, J. Determination of benzo(a)pyrene in some Spanish commercial smoked products by HPLC-FL. **Food Additives and Contaminants**, v. 16, n. 1, p. 9-14, 1999.

GERHARD, S.C.; WANG, D.N.; OVEREND, R.P.; PAISLEY, M.A. Catalytic conditioning of synthesis gas produced by biomass gasification. **Biomass & Bioenergy**, v. 7, p. 307-313, 1994.

GIL, J.; CORELLA, J.; AZNAR, M.P.; CABALLERO, M.A. Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: effect of the type of gasifying agent on the product distribution. **Biomass & Bioenergy**, v. 17, p. 389-403, 1999.

GONÇALVES, M.F.; CARNEIRO, W.M.A.; SENA, J.V.C. O mercado brasileiro de cacau: Mudanças no perfil do comércio internacional nos últimos vinte anos. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL – REGIONAL NORDESTE, 4, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: SOBER/NE, 2009.

GRETHLEIN, A.J.; JAIN, M.K. Bioprocessing of coal-derived synthesis gases by anaerobic bacteria. **Trends in Biotechnology**, v. 10, p. 418-423, 1993.

HAM, K. **Handbook of biomass gasification**. Biomass Technology Group, 2005.

HANAOKA, T.; YOSHIDA, T.; FUJIMOTO, S.; KAMEI, K.; HARADA, M.; SUZUKI, Y. Hydrogen production from woody biomass by steam gasification using a CO₂ sorbent. **Biomass & Bioenergy**, v. 28, p. 63-68, 2005.

HIGMAN, C.; VAN DER BURGT, M. **Gasification**. 2.ed. Gulf Professional Publishing, 2008. 456 p.

HIGMAN, C.; BURGT, V.D.M. **Gasification**. Burlington, MA: Elsevier, 2003.

HOFBAUER, H.; FLECK, T.; VERONIK, G.; RAUCH, R.; MACKINGER, H.; FERCHER, E. The FICFB - gasification process. In: BRIDGWATER, A.V.; BOOCOOCK, D.G.B. **Developments in thermochemical biomass conversion**. London: Blackie, 1997. p. 1016-1025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Sistema IBGE de recuperação automática SIDRA**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela>>. Acesso em: 20 nov. 2012.

INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION – ICCO. Disponível em: <<http://www.icco.org>>. Acesso em: 20 nov. 2012.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ – IAL. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. 1: Métodos físico-químicos para análise de alimentos. 4.ed. São Paulo: IMESP, 2004.

JANNUZZI, G.M.; SWISHER, J.N.P. **Planejamento integrado dos recursos energéticos**: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis. Campinas: Autores Associados, 1997. 246 p.

JENKINS, B.M.; GOSS, J.R.; CHANCELLOR, W.J.; CAMACHO, I.R. Variation of engine performance with reactor size for a rice hull fueled gasification system. **ASAE Paper**, p. 90-6076, 1990.

KINOSHITA, C.M.; TURN, S.Q.; OVEREND, R.P.; BAIN, R.L. Power generation potential of biomass gasification systems. **Journal of Energy Engineering**, v. 23, p. 88-99, 1997.

KISHIKAWA, N.; WADA, M.; KURODA, N.; AKIYAMA, S.; NAKASHIMA, K. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection. **Journal of Chromatography B**, v. 789, p. 257-264, 2003.

LAGE-YUSTY, M.A.; CORITZO-DAVIÑA, J.L. Supercritical fluid extraction and high-performance liquid chromatography-fluorescence detection method for polycyclic aromatic hydrocarbons investigation in vegetable oil. **Food Control**, v. 16, n. 1, p. 59-64, 2005.

LAJUS, B. **Estudo de alguns aspectos da tecnologia do cacau**. 1982. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

LI, C.; SUZUKI, K. Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification - an overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, p. 594-604, 2009.

LORA, E.S.; HAPP, J.F. Classificação e balanço térmico das fornalhas para a combustão de biomassa. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Manaus: EDUA/EFEL, 1997. p. 91-132.

LORA, E.S.; ANDRADE, R.V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 777-788, 2009.

LUCAS, C.; SZEWCZYK, D.; BLASIAK, W.; MOCHIDA, S. High-temperature air and steam gasification of densified biofuels. **Biomass & Bioenergy**, v. 27, p. 563-575, 2004.

MAGALHÃES, E.A. **Desenvolvimento e análise de uma folha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MARTIN, S.; SILVA, J.N.; FILHO, D.; DONZELES, S.M.L.; ZANATA, F.L.; SANTOS, R.R.S. Tensão térmica e taxa de reação em um reator para gaseificação de biomassa do tipo concorrente. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 2, p. 1, 2005.

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

MELO, F.A.O.; SILVA, J.N.; SILVA, J.S.; DONZELES, S.M.L. Avaliação da utilização da palha de café para o aquecimento indireto de ar para a secagem de produtos agrícolas. **Engenharia na Agricultura**, v. 13, n. 1, p. 49-50, 2005.

MELO, E.C.; LOPES, D.C.; CORRÊA, P.C. GRAPSI – Programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar. **Energia na Agricultura**, Viçosa, v. 12, n. 2, p. 154-162, 2004.

MELO, F.A.O.; SILVA, J.N.S.; SILVA, J.S.; SAMPAIO, C.P.; SILVA, D.F. Desenvolvimento e construção de fornalha para biomassa com sistema de aquecimento direto e indireto do ar. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 129-136, 2010.

MENDES, L.M.; SILVA, J.R.; TRUGILHO, P.F. **Gaseificação de carvão vegetal ou madeira para geração de energia em pequena escala**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998.

MISHIMA, D.; TATEDA, M.; IKE, M.; FUJITA, M. Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes. **Bioresour. Technol.**, v. 97, n. 16, p. 2166-2172, 2006.

NELLIST, M.E.; BRUCE, D.M. Heated-air grain drying. In: JAYAS, D.S.; WHITE, N.D.G.; MUIR, W.E. **Stored-grain ecosystems**. New York: Marcel Dekker, 1995. p. 609-659.

NUBER, F. Cálculo térmico de caldeira e fornalha. In: _____. **Manual do engenheiro**. Porto Alegre: Globo, 1075. v. 7, tomo II, p. 588-824.

OLIVEIRA, J.L. **Potencial energético da gaseificação de resíduos da produção de café e eucalipto**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLLERO, P.; SERRERA, A.; ARJONA, R.; ALCANTARILLA, S. The CO₂ gasification kinetics of olive residue. **Biomass & Bioenergy**, v. 24, p. 151-161, 2003.

PARIKH, L.; CHANNIWALA, S.A.; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, v. 86, p. 1710-1719, 2007.

PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia**. São Paulo: Fama, 1990.

PERES, S.; SCHULER, A.; ALMEIDA, C.H.T.; SOARES, M.B.; CAMPOS, R.; LUCENA, A. **Caracterização e determinação do poder calorífico e do número de cetano de vários tipos de biodiesel através da cromatografia**. Recife: Departamento de Engenharia Química/Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

PORTELLA, J.A.; EICHELBERGER, L. **Secagem de grãos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 194 p.

RAPAGNA, S.; JAND, N.; KIENNEMANN, A.; FOSCOLO, P.U. Steam gasification of biomass in a fluidised-bed of olivine particles. **Biomass & Bioenergy**, v. 19, p. 187-197, 2000.

REED, T.B.; DAS, A. **Handbook of downdraft gasifier engine systems**. Golden, Colo: Solar Technical Information Program, Solar Energy Research Institute, 1988. 140 p.

REZENDE, O.L.T. **O uso da lógica fuzzy no controle das temperaturas na zona de combustão do gaseificador do gaseificador e do ar quente de exaustão do conjunto gaseificador/combustor de biomassa**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ROCHA, J.D.; GÓMEZ, E.O.; PÉREZ, J.M.M.; CORTEZ, L.A.B.; SEYE, O.; GONZÁLEZ, L.E.B. The demonstration fast pyrolysis to biomass conversion in Brazil. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS, 7, 2002. **Proceedings...** 2002.

RODRIGUES, M.; WALTER, A.; FAAIJ, A. Co-firing of natural gas and biomass gas in biomass integrated gasification/combined cycle systems. **Energy**, v. 28, p. 1115-1131, 2003.

SANTOS, I.S. **Reator de gaseificação de biomassa em fluxo concorrente**. 2003. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SCHELL, D.J.; RILEY, C.J.; DOWE, N.; FARMER, J.; IBSEN, K.N.; RUTH, M.F. A bioethanol process development unit: initial operating experiences and results with a corn fiber feedstock. **Bioresour Technol.**, v. 91, p. 179-188, 2004.

SENA, J.V.C. Produção e efetivo do cacau no nordeste. Informe Rural Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste, ETENE. **Ambiente de Estudos Pesquisas e Avaliação - AEPA**, ano. 5, n. 2, 2011.

SILVA NETO, P.J.; MATOS, P.G.G.; MARTINS, A.C.S.; SILVA, A.P. **Sistema de produção para a Amazônia brasileira**. Belém: CEPLAC, 2001.

SILVA, J.S.; AFONSO, A.D.L.; LACERDA FILHO, A.F. Secagem e armazenamento de produtos agrícolas. In: SILVA, J.S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. p. 145-161.

SILVA, J.N.; CARDOSO SOBRINHO, J.; SAIKI, E.T. Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 2, 2004.

SILVA, J.N.; SAIKI, E.T.; VILARINHO, M.C.; CARDOSO SOBRINHO, J. Gaseificador/combustor a cavacos de lenha na secagem de café despulpado. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas. **CD-ROM...** Campinas, 2000.

SKOULOU, V.; SWIDERSKI, A.; YANG, W.; ZABANIOTOU, A. Process characteristics and products of olive kernel high temperature steam gasification (HTSG). **Bioresource Technology**, v. 100, p. 2444-2451, 2009.

SOBRINHO, J.C.; SILVA, J.N.; LACERDA FILHO, A.F.; SILVA, J.S.; CORRÊA, P.C. Avaliação de sistemas de secagem de café com aquecimento do ar em vapor de água, lenha de eucalipto e gás liquefeito de petróleo. **Rev. Bras. de Armaz.**, Viçosa, v. esp., n. 3, p. 25-34, 2001.

SODRÉ, G.A.; VENTURINI, M.T.; RIBEIRO, D.O.; MARROCOS, P.C.L. Extrato da casca do fruto do cacauzeiro como fertilizante potássico no crescimento de mudas de cacauzeiro. **Rev. Bras. Frutic.**, v. 34, n. 3, p. 881-887, 2012.

SPEER, K.; STEEG, K.; HORTSMANN, P.; KHUN, T.; MONTAG, A. Determination and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in native vegetable oils, smoked fish products, mussels and oysters, and bream from the river Elbe. **J. of High Resolution Chromatography**, v. 13, p. 104-111, 1990.

SUKUMARAN, R.K.; SINGHANIA, R.R.S.; GINCY, M.M.; ASHOK, P. Cellulase production using biomass feed stock and its application in lignocellulose saccharification for bio-ethanol production. **Renewable Energy**, v. 34, p. 421-424, 2009.

SUN, S.; ZHAO, Y.; LING, F.; SU, F. Experimental research on air staged cyclone gasification of rice husk. **Fuel Processing Technology**, v. 90, p. 465-471, 2009.

SYAMSIRO, M.; SAPTOADI, H.; TAMBUNAN, B.H.; PAMBUDI, N.A.A. Preliminary study on use of cocoa pod husk as a renewable source of energy in Indonesia. **Energy for Sustainable Development**, 2011.

TEDESCO, M.J.; BOHHNEM, H.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

TFOUNI, S.A.V.; VITORINO, S.H.P.; TOLEDO, M.C.F. Efeito do processamento na contaminação de cana-de-açúcar e derivados por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 76-82, 2007.

TIJMENSEN, M.J.A.; FAAIJ, A.P.C.; HAMELINCK, C.N.; VAN, H.M.R.M. Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification. **Biomass & Bioenergy**, v. 23, p. 129-152, 2002.

UNION EUROPEIA – UE. Regulamento n. 835/2011 de La Comisión de 19 de agosto de 2011 que modifica el reglamento (CE) n. 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de hidrocarburos aromáticos policíclicos em los productos alimenticios. **Diário Oficial de la União Européia**, 20 ago. 2011.

VALARELLI, I.D. **Desenvolvimento e teste de uma fornalha a resíduos agrícolas, de fogo indireto para secadores de produtos agrícolas**. 1991. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2009. 659 p.

VAN, D.D.A.; VAN, D.J.; VERMEULEN, J.W. Ten residual biomass fuels for circulating fluidized-bed gasification. **Biomass & Bioenergy**, v. 20, p. 45–56, 2001.

VAN, Z.E.; WEISMANN, M.; BAKKER, R.R.; ELBERSEN, H.W.; REITH, J.H.; DEN, U.H. **Lignocellulosic ethanol, a second opinion**. Report 2GAVE-03.11. Netherlands Agency for Energy & Environment. Disponível em: <<http://www.novem.nl/default.asp?menuId¼10&documentId¼34649>>. Acesso em: 04 jun. 2005.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: UFPR, 2001. 186 p.

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

WANG, L.; WELLER, C.L.; JONES, D.D.; HANNA, M.A. Contemporary issue in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, p. 573-581, 2008.

WATANABE, M.; INOMATA, H.; ARAI, K. Catalytic hydrogen generation from biomass (glucose and cellulose) with ZrO₂ in supercritical water. **Biomass & Bioenergy**, v. 22, p. 405-410, 2002.

WYMAN, C. Biomass ethanol: technical progress, opportunities, and commercial challenges. In: SOCOLOW, R.; ANDERSON, D.; HARTE, J. **Annual Reviews**, Palo Alto, v. 24, p. 189-226, 1999.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Comum. Soil Sci. Plant Ananl.**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

YIN, X.L.; WU, C.Z.; ZHENG, S.P.; CHEN, Y. Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk. **Biomass & Bioenergy**, v. 23, p. 181-187, 2002.

ZAINAL, Z.A.; RIFAU, A.; QUADIR, G.A.; SEETHARAMU, K.N. Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. **Biomass & Bioenergy**, v. 23: p. 283-289, 2002.

ZANATTA, F.L.; SILVA, J.N.; TINÔCO, I.F.F.; OLIVEIRA FILHO, D.; MARTIN, S. Avaliação do conforto térmico em aviário aquecido com gaseificador de biomassa. **Engenharia na Agricultura**, v. 16, p. 270-284, 2008.

ZANATTA, F.L. **Desenvolvimento e avaliação de um gaseificador de biomassa e estudo do potencial de produção de biogás com resíduos agrícolas e da avicultura**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ZANATTA, F.L. **Gasificação de biomassa no aquecimento de aviários e sua relação com conforto térmico, qualidade do ar e desempenho produtivo de frangos de corte.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.