



UnB - Universidade de Brasília
Instituto de Química - Laboratório de Catálise



Nádia Alves Viana

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOMASSAS
RESIDUAIS FLORESTAIS DO CERRADO PARA
PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE POR MEIO DO
PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO**

BRASÍLIA – DF

2015



UnB - Universidade de Brasília
Instituto de Química - Laboratório de Catálise



Nádia Alves Viana

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOMASSAS
RESIDUAIS FLORESTAIS DO CERRADO PARA
PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE POR MEIO DO
PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Instituto de Química da Universidade de Brasília como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Químicas e Biológicas.

Orientadora: Prof. Dr^a. Grace Ferreira Ghesti

Brasília - DF

2015

NÁDIA ALVES VIANA

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOMASSAS
RESIDUAIS FLORESTAIS DO CERRADO PARA
PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE POR MEIO DO
PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Instituto de Química da
Universidade de Brasília como parte do requisito para
obtenção do título de Mestre em Tecnologias Químicas e
Biológicas.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Juliana Petrocchi Rodrigues- FGA/UnB
Examinadora Interna

Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale- EFL/UnB
Examinador Externo

Prof.^a Dr.^a Grace Ferreira Ghesti- IQ/UnB
Orientadora

Brasília, ____ de _____ de 2015.

Dedicatória

Dedico esse trabalho a todos aqueles que fizeram do meu sonho real, me proporcionando forças para ultrapassar os obstáculos, todos os dias da minha vida. Obrigada por tudo Deus, família, amigos, professores e colegas. Graças a vocês eu não fraquejei em nenhum momento dessa jornada.

Nádia Alves Viana

Agradecimentos

Se você está tendo o prazer de ler esta página da minha dissertação, então eu consegui superar mais um obstáculo da minha vida profissional.

Tenho uma coisa a te dizer: - Não foi fácil chegar até aqui...

Ser aprovada em todas as etapas de seleção do mestrado até a conclusão da minha dissertação foi um caminho longo e árduo. Não me lembro de ter passado por nenhuma etapa fácil, nem tranquila nos meus dias de mestranda.

Como diz a canção “Estrada” do grupo Cidade Negra: “ Você não sabe o quanto eu caminhei, pra chegar até aqui, percorri milhas e milhas antes de dormir, eu não cochilei...”

Primeiramente, quero agradecer ao Senhor Jesus por ser a minha luz e amigo fiel todos os dias da minha vida. Oh! Senhor Jesus! Cantarei louvores a ti até o último dia da minha VIDA! Agora em especial quero agradecer aos meus pais Joaquim da Silva Viana e Cleuza Alves Viana por terem me ensinado a juntar todas as pedras que eu achasse no caminho da minha vida, e com elas construir o meu próprio caminho. Obrigada pai e mãe por serem à base da minha estrutura e meu porto seguro, hoje e sempre. Quero agradecer a toda minha família por confiarem em mim, desde sempre e, principalmente a minha irmã Najadácea Viana por ter me auxiliado e me incentivado a acreditar em meu sonho de entrar na UnB e ser engenheira.

Agradeço muito a minha avó Lindaura Maria dos Reis por suas orações e súplicas para que eu chegasse até aqui. Muito Obrigada Vovó!

Agradeço com muito carinho e apreço a minha orientadora e eterna amiga Grace Ghesti, por ter aceitado orientar uma engenheira de coração e química de alma. Muito obrigada por todas as horas que esteve ao meu lado me orientando e me mostrando por qual caminho devia seguir. Todos os dias que convivi com você serão levados comigo em minha história de vida, pois você não atuou no meu roteiro como personagem coadjuvante, você foi à personagem PRINCIPAL.

Agradeço em especial ao professor e amigo Ailton Teixeira do Vale, por ter me aberto portas que me ajudaram a chegar até aqui, e, principalmente, por ter me cedido horas de seu tempo precioso para sanar minhas dúvidas. Quero agradecer também com muito apreço, ao professor Júlio L. de Macedo por ter me ensinado a manipular diversos equipamentos no laboratório, por todo ensino repassado a mim e por sempre me socorrer quando alguma coisa dava errada. Meu muito obrigado!

Agradeço aos professores Sílvia C. L. Dias e José A. Dias por todo conhecimento repassado a mim, e por todas as horas de descontração proporcionadas a mim.

Agradeço com muito respeito e carinho ao professor Carlos Alberto Gurgel pela presença em meu seminário e por todo ensino repassado a mim naquele dia, nunca mais irei esquecer que os reatores não concorrem uns com os outros; por isso são denominados Co-Correntes... (risos). Muito Obrigada!

Agradeço a professora Thais Maia Araújo por toda atenção e cooperação dedicadas a meu trabalho. Muito Obrigada!

Agradeço com muito apreço ao professor Augusto Brasil por todo tempo gasto comigo e ensino repassado a mim acerca das simulações das gaseificações. Muito obrigada por tudo!

Agradeço em especial ao Alessandro César de Oliveira Moreira e ao técnico de laboratório Lopes, por toda ajuda, compreensão e conhecimento repassado a mim durante as minhas análises no setor de Química da Madeira (LPF). Também, não posso deixar de agradecer a Lucélia Macedo e Bruno Sant'Anna Chaves que tornaram os meus dias de análises no Laboratório de Energia (LPF) muito mais felizes e produtivos. Muito Obrigada!

Quero agradecer com muito carinho em especial as minhas amigas Omolabake Alhambra, Elizandra Monique, Ana Caroline Martins, Camila de Lima Ribeiro, Missmaybe, Ruth Mendes, Márcia Oliveira, Amanda Borges, Thayse Cazetta e Mayara Machado por terem estado ao meu lado em todos os momentos durante o mestrado. Vocês serão lembradas eternamente em minha vida! Muito Obrigada suas lindas!

Agradeço aos meus novos amigos Lucas Gaio, Ana Elisa, Estelle Diorato, Mayara Resende e Rafael Werneburg pela compreensão, carinho, paciência, diversão e amizade concedida a mim.

Agradeço com muito amor, carinho e respeito as minhas “Flores do Labcat”: Munique Guimarães, Amanda Assunção e Lorrayne Esvícero por terem feito valer a pena cada dia vivido no Instituto de Química (UnB). Aprendi muita química com vocês!!! Muito obrigada por todos os almoços, todas as risadas, todas as festinhas e todos os momentos passados com vocês.

Agora quero agradecer com muito prestígio e respeito à química industrial Munique Guimarães por todas as noites passadas comigo no Labcat executando as gaseificações e análises no CG, sem sua força e cooperação eu não teria chegado até aqui. Muito obrigada mesmo!

Muito Obrigada a toda família Labcat por ter me acolhido com tanta dedicação, pelo tempo que passamos juntos no laboratório e pelos conhecimentos compartilhados.

Agradeço ao Instituto de Química por todo acolhimento e atenção prestada a mim e a CAPES pela concessão da bolsa durante todo o período de realização deste mestrado.

Agradeço a Empório do Cerrado por todo apoio, ajuda e doação dos resíduos florestais a meu projeto de Mestrado. Muito Obrigada!

Muito obrigada a todos os meus amigos que não foram mencionados acima e que, de alguma forma direta ou indireta, possibilitaram a realização deste trabalho.

Meu Muito Obrigada a Todos!!!

Epígrafe

“Ainda que eu fale a língua dos homens e dos anjos, se não tiver amor, serei como o bronze que soa ou como o címbalo que retine.”

“Ainda que eu tenha o dom de profetizar e conheça todos os mistérios e toda a ciência; ainda que eu tenha tamanha fé, a ponto de transportar montes, se não tiver amor, nada serei.”

I Coríntios 13:1-2

Resumo

Atualmente, a grande demanda por energia no mundo está tornando os resíduos florestais um material bastante atrativo socialmente e economicamente para a geração de energia. A escolha desse material para utilização em processos termoquímicos, cujo enfoque seja a geração de energia, deve ser baseada na quantidade, custo da matéria-prima e características físicas e químicas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a potencialidade energética da casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço de pequi, através da caracterização química e física de cada material, e, além disso, a análise e entendimento do processo de gaseificação real, em reator contracorrente (*updraft*), através da simulação computacional com o software Comgas, e também por meio da metodologia adotada por TIANGCO *et.al.* (1996). As concentrações dos gases oriundas das gaseificações das biomassas analisadas foram: baru (H_2 - 24,7%, CO - 33%, CO_2 - 13,7% e 28,6% de CH_4 + outros gases), jatobá (H_2 - 15,4%, CO - 32,6%, CO_2 - 4% e 44,9% de CH_4 + outros gases) e pequi (H_2 - 0%, CO - 6,5%, CO_2 - 11,8% e 81,7% de CH_4 + outros gases). Os valores das razões de equivalências encontradas por meio da simulação foram: 3,2 (baru), 3,4 (jatobá) e 1,3 (Pequi). A Taxa de gaseificação específica (ψ) encontrada para a gaseificação da casca do fruto do baru e casca da árvore do jatobá-do-cerrado foi de 100 Kg/m².h. As relações ar-combustível encontradas para as biomassas analisadas foram: 1,25 (Baru), 1,3 (Jatobá) e 4,3 (Pequi). Os valores encontrados para o Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás frio em relação à gaseificação do baru e do jatobá foram os seguintes: 7,31 MJ/kg e 7,70 MJ/kg. Por meio dos resultados alcançados a partir das análises químicas e físicas realizadas neste trabalho, e, além disso, mediante a comparação com a literatura existente, foi possível concluir que a casca do fruto do baru e a casca da árvore do jatobá-do-cerrado são resíduos florestais que possuem significativo potencial para a geração de energia descentralizada através da gaseificação, e, que em relação ao caroço do pequi não houve gaseificação nos ensaios realizados, pois as condições operacionais e o tipo de reator adotado, não foram adequados para condução do processo.

Abstract

Currently, the high demand for energy in the world is making the forest residues a very attractive material socially and economically for power generation. The choice of this material for use in thermochemical processes whose focus is energy generation, should be based on quantity, cost of raw material and physical and chemical properties. The objective of this study was to evaluate the energy potential of bark baru fruit, tree bark jatobá-do-cerrado and pequi seed, through chemical and physical characterization of each material, and moreover, the analysis and understanding of the actual gasification process in updraft reactor, through computer simulation with Comgas software, and also using the methodology adopted by Tiangco *et.al.*, (1996). The concentrations of gases coming from biomasses gasification were: baru (H_2 - 24.7%, CO- 33%, CO_2 - 13.7% and 28.6% of CH_4 + other gases), jatoba-do-cerrado (H_2 - 15.4%, CO- 32.6%, CO_2 - 4% and 44.9% of CH_4 + other gases) and pequi (H_2 - 0%, CO- 6.5%, CO_2 - 11.8% and 81.7% of CH_4 + other gases). The values of equivalence ratio found through simulation were: 3.2 (baru) 3.4 (jatoba) and 1.3 (pequi). The specific gasification rate (ψ) determined for the bark baru fruit and tree bark jatoba-do-cerrado was 100 kg/m².h. The air-fuel relationships found for the analyzed biomass were: 1.25 (Baru), 1.3 (Jatoba) and 4.3 (Pequi). The values found for the Lower Calorific Value (LCV) of cold gas in relation to gasification baru and jatoba were: 7.31 MJ / kg and 7.70 MJ / kg. Through the results achieved from the chemical and physical analyzes performed in this work and in addition, by comparing with the existing literature, the conclusion was that the bark baru fruit and bark jatoba-do-cerrado tree have significant potential for the generation of decentralized energy by gasification technology. For the pequi seed, the results showed that the experimental gasification was not performed at the operating conditions and type of reactor adopted.

Índice de Ilustrações

Figura 1: Participação de Fontes Renováveis na Matriz Energética Brasileira e Mundial.....	5
Figura 2: Formas de valorização dos resíduos de madeira.....	10
Figura 3: Árvore do Baru.	13
Figura 4: Fruto e amêndoa do baru.....	13
Figura 5: Produção de carvão ecológico das cascas do fruto do baru.	15
Figura 6: Árvore do Jatobá-do-cerrado.	16
Figura 7: Fruto aberto do Jatobá-do-Cerrado.....	16
Figura 8: Tronco da árvore do Jatobá-do-cerrado com a casca.....	17
Figura 9: Árvore do Pequi.....	18
Figura 10: Endocarpo do Pequi.....	19
Figura 11: Extração da casca de jatobá-do-cerrado.....	39
Figura 12: (a) Beneficiamento dos frutos de pequi, (b) Coleta dos frutos de baru. ..	40
Figura 14: Modelo do gaseificador utilizado no desenvolvimento do estudo de gaseificação de biomassa florestal.....	55
Figura 15: Interface gráfica do software COMGAS.	62
Figura 16: Comparação dos resultados da análise imediata para as biomassas analisadas: (a) casca do fruto do baru, (b) casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) caroço de pequi.....	64
Figura 17: Valores de PCS, PCI e PCU para todas as biomassas analisadas: (a) Casca do fruto do baru, (b) Casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) Caroço de Pequi.	71
Figura 18: Densidade a granel das biomassas analisadas.	74
Figura 19: Densidade energética das biomassas analisadas.....	76
Figura 20: Valores de CHNO encontrados para as biomassas in natura: (a) Casca do fruto do baru, (b) Casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) Caroço de pequi. .	78
Figura 21: Valores de CHNO encontrados nas cinzas das biomassas: (a) Casca do fruto do baru, (b) Casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) Caroço de pequi.	80

Figura 22: DRX das cinzas da casca do baru. Figura 23: DRX das cinzas da casca do jatobá- do-cerrado.....	83
Figura 24: DRX das cinzas do caroço de pequi.	84
Figura 25: Comparação dos teores de extrativos, holocelulose e lignina obtida para as biomassas analisadas: (a) Casca do fruto do baru, (b) Casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) Caroço de pequi.....	86
Figura 26: Curvas de TG e DTG da casca do fruto do baru em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).....	94
Figura 27: Curvas de TG e DTG da casca da árvore do jatobá-do-cerrado em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).....	95
Figura 28: Curvas de TG/ DTG do caroço de pequi em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).....	95
Figura 29: Curvas de DTA (análise diferencial térmica) da casca do fruto do baru em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).	96
Figura 30: Curvas de DTA (análise diferencial térmica) da casca da árvore do jatobá-do-cerrado em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).....	97
Figura 31: Curvas de DTA (análise diferencial térmica) do caroço de pequi em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).....	97
Figura 32: Composição dos gases produto dos ensaios de gaseificação: (a) casca do fruto do baru, (b) casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) caroço de pequi..	100
Figura 33: Simulação da casca do fruto de baru (a) e casca da árvore do jatobá-do-cerrado (b) obtida através do software ComGas.	105
Figura 34: Comparação com os resultados de Tiangco et.al., (1996) encontrados em relação à razão ar-combustível versus taxa específica de gaseificação (ψ): (a) Casca do fruto do baru e (b) Casca da árvore do jatobá-do-cerrado.	107
Figura 35: Valor estimado para a eficiência do gás frio gerado através da gaseificação da casca do fruto do baru e gaseificação da casca da árvore do jatobá-do-cerrado.	108
Figura 36: Simulação do caroço de pequi obtido através do software ComGas. ...	109
Figura 37: Comparação da simulação com os resultados de Tiangco et.al., (1996) encontrados em relação à razão ar-combustível versus taxa específica de gaseificação (ψ).	111

Índice de Tabelas

Tabela 1: Geração de resíduos florestais, considerando a etapa de colheita e processamento mecânico em relação ao ano de 2009, valores em m ³ /ano.	8
Tabela 2: Resultados da Análise Imediata das biomassas analisadas com seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.....	64
Tabela 3: Resultados dos poderes caloríficos das biomassas analisadas.	70
Tabela 4: Composição química elementar das biomassas analisadas: casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço do pequi in natura obtida por análise elementar (CHNOS/ FRX/EDX), (% massa, base seca).....	79
Tabela 5: Composição química elementar das cinzas da casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço do pequi obtida por análise elementar (CHNOS/ FRX/EDX), (% massa, base seca).	80
Tabela 6: Dados da composição lignocelulósica das biomassas analisadas.	85
Tabela 7: Temperaturas de decomposição térmica em ar sintético e nitrogênio, predominantes em cada material analisado na análise termogravimétrica.	91
Tabela 8: Resultados da análise termogravimétrica das biomassas analisadas em atmosfera de ar sintético.	92
Tabela 9: Resultados da análise termogravimétrica das biomassas analisadas em nitrogênio.....	92
Tabela 10: Dados da composição dos gases em concentração (% v/v) oriundos do processo de gaseificação das biomassas analisadas.....	99

Índice de Abreviaturas e Siglas

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AIT- Instituto de Tecnologia Asiático
- ASTM- American Society for Testing and Materials
- BEN- Balanço Energético Nacional
- CHN- Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio
- COMGAS- Software utilizado para as simulações de gaseificação
- DAP- Diâmetro à Altura do Peito
- DRX- Difração de Raio X
- EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EPE- Empresa de Pesquisa Energética
- DTA- Termogravimetria Derivada
- DTG- Termogravimetria Diferencial
- FAO- Food and Agriculture Organization
- FRX/EDX- Fluorescência de Raio X por Energia Dispersiva
- g/Nm³- Grama por Normal metro cúbico
- kVA- Potência Aparente
- m/m- Relação entre massa e massa
- MME- Ministério de Minas e Energia
- MJ/kg- Megajoule por quilograma
- MW- Megawatt
- P.A- Para Análise (grau de pureza do produto químico)
- PCS- Poder Calorífico Superior
- PCI- Poder Calorífico Inferior
- PCU- Poder Calorífico Útil
- OCDE- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

PRAD's- Planos de Recuperação de Áreas Degradadas

Rpm- Rotação por minuto

TAPPI- Technical Association of the Pulp and Paper Industry

UFTM- Universidade Federal do Triângulo Mineiro

v/v- Relação entre volume e volume

Índice de Símbolos

Ψ - Psi (Vigésima Terceira Letra do Alfabeto Grego)- Utilizado como simbologia da Taxa Específica de Gaseificação.

Φ - Fi (Vigésima Primeira Letra do Alfabeto Grego)- Utilizado como simbologia da Razão de Equivalência.

Sumário

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVOS	2
2.1- Objetivo Geral	2
2.2- Objetivos Específicos:.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1- Utilização das Fontes Renováveis na Matriz Energética Brasileira e Mundial ..	4
3.2- Biomassa como fonte de energia renovável	5
3.3- Resíduos Florestais: Biomassa como alternativa energética.....	7
3.3.1- Características dos Resíduos da Colheita Florestal	10
3.4- Bioma Cerrado.....	11
3.4.1- Espécies de Estudo	12
3.4.1.1- Baru	12
3.4.1.2- Jatobá-do-Cerrado.....	15
3.4.1.3- Pequi	17
3.5- Histórico Sobre a Tecnologia da Gaseificação	19
3.5.1- A Indústria da Gaseificação	20
3.5.2- Estado da arte do processo de gaseificação	22
3.5.3- A tecnologia da gaseificação como alternativa de conversão	25
3.5.4- Parâmetros que influenciam no processo de gaseificação.....	29
3.5.4.1- Granulometria da partícula	29
3.5.4.2- Efeito da temperatura	30
3.5.4.3-Tempo de Residência.....	31
3.5.4.4- Pressão	32

3.5.5- Reações químicas envolvidas no processo de gaseificação	27
3.5.6- Aplicações da Tecnologia da Gaseificação	32
3.5.6.1-Geração de energia elétrica e calor	32
3.5.6.2-Geração de produtos químicos.....	34
3.5.6.3-Produção de Hidrogênio	35
3.5.7- Os Desafios Tecnológicos da Gaseificação	36
4. EXPERIMENTAL.....	38
4.1- Materiais e Reagentes	38
4.2- Preparação das Amostras	38
4.2.1- Obtenção dos Resíduos Florestais.....	38
4.2.2- Empresa parceira do projeto: Empório do Cerrado	39
4.2.3- Moagem do Material	40
4.2.3.1- Classificação dos Resíduos Moídos	40
4.2.4- Preparação dos cadinhos para a realização da Análise Imediata	Erro!
Indicador não definido.	
4.7- Técnicas de Caracterização	41
4.7.1- Análise Elementar (CHNO/EDX/FRX)	41
4.7.2-Difração de Raio- X (DRX)	42
4.7.4- Análise Térmica	42
4.7.5- Análises Imediatas.....	43
4.7.5.1-Teor de Umidade	43
4.7.5.2- Teor de Voláteis.....	44
4.7.5.3- Teor de Cinzas	44
4.7.5.4- Teor de Carbono Fixo.....	45
4.8- Poder Calorífico	46
4.8.1-Poder Calorífico Inferior (PCI)	46

4.8.2- Poder Calorífico Útil (PCU).....	47
4.9- Densidade Energética.....	47
4.10- Constituintes Químicos ou Composição Química (Extrativos, Lignina Solúvel e Insolúvel, Holocelulose e Cinzas)	48
4.10.1- Teor de Extrativos.....	48
4.10.2- Teor de Cinzas Sem Extrativos	49
4.10.3- Teor de Lignina.....	50
4.10.4- Teor de Lignina Insolúvel.....	50
4.10.5- Teor de Lignina Solúvel	52
4.10.6- Teor de Lignina Total.....	53
4.10.7- Teor de Holocelulose.....	54
4.11- Gaseificador.....	54
4.11.1- Descrição do processo de gaseificação	55
4.11.2- Procedimentos do ensaio de gaseificação para as cascas do fruto do baru:.....	56
4.11.3- Procedimentos do ensaio de gaseificação para as cascas da árvore do jatobá-do-cerrado:	57
4.11.4- Procedimentos do ensaio de gaseificação para o caroço do pequi:	58
4.11.5- Análise da composição dos gases.....	59
4.12- Simulação	61
4.12.1- Software COMGAS.....	61
4.12.2- Metodologia de TIANGCO <i>et.al.</i> , (1996).....	62
5. Resultados e Discussões	63
5.1- Caracterização da Casca do Fruto do Baru, Casca da Árvore do Jatobá-do-Cerrado e Caroço de Pequi.	63
5.1.1- Análise Imediata	63

5.2- Poder Calorífico	69
5.3- Densidade a granel.....	73
5.4- Densidade Energética.....	75
5.5- Análise Elementar CHNO e FRX/EDX.....	76
5.6- Difração de Raios-X (DRX).....	81
5.7- Análise Química de Materiais Lignocelulósicos	84
5.8- Análise Térmica	90
5.9- Análise da Composição dos Gases	97
5.10- Correlação entre a simulação computacional através do <i>software</i> Comgas e comparação com o trabalho realizado por Tiangco <i>et.al.</i> , (1996)	103
5.10.1- Simulação Casca do Fruto do Baru e Casca da Árvore do Jatobá-do- Cerrado.....	103
5.10.2-Simulação para o caroço de pequi	109
6. CONCLUSÕES	112
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
ANEXOS A	130
ANEXOS B	142
ANEXOS C.....	153

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Atualmente as questões ambientais estão sendo tratadas de maneira mais séria, devido ao desenvolvimento acelerado da tecnologia e da industrialização, quando comparado ao passado. A cobrança oriunda do cenário internacional está se intensificando sobre a questão da preservação dos recursos naturais existentes no mundo, principalmente em relação aos resíduos florestais, que na maioria das vezes não recebem o tratamento adequado, ficando expostos ao meio ambiente (FROEHLICH *et.al.*, 2012; ESCOBAR *et. al.* 2009).

O desperdício de resíduos florestais é muito grande de acordo com vários estudos realizados pela literatura, estima-se que cerca de 40-60% do volume total de uma tora de madeira seja aproveitado, logo as sobras são destinadas de forma incorreta no meio ambiente. Segundo DEMAJORIVIC (1995), o termo resíduo diferencia-se de lixo, pois este último não possui nenhum tipo de valor associado, referindo-se ao que será descartado. No entanto, resíduos são aqueles que possuem valor econômico agregado, possibilitando assim, o seu reaproveitamento (SILVA *et.al*, 2011; FROEHLICH *et.al.*, 2012; VALE & GENTIL, 2008).

A demanda mundial por energia cresce a um ritmo acelerado em relação ao crescimento da população mundial, uma vez que o aumento da riqueza e o desenvolvimento econômico representam impulsos ainda maiores para esse crescimento. Essa tendência está ocorrendo no Brasil em uma velocidade mais acelerada do que a média global. No decorrer da última década, o consumo brasileiro de energia apresentou um crescimento superior a 33%, tornando o país o 9º maior consumidor de energia no mundo e o 3º maior no hemisfério ocidental (RATH ANNA, 2014).

Em decorrência desta tendência mundial, o grande desafio é atender a essa demanda por energia de forma confiável, economicamente eficiente e sustentável. Dentre as fontes de energia renovável no meio ambiente, a que mais se destaca é a

biomassa, pois além de ser renovável, é capaz de gerar combustíveis líquidos, sólidos e gasosos. A biomassa é considerada como todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (animal ou vegetal), que pode ser utilizado como combustível para a geração de energia (RATH ANNA, 2014).

O uso da biomassa como um eficiente vetor energético depende de estudos preliminares sobre a sua caracterização física e química para indicar a melhor rota energética a ser utilizada. Com base nestes estudos é possível utilizar este combustível diretamente em processos termoquímicos, como: gaseificação, pirólise, liquefação, entre outros, visando à geração de energia (ALAUDDIN *et. al*, 2010).

O processo de gaseificação merece destaque nesse contexto mundial desafiador de buscar fontes energéticas alternativas, ao uso dos combustíveis fósseis, pois apresenta flexibilidade e eficiência na transformação do combustível em energia. Além disso, ele se apresenta como alternativa para reduzir a pressão exploratória sobre os recursos não renováveis, como o petróleo (VALE & GENTIL, 2008; DEVIL *et.al.*, 2003).

De acordo com SAIKI (2004) a eficiência térmica dos reatores utilizados na gaseificação é alta, variando de 60% a 90%, dependendo do sistema implementado. Em razão da alta eficiência energética e de outras vantagens e dificuldades apresentadas por essa tecnologia, é necessário mais estudos a respeito da sua aplicação como conversor energético. Através das pesquisas realizadas na área de energia será possível obter um equipamento capaz de produzir um gás de qualidade, com confiabilidade e segurança adaptado as condições particulares dos combustíveis e da operação.

2. OBJETIVOS

2.1- Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho dentro do contexto da tecnologia da gaseificação e sob a perspectiva de valorização dos resíduos florestais oriundos da extração de frutos do bioma Cerrado, é caracterizar e analisar o potencial e a viabilidade do processo de gaseificação, através de ensaios laboratoriais de gaseificação, reator contracorrente (*Updraft*), simulação computacional com o *software* Comgas e correlação dos dados com a metodologia adotada por TIANGCO et.al., (1996), para a geração de gás de síntese.

2.2- Objetivos Específicos

- Caracterizar as seguintes biomassas utilizadas como combustível: caroço de pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.), casca do fruto de baru (*Dipteryx alata*) e casca da árvore do jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* Mart.);

- Verificar a eficiência do processo de gaseificação para a geração de energia descentralizada, por meio da metodologia adotada por TIANGCO et.al., (1996);

- Coletar e analisar as concentrações de gases produzidos no gás de síntese, resultante da gaseificação em reator contracorrente (*Updraft*);

- Analisar a viabilidade de geração de energia por meio da gaseificação de resíduos florestais;

- Propor melhores condições de operação para o gaseificador utilizado no estudo;

- Comparar os dados adquiridos das simulações de gaseificação realizadas com o *software* Comgas com os dados obtidos com o processo de gaseificação real, e, além disso, correlacionar os dados com os resultados do estudo de TIANGCO et.al., (1996).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- Utilização das Fontes Renováveis na Matriz Energética Brasileira e Mundial

A matriz energética mundial é o conjunto de todos os tipos de energias geradas e consumidas pelo mundo. Atualmente, um dos maiores desafios enfrentados pelas nações é a procura por novas fontes de energia, que sejam ambientalmente corretas e sustentáveis. A justificativa para esta busca por novas formas de produção de energia está diretamente relacionada à finitude do petróleo e, principalmente, as questões socioambientais (ESCOBAR *et. al.*, 2009).

No mundo há uma minoria de países que conseguem ser autossuficientes na questão energética, pois mais da metade do planeta precisa importar energia para que sua economia funcione. Os Estados Unidos e o Japão são exemplos de grandes nações que compram mais da metade do petróleo que consomem, pois mesmo sendo possuidores de grandes áreas territoriais e recursos naturais, não possuem energia suficiente para arcar com o desenvolvimento econômico do país. A dependência energética envolve desde questões diplomáticas até militares, logo não é uma situação vantajosa para nenhuma nação (DEMIRBAS, 2007; SAXENA, 2009).

A energia é o elemento essencial para o desenvolvimento da humanidade, devido a isso é necessário encontrar novas maneiras de se gerar energia. Em razão deste contexto energético é necessário maiores investimentos e pesquisas em relação às fontes renováveis de energia, pois elas são uma excelente opção para o suprimento energético mundial. Dentre todos os recursos renováveis que há no planeta, a biomassa merece destaque, pois ela é a única fonte de carbono que pode ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, através de vários processos de conversão energética e por seu ciclo de vida ser relativamente curto, sua reposição e disponibilização ocorrerão em prazos (ESCOBAR, 2009; DEMIRBAS, 2007; DEVI, 2003).

O Brasil possui uma posição de destaque no cenário energético mundial, pois ele produz quase toda a energia que consome. Além disso, quase 50% dessa energia vêm de fontes renováveis, o que é vantajoso para o país, seja em nível local ou âmbito mundial. A razão disso é que a maior parte de energia que o país produz e consome vem das usinas hidrelétricas. Este país possui a matriz energética mais renovável do mundo, somente no ano 2013, a participação de fontes renováveis manteve-se entre as mais elevadas do mundo (Figura 1) (RATH ANNA, 2014).

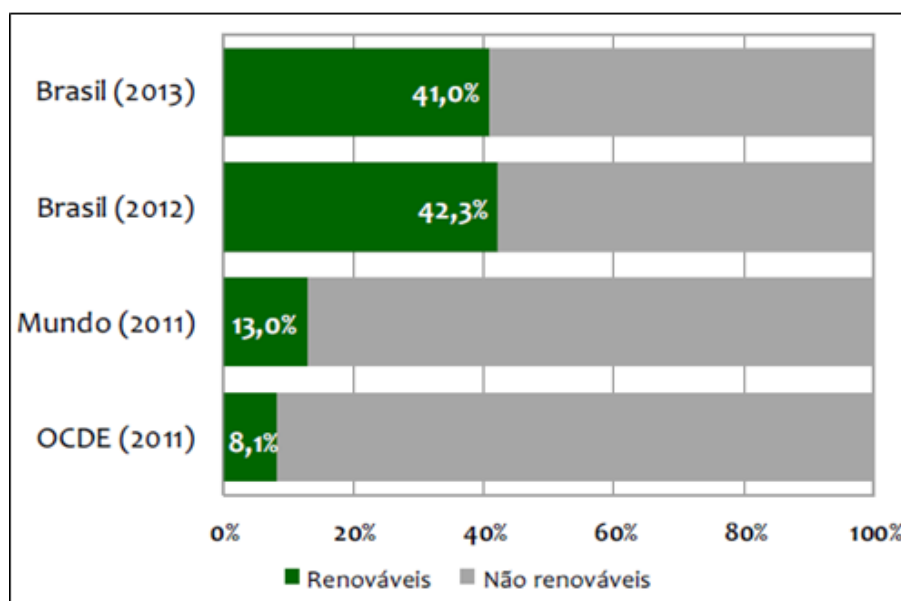


Figura 1: Participação de Fontes Renováveis na Matriz Energética Brasileira e Mundial.

Fonte: EPE, Agência Internacional de Energia, BEN, 2014.

3.2- Biomassa como fonte de energia renovável

Biomassa é todo material orgânico, ou seja, não fóssil, que possua em sua estrutura energia química, o que inclui todos os tipos de vegetações, resíduo de agricultura, resíduos florestal, lixo orgânico, resíduos produzidos por animais e outros formas de resíduos industriais (OMASHI *et.al.*, 2004).

SANTOS *et al.*, (2012) afirmam que a biomassa lignocelulósica é a fonte renovável mais abundante do planeta, sendo constituída principalmente por três estruturas básicas: celulose, lignina e hemicelulose. Segundo (LEWIN & GOLDSTEIN 1991; TSOUMIS 1991), em média a biomassa vegetal (madeira) é constituída em base seca a 2% de umidade por: celulose: 40-45%, hemiceluloses: 20-30%, lignina: 18 - 25% no caso das Folhosas e 25 - 35% em relação às Coníferas, extrativos: 3-8% e cinzas: 0,4%. Para maiores informações sobre composição de biomassa, veja o Anexo A.

Este material combustível tem atraído o interesse da sociedade mundial dentre as fontes energéticas sustentáveis e apresenta um potencial enorme de crescimento nos próximos anos, de acordo com os estudos do Ministério de Minas e Energia (MME). Ela é considerada modelo de matéria-prima para suprir a demanda energética mundial, pois pode ser transformada em diversas formas de energia, seja através de processos termoquímicos ou biológicos. Além disso, o uso da biomassa como energia contribui para a redução da emissão dos gases do efeito estufa, pois a sua queima gera a emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, mas como este composto já havia sido absorvido pelas plantas que deram origem ao combustível, o balanço de emissões do mesmo é nulo (ROCHA *et al.*, 2013; YOKOYAMA & MATSUMURA, 2008).

A geração de energia elétrica através da biomassa já é uma realidade em importantes setores da economia, como no sucroalcooleiro e na indústria de papel e celulose. Nesses dois setores da economia brasileira, o processo termoquímico utilizado para a geração de energia a partir da biomassa é a combustão direta, por meio de fornalhas adequadamente projetadas e construídas. Porém, a eficiência energética desse processo termoquímico é baixa, além de gerar muitos resíduos tóxicos ao meio ambiente (SOUZA & AZEVEDO, 2006).

Entretanto, a eficiência da combustão pode ser melhorada significativamente, se primeiramente a biomassa for submetida ao processo de gaseificação para a geração de gás combustível. Esse gás pode ser utilizado em um ciclo combinado

para a geração de eletricidade, por meio de um conjunto-turbina a gás/caldeira de recuperação/ turbina a vapor. Esta alternativa pode dobrar a quantidade de energia elétrica gerada, quando comparada com a utilização direta da combustão para a mesma finalidade (SOUZA & AZEVEDO, 2006).

3.3- Resíduos Florestais: Biomassa como alternativa energética

O setor florestal é um dos setores da economia brasileira que mais tem crescido nos últimos anos. A atividade silvicultural é responsável pelo estabelecimento, desenvolvimento e reprodução das florestas, objetivando múltiplas aplicações, como: carvoejamento, proteção ambiental, produção de resinas, produção de madeira, dentre outras. Atualmente, os produtos florestais são utilizados como fonte energética, lenha para carvoarias e indústrias siderúrgica (SAMBUICHI *et al.*, 2012).

A indústria florestal juntamente com a atividade da silvicultura apresentam enormes perdas no processo de produção, desde o corte da árvore até seu processamento na indústria. O setor florestal é complexo e amplo, sendo constituído de diversos segmentos de atividades e aplicações industriais. Em razão disso, cada estabelecimento que compõe o setor produz uma variedade de resíduos, em grande quantidade, cuja geração depende do porte da indústria, do processo produtivo e das políticas adotadas pela empresa. Devido a essa ampla variedade de resíduos (sobras) florestais gerados pelo setor, é difícil realizar uma quantificação precisa do montante de sobras geradas pelo processo produtivo, pois não existem dados individualizados de produção de cada região, estados brasileiros e países (BORTOLIN, 2012; SCHNEIDER *et al.*, 2012).

Os resíduos florestais são oriundos da madeira retirada pela silvicultura e também das sobras produzidas pela retirada da madeira no extrativismo vegetal.

Atualmente, esta atividade extrai grandes quantidades de madeiras de florestas naturais, sendo essa madeira amplamente utilizada em diversos setores da indústria florestal. O uso da madeira oriunda dessa prática gera uma enorme quantidade de resíduos (sobras), sendo maior que a da silvicultura, quando considerada a etapa de exploração de campo (DO CANTO, 2009).

A geração de resíduos da cadeia florestal brasileira no ano de 2009 foi equivalente a 85.574.464,76 m³. A Tabela 1 apresenta a geração de resíduo da cadeia florestal considerando a etapa de colheita e processamento mecânico (2009).

Tabela 1: Geração de resíduos florestais, considerando a etapa de colheita e processamento mecânico em relação ao ano de 2009, valores em m³/ano.

	Resíduo – cadeia florestal (colheita e processamento mecânico)		
	Silvicultura	Extrativismo	Total
Brasil	66.552.351,48	19.022.113,28	85.574.464,76
Norte	2.065.959,23	11.180.998,19	13.246.957,42
Rondônia	0,00	1.694.194,82	1.694.194,82
Acre	0,00	150.406,09	150.406,09
Amazonas	1.462,88	1.317.270,18	1.318.733,06
Roraima	0,00	125.910,18	125.910,18
Pará	1.235.697,36	7.455.021,33	8.690.718,69
Amapá	828.798,99	332.988,94	1.161.787,93
Tocantins	0,00	105.206,67	105.206,67
Nordeste	10.385.732,73	1.864.555,92	12.250.288,65
Maranhão	42.102,79	230.441,94	272.544,73
Piauí	0,00	150.684,28	150.684,28
Ceará	11.663,78	59.349,81	71.013,60
Rio Grande do Norte	0,00	8.199,82	8.199,82
Paraíba	0,00	0,00	0,00
Pernambuco	0,00	43.452,92	43.452,92
Alagoas	24.580,04	2.962,81	27.542,85
Sergipe	2.359,28	16.891,15	19.250,43
Bahia	10.304.718,09	1.352.573,18	11.657.291,27
Sudeste	22.456.848,11	71.126,21	22.527.974,32
Minas Gerais	4.844.242,09	49.079,15	4.893.321,23
Espírito Santo	3.878.619,47	2.872,99	3.881.492,46
Rio de Janeiro	93.419,82	1.397,20	94.817,02
São Paulo	13.640.566,73	17.776,88	13.658.343,61
Sul	29.121.724,04	977.573,44	30.099.297,47
Paraná	14.957.457,39	784.223,41	15.741.680,80
Santa Catarina	9.663.744,78	149.929,54	9.813.674,32
Rio Grande do Sul	4.500.521,87	43.420,49	4.543.942,35
Centro-Oeste	2.522.087,39	4.927.859,53	7.449.946,92
Mato Grosso do Sul	2.350.619,14	12.829,29	2.363.448,43
Mato Grosso	22.506,49	4.890.982,18	4.913.488,67
Goiás	148.961,76	24.048,06	173.009,82
Distrito Federal	0,00	0,00	0,00

Fonte: SCHNEIDER *et al.*, (2012).

As sobras florestais são de diversas formas e tipos, pois elas são oriundas de atividades variadas que compõem o setor florestal. Os resíduos florestais (sobras) ocorrem como: galhos, topos, folhas, tocos, cascas da árvore, resíduos de serrarias, cascas de frutos, licor negro gerado pela produção de celulose pelo processo Kraft, entre outros (SIMIONI, 2010; SCHNEIDER *et al.*, 2012).

A biomassa de origem florestal é uma alternativa de energia limpa, renovável, equilibrada com o meio ambiente urbano e rural, produtora de empregos e de tecnologia própria. Além disso, possibilita o seu uso como fonte alternativa de energia, seja pela combustão da madeira, em forma de carvão ou pelo aproveitamento dos resíduos, através de outros processos de conversão termoquímica (SIMIONI, 2010).

A utilização da biomassa florestal como recurso energético é uma tendência mundial e vem despertando a atenção da sociedade. O uso da biomassa florestal como insumo energético nas suas mais variadas formas de aproveitamento, vem adquirindo destaque no mercado energético, devido ao seu caráter renovável. Além deste caráter, os resíduos florestais apresentam como vantagens: descentralização da produção, redução de emissões atmosféricas, geração de oportunidade de trabalho no processo de produção, conservação energética e criação de novos mercados para as sobras florestais (J.L. de OLIVEIRA *et al.*, 2013; SANTIAGO, 2013).

Como toda fonte energética a biomassa florestal também apresenta desvantagens quando utilizada na queima direta, pois esse material *in natura* apresenta menor poder calorífico superior quando comparada a combustíveis à base de petróleo, maior teor de umidade devido às características do ambiente de origem, maior possibilidade da geração de material particulado para a atmosfera, dificuldade no estoque e armazenamento (ABREU *et al.*, 2009).

Em decorrência das características físicas e químicas inerentes a biomassa florestal é necessária à realização de pesquisas, projetos e investimentos para que se possa encontrar a melhor maneira de utilização desses resíduos florestais de maneira eficiente e limpa. Segundo QUIRINO (2004), há duas maneiras de se valorizar os resíduos da madeira: a valorização energética e a valorização da

matéria. A valorização energética é quando o resíduo será usado como fonte de energia, já a valorização da matéria é o uso da matéria-prima para produção de outros materiais. A Figura 2 apresenta o modo de utilização dos resíduos da madeira de acordo com o tipo de valorização aplicada.

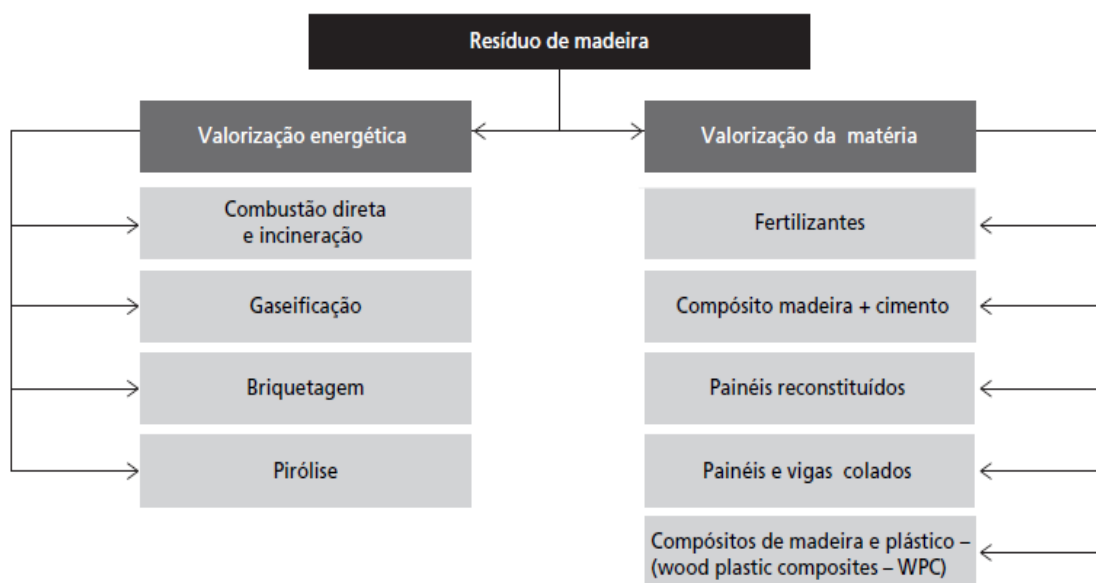


Figura 2: Formas de valorização dos resíduos de madeira.
 Fonte: (SCHNEIDER *et al.*, 2012).

3.3.1- Características dos Resíduos da Colheita Florestal

Os resíduos gerados pelas operações de colheita florestal, normalmente são deixados na floresta, pois a primeira vista não possuem valor agregado são galhos, ramos, cascas, partes quebradas da árvore, folhas, toras que não atingiram dimensões ideais ou de valor comercial insuficiente que justifique a sua remoção (FAO,1990).

Na maioria das vezes os resíduos florestais apresentam as características químicas, físicas, biológicas e mecânicas diferentes das apresentadas pela madeira. O teor de lignina, celulose e resina influenciam diretamente o poder calorífico, seja na madeira como nos resíduos. A resina possui poder calorífico superior (PCS)

maior do que o da madeira, cerca de 39,3 MJ/kg, devido a essa característica e, também, ao alto teor de lignina apresentado pelas coníferas, elas apresentam um maior PCS do que as folhosas (HOWARD, 1979).

Os combustíveis oriundos da biomassa possuem um elevado potencial para a geração de energia, devido à maioria dos materiais possuírem alta volatilidade e reatividade. No entanto, deve-se considerar que os resíduos lignocelulósicos apresentam uma menor concentração de carbono em sua constituição química e uma maior concentração de oxigênio, comparados aos combustíveis fósseis sólidos. Em razão dessa característica, o poder calorífico superior da biomassa é bem menor, logo tem um valor de aquecimento baixo (DEMIRBAS, A., 2004; MARKS J. WOOD, 1992).

3.4- Bioma Cerrado

O bioma Cerrado é uma das maiores e mais importantes vegetações da América do Sul. É o segundo maior bioma brasileiro, ocupando uma área de 2.036.448 km², isso corresponde a 22% do território nacional. Este bioma só perde para a Amazônia em tamanho e em biodiversidade (KLINK, 2005; HOGAN *et al.*, 2002; SANTOS *et al.*, 2014).

O Cerrado é uma das principais fontes de madeira para suprimento energético de comunidades rurais. Este bioma é a principal fonte da lenha nativa para a geração de calor e, talvez, o fornecedor mais significativo de combustível para residências no meio rural. A característica do Cerrado como fonte energética, o situa como um dos biomas de maior importância social no Brasil (VALE *et al.*, 2002; SANTOS *et al.*, 2014).

As espécies de árvores do Cerrado do ponto de vista energético são pouco conhecidas, devido ao elevado uso indiscriminado de seus recursos biológicos. A pressão antrópica sobre esse bioma, principalmente o avanço da agricultura trouxe grandes prejuízos ambientais e sociais como: fragmentação de *habitats*, extinção da biodiversidade, poluição de aquíferos e grande volume de resíduos agroindustriais, florestais, entre outros (KLINK, 2005).

Uma das soluções para a redução do volume de resíduos agroindustriais, florestais e urbanos gerados no Centro-Oeste brasileiro é a utilização de processos termoquímicos, como a pirólise, liquefação, e, principalmente, o da gaseificação para a produção de gás de síntese (VALE *et.al.*, 2002).

3.4.1- Espécies de Estudo

3.4.1.1- Baru

O baru (*Dipterix alata* Vog.) é uma espécie vegetal arbórea, pertence à família Leguminosae-Papilionoideae e é conhecida popularmente como baru, cumarurana, emburena-brava, barujo, coco-feijão, barueiro, dentre outros. O nome da árvore varia de acordo com a região de ocorrência da espécie. O barueiro (Figura 3) é uma espécie nativa do bioma Cerrado, ele tem preferência por locais com solos bem drenados e pelas fitofisionomias de Cerradões e Matas Secas. A floração e a frutificação ocorrem no começo da estação chuvosa, e os frutos ficam maduros no fim da estação seca subsequente (OLIVEIRA & SIGRIST, 2008; SANO, 2006; TAKEMOTO, 2001; VERA, 2009).

Os estados brasileiros de ocorrência do baru são: Goiás, Minas Gerais, Distrito Federal, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso (LORENZI, 1992). A árvore do baru está em processo de extinção, devido à procura por sua madeira para a fabricação de móveis; ao corte da madeira para produção de carvão vegetal e pelo

nível crescente da taxa de desmatamento do bioma Cerrado (CARRAZA & D'ÁVILA, 2010).



Figura 3: Árvore do Baru.
Fonte: EMBRAPA.

Essa árvore possui frutos do tipo drupa, ovoídes, relativamente achatados, coloração marrom-clara e no interior do fruto apresenta uma única semente (amêndoa). A amêndoa retirada do fruto é comestível e muito comercializada em empórios nos grandes centros das cidades do Estado de Goiás, por comunidades extrativistas (VERA *et.al.*, 2009; SOUZA, 2011; FERNANDEZ, 2010). O mesocarpo que constitui o fruto tem polpa seca e fibrosa e o endocarpo é classificado como lenhoso (Figura 4).

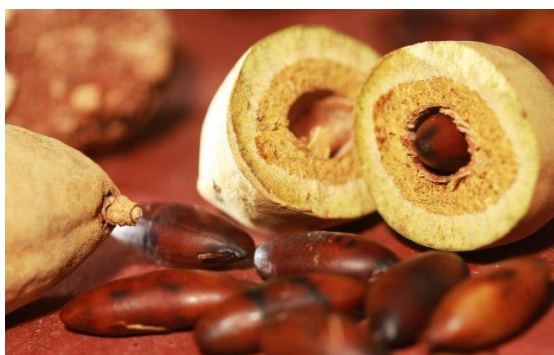


Figura 4: Fruto e amêndoa do baru.
Fonte: EMBRAPA.

Segundo SANO *et al.*, (1999), cada árvore da espécie *Dipterix alata* Vog. pode produzir de 1000 a 3000 frutos e o peso médio dos frutos fica entre 26 e 40 g, e o peso da amêndoa é de 1,17g. De acordo com estimativas de RIBEIRO *et al.*, (2000), um plantio comercial de baru pode produzir em torno de 850 kg de amêndoas e 19 toneladas de resíduo (polpa) por hectare. A vida útil da planta é em torno de 60 anos e a sua primeira frutificação ocorre quando a espécie atinge os 6 anos de idade (TAKEMOTO, 2001).

SANO *et al.*, (2004) mostrou diversos usos da árvore do baru, como: o uso na indústria alimentícia da polpa e da amêndoa, o uso medicinal por meio do óleo e da casca do tronco; a utilização da madeira na indústria naval, fabricação de cascos de navios, uso no paisagismo de cidades urbanas e utilização em PRAD's (Plano de Recuperação de Áreas Degradadas). Atualmente a casca do fruto de baru tem sido utilizada para a produção de carvão ecológico no Estado de Goiás. Este uso tem sido viável, pois a casca resultante do beneficiamento dos frutos apresenta aspecto lenhoso; característica relevante para fins energéticos.

O carvão ecológico (Figura 5) produzido da casca de baru possui excelente poder calorífico superior (PCS) quando comparado aos outros tipos de carvão vegetal. Este material apresenta dificuldade para entrar em combustão, pois apresenta elevado ponto de ignição, entretanto uma vez aceso apresenta chama constante, duradoura e pouca fumaça, desde que produzido de forma correta, combustão completa dos voláteis. Uma alternativa para a dificuldade de ignição da biomassa é a aspersão de algum tipo de combustível, como óleo de frituras, álcool, querosene facilitando o início da combustão (CARRAZA & e D'ÁVILA, 2010).



Figura 5: Produção de carvão ecológico das cascas do fruto do baru.
Fonte: BOLETIM EMPÓRIO DO CERRADO.

3.4.1.2- Jatobá-do-Cerrado

O jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* Mart.) ocorre no Cerrado e Cerradão, é uma árvore que pode chegar a 6 metros de altura, que produz frutos com comprimento entre 6-18 cm e diâmetro ente 3-6 cm (Figura 6). É conhecida como jatobá-do-cerrado, jutaí, jatobá-capo, jatobá-de-casca-fina ou jitaí. Sua ocorrência natural é nos Estados do Piauí, Bahia, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo, sendo comum nas formações abertas de Cerrado e Campo Cerrado. É uma leguminosa característica desse bioma e por possuir crescimento rápido é muito utilizada em (PRAD's)- Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (CHANG, 1998; MATUDA, 2005; BRASIL, 2002).



Figura 6: Árvore do Jatobá-do-cerrado.
Fonte: SITE UFTM.

A árvore do jatobá atinge um DAP (diâmetro a altura do peito, medido a 1,30 cm do solo) de até 50 cm, possui folhas alternas e os seus frutos (Figura 7) são classificados como legume seco, indeiscente. A floração ocorre, principalmente nos meses de outubro até abril e a sua frutificação de julho a novembro. A primeira frutificação da árvore começa na faixa de 8 a 10 anos de idade após o plantio. Possui pouca exigência em fertilidade do solo, essa espécie é adaptada ao desenvolvimento em pleno sol ou a meia sombra, preferência de plantio em solos bem drenados (CARVALHO, 2007; ÁVILA *et. al.*, 2012).



Figura 7: Fruto aberto do Jatobá-do-Cerrado.
Fonte: SITE EMBRAPA.

Sua madeira é empregada na construção civil e naval, a polpa de seus frutos é utilizada na culinária brasileira na fabricação de bolos e tortas, e a casca (Figura 8) oriunda do tronco de sua árvore é usada na medicina popular (garrafadas) (BATISTA *et al.*, 2011).



Figura 8: Tronco da árvore do Jatobá-do-cerrado com a casca.
Fonte: SITE EMBRAPA.

3.4.1.3- Pequi

O pequi (*Caryocar brasiliense*) faz parte de uma das famílias de espécies vegetais mais importantes do Cerrado, pertencente à família *Caryocaraceae* e ao gênero *Caryocar* (Figura 9). Essa árvore é cultivada em todo o Cerrado brasileiro, que inclui os Estados do Pará, Mato Grosso, Goiás, Distrito Federal, São Paulo, Minas Gerais e Paraná, incluindo também os Estados nordestinos, Piauí, Ceará e Maranhão. Na região do Cerrado a espécie de ocorrência principal é a *Caryocar brasiliense* Camb., por esse motivo essa espécie merece especial atenção. O volume de frutos comercializados na região Centro-Oeste e as suas especiais características organolépticas, o tornam uma espécie muito almejada no mercado consumidor (ALMEIDA, 1998; SILVA *et al.*, 1994).



Figura 9: Árvore do Pequi.
Fonte: EMBRAPA.

O pequi conhecido popularmente como pequizeiro, pequiá, amêndoa de espinho, piqui ou amêndoa do Brasil é utilizado na culinária brasileira para elaboração de vários pratos típicos do Centro-Oeste brasileiro. A primeira frutificação da árvore começa na faixa de 4 a 8 anos de idade após o plantio, além disso, o seu tempo de vida útil é de aproximadamente 50 anos. O óleo extraído de sua castanha é usado desde a culinária até a indústria farmacêutica (CORREA, G. M. *et al.*, 2008).

O fruto do pequi é na forma de drupa recoberta por uma fina casca, de cor verde-acinzentada que constitui o epicarpo. O mesocarpo é rico em tanino, pouco fibroso e apresenta de um a quatro putâmens. Já o endocarpo (Figura 10) é composto por espinhos e filamentos de cor avermelhada, sendo duro e lenhoso, acomodando uma semente oleaginosa de cor branca (amêndoa) (CORRÊA, *et al.*, 2008).



Figura 10: Endocarpo do Pequi.
Fonte: SITE EMBRAPA.

De acordo com o estudo de VERA *et al.*, (2005), sobre caracterização física de frutos do pequi (*Caryocar brasiliense Camb.*) no estado de Goiás, o período de safra desse fruto ocorre geralmente nos meses de setembro a fevereiro. Na análise dos frutos realizada neste estudo foi possível aos pesquisadores observar que o peso médio dos frutos foi em torno de 120g. A casca do fruto correspondeu a 82% do fruto, o endocarpo 4,6%, a polpa 7% e a amêndoa 1%. Em relação ao peso unitário dos frutos, foi possível observar que os valores obtidos ficaram na faixa entre 50-250g, a casca de 20-117g, a amêndoa de 2-4g e a polpa apresentou valor médio de 8,14g.

3.5- Histórico Sobre a Tecnologia da Gaseificação

A tecnologia da gaseificação de combustíveis é conhecida desde o final do século XVIII. No ano de 1830 foram registradas as primeiras utilizações comerciais e no ano de 1850, grande parte da cidade de Londres era iluminada com gás. Como o uso do gás para diversas utilidades só foi crescendo na Inglaterra, então a indústria passou a utilizar mais gaseificadores para a produção de gás, principalmente queimando madeira e carvão mineral (NETO, 2011).

Em 1881, o gás gerado pela gaseificação foi utilizado para acionar motores de combustão interna. No decorrer de 1920 foram realizadas várias demonstrações utilizando o gás produto da gaseificação para aplicações em motores estacionários, caminhões, carros e tratores. Com o passar do tempo, todas essas utilizações foram abandonadas na Europa, e passou-se a utilizar cada vez mais os combustíveis fósseis. Durante a 2ª Guerra Mundial, a utilização da gaseificação voltou a ser o enfoque da Europa, Ásia, América Latina e Austrália, principalmente para a geração de energia elétrica; devido à escassez do petróleo. Somente na Europa um milhão de veículos eram acionados por meio de gaseificadores, utilizando como combustível, carvão vegetal ou madeira. Nos anos de 1970 e 1980 reacendem o interesse pela gaseificação da biomassa, em razão das crises energéticas (CARDOSO, 2013).

Atualmente, o uso da tecnologia da gaseificação vem se intensificando mundialmente, devido aos problemas ambientais gerados pelo uso dos combustíveis fósseis e principalmente, em razão da descentralização. Todos os países estão investindo e apoiando o uso da gaseificação para a geração de energia elétrica, térmica, fabricação de produtos químicos, entre outras finalidades (CARDOSO, 2013).

3.5.1- A Indústria da Gaseificação

Segundo o documento WORLDWIDE GASIFICATION DATABASE (2010), no mundo todo existem mais de 269 plantas de gaseificação em operação e 677 gaseificadores construídos e instalados. Em relação aos gaseificadores em construção ao redor do mundo, há 74 usinas que terá um total de 238 gaseificadores que serão capazes de produzir 83 MWt. Nos Estados Unidos existem 33 usinas de gaseificação, e o país do mundo com o maior número de plantas de gaseificação é a China.

As instalações de gaseificação se encontravam predominantemente nas regiões da Ásia, Austrália, África, Oriente Médio e América do Norte. A região da

Austrália e Ásia possui uma enorme capacidade de gaseificação, tanto operacional como em construção. Esses países já ultrapassaram o resto do mundo com respeito ao conhecimento dessa tecnologia. Até o ano de 2018 a capacidade da Ásia e da Austrália para a geração de gás de síntese será de 200.000 MWt, valor significativo quando comparado com os outros países que detêm a tecnologia (HIGMAN, 2013).

A matéria-prima mais utilizada no processo de gaseificação é o carvão vegetal, que deverá perder essa posição no futuro, devido a diversas pesquisas com outros tipos de biomassas que vem sendo estudadas todos os anos. Algumas plantas de gaseificação utilizam derivados do petróleo em seu reator, mas esse uso vem apresentando redução ao longo dos anos, pois o preço do petróleo aumenta de maneira acelerada. A utilização de diversas biomassas como combustível nos gaseificadores irá crescer significativamente até o ano de 2018 (HIGMAN, 2013).

As utilizações da gaseificação são diversas: desde a produção de produtos químicos até a geração de energia elétrica. A gaseificação com enfoque na produção de produtos químicos é a aplicação mais nobre para o gás de síntese, devido a isso ele deve ser limpo e apresentar uma boa qualidade para utilização na indústria. Um estudo recente realizado por HIGMAN & TAM (2013) determinaram que 25% da amônia e 30% do metanol do mundo agora podem ser produzidos pelo processo de gaseificação, desde que o gás de síntese seja limpo e de boa qualidade.

Até o ano de 2018 a capacidade para produção de gás de síntese será de 110.000 MWt que serão utilizados para a produção de produtos químicos, já para a geração de energia são esperados 20.000 MWt. Para a produção de combustíveis gasosos a capacidade de geração de gás de síntese será de 65.000 MWt e para os combustíveis líquidos 50.000 MWt (HIGMAN, 2013).

Os projetos relacionados à área da gaseificação estão atualmente avançando nos estudos com diversos tipos de biomassas e nas mais variadas formas de se conduzir um reator de gaseificação. Os projetos de gaseificação voltados para a indústria seja ela de produtos químicos, hidrogênio ou para geração de energia, estão ficando cada vez maiores em relação ao tamanho do reator, e, também no

número de gaseificadores instalados pela indústria. A razão de tudo isto, é atender a demanda energética e comercial mundial (HIGMAN, 2013).

A procura por gaseificadores de menor escala também é crescente, pois para se trabalhar com alguns tipos de biomassas e resíduos sólidos municipais não são necessários reatores maiores, como os que são utilizados em escala industrial. A capacidade de gaseificação mundial irá crescer significativamente até o ano de 2018, em razão dos países como China, Índia, Coréia do Sul e Mongólia estarem investindo pesado nessa área com o apoio do governo local (HIGMAN, 2013).

3.5.2- Estado da arte do processo de gaseificação

GROOM & ELDER (2011) realizaram um estudo com gaseificação, utilizando o reator de leito fixo do tipo *Downdraft* e como combustível as biomassas: pinho e mistura de madeiras de alta densidade. O agente gaseificante utilizado no estudo foi o ar. Os autores observaram que o consumo das duas biomassas, aumentando o fluxo de ar, ocorreu de forma relativamente linear. O consumo de combustível ficou entre 17-30 kg/h⁻¹.

A composição dos gases apresentou uma variabilidade muito estreita, com exceção do dióxido de carbono que se apresentou para as duas biomassas da mesma maneira. A eficiência do processo foi maior nas taxas de fluxo de ar de 62 e 70m³/h⁻¹. A composição do gás foi formada por aproximadamente 200 dm³.m⁻³ de monóxido de carbono, 30 dm³.m⁻³ de metano, 190 dm³.m⁻³ e 12 dm³.m⁻³ de dióxido de carbono, como resultado da gaseificação para as duas biomassas. O poder calorífico do gás produzido foi de 6 MJ/m⁻³, em relação as duas biomassas.

Ao final do experimento pode-se concluir que a composição do gás e o conteúdo de energia do gás resultante do processo deram semelhantes com ligeiras diferenças devido à taxa de fluxo de ar. A gaseificação pode converter muitas matérias-primas em gás de síntese, mas é necessário caracterizar bem as biomassas utilizadas para entender ao final do processo a influência das propriedades do combustível na composição final do gás.

FIGUEIREDO *et al.*, (2012) avaliaram o desempenho de uma planta piloto do sistema de gaseificação, leito fixo, co-corrente de duplo estágio. A biomassa utilizada como combustível foi a lenha de eucalipto na geração do gás combustível, para alimentação do motor MWM, que precisou ser convertido para ciclo Otto; pois é fabricado para ciclo diesel. O motor possuía potência para 50 kVA, acoplado ao reator de gaseificação, tendo como produto final a geração de energia elétrica.

O consumo médio de biomassa no reator foi de 49,6 kg/h com teor de umidade médio de 16,42%. Os teores de gases encontrados no gás de síntese foram de 16,9 % de H₂, 0,1% de O₂, 50,1% de N₂, 20,0% de CO, 10,9% de CO₂ e 2,0% de CH₄. A presença do nitrogênio no gás de síntese, não contribui positivamente para o aumento do PCS, pois o N₂ é um gás inerte. A concentração dos outros gases gerados ficou dentro do que se esperava para este processo. A quantidade de gás gerada foi suficiente para alimentar o grupo gerador com potência máxima de 26,4 kW. Pode-se observar que à medida que o gerador era alimentado, a temperatura do gaseificador aumentava, pois o gás produzido estava sendo consumido, logo o volume ocupado por ele no interior do gaseificador diminuía. Em relação ao funcionamento do motor não foi possível obter uma queima perfeita do gás, pois como o motor foi modificado para ciclo Otto, no escapamento foi detectado 0,1% de H₂ e CH₄. O experimento foi obtido com sucesso demonstrando que a gaseificação quando realizada sob controle dos parâmetros é uma tecnologia viável para a geração de energia elétrica.

OUADI *et al.*, (2013) utilizou rejeitos da indústria de papelão misturados com lascas de madeira de diversas espécies em um gaseificador *downdraft*. Todos os materiais utilizados na gaseificação foram tratados para redução do teor de umidade e a quantidade de biomassa utilizada para alimentação do gaseificador foi de 10 kg/h. O fluxo de ar utilizado foi de 10 m³/h e cada ensaio de gaseificação durou de 3-5 horas. Em geral todos os ensaios foram bem sucedidos, o gás produzido gerou uma chama duradoura e consistente e o teor de alcatrão gerado no processo foi de 3 g/Nm³; acima do teor gerado pela gaseificação de madeira que normalmente é de 1-2 g/Nm³. A composição média do gás foi de 16,24% de H₂, 23,34% de CO, 12,71% de CO₂, 5,21% de CH₄ e 42,49% de N₂. Após a remoção de alcatrão e água

de condensado o gás produzido tinha PCS suficiente e vazão para alimentar um motor a gasolina de 10 kWe.

GALINDO *et al.* (2014) realizou um experimento com madeira de eucalipto em um gaseificador *Downdraft*, com estágio duplo de entrada de ar. A primeira injeção de ar ocorria 0,3 m acima da grelha e a outra 0,4 m acima da primeira injeção de ar. O consumo de alimentação de biomassa no reator foi de 12 kg/h. O objetivo deste trabalho foi verificar se aplicando condições operacionais diferentes, como: fluxo de ar e relações equivalentes diferentes influenciaria no conteúdo de alcatrão e partículas no gás e, principalmente, no conteúdo do gás.

O gás obtido neste experimento teve uma composição de 19,2% de CO, 1,3% de CH₄, 17,14% de H₂, 14,22% de CO₂ e com um Poder Calorífico Inferior (PCI) médio de 4,74 MJ /Nm³. Esses bons resultados podem ser explicados pelo aumento da temperatura na zona de pirólise e combustão, que favoreceram o craqueamento do alcatrão e a diminuição no teor de particulados no gás produto.

GUO *et al.*(2014) realizou um estudo com o objetivo de verificar a influencia da geometria do reator, razão de equivalência e taxa de alimentação de biomassa no desempenho do reator. Ele testou e avaliou o sistema de gaseificação de leito fixo, *downdraft*, em escala laboratorial, utilizando como biomassa palha de milho. Além disso, foi utilizado três estágios de entrada de ar e a rotação da grelha para disposição das cinzas e coque quando oriundo do processo de gaseificação. Utilizou o ar como agente gaseificante e o reator sob pressão atmosférica.

Pode-se observar por meio dos resultados encontrados, que é extremamente importante que o reator tenha uma zona de redução uniforme e estável, pois em decorrência disso, o gás produzido apresenta uma melhor qualidade e uma redução no teor de alcatrão. Os resultados demonstraram que as três fases de entrada de ar, 0,43; 0,7 e 0,36m distante da grelha geraram uma zona de redução e oxidação com temperatura elevada e uniforme. Em razão disso, é extremamente importante ter controle sobre as zonas de reação dos gaseificadores, é necessário se utilizar termopares sempre que possível em diversas regiões do reator com o intuito de melhorar o desempenho da tecnologia.

O Instituto de Tecnologia Asiático (AIT) projetou um gaseificador *downdraft* com duplo estágio para fornecimento de ar, essa diferença em relação a um reator tradicional de gaseificação fornece um gás de síntese com um teor de alcatrão baixo, cerca de 40 vezes menor (JAOJARUEK K, 2011; BHATTACHARRYA, 1999).

O processo de gaseificação está em constante movimento, principalmente a partir do ano de 2009, no qual USA e China passaram a pesquisar e publicar mais sobre o tema. A área é promissora, em decorrência das utilizações do gás de síntese, que pode ser usado na fabricação de produtos químicos, geração de energia elétrica e térmica, entre outras possibilidades. A alta demanda mundial pela procura por energias renováveis é um dos principais motivadores do crescente emprego e estudo dos sistemas de gaseificação (SANT' ANNA *et al.*, 2013).

3.5.3- A tecnologia da gaseificação como alternativa de conversão

O processo de gaseificação consiste na conversão termoquímica de materiais carbonáceos, líquidos ou sólidos, em gás combustível, denominado de gás de síntese ou *syn gas*. O agente de gaseificação utilizado nessa conversão pode ser: ar, vapor, oxigênio, CO₂, ou uma mistura destes. O gás produzido pelo processo é formado por uma mistura de CO, H₂, CH₄, pequenas frações de outros hidrocarbonetos leves (C_nH_m), CO₂, vapor d'água e N₂ (E.G. PEREIRA *et al.*, 2012).

Além do gás de síntese produzido no processo, também há a formação de ácidos pirolenhosos, alcatrão e cinzas. A formação do alcatrão é um dos maiores problemas gerados durante a gaseificação da biomassa, pois o alcatrão afeta o uso final do gás produzido e influencia no desempenho do reator (DEVI, L. & PTASINSKI, K. J., 2003).

De acordo com Silva *et al.*,(2004) nesse processo de conversão termoquímica o carbono presente no combustível sofre oxidação térmica parcial com o oxigênio fornecido ao sistema, pois a quantidade fornecida é abaixo da estequiométrica recomendada para a combustão completa. Em decorrência disso, o gás combustível

formado é constituído principalmente por componentes que ainda são passíveis de combustão, como o CO e H₂. A constituição do gás depende de vários parâmetros utilizados no processo de gaseificação, como: a medida do tamanho das partículas da biomassa, a pressão, a temperatura, o tempo de residência e o tempo de aquecimento (SILVA *et al.*, 2004; J.A. RUIZ *et al.*, 2013).

As razões práticas para se utilizar o processo de gaseificação para a conversão da biomassa em energia são numerosas e dependem muito das condições locais. A gaseificação pode reduzir a área de disposição de resíduos, o volume de resíduos dispostos no meio ambiente, a dependência de regiões e países às flutuações nos preços dos combustíveis importados. Além disso, existem muitas situações em que a gaseificação apresenta vantagens significativas sobre a queima direta da biomassa ou de combustíveis fósseis. Um exemplo é a geração de eletricidade em pequena escala, que pode ser realizada, sem a necessidade de um ciclo a vapor, simplesmente pela queima do gás em um motor de combustão interna (SAIK *et al.*, 2004; SANCHEZ, 2002).

Segundo SANCHEZ (2002), as vantagens oriundas da utilização da gaseificação são diversas, como:

- Alta eficiência térmica, variando de 60-90%, dependendo do reator implementado no processo;
- A energia gerada com a combustão dos gases é limpa, comparada a produzida pela queima dos combustíveis fósseis;
- A demanda de energia pode ser controlada e a taxa de gaseificação pode ser facilmente monitorada.

As desvantagens dessa tecnologia são:

- A matéria-prima combustível deve ser limpa, sem a presença de terras ou de outros resíduos que possam comprometer o processo de gaseificação;
- Pode ocorrer a fusão das cinzas, e em decorrência disso, o desempenho do reator pode ficar comprometido;

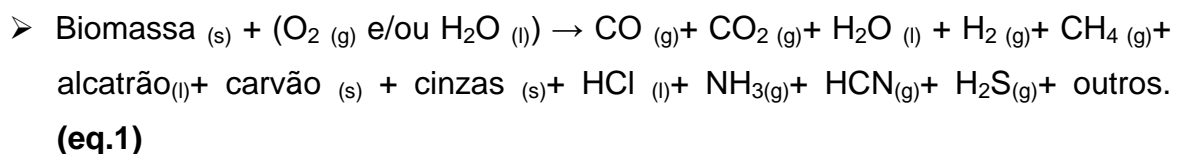
- O alcatrão resultante do processo se não completamente queimado no interior do reator, pode limitar as aplicações do gás combustível.

3.5.5- Reações químicas envolvidas no processo de gaseificação

O processo termoquímico de gaseificação da biomassa envolve diversas reações químicas complexas, elas são responsáveis pela formação do gás de síntese. A gaseificação é uma prática altamente eficiente, alcançando valores de eficiência a frio de 60-70% e conversão de carbono de 98-99%. As reações envolvidas na gaseificação podem ser distintas em zonas dentro do reator, como: secagem, pirólise, combustão e redução (REZAIAN, 2005; KLASS, 1998).

- Secagem (até 150°C): é um processo endotérmico, responsável pela evaporação da água;
- Pirólise ($T < 700^{\circ}\text{C}$): é um processo endotérmico que produz como produtos: bióleo, alcatrão, resíduo sólido de carbono (carvão) e uma parte gasosa composta por: H_2 , CO , N_2 ;
- Combustão ($700 < T < 2000^{\circ}\text{C}$): é um processo exotérmico, onde o carbono da biomassa reage com o oxigênio disponível;
- Redução ($800 < T < 1200^{\circ}\text{C}$): é um processo endotérmico, responsável pela formação de gases combustíveis.

A gaseificação é um processo globalmente endotérmico, podendo ser resumido da seguinte maneira (CENBIO, 2002; MARTIN, 2010):



I- Pirólise

- Biomassa (s) + Calor → Coque (l) + Gases (g) + Alcatrão (l) + Condensáveis(g).
(eq.2)

II- Oxidação do Carbono

- $C_{(s)} + 1/2 O_{2(g)} \rightarrow CO_{(g)}$ $\Delta H = -110,6 \text{ kJ.mol}^{-1}$ (eq.3)

- $C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$ $\Delta H = -393,8 \text{ kJ.mol}^{-1}$ (eq.4)

III- Gaseificação

Reações heterogêneas

- $C_{(s)} + CO_{2(g)} \leftrightarrow 2CO_{(g)}$ (Reação de Boudouard) $\Delta H = 172,6 \text{ kJ.mol}^{-1}$
(eq.5)

- $C_{(s)} + H_2O_{(l)} \rightarrow CO_{(g)} + H_{2(g)}$ (Oxidação parcial do carbono pelo vapor d'água)
 $\Delta H = 131,4 \text{ kJ.mol}^{-1}$ (eq.6)

- $C_{(g)} + 2H_{2(g)} \leftrightarrow CH_{4(g)}$ (Reação de Formação do Metano)
(eq.7)

$$\Delta H = -74,9 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

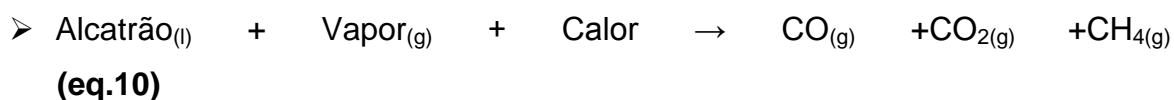
Reações homogêneas

- $CO_{(g)} + H_2O_{(l)} \leftrightarrow CO_{2(g)} + H_{2(g)}$ (Reação de Shift) $\Delta H = -41,2 \text{ kJ.mol}^{-1}$
(eq.8)

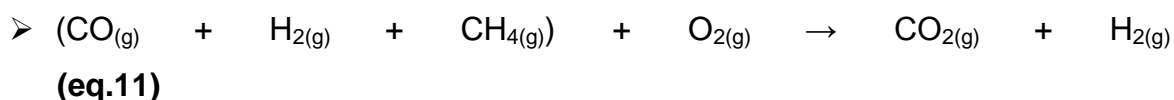
- $CH_{4(g)} + H_2O_{(l)} \leftrightarrow CO_{(g)} + 3 H_{2(g)}$ (Reação de reforma a vapor de metano)
(eq.9)

$$\Delta H = 201,9 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

IV- Craqueamento do Alcatrão



V- Oxidação parcial dos produtos da pirólise



A pureza do gás de síntese produzido através do processo de gaseificação irá depender da tecnologia do reator de gaseificação utilizada e principalmente da temperatura de operação do processo. Gaseificadores que operam com temperaturas baixas (800-1000°C) geram um gás de síntese composto por CO₂, CO, H₂, H₂O, CH₄, olefinas, benzeno, alcatrão e impurezas inorgânicas. Já em reatores de gaseificação que a temperatura de operação é alta (1200-1400°C), o gás de síntese contém primordialmente CO, CO₂, H₂O e H₂.

3.5.4- Parâmetros que influenciam no processo de gaseificação

3.5.4.1- Granulometria da partícula

A granulometria está relacionada ao tamanho da partícula utilizada no processo de gaseificação. Para cada tipo de reator existe um tamanho de partícula ideal, que irá influenciar diretamente no funcionamento do gaseificador e, além disso, afetará a composição final do gás de síntese. A granulometria ideal aumenta a área reativa superficial do combustível sólido, gerando melhores condições de operação e rendimento no processo (RAPAGNA, 2008; WARNECKE, 2000).

A utilização de partículas maiores de biomassa em gaseificadores podem formar pontes que impedem o movimento de biomassa no interior do reator,

enquanto a utilização de partículas menores dificulta a passagem do ar no interior do reator; facilitando a formação de caminhos preferenciais. Portanto, quando se realiza o processo de gaseificação deve-se considerar o equilíbrio entre o efeito do tamanho da partícula da biomassa sobre a eficiência do processo (RAPAGNA, 2008; WARNECKE, 2000).

Nos estudos de LV *et al.*, (2004), eles observaram que partículas de pequenas dimensões produzem mais CH₄, CO e C₂H₄ no gás de síntese e menor concentração de CO₂, em comparação com partículas maiores. Eles trabalharam o efeito da granulometria sobre a composição do gás, utilizando resíduos em quatro faixas de 0,6-0,9, 0,45-0,6, 0,3- 0,45 e 0,2-3 mm. Dessa forma o rendimento do gás, poder calorífico superior e a conversão de carbono foram analisadas, objetivando melhorar o processo de gaseificação. Os autores concluíram que as pequenas partículas de combustível, contribuem para aumentar a área superficial e facilitar a taxa de aquecimento, que dessa forma produzem mais gases leves e menos carvão e produtos condensados. Portanto, o rendimento e composição do gás podem ser melhorados com o controle do tamanho das partículas de biomassa.

3.5.4.2- Efeito da temperatura

A temperatura de operação do gaseificador é um dos parâmetros operacionais mais significantes no processo, pois ela tem efeito na composição do gás combustível e na conversão de carbono através das reações de oxidação e gaseificação. Vários fatores no processo de gaseificação são afetados pela ação da temperatura, como: o rendimento do material gasoso, o poder calorífico do gás produzido, a eficiência do gás quando queimado e finalmente, o rendimento de alcatrão e carvão oriundos do processo. O efeito da temperatura sobre o processo, também depende do comportamento das reações e do balanço das reações endotérmicas e exotérmicas (ERNAMI *et al.*, 2012).

A temperatura durante o processo de gaseificação irá depender dos seguintes fatores: teor de materiais voláteis dos combustíveis, o tipo de reator escolhido para o

processo, o teor de umidade presente no combustível, os materiais de construção usados no gaseificador, o teor de cinzas presente na biomassa, entre outros fatores.

De acordo com ERNAMI *et al.*, (2012), a temperatura é o parâmetro da gaseificação que deve ser controlado cuidadosamente, pois quando se reduz esse fator no processo da gaseificação, haverá uma menor conversão de carvão e um aumento na concentração de alcatrão no gás gerado (*syngas*). Segundo GÔMES (2011), gases com elevada concentração de alcatrão, não são indicados para a produção de energia elétrica, através de alguns equipamentos (ERNAMI, 2012 e GÔMES, 2011).

Em relação à constituição do *syngas*, com o aumento da temperatura do reator, aumenta-se a concentração de CO e H₂; e reduz as concentrações de CH₄, H₂O e CO₂. O reator que mais uniformiza a distribuição da temperatura em seu interior é o de leito fluidizado, pois a todo tempo o leito está sendo movimentado (J.A. RUIZ *et al.*, 2013).

3.5.4.3-Tempo de Residência

O tempo de residência está relacionado com o funcionamento de cada reator. O tempo de residência é o período médio que as partículas do combustível permanecem no interior do gaseificador. Esse período deve ser suficiente para assegurar que as reações que norteiam a gaseificação ocorram, gerando como produto final, o gás de síntese (ZHOU *et al.*, 2009).

Esse parâmetro está diretamente ligado ao grau de fluidização do combustível no interior do reator. Em leitos fluidizados, o tempo de residência da biomassa é menor que nos leitos fixos, a justificativa para isso, é a distribuição não uniforme da temperatura nos reatores de leito fixo. Para resolver esse problema dos gaseificadores de leito fixo, muitos projetos de plantas pilotos adicionam ventiladores ou sopradores no reator para que haja a agitação da biomassa no leito e assim ocorra redução no tempo de residência (WANG *et al.*, 2008).

3.5.4.4- Pressão

A pressão é um dos fatores que influenciam significativamente a composição do gás de síntese resultante do processo de gaseificação, pois esse fator favorece as reações que ocorrem dentro do gaseificador, cujo objetivo é diminuir o número de moles; principalmente a reação do gás metano.

De acordo com ASSUMPÇÃO (1981), os gaseificadores que trabalham sob pressão atingem temperaturas elevadas de trabalho, enquanto que os que ficam submetidos à pressão atmosférica de auto ajuste são mais fáceis de manipular.

3.5.6- Aplicações da Tecnologia da Gaseificação

A tecnologia da gaseificação da biomassa vem se consolidando no decorrer dos anos, por meio das pesquisas nas universidades e do incentivo do governo em muitos países desenvolvidos, como na Finlândia (JUÀREZ, 2013). A gaseificação é uma área muito atrativa para fins energéticos, principalmente, porque o seu objeto de estudo é a utilização da biomassa residual (PEREIRA, 2012). Há diversos projetos de sistemas de gaseificação sustentáveis, sendo implantados pelo mundo, com o enfoque de gerar diversas formas de energia.

3.5.6.1-Geração de energia elétrica e calor

Nos últimos 20 anos as pesquisas relacionadas à geração de energia a partir da gaseificação da biomassa tem avançado, devido à utilização de diversas matérias-primas nos experimentos realizados nas várias plantas pilotos distribuídas pelo mundo. Nos países da Europa, no fim dos anos 90, aumentou o interesse pela utilização da biomassa para geração de energia, por meio da tecnologia da gaseificação (PEREIRA, 2012). BEENACKERS (1999) mostra que o principal interesse da Europa no processo de gaseificação é a combinação da geração de calor e eletricidade, devido às épocas frias vividas pela sociedade europeia e a

dependência dos países comunitários quanto ao abastecimento de fontes energéticas fósseis, em sua maior parte importada.

No Brasil houve o projeto do GASEIFAMAZ, com o objetivo de comparar as tecnologias de gaseificação de biomassa existentes no Brasil e no Exterior e formar recursos humanos na Região Norte. Foi avaliada a tecnologia de gaseificação indiana com leitos fixos para utilização em pequena escala. O intuito da análise era suprir eletricidade de forma sustentável em comunidades isoladas na região Norte. O sistema de gaseificação foi instalado em uma pequena comunidade chamada Aquidabam, na região Amazônica, a biomassa utilizada foi a casca do cupuaçu e resíduos de madeira. O projeto obteve bons resultados na geração de energia elétrica, mas atualmente a comunidade não utiliza mais o reator. A Índia já apresenta diversos equipamentos de leito fixo implantados em seu país em operação há mais de 10 anos, e com a maioria tem obtido sucesso (LORA *et al.*, 2009).

Na Áustria, se utiliza biomassa principalmente para aquecer ambientes e gerar energia elétrica. Uma das plantas de gaseificação de maior sucesso implantada nesse país está instalada em uma vila chamada Güssing. O reator implantado é do tipo leito fluidizado circulante, ele produz por volta de 2.0 MW de energia elétrica e 4.5 MW de energia térmica. A biomassa utilizada para produção de energia são cavacos de madeira. O gás oriundo do reator em Güssing passa por um processo de limpeza, e posteriormente passa por um motor a gás associado com uma caldeira, para a geração de calor e energia elétrica. Essa associação para geração de calor e energia é denominada de cogeração, e é uma das possibilidades de se gerar energia elétrica com a tecnologia da gaseificação (RENTIZELAS *et al.*, 2009).

A utilização da biomassa para geração de energia na Áustria alcançou resultados positivos devido a uma política de apoio, financiamento e comprometimento do governo. Isso é extremamente importante para esse país, que depende de combustível importado, cerca de 90% do petróleo e 80% do gás e carvão mineral que consome (CALLE *et al.*, 2008).

Diversos gaseificadores de grande porte foram desenvolvidos nos Estados Unidos e na Europa, primeiramente para geração de calor e eletricidade, como na Áustria, atualmente alguns desses gaseificadores geram vapor, calor e eletricidade para diversas atividades na indústria e no âmbito residencial. BERGGREN *et al.*, (2008) analisou um sistema de gaseificação polonês para a geração de energia, utilizando carvão e outra biomassa, mecanismo co-firing. O experimento mostrou um potencial de geração de energia de 2,3 a 6,6 TWhe, isso representa de 1,6-4,6% da geração de eletricidade na Polônia no ano de 2010. O custo para se gerar energia dessa forma seria bem menor que 20 euros por MWhe, valor significativo comparado com os 96 euros gastos pelo país no ano de 2003, para geração energética.

A Finlândia é outro país que merece destaque na produção e utilização de gaseificadores para a geração de energia e calor. A Foster Wheeler Energy OY (FW) é uma grande empresa fabricante de gaseificadores, em escala comercial. Esta empresa opera atualmente um reator de gaseificação com capacidade de 43 MW, na termoelétrica Kymijaevi, na cidade de Lahti, na Finlândia. A biomassa utilizada nesse reator consiste em pó de serraria, resíduos de madeira e combustível reciclado (plástico, papelão, madeira). O poder calorífico do gás produzido é de aproximadamente 2,2 MJ/Nm³. O gás é queimado em uma caldeira para a geração de eletricidade. Mais de 20% da energia desse país é oriunda da biomassa, é utilizado desde o licor negro resultante da produção de celulose e papel, até os resíduos florestais (CALLE, 2008; HALDER, 2014).

3.5.6.2-Geração de produtos químicos

Produzir o etanol por meio da fermentação do gás de síntese gerado através da gaseificação é uma grande promessa proposta pela ciência para aumentar o volume de etanol produzido no mundo. Na literatura ainda não há a descrição perfeita de uma rota para a geração de etanol por meio do gás de síntese, mas o Departamento de Energia dos Estados Unidos tem realizado pesquisas para determinar uma rota viável para a geração desse produto. Muitas bactérias têm sido estudadas por esta instituição para a conversão do gás de síntese em etanol.

A instituição realizou experimentos com a bactéria anaeróbica *Clostridium ljunduhdi* que já apresentou bons resultados na produção de etanol e ácido acético a partir dos gases: CO, CO₂ e H₂ por meio do processo acetogênico. Os estudos nessa área estão se intensificando ao longo dos anos para que se encontre a melhor rota, o menor custo e a melhor bactéria para a produção de etanol do *syn gas* (MABEE *et al.*, 2011).

3.5.6.3-Produção de Hidrogênio

Vários cientistas vêm pesquisando quais os fatores que influenciam no processo de gaseificação, pois o objetivo de todos é a geração de um gás limpo e principalmente de elevado poder calorífico. Nos estudos de BYRD *et al.*, (2011) ele verificou que a temperatura é o fator mais influente para o processo de gaseificação visando a produção de hidrogênio, pois o aumento dessa variável resultou em um aumento significativo no conteúdo de hidrogênio e metano. XIONG *et al.*, (2004) observou que aumentando a temperatura, o poder calorífico inferior do gás aumenta e a porcentagem de hidrogênio também, mas estes fatores diminuem aumentando a razão de equivalência (ER). LU *et al.*, (2012) observou que o tamanho das partículas influencia na eficiência da conversão de carbono dentro do reator e na produção de hidrogênio. Com a diminuição do tamanho das partículas ocorreu aumento significativo no teor de hidrogênio no gás.

CHANG *et al.*, (2011) analisou a gaseificação da biomassa, α - celulose e outros resíduos agrícolas, em um reator de leito fluidizado. O agente gaseificante utilizado foi o vapor d'água. O enfoque deste estudo era a geração de bio-hidrogênio e *syngas*. Neste experimento pode-se verificar que quando a razão equivalente foi de 0,2 e a temperatura utilizada foi de 1000°C, sem o uso de vapor, conseguiu-se o máximo rendimento de bio-hidrogenio (29,5%) e CO (23,6%). A concentração de CO₂ adotando essas mesmas condições de operação foi de 10,9%. O gás de síntese é caracterizado pelas porcentagens de H₂ e CO presentes no gás oriundo da gaseificação, quanto maior as porcentagens desses gases, maior o poder calorífico

do gás e melhor a sua qualidade para produção de combustíveis líquidos e, além disso, pode-se utilizar esse gás para limpeza de gases para produção de hidrogênio.

3.5.7- Os Desafios Tecnológicos da Gaseificação

O processo termoquímico da gaseificação é considerado versátil pela comunidade científica, mas ainda há muitas barreiras para transformar todo este potencial teórico da tecnologia em realidade, tornando-a competitiva comercialmente dentre as formas já existentes de tecnologias para conversão energética. As dificuldades relacionadas ao assunto da gaseificação, não estão ligadas ao processo básico em si, mas sim na elaboração de um projeto que atenda as demandas do mercado energético mundial (NETO *et al.*, 2001).

Um excelente equipamento de gaseificação precisa produzir um gás com segurança e confiabilidade, adaptado as características inerentes do combustível e da operação, tão exclusivos que alguns componentes podem ser de relevante importância, dependendo da utilização do gás de síntese, ou podem se tornar completamente dispensáveis ao processo. Na prática para se construir um reator modelo levando em consideração: os requisitos de limpeza, excelente qualidade do gás de síntese, alta eficiência, sem a necessidade de vigilância constante na operação do reator, rapidez na alteração da carga, baixo custo de manutenção e construção do reator, e elevada durabilidade são fatores conflitantes, pois quando há aumento no desempenho de um, existe perda no outro (NETO *et al.*, 2001).

Esta discrepância que ocorre no desempenho dos reatores é algo normal quando se trabalha com projetos de máquinas para geração de energia, tais como hidroelétricas, termelétricas convencionais e equipamentos térmicos de maior porte. Devido a isso, é necessário um estudo prévio das características químicas e físicas do combustível que será utilizado como fonte energética e, além disso, é necessário um estudo detalhado do produto final que deve ser gerado (NETO *et al.*, 2001).

Os detalhes técnicos do reator e da biomassa que precisam ser dominados profundamente pela ciência são:

- Sistema de limpeza eficiente e de baixo custo na construção do reator;
- Melhor forma de armazenar, transportar e manusear os combustíveis utilizados no processo;
- Verificar a escala adequada para construção do reator, analisando primeiramente as características intrínsecas da biomassa;
- Estudar a melhor forma de conduzir a operação de gaseificação, com o intuito de aumentar a eficiência do processo;
- Determinar formas sustentáveis de destinar os resíduos da gaseificação, como: cinzas e alcatrão.

4. EXPERIMENTAL

4.1- Materiais e Reagentes

- Casca do fruto de baru (*Dipteryx alata* Vog.);
- Carço do fruto de pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.);
- Casca da árvore do Jatobá-do-Cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* Mart);
- Etanol, 96% P.A, Vertec Química Fina;
- Tolueno, 96% P.A, Vertec Química Fina;
- Ácido Sulfúrico, P.A, Vertec Química Fina;
- Moinho de facas de laboratório, modelo MA 680, marca Marconi;
- Agitador de Peneiras, Bertel;
- Peneiras 40 ABNT/ASTM (40 Mesh) e 60 ABNT/ASTM (60 Mesh), Bertel;
- Ar sintético (ar comprimido) 5.0, fid, da White Martins (pureza = 99,999%);
- Nitrogênio comprimido 5.0, analítico, da White Martins (pureza = 99,999%);
- Gaseificador de leite fixo (contracorrente).

4.2- Preparação das Amostras

4.2.1- Obtenção dos Resíduos Florestais

Os resíduos florestais selecionados, carço de Pequi (*Caryocar brasiliense*), casca do fruto do Baru (*Dipteryx alata*) e casca da árvore do Jatobá do Cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*) foram doados pela empresa Empório do Cerrado (Rede de Comercialização Solidária de Agricultores Familiares e Extrativistas do Cerrado).

4.2.2- Empresa parceira do projeto: Empório do Cerrado

Empório do Cerrado é uma rede de comercialização solidária que foi organizada no ano de 2001 por seis comunidades de agricultores, assentados, familiares, extrativistas, pescadores, entre outros grupos formadores da sociedade local. O intuito da formação dessa associação era superar os problemas oriundos da baixa produtividade das roças e o alto custo para produção de alimentos. O potencial que essa cooperativa tem em relação a produção de alimentos é enorme, pois a sua área de atuação é composta por 74 municípios, em quatro estados brasileiros: BA, MG, TO e GO. Nestes estados são cultivadas as seguintes espécies florestais: baru (*Dipterix alata*), faveira (*Dimorphandra mollis*), buriti (*Mauritia flexuosa*), copaíba (*Copaifera sp.*), jatobá (*Hymenaea stignocarpa*), macaúba (*Acrocomia aculeata*), pequi (*Caryocar brasiliense*), babaçu (*Orbignya speciosa*) e ipê-roxo (*Tabebuia avellaneda*).

A produção anual de resíduos florestais gerados pela empresa é enorme, pois o território brasileiro onde há os plantios florestais gera volume significativo de matéria prima para a fabricação de produtos industriais. A casca da árvore de jatobá-do-cerrado é retirada de forma manual pelos extrativistas da área (Figura 11). Ela é utilizada pela empresa para a fabricação de produtos medicinais. Atualmente a capacidade de coleta da Empório em relação a esse tipo de matéria-prima é de 50-100 ton./ano.



Figura 11: Extração da casca de jatobá-do-cerrado.
Fonte: Material fornecido pela Empório do Cerrado.

No caso do caroço de pequi, atualmente a empresa coleta de 30-50 ton./ano, mas se houver a possibilidade de usá-lo para a produção de energia é possível trabalhar com até 500 ton./ano. A extração dos caroços de pequi é realizada manualmente (Figura 12), assim como da casca da árvore do jatobá-do-cerrado e dos frutos do baru. Atualmente, o beneficiamento do fruto do baru gera 1000 ton./ano de resíduos, mas o potencial para geração de energia é de 2-3 mil ton./ano.



(a)



(b)

Figura 12: (a) Beneficiamento dos frutos de pequi, (b) Coleta dos frutos de baru.

Fonte: Material fornecido pela Empório do Cerrado.

4.2.3- Preparo dos resíduos

Primeiramente, parte dos caroços de pequi, casca do fruto do baru e da casca da árvore do jatobá foram moídos em um moinho de facas de laboratório da marca Marconi, modelo MA 680. Posteriormente, os materiais foram armazenados em sacos plásticos, lacrados, para se evitar a contaminação.

4.2.3.1- Classificação dos Resíduos Moídos

Os resíduos florestais moídos foram classificados em duas granulometrias por meio de um agitador de peneiras, marca Betel com peneiras de 40 ABNT/ASTM (40 Mesh) para obtenção de partículas com maior granulometria e de 60 ABNT/ASTM (60 Mesh) para a obtenção de partículas com granulometria mais fina. O agitador foi programado durante o tempo de 20 minutos e vibrações de 7 rpm.

4.7- Técnicas de Caracterização

As amostras dos resíduos florestais foram caracterizadas por meio da difração de raios X (DRX) para verificar a cristalinidade/estrutura cristalina dos minerais que compõem as cinzas oriundas dos resíduos, análises térmicas (TG/DTG/DTA) para avaliação do comportamento térmico dos resíduos e análises elementar de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Oxigênio (CHNO) e fluorescência de raios-X com energia dispersiva (FRX/EDX) para obtenção da composição elementar das amostras.

Os programas computacionais utilizados para a análise dos difratogramas foram os programas OPUS-NT (Brüker, versão 3.1) e OriginPro 8.0. Para o tratamento dos dados de análise térmica foi também utilizado o programa Universal Analysis (TA Instruments, versão 3.1E). EDX/FRX foi utilizado o programa do próprio equipamento.

4.7.1- Análise Elementar (CHNO/EDX/FRX)

Para a caracterização quantitativa dos elementos: Carbono (C), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N) e Oxigênio (O) foi utilizado um equipamento de análise elementar da marca PerKin Elmer, série II, modelo 2400, CHN/S. Para o ajuste do equipamento foi utilizado Acetanilida (Perkin Elmer, P.A), como padrão. A partir desses dados e do teor de cinzas, foi possível obter o teor de Oxigênio (O).

Para a obtenção dos dados de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (FRX/EDX) foi utilizado um espectrômetro da marca Shimadzu, modelo EDX-720, que analisa a faixa de elementos que vai do sódio ($_{11}\text{Na}$) ao urânio ($_{92}\text{U}$) e cujo alvo dos raios X é os átomos de ródio (Rh).

Primeiramente, as amostras *in natura* das biomassas foram trituradas, peneiradas e maceradas para que ficassem homogêneas. Posteriormente, as amostras foram colocadas nos portas-amostra do equipamento, utilizando filme de polipropileno (PP) na base e no topo para o fechamento das portas-amostra. As amostras foram analisadas utilizando o método qualitativo-quantitativo (Quali-Quanti).

4.7.2-Difração de Raio- X (DRX)

A técnica do DRX tem-se desenvolvido constantemente, facilitando a obtenção de informações acerca da relação entre a estrutura cristalina e as características físicas e químicas dos materiais. Para esta análise foi utilizado um difratômetro da marca Rigaku, modelo D/MAX-2A/C com radiação $\text{CuK}\alpha$ a 40 kV e 20 mA. A Difração de Raios-X (DRX) foi obtida 2° min^{-1} e a manipulação dos dados foi realizada no Software Origin (Microcal, Versão 8.0).

4.7.4- Análise Térmica

Para a obtenção das curvas de TG/DTG/DTA foi utilizado um equipamento SDT 2960 Simultaneous DSC-TGA, da marca TA Instruments, e o software utilizado para obtenção dos dados foi o TA Analysis. Primeiramente, a amostra a ser analisada e a referência (α - alumina) foram pesadas, cerca de 15 mg, em cadinhos de platina (Pt). Posteriormente, as amostras já dentro do forno, foram aquecidas até 1000°C a uma taxa de $10^\circ\text{C min}^{-1}$, em atmosfera de N_2 ou ar sintético a 100 mL min^{-1} . Para a obtenção dos gráficos de análises térmicas foi utilizado o programa Origin 8.0.

4.7.5- Análises Imediatas

A análise imediata realizada nas amostras de resíduos de *Caryocar brasiliense* (pequi), *Hymenaea stigonocarpa* (jatobá-do-cerrado) e *Dipteryx alata* (baru), seguiu os procedimentos da Norma ABNT NBR 8112/86, com adaptações, pois tal norma foi produzida para análise de carvão vegetal.

As adaptações consistiram na substituição dos cadinhos de platina por cadinhos de porcelana, a realização dos ensaios em triplicata e na massa utilizada para os teores de cinzas que foi aumentada para 2 g, tendendo ao aumento proporcional das cinzas medidas para a realização de outras análises químicas.

4.7.5.1-Teor de Umidade

O teor de umidade foi obtido partindo de 1 g de amostra *in natura* com granulometria menor que 60 mesh. O ensaio consistiu em colocar as amostras em placas de petri de massa conhecida, e em seguida as mesmas foram colocadas na estufa, marca Marconi- estufa com circulação e renovação de ar e modelo 035, a 105°C. As amostras permaneceram na estufa até massa constante. Após tal período, as amostras foram retiradas da estufa, resfriadas em dessecador e após o total resfriamento, as massas das placas de petri com as amostras sem umidade foram anotadas para o cálculo do teor de umidade, conforme Equação 12.

$$TU = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \% \quad (\text{eq. 12})$$

Onde:

TU- teor de umidade em percentual (%);

m_0 = massa inicial da amostra, em g;

m_1 = massa final da amostra, em g.

4.7.5.2- Teor de Voláteis

O teor de voláteis foi obtido partindo de 1 g de amostra seca (0% de umidade) com granulometria menor que 60 mesh. O ensaio consistiu em colocar as amostras em cadinhos de porcelana de massa conhecida e com tampa, e em seguida os mesmos foram colocados na porta de uma mufla, marca Quimis e modelo Q-3185357, previamente aquecida a 900°C. Os cadinhos permaneceram 3 minutos na porta da mufla e 7 minutos dentro da mesma, com a porta fechada, totalizando 10 minutos. Após tal período os cadinhos foram colocados dentro do dessecador para o total resfriamento, as massas dos cadinhos com os respectivos materiais resultantes foram anotadas para o cálculo do teor de voláteis, conforme a fórmula:

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m} \times 100 \text{ (eq.13)}$$

m

Onde:

MV- teor de materiais voláteis, em %;

m_2 - massa inicial do cadinho + amostra, em g;

m_3 - massa final do cadinho + amostra residual, em g;

m - massa da amostra, em g.

4.7.5.3- Teor de Cinzas

O teor de cinzas foi obtido partindo de 2 g de amostra seca (0% de umidade) com granulometria menor que 60 mesh. O ensaio consistiu em colocar as amostras

em cadinhos de porcelana de massa conhecida, e em seguida os mesmos foram colocados em uma mufla, marca Quimis e modelo Q-3185357, previamente aquecida a 700°C. Os cadinhos permaneceram no interior da mufla até a calcinação total do material, por um tempo de 5 horas. Após a calcinação os cadinhos foram retirados da mufla e colocados em um dessecador para o total resfriamento. Em seguida, as massas dos cadinhos com as respectivas cinzas foram anotadas para o cálculo do teor de cinzas, conforme a fórmula:

$$CZ = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \quad (\text{eq. 14})$$

Onde:

CZ- teor de cinzas, em %;

m_0 - massa do cadinho, em g;

m_1 - massa do cadinho + resíduo, em g;

m = massa da amostra, em g.

4.7.5.4- Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo é calculado partindo dos teores de voláteis e cinzas, conforme a fórmula:

$$CF = 100 - (MV + CZ) \quad (\text{eq.15})$$

Onde:

CZ= Teor de carbono fixo;

MV= Teor de materiais voláteis em percentagem (%);

CZ= Teor de cinzas em percentagem (%)

4.8- Poder Calorífico

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado de acordo com a Norma ABNT NBR 8633/84. O poder calorífico superior foi obtido partindo de aproximadamente 1 g das amostras secas em estufa, por 3 horas a 105 °C, em estufa. As amostras, com granulometria de 60 mesh, foram pesadas em uma balança analítica com precisão de 0,1 mg, em duplicata. O poder calorífico superior foi determinado em uma bomba calorimétrica IKA, modelo C 2000 basic, obtendo-se a média entre duplicatas, não podendo a diferença entre elas ficar acima de 29 cal/g, conforme a norma determina.

4.8.1-Poder Calorífico Inferior (PCI)

Para o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) a 0% de umidade foi utilizada a seguinte equação, de acordo com KOLLMAN (1968):

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 600 (9\text{H}/100) \text{ (eq.16)}$$

Onde:

PCI- Poder calorífico inferior (kcal/Kg);

PCS- Poder calorífico superior (kcal/Kg);

H- é o teor de hidrogênio (%) obtido pela análise de CHN;

600- é a quantidade de calor necessária para evaporar 1 g de água;

9 = Representa a quantidade de água (em quilogramas) que se formam ao oxidar um quilo de hidrogênio.

4.8.2- Poder Calorífico Útil (PCU)

Para converter o poder calorífico inferior (PCI) a 0% em poder calorífico útil (PCU) a uma dada umidade foi utilizada a seguinte equação, conforme BRITO (1993):

$$PCU = [PCI \times (1 - U)] - 600U \quad (\text{eq.17})$$

Onde:

PCU = Poder Calorífico Útil (cal/g);

U = teor de umidade em base úmida (%);

PCI = poder calorífico inferior a 0% de umidade.

Os teores de umidade em base úmida utilizados para os cálculos do PCU, foram respectivamente: 10,73% (baru), 10,36% (jatobá) e 22,22% (pequi).

4.9- Densidade

A densidade é uma variável que tem sido citada por vários autores como um dos parâmetros mais importante em termos de determinação da qualidade da biomassa para energia. A densidade energética foi determinada a partir do produto entre a densidade aparente e o Poder Calorífico Útil (PCU) da biomassa. A Densidade a Granel é a relação entre o peso obtido e o volume, dada em Kg/m³.

Para a obtenção da densidade a granel das biomassas, foi obtido o peso de cada biomassa contida em uma caixa de 0,4 x 0,29 x 0,25 m³ de dimensões internas, com o auxílio de uma balança de resíduos, marca TRENTIN, modelo BT-0007, carga máxima 150 Kg.

4.10- Composição Química

Para determinar a composição lignocelulósica (lignina e holocelulose livre de extrativos e cinzas) dos resíduos utilizados no experimento foram utilizadas as normas adotadas pelo Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB). Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

4.10.1- Teor de Extrativos Totais

A metodologia adotada neste experimento segue as diretrizes TAPPI 204 om-88 (Solvent Extratives of Wood and Pulp), com adaptações.

Para a primeira etapa do experimento secou-se os balões de extração em estufa, marca Marconi e modelo MA 037, à 115°C por 2 horas. Após as duas horas, todos os balões foram colocados em um dessecador para resfriamento. Posteriormente, mediu-se a massa desses balões em uma balança analítica, com precisão de 0,3 g, marca Mettler e modelo AE 160, onde a massa de cada um foi anotada. Preparou-se uma solução etanol: tolueno, na proporção em volume de 1:2, atribuindo respectivamente, 9 unidades experimentais com 3 repetições cada uma.

Para cada tipo de resíduo analisado foram separadas 3 amostras, com massa de 13 g e acondicionadas em casulos de celulose. Cada casulo com as suas respectivas amostras foi inserido na coluna de extração sorxlet. Cada balão de extração foi preenchido com 210 ml da solução, etanol:tolueno e posteriormente, foram ajustados em extratores sorxlet e assentados sobre as placas aquecedoras.

Cada extração exigiu um tempo médio de 12 horas. Após o período correspondente de extração, foram retirados gradativamente das colunas de extração os solventes sem a presença de extrativos, até ficar aproximadamente 2 ml de solventes com os extratos em cada balão de extração. Os balões foram secos em estufa, marca Marconi e modelo MA 037, pelo período de 2 horas à 115°C.

Para obter-se o teor de extrativos correspondente a cada amostra, foi utilizada a seguinte equação:

$$\text{Te} = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100 \% \quad (\text{eq.18})$$

m

Onde:

Te: Teor de Extrativos em Percentual (%);

m: Massa da amostra descontada a umidade;

m_1 : Massa do balão de extração;

m_2 : Massa do balão de extrator + Extratos após processo de secagem à 115°C, em estufa por 2 horas.

4.10.2-Teor de Cinzas Sem Extrativos

Para a realização desta análise foi adotada a norma TAPPI T211 om-93 “Ash in wood , pulp, paper and paperboard combustion at 525 °C” .O teor de cinzas livre de extrativos foi realizado apenas para a determinação dos teores de lignina insolúvel.

Primeiramente, uma quantidade suficiente de cadinhos foram calcinados na mufla, marca Quimis e modelo Q-3185357, por 8 horas. Após as 8 horas, os cadinhos foram retirados da mufla e colocados em dessecador, para resfriamento. As amostras das biomassas foram colocadas por 24 horas em estufa à 105°C para a evaporação da umidade. Posteriormente, mediu-se aproximadamente 3 gramas de cada amostra seca, no interior de cada cadinho. Logo após esse procedimento os cadinhos destampados foram colocados na mufla. A mufla já estava pré-aquecida à 100°C e programou-se para a temperatura chegar à 525°C, quando esta temperatura foi atingida contou-se um tempo não inferior a 4 horas de calcinação.

Para obter-se o teor de cinzas sem extrativos, correspondente a cada amostra, foi utilizada a seguinte equação:

$$CZ = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \text{ (eq.19)}$$

m

Onde:

CZ: Teor de Cinzas sem Extrativos em Percentual (%);

m : Massa da amostra a 0% de umidade;

m_1 : Massa do cadinho;

m_0 : Massa do cadinho + Amostra calcinada a 525°C.

4.10.3- Teor de Lignina

Para realizar as análises de isolamento da lignina ácida (Lignina Klason), as amostras de caroço de pequi, casca do fruto de baru e casca da árvore de jatobá-do-cerrado, foram submetidas à limpeza dos extrativos com solução 1:2 (etanol: tolueno), posteriormente com etanol e para a finalização da limpeza, lavagem com água quente. Todas essas etapas foram realizadas conforme a norma TAPP 204 om-88 (Solvent extratives of Wood and pulp).

Na determinação dos teores de lignina solúvel e insolúvel foram adotados os seguintes procedimentos laboratoriais: LAP #003 (Templeton e Ehrman, 1995) e LAP #004 (Templeton e Ehrman, 1995), respectivamente.

4.10.4- Teor de Lignina Insolúvel

Os procedimentos adotados nesta análise segue o protocolo determinado pela LAP #003 (Templeton e Ehrman, 1995).

Foram pesadas três amostras de cada biomassa, aproximadamente 300 mg de cada, diretamente em tubos de ensaio que foram identificados. Em cada tubo de ensaio foi adicionado 3 ml de solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄), 72% v/v. Posteriormente, os tubos de ensaio foram colocados em banho-maria a 30°C, durante 2 horas, onde a cada 15 minutos foi realizado agitação. Após as 2 horas, a mistura de cada tubo de ensaio foi retirada e repassada para frascos de vidro devidamente identificados. Adicionou-se 84 ml de água deionizada em cada frasco, logo cada frasco ficou com uma solução a 4% (p/p) de ácido. Posteriormente, todos os frascos foram tampados com rolhas de borracha e lacrados com anel de alumínio, logo em seguida, todos os frascos foram colocados em autoclave, por 1 hora a 121°C. Após a auclavagem, os frascos foram expostos à temperatura ambiente sobre a bancada para o total resfriamento, durante 30 minutos.

Após o resfriamento, os frascos de vidro foram abertos e devidamente filtrados em cadinhos de placa porosa. A solução líquida que passava em cada cadinho foi recolhida em kitassatos distintos, para posteriormente se realizar a leitura da solução em espectrofotômetro, marca FEMTO e modelo 700 Plus. A lignina insolúvel que ficou retida no cadinho foi lavada com água deionizada quente, e posteriormente todos os cadinhos foram levados para a estufa, marca Marconi e modelo MA 037, por 4 horas; sendo que a primeira pesagem foi realizada após 2 horas de secagem e depois ocorreram mais duas pesagens sendo a segunda após 3 horas e a terceira após 4 horas.

Foi utilizada a seguinte equação para o cálculo do teor de lignina insolúvel:

$$L_{\text{insol}} = \frac{m_2 - m_1}{m} \quad (\text{eq.20})$$

m

Onde:

L_{ins} = teor de lignina insolúvel em percentual (%);

m = massa da amostra descontada a umidade;

m_1 = massa do cadinho filtrante;

m_2 = massa do cadinho filtrante + lignina insolúvel descontada as cinzas livre de extrativos.

4.10.5- Teor de Lignina Solúvel

A metodologia adotada nesta análise segue o protocolo LAP #004 (Templeton e Ehrman, 1995).

Primeiramente, preparou-se uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 4% (p/p), esta solução foi preparada da seguinte forma: mediu-se 3 ml de H_2SO_4 a 72% (p/p) e diluiu-se a solução em 84 ml de água deionizada. Esta solução foi utilizada para o preparo do branco que foi utilizado no espectrofotômetro de UV-Vis, medindo-se 1 ml de H_2SO_4 a 4% e diluindo este volume em água deionizada, até completar 10 ml em um balão volumétrico separado e identificado.

O filtrado de cada kitassato, que foi obtido na etapa de filtragem após a autoclavagem dos materiais, foi recolhido, e de cada um deles foi retirado uma alíquota de 1 ml e diluído com água deionizada; até completar 10 ml em um balão volumétrico. O espectrofotômetro de UV-vis, marca FEMTO e modelo 700 Plus, foi ligado e regulado para o comprimento de onda de 205 nm. A amostra do branco foi colocada em cubeta de referência para calibração do equipamento, a leitura da absorbância do branco foi de 0,000.

As alíquotas das amostras foram colocadas em cubetas distintas, todas devidamente diluídas, e, logo em seguida, foram realizadas as leituras das absorbâncias das amostras. As leituras foram realizadas em duplicata.

A equação para a obtenção do teor de lignina solúvel é representada por:

$$Li_{sol} = \frac{A}{110} \times F \times \frac{87}{1000} \times 100 \text{ (eq.21)}$$

m

Onde:

Li_{sol} = Teor de lignina insolúvel em percentual (%);

m = Massa da amostra descontada a umidade;

A = Absorbância lida no espectrofotômetro;

F = Fator de diluição (20 para o pequi e 10 para o jatobá e baru).

4.10.6- Teor de Lignina Total

O teor de lignina total é um somatório entre o teor de lignina insolúvel e solúvel, e deve ser calculado pela seguinte expressão:

$$Li_{total} = Li_{ins} + Li_{sol} \text{ (eq.22)}$$

Onde:

Li_{total} = Lignina Total;

Li_{ins} = Lignina Insolúvel;

Li_{sol} = Lignina Solúvel.

4.10.7- Teor de Holocelulose

O teor de holocelulose sem extrativos foi calculado por diferença, onde se subtraíram de 100%, os teores de lignina total e o teor de cinzas livres de extrativos, de acordo com a equação abaixo:

$$\text{TH} = 100\% - \text{Li}_{\text{total}} - \text{CZ}_{525^{\circ}\text{C}} \quad (\text{eq.23})$$

Onde:

TH= Teor de Holocelulose em percentual (%).

4.11- Gaseificador

O reator de gaseificação (Figura 14) utilizado neste estudo foi do tipo contracorrente (*Updraft*), com as seguintes dimensões:

- Altura do leito: 45 cm;
- Diâmetro do Leito: 14 cm;
- Capacidade aproximada de armazenagem do reator: 7 L.

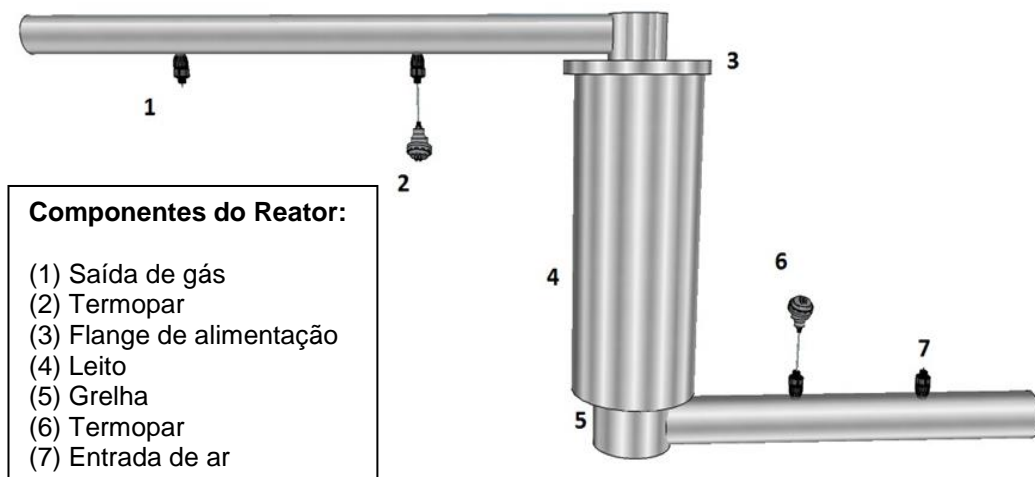


Figura 13: Modelo do gaseificador utilizado no desenvolvimento do estudo de gaseificação de biomassa florestal.

Fonte: Nakai (2014).

4.11.1- Descrição do processo de gaseificação

Os testes de gaseificação foram realizados em um gaseificador do tipo Contracorrente (*updraft*), cuja alimentação da biomassa é realizada pelo topo do reator e o ar introduzido ao sistema é inserido pela parte inferior do equipamento. O gás gerado pelo processo de gaseificação é extraído na parte superior do reator.

Para a realização dos ensaios de gaseificação foram utilizados os seguintes resíduos florestais: casca do fruto do baru (*Dipteryx alata* Vog.), caroço de pequi, sem a polpa, (*Caryocar brasiliense*) e casca da árvore do jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* Mart). A granulometria dos resíduos de baru e jatobá-do-cerrado utilizados no processo foi de 12 mesh, enquanto os resíduos de pequi foram utilizados com granulometria de 40 mesh. Todos os resíduos foram utilizados na forma *in natura* nos ensaios de gaseificação.

Os ensaios de gaseificação para cada biomassa foram conduzidos com adaptações na condução do processo, pois cada material possuía características próprias e comportamentos diferentes no processo de gaseificação.

4.11.2- Procedimentos do ensaio de gaseificação para as cascas do fruto do baru:

- 1) Adição de 10 cm de argila expandida dentro do reator;
- 2) Adição de 300 g da biomassa triturada para a geração do carvão;
- 3) Adição de 100 ml de álcool etílico para estimulação do processo de queima;
- 4) Injeção de ar: 3,5 Nm³/h;
- 5) Tempo esperado para a pirólise da biomassa e geração do carvão: 20 minutos;
- 6) Alimentação do reator com 400 g de biomassa;
- 7) Fechamento da parte superior do reator com a tampa e com o auxílio de 9 alicates de pressão, para vedação total;
- 8) Queima do gás na exaustão durante todo o experimento;
- 9) Tempo decorrido para a primeira coleta do gás resultante do processo: 10-15 minutos;
- 10) Duas coletas e expulsão do gás oriundo do processo por meio de uma seringa para cromatografia gasosa, objetivando homogeneizar o interior da seringa;
- 11) A terceira coleta era injetada no CG/TCD para análise da composição dos gases;
- 12) Após 1 hora era analisado o resultado da cromatografia gasosa;
- 13) Os resultados da gaseificação somente foram considerados válidos cientificamente, quando os valores das triplicatas eram semelhantes ou próximos em relação aos teores de H₂, CO, CO₂ e outros gases;
- 14) Pesagem das cinzas totais e coleta do alcatrão resultante do processo.

4.11.3- Procedimentos do ensaio de gaseificação para as cascas da árvore do jatobá-do-cerrado:

- 1) Adição de 10 cm de argila expandida dentro do reator;
- 2) Adição de 200 g da biomassa triturada para a geração do carvão;
- 3) Adição de 50 ml de álcool etílico para ignição do processo de queima;
- 4) Injeção de ar: 3,5 Nm³/h;
- 5) Tempo esperado para pirólise da biomassa e geração do carvão: 10 minutos;
- 6) Alimentação do reator com 300 g de biomassa;
- 7) Fechamento da parte superior do reator com a tampa e com o auxílio de 9 alicates de pressão, para vedação total;
- 8) Queima do gás na exaustão durante todo o experimento;
- 9) Tempo decorrido para a primeira coleta do gás resultante do processo: 5 minutos;
- 10) Duas coletas e expulsão do gás oriundo do processo por meio de uma seringa para cromatografia gasosa, objetivando homogeneizar o interior da seringa;
- 11) A terceira coleta era injetada no CG/TCD para análise da composição dos gases;
- 12) Após 1 hora era analisado o resultado da cromatografia gasosa;
- 13) Os resultados da gaseificação somente foram considerados válidos cientificamente, quando os valores das triplicatas eram semelhantes ou próximos em relação aos teores de H₂, CO, CO₂ e outros gases;
- 14) Pesagem das cinzas totais e coleta do alcatrão resultante do processo .

4.11.4- Procedimentos do ensaio de gaseificação para o caroço do pequi:

- 1) Adição de 10 cm de argila expandida dentro do reator;
- 2) Adição de 550 g da biomassa triturada para a geração do carvão;
- 3) Adição de 200 ml de álcool etílico para ignição do processo de queima;
- 4) Injeção de ar: 3,5 Nm³/h;
- 5) Tempo esperado para a pirólise da biomassa e geração do carvão : 30 minutos;
- 6) Alimentação do reator com 500 g de biomassa;
- 7) Fechamento da parte superior do reator com a tampa e com o auxílio de 9 alicates de pressão, para vedação total;
- 8) Queima do gás na exaustão durante todo o experimento;
- 9) Tempo decorrido para a primeira coleta do gás resultante do processo: 5 minutos;
- 10) Duas coletas e expulsão do gás oriundo do processo por meio de uma seringa para cromatografia gasosa, objetivando homogeneizar o interior da seringa;
- 11) A terceira coleta era injetada no CG/TCD para análise da composição dos gases;
- 12) Após 1 hora era analisado o resultado da cromatografia gasosa;
- 13) Os resultados da gaseificação somente foram considerados válidos cientificamente, quando os valores das triplicatas eram semelhantes ou próximos em relação aos teores de H₂, CO, CO₂ e outros gases;
- 14) Pesagem das cinzas totais e coleta do alcatrão resultante do processo.

4.11.5- Análise da composição dos gases

Para realizar a análise dos gases coletados no gaseificador *Updraft*, foi utilizado o equipamento CG-17, marca Shimadzu, com coluna Carboxen 1010-Plot, argônio como o gás de arraste e detector de condutividade térmica (TCD).

A metodologia utilizada seguiu os seguintes parâmetros para a realização da análise dos gases:

- Injetor: 200° C, splitless;
- Pressão: 15 kPa;
- Vazão Total: 30 ml/min;
- Vazão na Coluna: 2,47 ml/min;
- Características da coluna de detecção: Coluna Carboxen 1010 Plot, 30 m por 0,53 mm, 45° C isotérmico por 60 minutos;
- Detector TCD: 230°C, 60 mA e polaridade negativa;
- Gás de arraste: Argônio, pureza 4,8.

Para determinar a concentração (v/v) dos gases coletados no gaseificador, foram elaboradas curvas padrões lineares, por meio da diluição de um volume determinado do gás a ser analisado, em nitrogênio puro, dentro de uma seringa cromatográfica. A correlação determinada foi entre a altura do pico e a concentração do gás. As equações e os coeficientes de regressão lineares R^2 , foram obtidos por meio do software Microsoft Excel 2010, assim como as faixas de concentrações que foram utilizadas na análise. As faixas de concentrações determinadas para a análise em questão foram:

- Hidrogênio (H_2):
 - Faixa de linearidade: entre 5% e 25%;
 - Equação: $y = 1966 * x + 7018,8$;

- x corresponde à altura do pico;
- y corresponde à concentração volumétrica do gás;
- R^2 : 0,9963.

- Gás Carbônico (CO):

- Faixa de linearidade: entre 5% e 20%;

- Equação: $y = 264,39 * x + 729,1$;

- x corresponde à altura do pico;
- y corresponde à concentração volumétrica do gás;
- R^2 : 0,9990.

- Dióxido de Carbono (CO₂):

- Faixa de linearidade: entre 5% e 15%;

- Equação: $y = 88,296 * x + 166,5$;

- x corresponde à altura do pico;
- y corresponde à concentração volumétrica do gás;
- R^2 : 0,9808.

4.12- Simulação

4.12.1- Software COMGAS

O modelo de simulação numérica adotado pelo Comgas (Figura 15), considera simplificações das reações químicas em 0D, na condição de equilíbrio químico, minimização da energia livre de Gibbs e estado estacionário (RENDEIRO *et al.*, 2008; SOUZA-SANTOS, 2004). Este modelo considera que o tempo de residência dos reagentes é prolongado o bastante, para chegar ao equilíbrio químico, e garantir que todo o carbono presente na biomassa seja convertido em gás, portanto, os produtos químicos gerados a partir da reação de gaseificação, são todos gasosos, prevalecendo os compostos químicos de baixo peso molecular, tais como: CO, CO₂, H₂O, H₂, N₂ e CH₄ (RUGGIERO & MANFRIDA 1999; ZAINAL *et al.*, 2001). O objetivo principal do programa é facilitar o entendimento dos processos da gaseificação e combustão, e, além disso, auxiliar no desenvolvimento de processos termoquímicos, para melhor aproveitamento energético de biomassas.

Para a execução da simulação da gaseificação foi introduzido os dados obtidos por meio da análise elementar (CHNO), o teor de cinzas obtido conforme a metodologia Norma ABNT NBR 8112/86 e o poder calorífico superior (PCS) adquirido de acordo com a norma NBR 8633 da ABNT/1984. Com base nas concentrações dos gases produzidos pela gaseificação real das biomassas analisadas CG/TCD neste estudo e nos gráficos gerados pelas simulações foi calculado o Beta real, considerando a razão de equivalência correspondente à concentração de Monóxido de Carbono (CO) real e o Beta estequiométrico fornecido pelo programa.

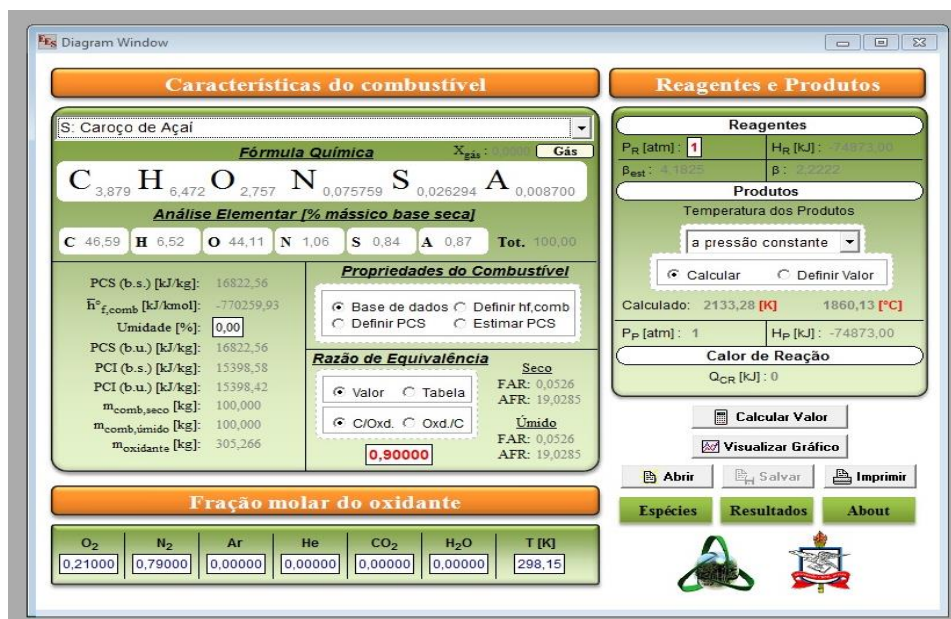


Figura 14: Interface gráfica do software COMGAS.
Fonte: Programa Comgas.

4.12.2- Metodologia de TIANGCO *et al.*,(1996)

TIANGCO *et al.*, (1996) desenvolveu uma metodologia para definir a Taxa Específica de Gaseificação (ψ) do gaseificador de pequena escala, com o intuito de se obter a maior eficiência do gás. Essa variável é obtida por meio da razão entre o consumo de biomassa (kg/h) e a área da secção do reator (diâmetro), sendo que o seu valor fica na faixa entre 100-400 kg/m².h. No estudo executado pelo autor supracitado, foram realizados ensaios com reatores de diversos diâmetros, utilizando como combustível a casca de arroz. Por meio dos ensaios realizados foi possível comprovar que quando variava a taxa específica de gaseificação, havia alteração significativa na eficiência do gás. Devido a isso, foi desenvolvido um equacionamento para se calcular a eficiência do gás frio, por meio dessa taxa. O autor a partir dos ensaios realizados com os gaseificadores, e relacionando a eficiência com a taxa específica de gaseificação chegou a um valor próximo de 200 kg/m².h. Este valor final obtido foi considerado pelo autor como a maior eficiência de um reator de pequena escala.

5. Resultados e Discussões

5.1- Caracterização da Casca do Fruto do Baru, Casca da Árvore do Jatobá-do-Cerrado e Caroço de Pequi.

5.1.1- Análise Imediata

A análise imediata de um material combustível determina a percentagem de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo presentes no combustível. No decorrer do processo de queima da biomassa, de acordo com o aumento da temperatura, vapores de água e outros gases são liberados. Uma fração desses gases é combustível, e corresponde a queima na fração gasosa (voláteis) (PEREIRA, 2000).

Como produto final do processo de queima há a formação das cinzas oriundas dos constituintes inorgânicos da biomassa. O conhecimento das características do combustível através da análise imediata é extremamente importante, pois todas as variáveis obtidas por meio dessa análise irão influenciar significativamente o processo de queima (BRITO & BARRICHELO, 1978).

A Figura 16 e a Tabela 2 apresentam os resultados comparativos de todas as biomassas submetidas à análise imediata. O teor de umidade e o teor de cinzas estão diretamente relacionados à diminuição dos valores do Poder Calorífico Superior (PCS), enquanto os valores de materiais voláteis e carbono fixo contribuem para o aumento do PCS.

Dentre os valores que contribuem para a redução do PCS, o maior resultado de umidade foi obtido para o caroço de pequi com 28,56% e o menor resultado foi para a casca da árvore do jatobá com 11,56%. Este maior valor do pequi está relacionado diretamente com a característica oleaginosa da espécie, principalmente por conter alto teor de ácidos graxos livres que carregam consigo um alto teor de umidade. Para as cinzas o maior valor encontrado foi para a casca do fruto do baru com 2,6% e o menor foi para a casca da árvore do jatobá com 1,08%. Com relação

aos valores que contribuem para o aumento do PCS, o maior resultado de materiais voláteis foi obtido para o caroço de pequi com 83,01% e o menor resultado encontrado foi para a casca do fruto de baru com 71,71%, indicando que o pequi apresentará maior geração de energia na queima direta que as demais biomassas.

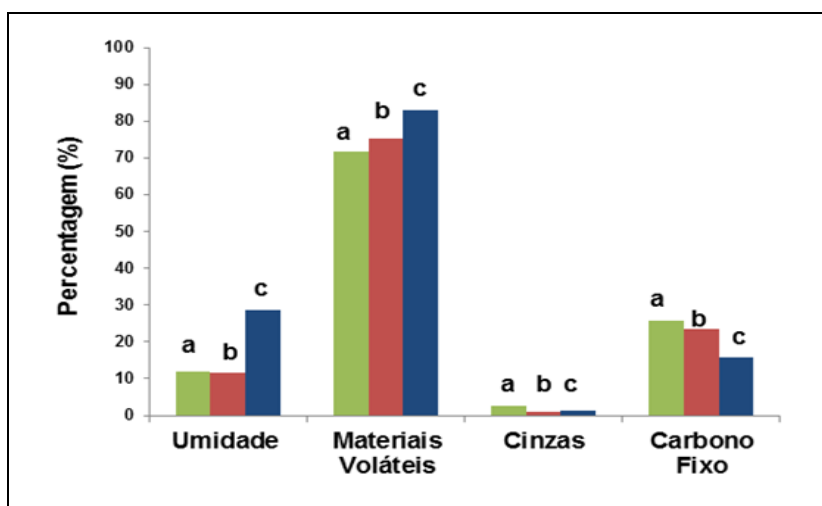


Figura 15: Comparação dos resultados da análise imediata para as biomassas analisadas: (a) casca do fruto do baru, (b) casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) caroço de pequi.
Fonte: (Autoria Própria)

Tabela 2: Resultados da Análise Imediata das biomassas analisadas com seus respectivos desvios padrão.

Biomassas	Teor de Umidade (%)	Teor de Materiais Voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Carbono Fixo (%)
Casca do Fruto do Baru	12,02	71,17	2,6	25,7

Desvio Padrão	0,22	0,39	0,09	–
Casca da Árvore do Jatobá-do-Cerrado	11,56	75,36	1,08	23,56
Desvio Padrão	0,46	0,79	0,03	–
Caroço de Pequi	28,56	83,01	1,22	15,77
Desvio Padrão	0,33	0,18	0,006	–

A Tabela 2 apresenta os valores da análise imediata para as amostras das biomassas analisadas, com seus respectivos desvios padrão. O teor de umidade da casca do fruto do baru foi de 12,02% e para a casca da árvore do jatobá-do-cerrado foi de 11,56%, valores considerados significativos para a utilização com fim energético. Segundo FARINHAQUE (1981), o teor de umidade ideal para a madeira (lenha) queimar é até 25%, logo como as duas biomassas analisadas apresentaram valores de umidade abaixo de 25%, são consideradas viáveis para processos envolvendo a queima do material. Devido ao baixo teor de umidade apresentado pelas biomassas analisadas, o equipamento que for utilizado para a geração de energia, seja uma fornalha ou gaseificador, não investirá tanta energia, na forma de calor no processo de evaporação da água presente no material. Logo, o equipamento investirá mais na produção de calor para a geração de energia, tendo um melhor aproveitamento energético.

Em relação ao teor de umidade apresentado pelo caroço de pequi, que foi de 28%, acima do valor ideal de umidade citado por FARINHAQUE (1981) para a madeira ser utilizada em processos de queima. Este alto teor de umidade apresentado por essa biomassa na análise, pode ser consequência do alto teor de extrativos presentes na espécie, que foi de 40,73%, valor obtido através da análise lignocelulósica. Em decorrência desta característica apresentada pelo caroço de pequi, é recomendável que se realize um processo de secagem antes de submeter tal biomassa a equipamentos de queima.

KLEINLEIN (2010), em seu estudo com biomassas amazônicas e utilizando as normas ASTM E 871 – 82, E 872 – 82 e E 1755 – 01 encontrou valores para os teores de umidade das cascas da castanha do Pará de 14,48% e para as cascas de coco de 10,53%. O teor de umidade encontrado para as cascas do fruto do baru neste estudo foi de 12,02%, a diferença apresentada entre os valores encontrados pela literatura para outras biomassas em relação ao baru, está relacionada com as condições de desenvolvimento de cada espécie, ao processamento de extração da castanha do Pará e do coco, e a forma de armazenamento de cada resíduo.

A eficiência energética do equipamento de queima é diretamente influenciada pelo teor de umidade da biomassa, pois essa característica é uma das propriedades mais importantes de um material combustível. Quanto menor for o teor de umidade de um combustível, maior será a quantidade de calor líquido liberado na sua combustão, pois parte da sua energia é empregada para aquecer e vaporizar a água do material (SCHUTZ *et al.*; 2010).

A espécie que apresentou o maior teor de materiais voláteis foi o caroço de pequi, com 83,01%. Essa característica indica que o caroço de pequi quando for submetido em processos termoquímicos irá ser consumido rapidamente, pois os voláteis são as substâncias que se desprendem do material combustível na forma de gases durante a queima da amostra. Eles estão diretamente ligados ao tempo de residência do material dentro de um equipamento de queima, para geração de energia e influenciam diretamente a estabilidade da chama no processo de combustão (RABAÇAL, 2010).

A casca do fruto do baru apresentou teor de voláteis de 71,71% e a casca da árvore do jatobá-do-cerrado de 75,36%. Segundo MORAIS (2004), os combustíveis sólidos, como a madeira, apresentam quantidade de materiais voláteis entre 76% e 86%, base seca, logo dentre as biomassas analisadas somente o caroço de pequi e a casca da árvore do jatobá se encaixam dentro da faixa média de voláteis para a madeira.

VALE *et.al.*, (2002), utilizando a norma ASTM D-1762/64 para realização da análise imediata, encontrou teor de materiais voláteis para a casca da árvore do jatobá-do-cerrado de 76,58% e para madeira de 77,37%. Comparando-se com o valor de voláteis, de 75,36%, encontrado neste estudo para a casca, pode-se perceber que este valor é significativo em relação ao adquirido por VALE *et.al.*; (2002) e está de acordo com BRITO e BARRICHELLO (1982) que relataram, em termos gerais, teores de matérias voláteis entre 75% a 85% para a madeira.

Materiais combustíveis com teores de voláteis próximos ao da madeira resultam em maior emissão de gases na combustão. Em decorrência disso, há formação e eliminação de gases, formando chamas, pois o calor é obrigado a se difundir em um espaço maior da região de queima, logo não há a formação de altas temperaturas em pontos específicos. Devido a isso, combustíveis com altos teores de voláteis são queimados mais rapidamente (VALE *et.al.*, 2000).

CINTRA (2009), em seu estudo sobre avaliação energética de 12 espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema- SP encontrou valores para o teor de materiais voláteis entre 79,6-84,9%. BRITO e BARRICHELLO (1978), em seu estudo com 8 espécies de eucalipto, encontraram valores entre 74,1% e 89,9% para materiais voláteis. KLEINLEIN (2010) encontrou valores para os teores de voláteis das cascas da castanha do Pará de 66,68% e para as cascas de coco de 79,45%. O teor de materiais voláteis para as cascas do fruto do baru foi de 71,71% e para a casca da árvore do jatobá-do-cerrado foi de 75,36%, comparando estes dados com os valores encontrados pela literatura para outras biomassas, pode-se perceber que estes resíduos possuem valores de voláteis bem próximos ao de madeiras tradicionais utilizadas para a geração de energia no mundo, como o eucalipto. Além disso, o resultado de voláteis para a biomassa analisada neste

estudo apresentou valor superior quando comparado às cascas da castanha do Pará e inferior em relação às cascas do coco.

Com relação aos teores de cinzas apresentados pela casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço do pequi, eles foram respectivamente: 2,6%, 1,08% e 1,22%. As cinzas da biomassa florestal são formadas pelos componentes minerais adquiridos ao longo da vida do vegetal, ou em decorrência da contaminação durante os processos de colheita, transporte e armazenamento. Quanto menor o teor de cinzas apresentado pela biomassa, melhor será o seu aproveitamento em equipamentos de queima, pois as cinzas são componentes indesejáveis nos processos de produção energética. Devido a isto, a biomassa que apresentaria um melhor desempenho em processos de queima seria a casca da árvore do jatobá, que obteve o menor teor de cinzas.

O teor de cinzas e os voláteis estão diretamente relacionados com a composição química de cada material, que pode ser afetada significativamente pela disponibilidade de minerais no solo e pelo processo de adubação química. Ou seja, o sítio florestal onde as espécies foram plantadas irá influenciar diretamente a composição das cinzas, uma vez que os macronutrientes e micronutrientes relacionados ao desenvolvimento da planta irão atuar fortemente nos compostos químicos constituintes das cinzas (ANDRADE, 1993).

VALE & COLABORADORES (2002), em seu estudo sobre quantificação e caracterização energética da madeira e da casca de espécies do Cerrado encontrou teor de cinzas para a madeira e casca da árvore do jatobá-do-cerrado, de 1,08 e 0,76%. O teor de cinzas encontrado neste estudo para a casca da árvore do jatobá foi de 1,08%, valor coincidente ao da madeira encontrado pelo autor supracitado.

O teor de cinzas encontrado para as cascas do fruto do baru foi de 2,6% e o teor de carbono fixo foi de 25,7%. CINTRA (2009) encontrou em relação à madeira de 12 espécies florestais, teor de cinzas na faixa entre 0,46-3,49% e os valores de carbono fixo entre 14,4-19,6%. KLEINLEIN (2010) encontrou o valor do teor de cinzas para as cascas da castanha do Pará de 19,77% e para as cascas do coco de 0,14%. Neste mesmo trabalho, o autor encontrou o teor de carbono fixo para as cascas da castanha do Pará de 13,55% e para as cascas do coco de 20,41%.

O teor de carbono fixo das cascas do fruto do baru foi de 25,7% e da casca da árvore do jatobá foi de 23,56%, essa variável também é determinante no processo de queima. Quanto maior o teor de carbono fixo no material, mais lento será o processo de queima do combustível (VALE *et.al.*, 2002). A consequência principal dessa característica nos processos termoquímicos é o aumento da duração do tempo de residência do combustível nos aparelhos de queima, em comparação com outros que tem menor teor de carbono fixo (BRITO & BARRICHELLO, 1982). VALE *et.al.*, (2002) encontrou para a casca da árvore do jatobá-do-cerrado, teor de carbono fixo de 22,66%, e para a madeira de 21,55%. O caroço de pequi como apresentou um baixo teor de carbono fixo, de 15,77%, em relação às outras duas biomassas analisadas, pode-se concluir que queimará rapidamente em processos termoquímicos.

O teor de carbono fixo encontrado para as cascas do fruto do baru foi superior ao encontrado por CINTRA (2009) em seu estudo com espécies florestais plantadas e por KLEINLEIN (2010) para resíduos amazônicos. O teor de carbono fixo alto indica que o combustível irá queimar de maneira mais lenta, isso é vantajoso para o processo de gaseificação em leito fixo (contracorrente e co-correntes) e em leitos fluidizados (borbulhante e circulante), pois o tempo de residência da biomassa no interior do reator será maior, logo não será necessário ficar recarregando o equipamento a todo o momento, e a queima mais lenta, garante um melhor controle do processo termoquímico.

5.2- Poder Calorífico

O poder calorífico é uma das variáveis mais importantes quando se trabalha com geração de energia, pois ele é a quantidade de energia na forma de calor que é liberada pela combustão de uma unidade de massa do combustível (QUIRINO, 2005).

Essa variável divide-se em: superior, inferior e útil. O Poder Calorífico Superior (PCS) é aquele em que o processo de combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante o processo é condensada, e o calor que

é derivado desta condensação é recuperado (BRIANE & DOAT, 1985). O Poder Calorífico Inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível, após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989). O Poder Calorífico Útil (PCU) é a quantidade de energia liberada pela queima (combustão), considerando a umidade que a biomassa apresenta no momento da queima (LIMA, 2010).

A Tabela 3 apresenta os valores de PCS obtidos por meio do ensaio em bomba calorimétrica e os resultados de PCI e PCU obtidos através das equações já citadas em materiais e métodos.

Dentre todas as biomassas analisadas a que apresentou o maior valor de PCS, PCI e PCU foi o caroço de pequi com 6.375 kcal/kg, 5.937,06 kcal/kg e 4.484,52 kcal/kg. A casca da árvore do jatobá-do-cerrado foi à espécie que apresentou valores intermediários dos poderes caloríficos na análise, o PCS foi de 4.876 kcal/kg, o PCI foi 4.599,52 kcal/kg e o PCU foi de 3.998,45 kcal/kg. Entretanto, a casca do fruto do baru foi a biomassa que apresentou os menores valores para esta propriedade, tendo como PCS o valor de 4.700 kcal/kg, PCI 4.363,04 kcal/kg e PCU de 3.766,48 kcal/kg. A diferença apresentada nesta propriedade para as biomassas analisadas deve-se ao fato delas terem diferentes composições químicas, tais como: teores de umidade e hidrogênio.

Tabela 3: Resultados dos poderes caloríficos das biomassas analisadas.

Biomassa	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	PCU (kcal/kg)
Casca do Fruto de Baru	4.700	4.363,04	3.830,50
Desvio Padrão	7,07	–	–

Casca da Árvore do Jatobá	4.876	4.599,52	4.060,84
Desvio Padrão	1,41	–	–
Caroço do Pequi	6.375	5.937,06	4.484,52
Desvio Padrão	16,97	–	–

Na Figura 17, na seqüência, apresenta-se a comparação de todas as biomassas analisadas no ensaio de PCS, levando-se em conta também os resultados obtidos de PCI e PCU.

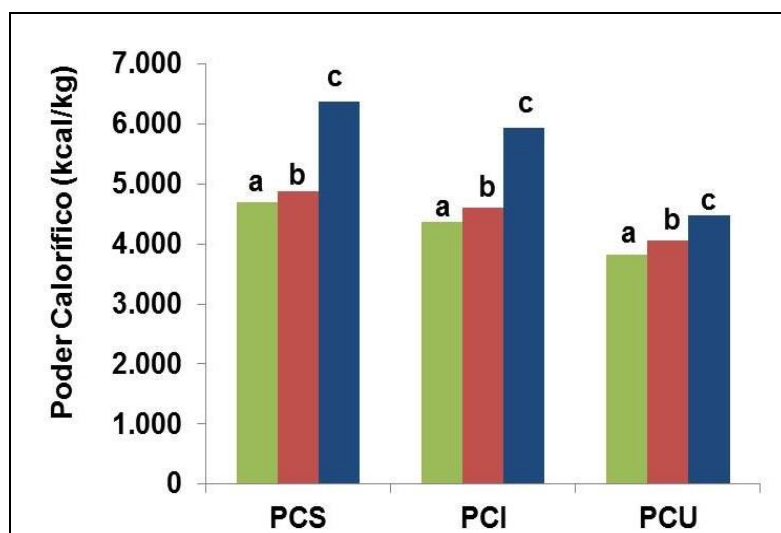


Figura 16: Valores de PCS, PCI e PCU para todas as biomassas analisadas: (a) Casca do fruto do baru, (b) Casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) Caroço de Pequi.

Fonte: (Autoria Própria).

Os altos poderes caloríficos do caroço de pequi podem estar relacionados com o alto teor de materiais graxos presente nesta biomassa. Segundo ANTUNES *et al.*, (2009), o caroço de pequi apresenta aproximadamente 50% (m/m) de óleo vegetal, logo é possível concluir que a presença deste tipo de extrativo na biomassa eleva o seu PCS. De acordo com JARA (1989), o PCS da biomassa (madeira) é influenciado diretamente pela constituição química do material, principalmente a lignina e os extrativos (resinas, matérias graxas, óleos-resinas, óleos, etc). Outra razão para o PCS desta biomassa ser tão elevado é a presença de um alto teor de lignina no caroço da espécie, que foi de 36,99%, valor superior ao teor de lignina apresentado pela madeira de folhosas, que geralmente é de 18-25%, de acordo com (LEWIN & GOLDSTEIN, 1991; TSOUMIS, 1991).

Comparando os PCS e PCI do caroço do pequi com os valores encontrados por LIRA (2012) para as mesmas variáveis em relação à semente da palmeira de tucumã (*Astrocaryum aculeatum*), que foram PCS de 5.035 Kcal/kg e PCI de 4.650 kcal/kg, pode-se observar que geralmente as sementes que possuem conteúdo oleaginoso em sua constituição, apresentam poderes caloríficos superiores em relação ao da madeira de folhosas, que em média é de 4.500 kcal/kg. VALE *et al.*, (2002), encontraram para a madeira e casca da árvore do pequi, PCS de 4.839,10 kcal/kg e 4.761,80 kcal/kg, comparando esses valores da literatura com os observados no presente estudo, pode-se concluir que a biomassa analisada possui grande potencial para ser utilizada em processos termoquímicos para a geração de energia. Posteriormente, com a realização de mais estudos em relação ao caroço de pequi será possível a extração dos materiais graxos, para sua conversão em biocombustíveis líquidos, como o biodiesel.

A casca da árvore do jatobá-do-cerrado apresentou PCS de 4.876 kcal/kg valor semelhante quando comparado ao encontrado por QUIRINO *et al.*, (2005) que foi de 4.851 kcal/kg.

O PCS da casca do fruto do baru foi de 4.700 kcal/kg, o PCI foi de 4.363.04 kcal/kg e o PCU foi de 3.766,48 kcal/kg. O PCS médio para cascas de madeira muito utilizadas para bioenergia é de 4.046 kcal/kg (REIS, 2002), valor próximo dos resultados encontrados para a casca do fruto do baru e para a casca da árvore do

jatobá-do-cerrado. Comparando-se os resultados encontrados do PCS e do PCI das cascas do fruto do baru com o estudo de QUIRINO *et. al.* (2005), pode-se verificar que os respectivos valores encontrados pelo autor para a mesma biomassa, de PCS 4.389 kcal/kg e PCI 3.664 kcal/kg diferenciaram significativamente dos valores adquiridos neste estudo. A diferença encontrada em relação aos dados fornecidos pela literatura pode estar relacionada com a diferença de local de ocorrência da espécie, forma de armazenamento e o teor de umidade encontrado pelo autor, de 11,7%.

VALE *et.al.*; (2007), em seu estudo com resíduos de madeira e de café, encontrou PCU para a maravalha de 3.717 kcal/kg e para a casca de café de 3.040 kcal/kg. Neste sentido o PCU das cascas do fruto do baru de 3.766,48 kcal/kg e da casca da árvore do jatobá de 3.998,45 kcal/kg indica que essas biomassas possuem valor energético superior em relação à maravalha de cedrorana (*Cedrelinga cateniformis*, Duke) e a casca de café (*Coffea arabic*,L).

Portanto, essas biomassas de resíduo florestal, podem se tornar uma importante fonte energética para comunidades extrativistas, pois elas apresentam significativas características energéticas quando comparadas a madeira, e, além disso, são produzidas em grande quantidade. O volume de resíduos oriundos do beneficiamento do fruto do baru gera em torno de 1000 toneladas por ano, mas se a empresa Empório do Cerrado for investir na produção de energia é possível gerar até 2-3 mil ton./ano. Atualmente, a quantidade de coleta da casca da árvore do jatobá é de 5-10 ton./mês. Se for para uso da casca em bioenergia o potencial de produção é 10 vezes maior.

5.3- Densidade a granel

Densidade a granel expressa a relação entre o peso da biomassa contida em um recipiente de 1 m³ de volume (SILVA *et.al.*; 2007). Essa propriedade do material é extremamente importante para a quantificação de volumes de materiais que apresentam formas irregulares, pois transmite informações relevantes que serão

úteis para a logística e transporte do material. Essa variável do material considera os espaços vazios entre uma partícula e outra, e, além disso, fornece dados reais dos volumes para transporte (MANI, 2006; OBERNBERGER, 2004).

Como pode ser observada na Figura 18, a biomassa que apresentou o maior valor de densidade a granel foi a casca do fruto do baru, com 453,45 kg/m³ e a que apresentou o menor valor, com 255,17 Kg/m³, foi à casca da árvore do jatobá-do-cerrado. O caroço de pequi apresentou densidade a granel de 315,52 Kg/m³. As cascas do fruto do baru ficaram mais compactadas no recipiente de volume fixo que as cascas do fruto do jatobá-do-cerrado e os caroços de pequi, e mesmo tendo umidade menor que a do caroço de pequi, apresentou maior densidade do granel.

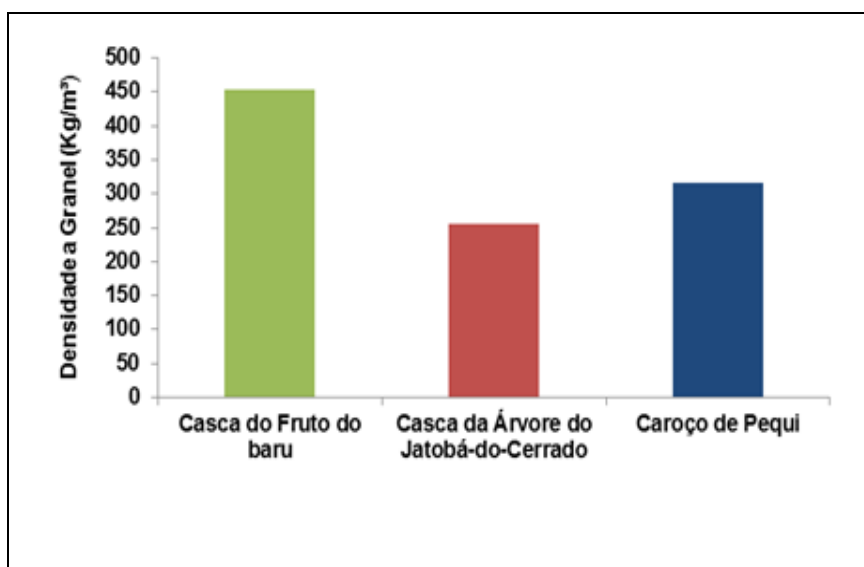


Figura 17: Densidade a granel das biomassas analisadas.

Fonte: (Autoria Própria).

PINHEIRO *et.al.*; (2005), em seu estudo sobre densidade a granel de resíduos vegetais, encontrou para a casca da castanha-do-pará de 250 kg/m³ e da casca de amêndoa de 399 kg/m³. FEITOSA *et.al.*; (2006) encontrou para as cascas de nozes, densidade a granel de 260 kg/m³. Comparando os resultados obtidos com a literatura citada, é possível concluir que uma maior massa poderá ser transportada ou armazenada de cada material, num recipiente de volume fixo, diminuindo assim, os custos de transporte e armazenamento (CHRISOSTOMO, 2011).

DA SILVA *et.al.*, (2007) considera que densidade a granel está diretamente relacionada com a granulometria, ou seja, menor ou maior quantidade de massa por unidade de volume irá influenciar a variável. Outra justificativa que pode ser considerada sobre a maior densidade a granel das cascas do fruto do baru, cascas da árvore do jatobá e caroço de pequi em relação aos resíduos estudados pela literatura, é que essas biomassas contêm um maior teor de umidade em comparação aos frutos secos da castanha-do-pará e da amêndoa (CARRANZZA, 2010). Portanto, para utilização posterior ou em ambientes úmidos, recomenda-se uma secagem prévia para aumentar a vida útil das biomassas.

5.4- Densidade Energética

A densidade energética é a quantidade de energia por unidade de volume de um combustível. Essa variável foi obtida para essa análise, pelo produto do PCU com a densidade a granel de cada biomassa analisada. A densidade a granel foi obtida seguindo os parâmetros da norma NBR 6922 – Determinação da Massa Específica (Densidade a Granel), com adaptações (PINHEIRO, 2005) .

Na Figura 19 é possível observar que a biomassa que possui a maior densidade energética foi a casca do fruto do baru, com valor de 1.707,91 Mcal/ m³ e a que apresentou menor valor, de 1.020,28 Mcal/m³ foi à casca da árvore do jatobá-do-cerrado. Em relação ao caroço de pequi, a densidade energética foi de 1.284,19 Mcal/m³.

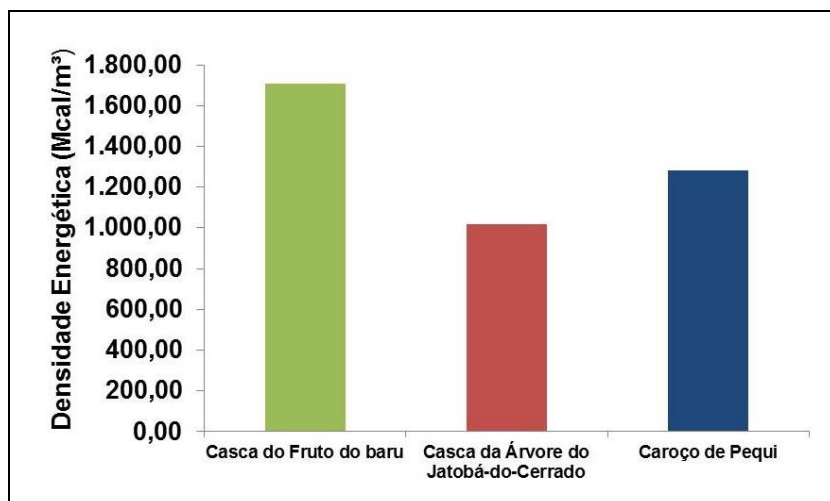


Figura 18: Densidade energética das biomassas analisadas.

Fonte: (Autoria Própria).

LIMA *et al.*, (2011) em seu estudo sobre caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalytus benthamii*, encontrou densidade energética para a madeira de eucalipto de 2.222 kcal/m³. Neste estudo o autor adotou para o cálculo da densidade energética o valor do PCS e a densidade básica da madeira. O valor da densidade energética está intimamente ligado com o teor de umidade e o poder calorífico do combustível. Os valores obtidos desta variável em comparação com a literatura fazem concluir que as biomassas analisadas possuem energia por unidade de volume próxima ao da madeira, que já é um recurso energético bastante utilizado mundialmente.

5.5- Análise Elementar CHNO e FRX/EDX

A análise elementar (CHNO) caracteriza-se por ocorrer à combustão dinâmica de determinada quantidade do material de estudo (seco, moído e pesado), o qual é inserido em um reator de combustão. O produto final da análise é a composição do material (C, H, N), expressa em termos da percentagem em massa de cada um dos elementos constituintes do material. A percentagem de Oxigênio (O) é calculada por diferença em relação aos outros elementos constituintes do material como: Carbono

(%C), Hidrogênio (%H), Nitrogênio (N%), Enxofre (%S) e Cinzas. É essencial o conhecimento da percentagem destes compostos na biomassa utilizada para a geração de energia, pois a relação C/H influencia diretamente o PCS do combustível (GOMES *et.al.*; 2013).

A análise de FRX/EDX é realizada por um equipamento chamado espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva. Os elementos individuais que constituem a estrutura da amostra emitem sua radiação característica (fluorescentes). O equipamento detecta esta radiação, e qualitativamente, determina quais os elementos estão presentes no material. Além disso, estabelece a concentração que cada elemento se apresenta na amostra (SCHIMIDT *et.al.*; 2002).

Os resultados obtidos por meio das análises CHNO e FRX/EDX são utilizados para entender a constituição química da biomassa e, para o cálculo do PCI de cada material. Como pôde ser observada na Figura 20 e na Tabela 4, a casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço de pequi *in natura* são compostos basicamente por Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O) e Nitrogênio (N). A biomassa que apresentou a maior percentagem de carbono foi o caroço de pequi com C- 55,09% (m/m) e a de menor percentagem foi a casca do fruto do baru com 45,83% (m/m) de Carbono. Para o Hidrogênio o maior valor foi H- 8,11% (m/m) no caroço de pequi e o menor foi H- 5,12% (m/m) na casca da árvore do jatobá-do-cerrado. Em relação ao Nitrogênio (N) 1,29% (m/m) foi o maior valor, e 0,53% o menor valor, encontrados nas biomassas caroço de pequi e casca da árvore do jatobá-do-cerrado, respectivamente. Os valores de Oxigênio foram obtidos por diferença, ficando 45,37% (m/m) para a casca da árvore do jatobá-do-cerrado, como maior valor e, 34,30% (m/m) no caroço de pequi, como menor valor.

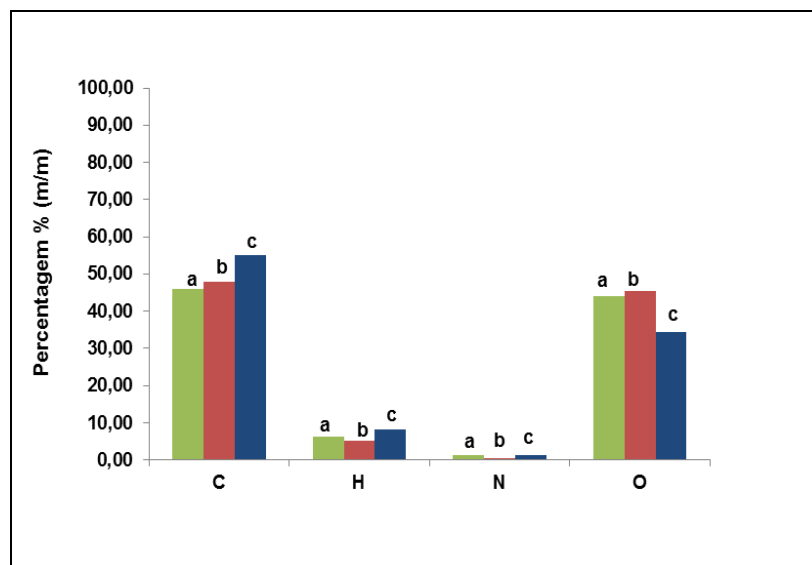


Figura 19: Valores de CHNO encontrados para as biomassas *in natura*: (a) Casca do fruto do baru, (b) Casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) Carço de pequi.

Fonte: (Autoria Própria).

A composição química da biomassa analisada por CHNO em relação aos compostos C, H, O e N não apresentaram diferenças consideráveis em relação à mesma composição de madeiras de diversas espécies, coníferas e folhosas. A maioria das madeiras existentes na natureza apresentam a seguinte composição química elementar: Carbono (C)- 49-50%, Hidrogênio (H)- 6%, Oxigênio (O)- 44-45% e Nitrogênio (N)- 0,1-1% (KLOCK *et.al.*; 2005).

Assim, como os elementos C, H, O, N são considerados macronutrientes, pois as plantas necessitam deles em maiores quantidades, e, em razão disso, apareceram em maiores percentagens na amostra analisada; os elementos: Fósforo (P), Enxofre (S), Cálcio (Ca), Potássio (K) e Silício (Si) também entram na mesma classificação em relação à necessidade nutricional das plantas (MENDES, 2007). Esses macronutrientes se apresentaram da seguinte forma nas amostras analisadas: P_2O_5 , SO_3 , CaO, K_2O , SiO_2 .

Os elementos Sódio (Na) e Ferro (Fe) apareceram, representados na forma de óxidos nas amostras. Estes elementos são classificados como micronutrientes para os vegetais, pois eles são necessários em menores quantidades no desenvolvimento das plantas (MENDES, 2007).

Tabela 4: Composição química elementar das biomassas analisadas: casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço do pequi *in natura* obtida por análise elementar (CHNOS/ FRX/EDX), (% massa, base seca).

Compostos	Casca do Fruto do Baru	Casca da Árvore do Jatobá-do-Cerrado	Caroço de Pequi
C	45,830	47,880	55,090
H	6,240	5,120	8,110
O	44,150	45,370	34,300
N	1,180	0,530	1,290
K₂O	1,260	0,394	0,398
Na₂O	1,023	-	0,359
CaO	0,158	0,497	0,056
SO₃	0,185	0,071	0,157
P₂O₅	0,152	0,047	0,066
Br	-	-	0,017
Fe₂O₃	0,012	0,015	0,014
SiO₂	0,044	-	0,066

Na Figura 21, são apresentados os principais compostos constituintes das cinzas, oriundas da análise imediata das biomassas. As cinzas obtidas da combustão das cascas do fruto do baru, cascas da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço de pequi, exibem como principal característica o alto teor de Oxigênio (O), indicando grau de oxidação máximo dos componentes das cinzas. A biomassa cuja cinza apresentou o maior teor de oxigênio foi o caroço de pequi com 92,48% (m/m) e a que obteve o menor valor foi à casca do fruto do baru, com 89,17%. Esse resultado comprova que a maioria do material carbônico foi oxidado ao estado de cinzas, além disso, os baixos teores de (CHN) presentes no material residual das biomassas comprovam que a matéria orgânica foi reduzida ao máximo, através do processo de queima.

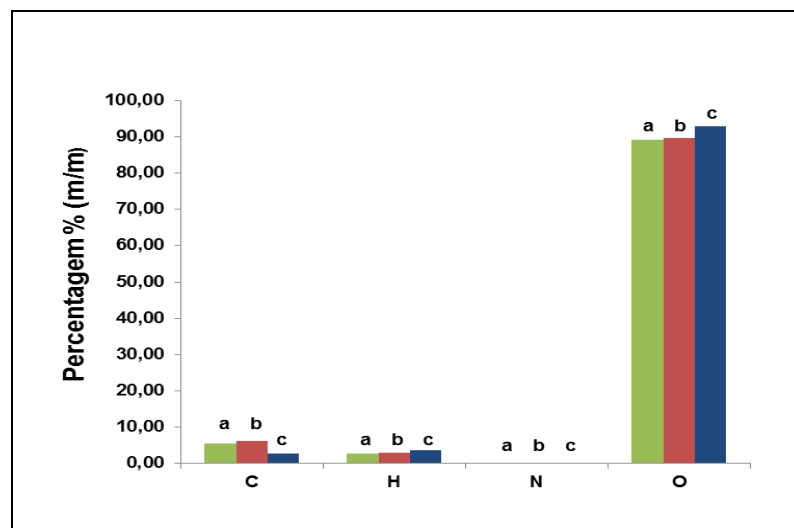


Figura 20: Valores de CHNO encontrados nas cinzas das biomassas: (a) Casca do fruto do baru, (b) Casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) Carvão de pequi.

Fonte: (Autoria Própria).

Pode-se também verificar, que as cinzas oriundas das biomassas, Tabela 5, também apresentaram em sua composição óxidos de K_2O , CaO , P_2O_5 , SO_3 , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Esses óxidos são decorrentes da oxidação da matéria orgânica, e a presença de certos metais está relacionada com a adubação realizada na área de plantio, e também, com o tipo de solo da área plantada.

Tabela 5: Composição química elementar das cinzas da casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e carvão do pequi obtida por análise elementar (CHNOS/ FRX/EDX), (% massa, base seca).

Compostos	Casca do Fruto do Baru	Casca da Árvore do Jatobá-do-Cerrado	Carvão de Pequi
C	5,490	6,120	2,710
H	2,730	3,050	3,580
O	89,170	89,60	92,480
N	0,010	0,050	0,010
K₂O	1,404	0,286	0,157
CaO	0,100	0,388	0,030

P₂O₅	0,511	0,099	0,246
SO₃	0,226	0,032	0,015
SiO₂	0,184	0,062	0,330
MgO	-	0,228	0,178
Al₂O₃	-	-	0,233
Fe₂O₃	-	-	0,024

No resultado das análises elementares de (CHNOS/FRX/EDX) das cinzas das biomassas é possível observar a presença de óxidos oriundos de diversos elementos químicos relacionados ao ambiente de crescimento das árvores, como: K₂O, CaO, P₂O₅, SO₃ e SiO₂, conforme FREDDO (1997) e BUCHANAM (1981).

De acordo com FREDDO (1997), os principais íons minerais presentes nas cinzas de biomassa, principalmente madeira, são: cálcio, magnésio, potássio, enxofre, baixas quantidades de sódio, manganês, alumínio, ferro, cromo, zinco, cobre, entre outros. Além desses minerais, algumas biomassas podem conter em suas cinzas, radicais como: silicatos, sulfatos, carbonatos e cloretos. A quantidade desses elementos químicos na biomassa vegetal varia com a espécie, com a disponibilidade no solo e a época do ano.

Segundo BUCHANAM (1981), os compostos inorgânicos estão presentes na biomassa, pois eles proporcionam a biomassa maior resistência ao desenvolvimento de organismos. Geralmente, os compostos inorgânicos aparecem na forma de cristais de oxalato de cálcio ou potássio e sílica, e a proporção destes na biomassa está relacionada diretamente as condições ambientais que o vegetal encontrou no decorrer de seu crescimento.

5.6- Difração de Raios-X (DRX)

A análise de difração de raios-X é uma técnica utilizada para revelar detalhes da estrutura cristalina de um material. As informações sobre a estrutura de um

determinado material são importantes para explicar as propriedades e seu desenvolvimento em determinadas aplicações (CLEARFIELD, 2008).

Esta técnica é baseada na incidência de um feixe de raios X em um determinado material, o mesmo interage com os átomos presentes, gerando o fenômeno da difração. A difração de raios X acontece de acordo com a lei de Bragg, a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram (característicos para cada fase cristalina) (ALBERS, 2002).

A análise de DRX demonstrou que a cinza da casca do fruto do baru e a cinza da casca da árvore do jatobá-do-cerrado apresentam sílica na forma amorfa (Figura 22 e 23). Segundo DELLA *et.al.*; (2001), a presença de sílica amorfa (reativa) ou cristalina (praticamente inerte) em materiais está diretamente ligada à temperatura e a metodologia de obtenção das cinzas. Se a temperatura de queima da cinza é baixa ou quando o tempo de exposição da mesma a temperaturas elevadas é pequeno, a sílica contida no material é predominantemente amorfa. Conhecer a forma como a sílica se apresenta nas cinzas pós-gaseificação é importante, pois a temperatura de operação do reator irá influenciar se ocorrerá incrustações nas tubulações devido à fusão das cinzas, ou, além disso, pode acontecer entupimentos nas passagens de ar do equipamento.

Com base no resultado do DRX das cinzas da casca do fruto do baru (Figura 22) e das cinzas da casca do jatobá-do-cerrado (Figura 23) é possível concluir que os materiais apresentam estrutura predominantemente amorfa, e esta característica é justificada pela não predominância de fase determinante (cristalina) no material. Segundo SCITANG (1999), materiais amorfos são classificados dessa maneira, pois os átomos presentes estão arranjados de forma aleatória, muito similar à aleatoriedade encontrada nos líquidos. Também, pode-se observar a presença de picos baixos de difração em $2\theta = 29, 31$ e 33° referentes provavelmente a carbonatos do tipo $K_2Ca(CO_3)_2$, conforme biblioteca de dados do equipamento. Portanto, as cinzas da casca do fruto do baru e da casca da árvore do jatobá-do-cerrado apresentam baixa concentração de carbonatos, que pode ser justificada pela análise de CHN das cinzas da casca do fruto do baru e das cinzas da casca da árvore do

jatobá-do-cerrado que tiveram como resultado da percentagem de Carbono (C), 5,49% para o baru e 6,12% para o jatobá.

Em relação ao DRX das cinzas do caroço de pequi (Figura 24) é possível concluir que o material apresenta certa amorficidade nos picos baixos de difração até $2\theta = 20^\circ$, isso corresponde a presença de sílica amorfa (reativa).

O pico predominante de difração em $2\theta = 21$ e 22° é referente provavelmente a presença de quartzo de baixa pureza. De acordo com SILVA *et.al.* (2014), o quartzo é um mineral, que apesar de ser constituído em grande parte por SiO_2 , possui impurezas que são compostas pelos elementos químicos: alumínio, manganês, boro, molibdênio, cálcio, níquel, magnésio, zircônio, vanádio, ferro, titânio, cobre, fósforo, cromo e outros. Além disso, por meio da observação dos picos de difração de $2\theta = 27$ a 35° é possível concluir que o material possui provavelmente a presença de silicatos de potássio, dos tipos $\text{K}_2(\text{ZnSi}_3\text{O}_8)$ e KGaSiO_4 , conforme biblioteca de dados do equipamento.

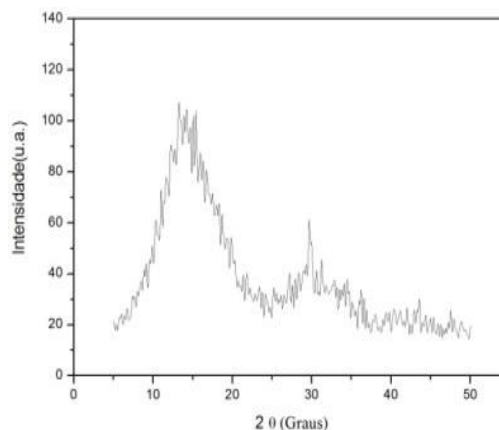
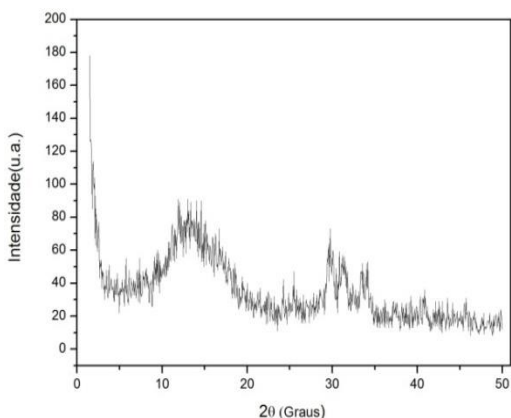


Figura 21: DRX das cinzas da casca do baru. **Figura 22:** DRX das cinzas da casca do jatobá- do-cerrado.

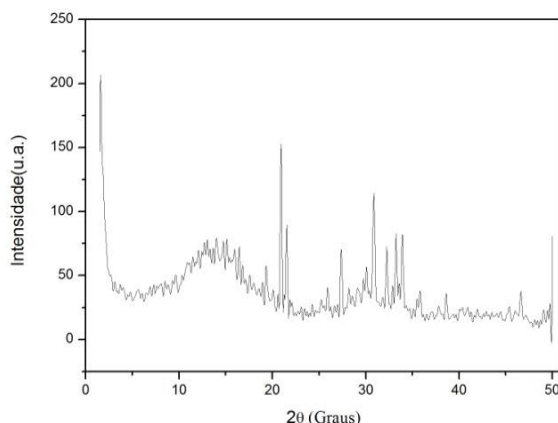


Figura 23: DRX das cinzas do caroço de pequi.

5.7- Análise Química de Materiais Lignocelulósicos

A análise lignocelulósica da biomassa é realizada com o objetivo de verificar a composição química do material vegetal. A biomassa vegetal é composta basicamente de macromoléculas, constituídas de celulose, hemicelulose e lignina. Além das macromoléculas constituintes, há as moléculas de baixo peso molecular, onde se encaixa os extrativos presentes no material, e a parte inorgânica composta de sais, óxidos e íons metálicos; no qual os últimos elementos são contabilizados como cinzas (R. ROWELL, 2005).

Os métodos de análise lignocelulósica existentes na literatura são desenvolvidos especificamente para o estudo da madeira, logo não podem ser utilizados diretamente com outros tipos de materiais lignocelulósicos. É necessário o desenvolvimento de uma metodologia específica para que essa análise possa ser utilizada com outros tipos de materiais florestais, que não sejam como a madeira, pois os reagentes e temperaturas utilizadas nesta análise podem atingir outros materiais constituintes desconhecidos. Portanto, os dados obtidos pelas análises, podem ser subestimados ou superestimados pela heterogeneidade de composição (Santos, 2008).

Na Tabela 6 é apresentada a composição lignocelulósica (Extrativos, Holocelulose e Lignina) das biomassas analisadas. Dentre todas as biomassas

estudadas a que apresentou o maior valor de teor de extrativos foi o caroço de pequi com 40,73%, seguido da casca do fruto do baru com 21,65% e a casca da árvore do jatobá-do-cerrado com 13,25%. O maior teor de holocelulose foi apresentado pela casca do fruto do baru, com 65,82%, seguido da casca da árvore do jatobá com 60,69% e o caroço de pequi, com 60,65%. Em relação ao teor de lignina, a biomassa que apresentou o maior valor foi à casca da árvore do jatobá-do cerrado, com 38,07%, e a que apresentou menor valor foi à casca do fruto do baru, com 31,82%. O caroço de pequi apresentou 36,99% de teor de lignina.

Tabela 6: Dados da composição lignocelulósica das biomassas analisadas.

Biomassas	Extrativos (%)	Holocelulose (%)	Lignina (%)
Casca do Fruto do Baru	21,65	65,82	31,82
Desvio Padrão	2,23	0,91	0,90
Casca da Árvore do Jatobá-do-Cerrado	13,25	60,69	38,07
Desvio Padrão	0,81	0,38	0,43
Caroço de Pequi	40,73	60,65	36,99

Desvio Padrão

3,83

0,60

0,64

Na Figura 25, na sequência, apresenta-se a comparação dos resultados obtidos para a análise lignocelulósica de todas as biomassas analisadas no experimento.

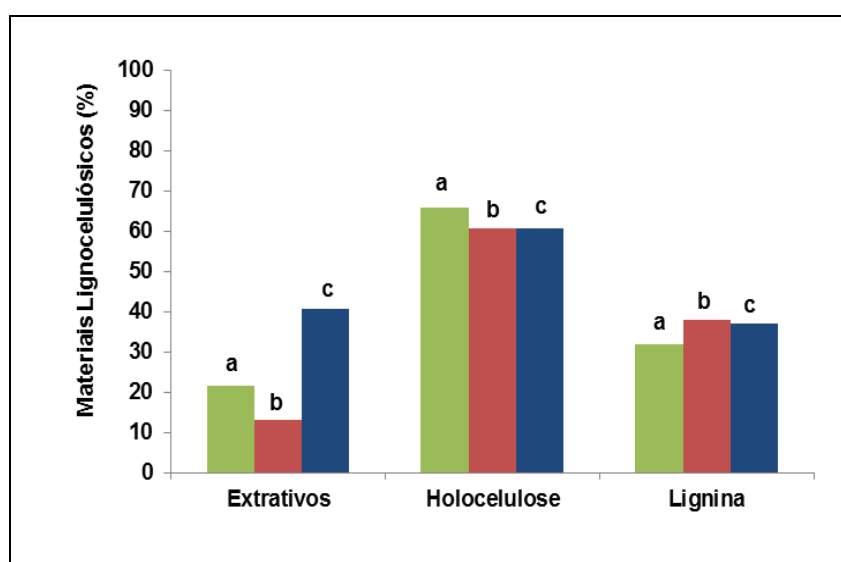


Figura 24: Comparação dos teores de extrativos, holocelulose e lignina obtida para as biomassas analisadas: (a) Casca do fruto do baru, (b) Casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) Caroço de pequi.

Fonte: (Autoria Própria).

O alto teor de extrativos apresentado pelo caroço de pequi de 40,73% pode ser justificado devido ao alto teor de óleo presente nesta biomassa, conforme já mencionado no subitem de poder calorífico. Segundo ANTUNES *et al.*, (2009), o caroço de pequi apresenta aproximadamente 50% (m/m) de óleo vegetal, logo é possível concluir, que a presença deste tipo de extrativo na biomassa influencia diretamente no percentual de extrativos.

A casca da árvore do jatobá-do-cerrado apresentou teor de extrativos de 13,25%, esse valor é provavelmente constituído por: compostos terpênicos, taninos, substâncias amargas, matérias resinosas e pécnicas, amido, açúcares e compostos fenólicos, esses elementos possuem função ante diversos microrganismos (STUBBLEBINE & LANGENHEIM, 1980; LORENZI & MATOS, 2002). Os valores de extrativos obtidos para as biomassas analisadas são considerados superiores quando comparados ao mesmo teor para a madeira, que geralmente está situado entre 1-5% (R. ROWELL, 2005).

Os teores de lignina obtidos para as biomassas analisadas são considerados superiores quando comparados à percentagem média de lignina encontrada para a madeira de folhosas, que geralmente é de 18-25%, de acordo com LEWIN & GOLDSTEIN (1991) & TSOUMIS (1991). Segundo JARA (1989), a constituição química do material, principalmente o teor de lignina e de extrativos (resinas, matérias graxas, óleos-resinas, óleos, etc) influencia diretamente o PCS do material vegetal.

ZANUNCIO *et.al.*; (2013) em seu estudo sobre a influência do desbaste na composição química da madeira de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), realizou análises químicas para a obtenção dos teores de extrativos e lignina total da espécie. Os teores de extrativos variaram de 2,1-2,5%, valores comumente encontrados para madeiras de folhosas.

Comparando os teores de extrativos das biomassas deste estudo com os obtidos pela literatura para a madeira de eucalipto e do cumaru, pôde-se verificar que os resíduos florestais possuem altos percentuais de extrativos em relação à madeira. O alto teor de extrativos, obtido através da análise lignocelulósica para as biomassas estudadas pode ser justificado por BUCHANAN (1963) que afirma que existe variação no teor desses componentes nos galhos, madeira e frutos de uma mesma árvore, pois existe variação na composição anatômica e química desses elementos estruturais da árvore.

Segundo SILVÉRIO *et. al.*, (2006), os extrativos são os componentes químicos que não fazem parte da constituição química da parede celular, e são constituídos por elevado número de compostos, como: resinas, açúcares, taninos,

ácidos graxos dentre outros; que podem ser extraídos em água ou solventes orgânicos. Em razão da complexa gama de extrativos existentes, muitos autores recomendam realizar várias extrações dos mesmos com diversos solventes, como: acetona, água quente, etanol, tolueno, entre outros; para que se possa retirar o máximo de extrativos da biomassa. Segundo OLIVEIRA *et.al.*; (2005), a mistura etanol: tolueno na proporção de 1:2 extrai somente ceras, gorduras, resinas e óleos. De acordo com esse mesmo autor a extração realizada com água quente ou fria retira da biomassa certos componentes, como: amido, taninos, açúcares e corantes. Em decorrência desses fatores citados, a retirada de extrativos, seja da madeira ou de resíduos florestais, deve ser realizada com vários tipos de solventes orgânicos, para que se possa extrair o máximo possível da amostra.

Comparando o teor de lignina encontrado para as biomassas analisadas com o mesmo teor encontrado para madeiras do Cerrado, estudo realizado por SANTOS (2008), onde os teores encontrados foram: 31,74% Sucupira-Branca (*Pterodon pubenscens*), 32,31% Jacarandá-do-Cerrado (*Dalbergia miscolobium*), 31,42% Carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum*), 27,78% Barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*) e 25,16% Gomeira (*Vochysia thyrsoidea*), pode-se perceber que os resíduos possuem a percentagem de lignina bem próxima dos valores encontrados para madeira.

De acordo com CUNHA (1989), o poder calorífico da biomassa, principalmente da madeira, é influenciado diretamente pelo teor de lignina e extrativos, pois os mesmos contém menos oxigênio que os polissacarídeos presentes na holocelulose (celulose + hemicelulose). JARA (1989) relata também, que a constituição química da biomassa vegetal varia conforme a parte da árvore que esteja em processo de queima (casca da árvore, madeira, casca dos frutos, raiz, nós, ramos, galhos, etc.), logo isso influencia significativamente nos valores dos poderes caloríficos do material.

BRITO & BARRICHELLO (1977) estudando diversas espécies de madeira verificaram que o teor de carbono fixo, fornecido pela unidade de madeira enfiada é função da percentagem de lignina na biomassa. Por meio da comparação dos teores de lignina encontrados neste estudo com a literatura citada acima, é possível

concluir que as biomassas estudadas são recursos que possuem elevado potencial energético e apresentam forte tendência a serem aplicadas como recurso energético, assim como atualmente a madeira é aplicada.

Os teores de holocelulose encontrados neste estudo para a casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço de pequi foram respectivamente: 65,82%, 60,69% e 60,65%, valores significativos quando comparados aos valores encontrados no estudo de SANTOS (2008) para as madeiras das seguintes espécies: 68,26% para a Sucupira-Branca (*Pterodon pubescens*), 67,69% para o Jacarandá-do-Cerrado (*Dalbergia miscolobium*), 68,58% para o Carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum*), 72,22% para o Barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*) e 74,84% para a Gomeira (*Vochysia thyrsoidea*).

Os valores de teores de lignina e teores de holocelulose encontrados para as biomassas analisadas neste estudo são favoráveis à geração de bioenergia, através de processos termoquímicos, principalmente o da gaseificação, pois de acordo com (RAAD *et.al.*, 2006; GANI & NARUSE, 2007) a holocelulose apresenta baixa estabilidade térmica em relação à estrutura da lignina, logo maiores teores de holocelulose tendem a diminuir o rendimento de carvão vegetal, e altos teores de lignina favorecem a formação de carvão. Como os teores de holocelulose foram superiores aos encontrados para diversas madeiras na literatura, pode-se concluir que essa característica irá favorecer o processo de formação de gases no reator.

Além dessa justificativa, pode-se considerar a citação de PROBSTEIN & HICKS (1982) que dizem que processos pirolíticos lentos (carbonização) tendem a produzir maior quantidade de material carbonado, enquanto um processo cuja taxa de aquecimento é alta como a gaseificação, geralmente se utiliza temperatura na faixa de 1.500- 2000°C, logo tende a apresentar alto rendimento de produtos gasosos. Durante o processo de gaseificação, os reagentes fornecidos ao sistema se combinam com o carbono sólido, em temperaturas elevadas, aumentando a produção dos gases, à medida que consome o material carbonado. Segundo BRIDGWATER (2001), o processo termoquímico da gaseificação geralmente produz 85% de produto gasoso, 10% de carvão e 5% de líquido.

5.8- Análises Térmicas

A Análise Termogravimétrica (TG) é uma técnica utilizada pela ciência para conhecer o comportamento de um material, através da variação da propriedade física (massa), da amostra de um determinado material em função do tempo (com a temperatura constante), ou em função da temperatura. A curva de DTG corresponde à derivada primeira da curva de TG, nos quais os degraus presentes na curva de TG são substituídos por picos que delimitam áreas proporcionais às variações de massa sofridas pela amostra. Entretanto, a curva de DTA (Análise Térmica Diferencial), corresponde à segunda derivada da curva de TG, que consiste em medir a diferença de temperatura (ΔT) entre a substância e o material de referência, além disso, é possível determinar a ocorrência de processos endotérmicos e exotérmicos (PEREIRA, B.L.C. *et al.*, 2013).

A biomassa quando é submetida a altas temperaturas, sofre decomposição térmica dos seus constituintes químicos (hemicelulose, celulose e lignina), pois ocorre o processo de carbonização. Os componentes químicos da biomassa se decompõem em faixas diferentes de temperatura. A faixa de degradação dos componentes químicos ocorre da seguinte maneira: hemicelulose (200-300°C), celulose (240-350°C) e lignina (350-500°C) (CONESA *et al.*, 1995). A decomposição térmica da biomassa acontece por fases, sendo estas caracterizadas por regiões bem distintas em grau de decomposição, conforme as faixas definidas (OLIVEIRA, 1982).

Os ensaios empregando-se a TG foram realizados com a casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço de pequi em atmosfera de ar sintético, e também, em nitrogênio. Esta análise foi realizada em duas atmosferas diferentes, pois o objetivo principal era o entendimento do processo de combustão (ar sintético em excesso) e pirólise (atmosfera inerte, N₂), afinal são os meios prováveis de se realizar a gaseificação. As curvas termogravimétricas (TG/DTG) resultantes do ensaio com a casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço de pequi podem ser observadas nas figuras 26, 27 e 28. Para a casca do fruto do baru a perda de massa total foi de 98,99% em ar sintético e 96,8%

em nitrogênio. Já para a casca da árvore de jatobá-do-cerrado essas perdas foram respectivamente: 99,99% em ar sintético e 99,98% em nitrogênio. Em relação ao caroço de pequi, as perdas até 1000°C foram: 99,93% em ar sintético e 99,51% em nitrogênio.

A análise térmica ocorreu para todas as biomassas até a temperatura de 1000°C, mas a decomposição térmica de cada material ocorreu de forma variada, conforme os dados expressos na Tabela 7. O comportamento das biomassas durante a análise termogravimétrica representa o somatório de cada um de seus componentes. Nas faixas de decomposição térmica encontradas, além da liberação de CO₂, ocorreram outros eventos como a perda de compostos voláteis e umidade remanescente.

Tabela 7: Temperaturas de decomposição térmica em ar sintético e nitrogênio, predominantes em cada material analisado na análise termogravimétrica.

Biomassas	Temperatura de decomposição total em ar sintético	Temperatura de decomposição total em nitrogênio
Casca do Fruto do Baru	Até 600°C	Até 800°C
Casca da Árvore do Jatobá-do-Cerrado	Até 700°C	Até 900°C
Caroço de Pequi	Até 600°C	Até 800°C

Nas Tabelas 8 e 9 apresenta as principais perdas de massas registradas nas Figuras 26, 27 e 28.

Tabela 8: Resultados da análise termogravimétrica das biomassas analisadas em atmosfera de ar sintético.

Zonas de Decomposição	Pico Máximo (°C)	Perda de massa (%)	Intervalo de Temperatura (°C)	
1	57,68	10,63	0-100	Casca do Fruto do Baru
2	209,75	12,78	100-212	
3	319	36,12	212-330	
4	458,80	35,58	330-480	
5	632,27	1,45	480-640	
1	62,76	11,76	0-100	Casca da árvore do jatobá-do-cerrado
2	318,82	50,40	100-350	
3	426,77	33,25	350-440	
4	442,06	4,58	440-510	
1	66,62	3,84	0-100	Caroço de Pequi
2	337,76	62,93	100-342	
3	387,31	31,37	342-510	

Tabela 9: Resultados da análise termogravimétrica das biomassas analisadas em nitrogênio.

Zonas de Decomposição	Pico Máximo (°C)	Perda de massa (%)	Intervalo de temperatura (°C)	
1	62,65	3,14	0-100	Casca do fruto do baru
2	211,30	19	100-212	
3	348,50	34,58	212-400	
4	808,59	39,65	400-810	
1	63,66	9,84	0-100	Casca da árvore do jatobá-do-cerrado
2	251,60	18,73	100-350	
3	346	26,69	350-440	
4	637,80	41,37	400-700	
1	66,49	4,32	0-100	Caroço de Pequi
2	341,80	40,30	100-343	
3	398,75	30,29	343-430	
4	658,22	24,09	430-800	

Durante o processo de aquecimento da biomassa, seja em ar sintético ou nitrogênio, ocorrem os mesmos eventos de degradação térmica na estrutura da biomassa. A primeira zona de decomposição da curva TG/DTG ocorre geralmente em temperatura inferior a 100°C, atribuída à perda de água fisicamente adsorvida na superfície (externa e interna) da biomassa e a saída dos materiais voláteis.

A segunda zona de decomposição da curva de TG/DTG está relacionada à degradação térmica da hemicelulose, extrativos orgânicos de maior massa molecular e liberação de voláteis (CO, CO₂ e alguns hidrocarbonetos) a baixas temperaturas. Segundo FENGEL (1989), a degradação térmica da hemicelulose ocorre na faixa entre 160-260°C, estando quase completa em torno de 325°C, pois ela é formada por estruturas amorfas, ricas em ramificações que a tornam mais flexíveis ao processo de degradação, por isso esse constituinte do material vegetal é o primeiro a ser degradado em processos térmicos (YANG *et al.*, 2007). As hemiceluloses durante o processo de queima produzem mais gases não combustíveis e mais alcatrão do que a celulose, devido sua estrutura mais simples.

A terceira zona de degradação da curva TG/DTG está relacionada à degradação da celulose e parte da lignina. A celulose se degrada na faixa de temperatura de 260-350°C, com uma faixa de degradação progressiva que inclui despolimerização e desidratação da celulose nas regiões amorfas, e, além disso, ocorre ruptura da lignina em blocos complexos (BROWNE, 1958). A celulose é responsável pela produção da maior parte dos compostos voláteis inflamáveis (MARTINS, 1982).

A quarta zona de temperatura da curva TG/DTG corresponde à degradação térmica da lignina e decomposição completa da celulose, principalmente a que se encontra em empacotamento cristalino. O mecanismo de degradação térmica da lignina é pouco conhecido, pois a sua estrutura é altamente complexa. A faixa de degradação da lignina é bastante ampla, entre 150-300°C, ocorre ruptura das ligações éter e, próximo aos 300°C, quebras das ligações aromáticas. Nessa fase, também ocorre o destaque das cadeiras alifáticas das cadeias aromáticas e, por fim, rompem-se as ligações carbono-carbono às temperaturas compreendidas entre 370

- 400°C. Esse composto é termicamente mais resistente a mudanças de temperatura que a hemicelulose e a celulose (LEVAN & WINANDY, 1990).

A quinta zona de decomposição observada na curva de TG/DTG da casca do fruto do baru, apresentou pico máximo em 632,27°C e a perda de massa observada foi de 1,45%. Este pico é característico de carbonatos formados da decomposição de alguns materiais inorgânicos presentes nas cinzas da biomassa analisada. Outra justificativa para a ocorrência deste pico é o alto teor de cinzas apresentado pelo material na análise imediata, que foi de 2,6%.

Os respectivos resíduos apresentados por cada biomassa analisada, nas curvas de TG apresentadas foram: casca do fruto do baru (ar sintético)- 3,43%, (nitrogênio)- 3,68%; casca da árvore do jatobá-do-cerrado (ar sintético)- 0,0064%, (nitrogênio)- 3,50%; caroço de pequi (ar sintético)- 1,395% e em (nitrogênio)- 1,013%. Os resíduos finais da queima da biomassa são correspondentes às cinzas e aos materiais inorgânicos constituintes e misturados a biomassa *in natura*.

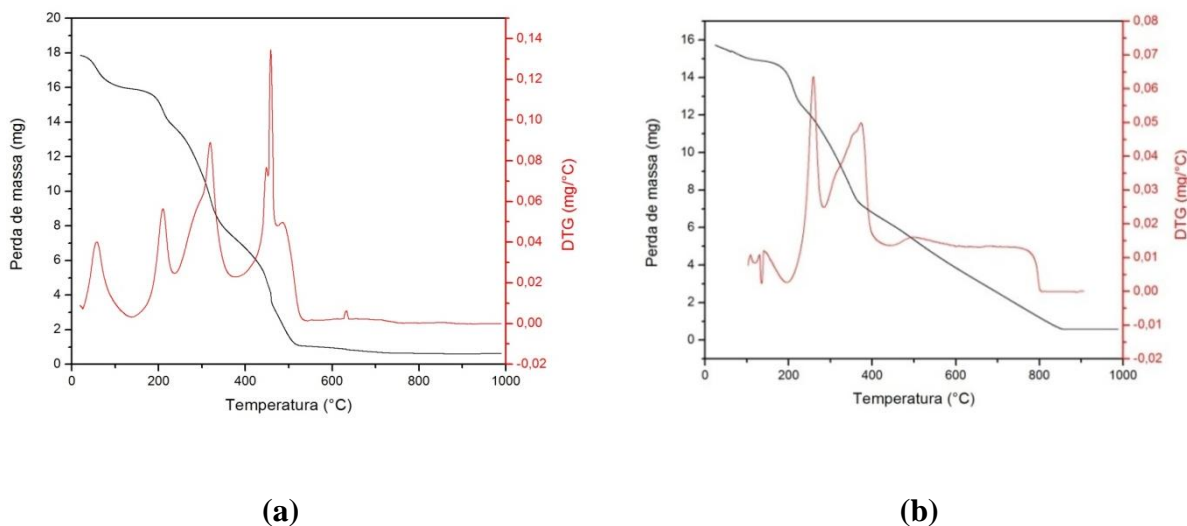


Figura 25: Curvas de TG e DTG da casca do fruto do baru em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).

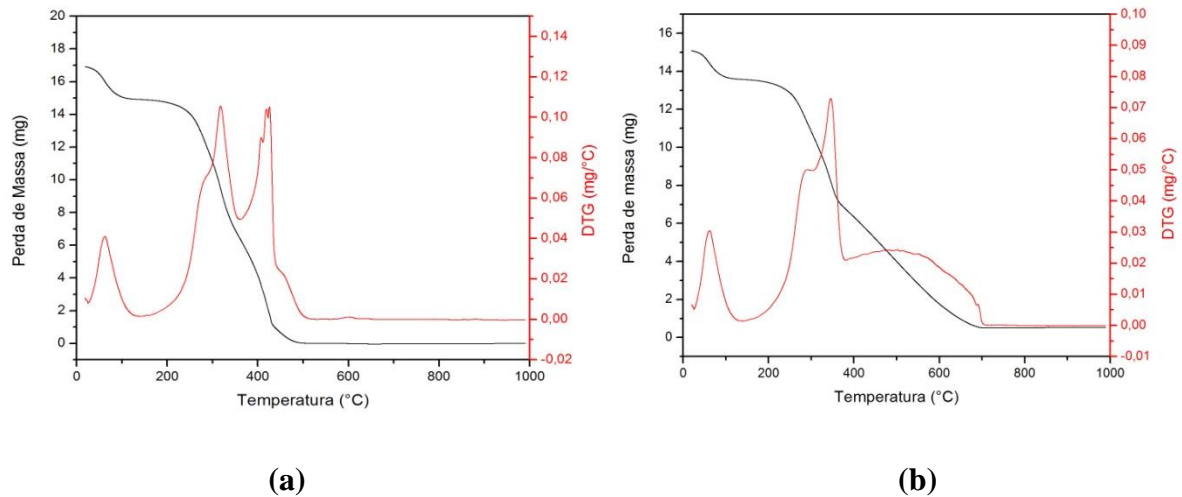


Figura 26: Curvas de TG e DTG da casca da árvore do jatobá-do-cerrado em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).

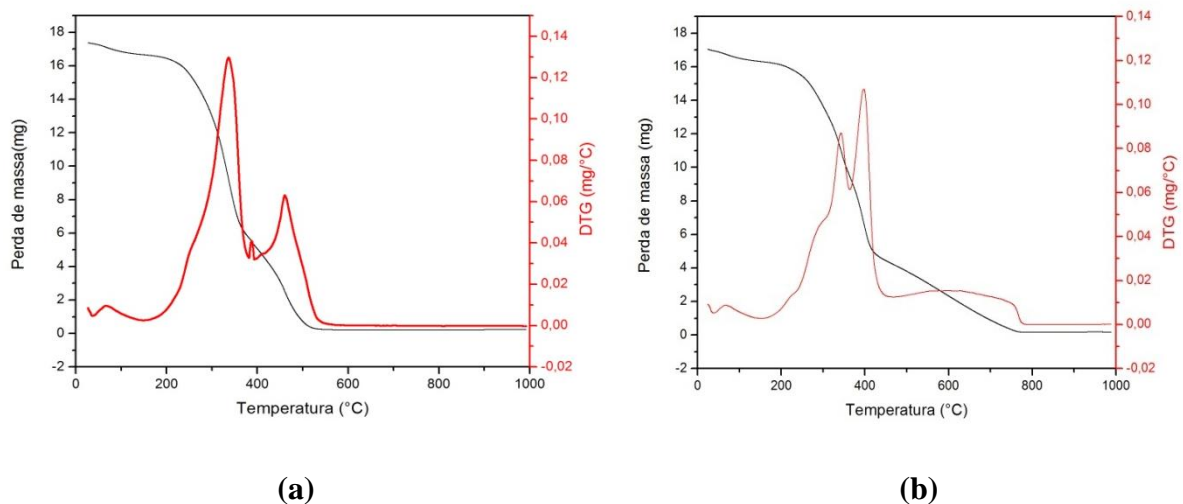


Figura 27: Curvas de TG/ DTG do caroço de pequi em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).

As Figuras 29, 30 e 31 mostram as curvas de DTA obtidas para as biomassas analisadas, em atmosfera de ar sintético, e também, em nitrogênio. Pode-se observar na figura que a curva de DTA associada à casca do fruto do baru em ar sintético apresentou um pico endotérmico e quatro picos exotérmicos. O pico endotérmico pode ser observado na temperatura de 64,47°C e, logo em seguida, quatro picos exotérmicos foram observados em 329,03°C, 458,50°C, 494,15°C e

633,50°C. Em nitrogênio ocorreu um pico endotérmico em 49,35°C, e em seguida dois exotérmicos, em 371,97°C, 505,41°C. Em relação à casca da árvore do jatobá-do-cerrado, as curvas de DTA, Figura 30 e 31, apresentaram um pico endotérmico e três picos exotérmicos, tanto na atmosfera com ar sintético quanto com nitrogênio. O pico endotérmico pode ser observado na temperatura de 68,72°C, em ar sintético e, 69,25°C em nitrogênio. Os picos exotérmicos apareceram nas seguintes temperaturas: 335,93°C, 401,90°C e 426,21°C (ar sintético) e 139,46°C, 200,97°C e 392,61°C (nitrogênio). Por meio da curva de DTA (ar sintético) para o caroço de pequi é possível observar que há um pico endotérmico na temperatura de 55,58°C, e posteriormente três picos exotérmicos, nas temperaturas de 250,76°C; 350,20°C e 459,55°C. Em relação às temperaturas atingidas nos picos em atmosfera de nitrogênio, os valores foram os seguintes: 35,74°C (endotérmico), 348,29°C e 425,95°C (exotérmicos).

Os picos endotérmicos estão relacionados com os seguintes eventos: à evaporação da água e decomposição de compostos orgânicos de baixo peso molecular. Entretanto, os picos exotérmicos são correspondentes à combustão da matéria orgânica.

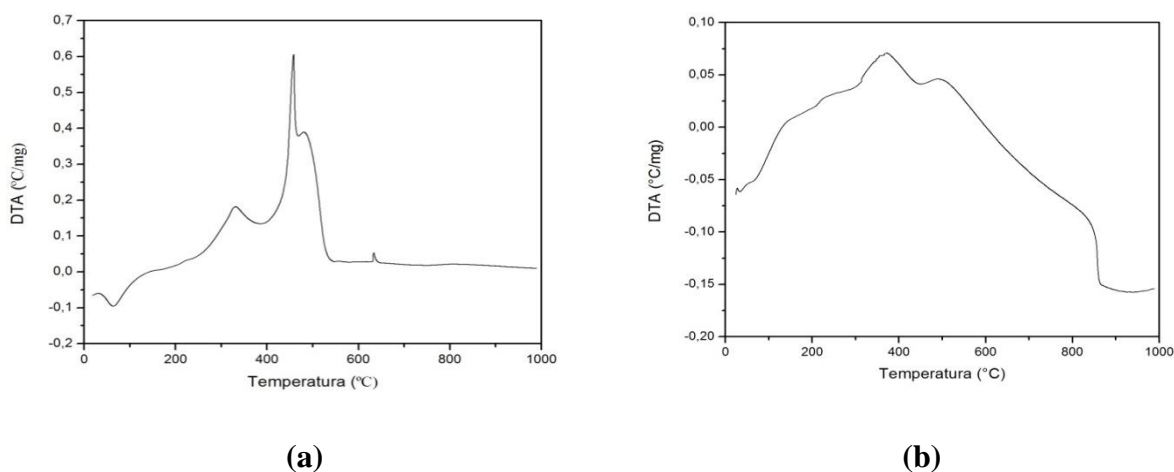


Figura 28: Curvas de DTA (análise diferencial térmica) da casca do fruto do baru em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).

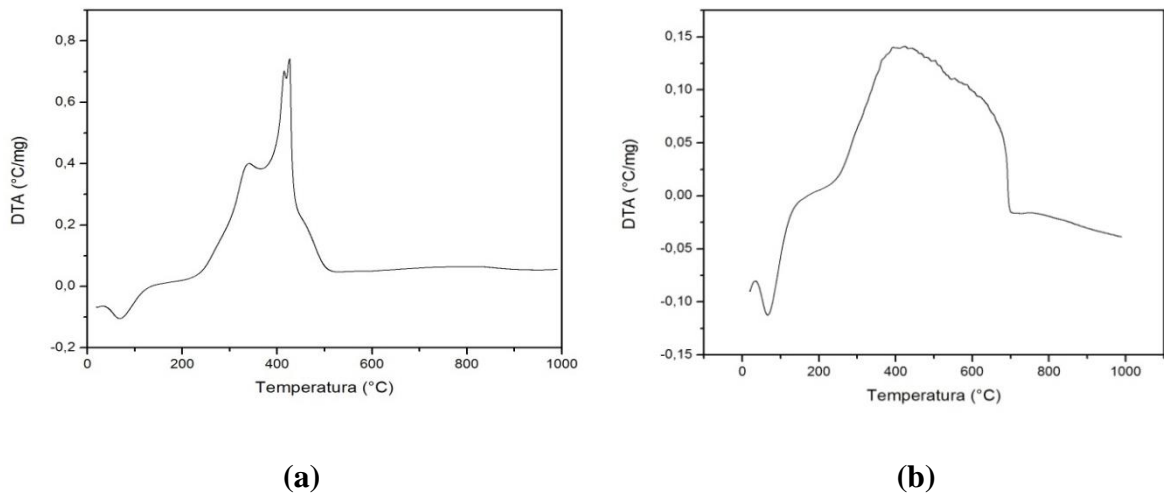


Figura 29: Curvas de DTA (análise diferencial térmica) da casca da árvore do jatobá-do-cerrado em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).

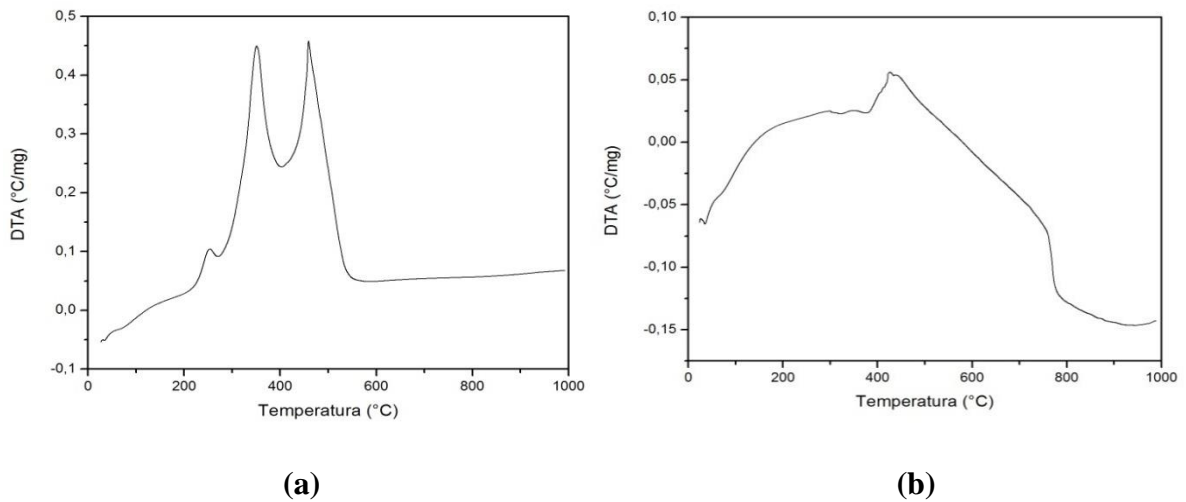


Figura 30: Curvas de DTA (análise diferencial térmica) do caroço de pequi em Ar Sintético (a) e em Nitrogênio (b).

5.9- Resultados da Gaseificação e Composição dos Gases

Os ensaios de gaseificação com as biomassas analisadas neste estudo foram realizados em um gaseificador do tipo Contracorrente (*updraft*). Este tipo de reator é

considerado simples, mas possui como desvantagem a produção de um gás extremamente impuro. Segundo CORTEZ (2008), reatores contracorrentes geram gás de síntese com elevado teor de alcatrão e particulados, o teor de alcatrão situa-se na faixa de 20-100 g/Nm³ e o teor de particulados (fuligem) entre 0,1-0,2 g/Nm³ (GOMÉZ, 2011; MCKENDY, 2002). Todos os ensaios de gaseificação foram conduzidos com adaptações nas quantidades de biomassa colocadas no interior do reator e na quantidade do ar injetado para a condução do processo. Quando se verificava que a produção do gás de síntese no gaseificador era constante, coletava-se através de uma seringa do equipamento CG/TCD uma amostra de gás, e injetava no equipamento, para posterior coleta dos dados de concentração dos gases oriundos do processo de gaseificação.

O reator utilizado nos ensaios laboratoriais apresentou alguns problemas durante a realização dos experimentos, como: produção de faíscas, pequenos locais de vazamento, incrustações de alcatrão nas tubulações e acúmulo de cinzas. Em decorrência disso, os ensaios tiveram que ser realizados com adaptações de algumas peças como: alicates de pressão e folha de carbono utilizadas para a vedação do reator.

Para analisar se o processo de gaseificação ocorreu de fato durante o ensaio laboratorial foi considerada primeiramente a observação da chama decorrente da queima do gás oriunda do processo termoquímico. No Anexo B podem ser observadas as Figuras 8 e 9 que correspondem respectivamente: a chama gerada pela gaseificação da casca do fruto do baru e a chama gerada da gaseificação da casca da árvore do jatobá-do-cerrado. Pode-se observar uma coloração azul intensa nas chamas geradas por meio do processo de gaseificação, essa característica evidencia a queima de H₂ e CO.

A Cromatografia Gasosa (CG) é uma análise química amplamente utilizada para separar, identificar e quantificar constituintes voláteis ou semi-voláteis e termicamente estáveis que compõem uma mistura química (amostra). Esta análise tem como princípio o deslocamento de uma substância pela fase estacionária por meio da passagem por uma fase móvel, neste caso essa fase móvel é gasosa (hélio, ar sintético, hidrogênio, etc), resultando no deslocamento com diferentes

velocidades dos componentes da amostra. Essa análise é usada principalmente para obter resultados quantitativos (concentrações), tendo como base o princípio da quantificação, que é a área dos picos registrados no cromatograma proporcional à massa do material injetado. Dessa forma, é extremamente importante que a análise seja realizada de maneira confiável e precisa, sendo assim a área dos picos precisa ser medida de maneira exata e reproduzível (DEGANI, 2011).

Na Tabela 10 são apresentadas as concentrações dos componentes gasosos medidos durante o experimento de gaseificação. Recordando que os valores percentuais desses constituintes dos gases são expressos em volume, e que a fração de CH₄ não foi medida, devido restrição do equipamento. Dentre todas as biomassas gaseificadas a que apresentou a maior produção (concentração) de H₂ foi à casca do fruto do baru, com 24,7%, e a que gerou menor percentagem deste gás foi o caroço de pequi, com 0%. A concentração de H₂ presente no gás produzido pela gaseificação da casca da árvore do jatobá-do-cerrado foi de 15,4%, valor intermediário em relação às outras duas concentrações citadas acima. Os valores das concentrações de CO obtidas a partir da análise do gás produto da gaseificação das biomassas variaram de 6,5% até 35,6%, sendo que a biomassa que apresentou a maior produção deste gás foi a casca da árvore do jatobá-do-cerrado. As concentrações de CO₂ obtidas em relação à gaseificação das biomassas foram as seguintes: 4% (casca da árvore do jatobá-do-cerrado), 11,8% (caroço de pequi) e 13,7% (casca do fruto do baru).

Tabela 10: Dados da composição dos gases em concentração (% v/v) oriundos do processo de gaseificação das biomassas analisadas.

Biomassa	H₂ (%)	CO (%)	CO₂ (%)	Outros Gases (%)
Casca do Fruto do Baru	24,7	33,0	13,7	28,6

Casca da Árvore	15,4	35,6	4,0	44,9
do Jatobá-do-Cerrado				
Caroço de Pequi	0,00	6,5	11,8	81,7

Na Figura 32, na sequência, apresenta-se a comparação da composição dos gases resultantes dos ensaios de gaseificação.

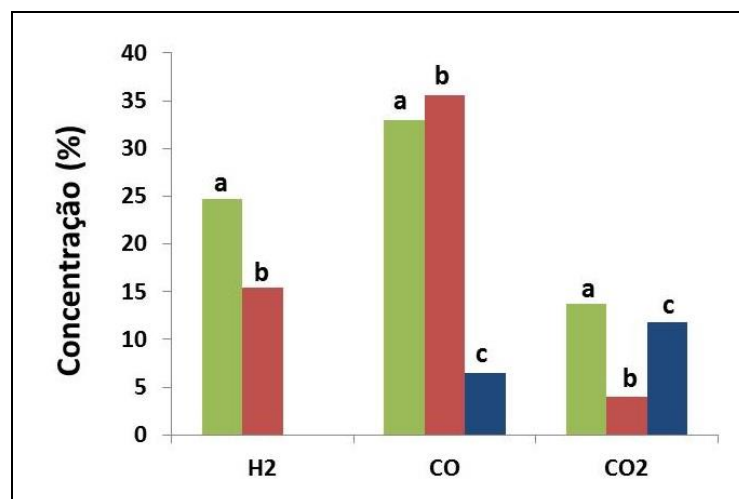


Figura 31: Composição dos gases produto dos ensaios de gaseificação: (a) casca do fruto do baru, (b) casca da árvore do jatobá-do-cerrado e (c) caroço de pequi.

Fonte: (Autoria Própria)

Pasangulapati *et.al.*, (2012) observou que a constituição química da biomassa vegetal influencia significativamente no perfil de liberação de gases em processos termoquímicos, seja pirólise ou gaseificação. Os autores concluíram que altos teores de celulose e hemicelulose podem gerar maiores concentrações de CO e CO₂, e que altos teores de lignina podem gerar uma maior concentração de CH₄. Comparando os resultados das concentrações obtidas de CO e CO₂ para as biomassas

analisadas com a literatura supracitada, pode-se concluir que o baru e o jatobá geraram gases mais ricos em CO, pois foram às biomassas que apresentaram maiores valores de holocelulose na análise química. Em relação a concentração de CO₂, pode-se concluir que a gaseificação do baru gerou o maior valor para este gás, pois foi a biomassa que apresentou o maior valor de holocelulose na análise química, que foi de 65,82%.

Em relação à concentração dos outros gases, as biomassas que apresentaram os maiores valores desses gases foram a casca da árvore do jatobá e o caroço de pequi, isso pode ser justificado em parte, em decorrência, de a gaseificação ter sido realizada com o ar como agente gaseificante e, além disso, em razão do tipo de reator utilizado.

Segundo (HASLER & NUSSBAUMER, 1999; HAN e KIM, 2008) a composição típica do gás de síntese gerado por meio do processo de gaseificação em reatores do tipo contracorrente (*updraft*) utilizando como agente gaseificante o ar, é a seguinte: 10-14% de H₂, 15-20% de CO, 8-10% de CO₂, 2-3% de CH₄ e 53-65% de N₂. Por meio da comparação com a literatura dos dados gerados acerca do gás, oriundo da gaseificação da casca do baru, é possível concluir que houve de forma significativa o processo de gaseificação. O alto teor de H₂ e CO tornam essa mistura gasosa em um produto especial, conhecido com gás de síntese ou *syngas*, que pode ser usado na produção de alguns hidrocarbonetos.

De acordo com MCKENDRY (2002), as concentrações típicas do gás produto de gaseificadores de leito fixo alimentados com biomassa são: 15-20% de H₂, 10-15% de CO, 3-5% de CH₄, 10-15% de CO₂ e de 40-50% de N₂. Comparando os dados obtidos acerca da gaseificação da casca da árvore de jatobá-do-cerrado com os dados apresentados por MCKENDRY (2002), pode-se verificar que ocorreu o processo de gaseificação nas condições operacionais impostas ao reator no experimento realizado. Houve diferença significativa em relação às concentrações de CO e CO₂ obtidas no experimento e as encontradas pela literatura. A justificativa para isso é que a composição final do gás resultante da gaseificação depende, entre outros aspectos, das condições operacionais impostas ao sistema de gaseificação,

como: temperatura, pressão, tempo de residência, características intrínsecas da biomassa, tipo de reator e agente de gaseificação utilizado.

Comparando as concentrações dos gases obtidos através da gaseificação do caroço de pequi, com as médias encontradas por (MCKENDRY, 2002; HASLER & NUSSBAUMER, 1999; HAN e KIM, 2008), pode-se concluir que não ocorreu o processo de gaseificação no interior do reator, com a biomassa utilizada. Esse processo termoquímico não ocorreu de maneira eficiente em relação a esta biomassa, devido a diversos fatores, como: a granulometria adotada no experimento que estava abaixo da indicada por GOMEZ *et.al.*, (2011), que diz que neste tipo de reator, a biomassa deve ter uma granulometria entre 10-100 mm. Outra justificativa para o processo de gaseificação não ter ocorrido é que a biomassa apresenta segundo ANATUNES & COLABORADORES (2009) aproximadamente 50% (m/m) de óleo vegetal. Este fator pode ter influenciado diretamente a formação de incrustações dentro do reator, prejudicando a entrada e passagem de ar no interior do equipamento.

Além disso, recomenda-se que para cada tipo de biomassa seja construído um reator específico, que garanta todas as fases de reação química dentro do equipamento. Neste caso específico do caroço de pequi, constatou-se que o reator utilizado não apresentou design adequado e nem condições operacionais ideais para garantir o regime de gaseificação, apenas o de combustão, pois o material queimou de maneira desuniforme quando se injetava certa quantidade de ar. Além disso, ocorreu à formação de uma pasta cremosa (textura de sabão) nos orifícios presentes no leito do reator e a concentração dos gases produzidos pelo processo termoquímico foi abaixo das concentrações típicas do gás produto oriundo de gaseificadores do tipo contracorrente, como o adotado no presente estudo.

As concentrações dos gases gerados por meio dos ensaios de gaseificação variaram de uma espécie botânica para outra, pois as condições operacionais adotadas no reator utilizado, e principalmente, a composição lignocelulósica de cada uma delas afeta diretamente as reações químicas no interior do equipamento. Segundo (KOLLMAN & COTÉ JR, 1968) após a temperatura de 280°C, no interior do reator químico, ocorre a pirólise propriamente dita, as reações são endotérmicas e

exotérmicas, e a decomposição térmica da biomassa consegue se manter na maioria das vezes, somente com a energia liberada da quebra das ligações das unidades básicas de celulose, hemiceluloses e lignina. O fenômeno da degradação térmica nesta faixa de temperatura gera os seguintes produtos: CO, CH₄, H₂, entre outros gases e líquidos, também há a geração de alcatrões que, nestas condições, são altamente inflamáveis.

5.10- Correlação entre a simulação computacional através do *software* Comgas e comparação com o trabalho realizado por Tiangco *et.al.*, (1996)

5.10.1- Simulação Casca do Fruto do Baru e Casca da Árvore do Jatobá-do-Cerrado

As simulações computacionais utilizadas em gaseificação podem não fornecer a melhor predição e precisão de seu desenvolvimento operacional, mas podem ser uma ferramenta que analisa de forma qualitativa a influência do design, das propriedades termoquímicas da biomassa no andamento do processo da gaseificação e dos parâmetros da operação. A simulação é utilizada para facilitar o entendimento do processo de gaseificação, por meio da comparação com ensaios de gaseificação real (ITAI, 2011).

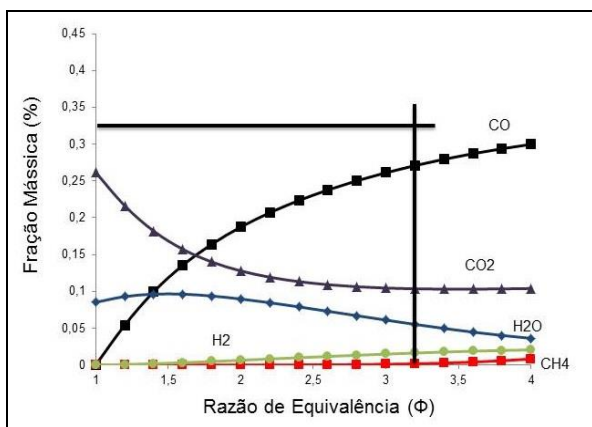
O programa ComGas correlaciona os dados acerca da composição elementar, teor de umidade da biomassa e poder calorífico superior com a razão de equivalência. Através dessa correlação o software identifica as quantidades dos reagentes da reação, e por meio de equações das reações químicas são calculadas as concentrações dos constituintes do *syn gas* (RENDEIRO, 2008).

Utilizando a combinação dos dados obtidos na simulação computacional com o software Comgas, com os dados alcançados no experimento de TIANGCO *et.al.*, (1996), é possível realizar análises comparativas aos resultados do próprio, para confirmar se de fato ocorreu o processo termoquímico da gaseificação nos ensaios laboratoriais. O autor supracitado executou vários ensaios de gaseificação,

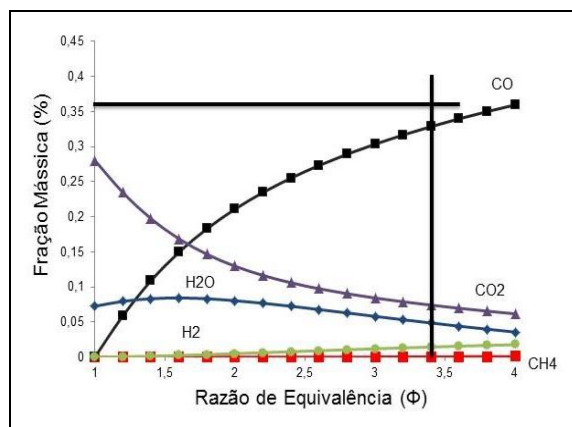
considerando diversas combinações entre taxa específica de gaseificação, diâmetro do reator e razão ar-combustível, obtendo dessa forma um intervalo amplo de resultados, que foram utilizados em comparação com os dados do presente trabalho. O autor determina um intervalo de valores para a taxa específica de gaseificação, ele considera que reatores de pequena escala apresentam um bom regime de gaseificação entre $100 \leq \psi \leq 400 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$.

A simulação considera os seguintes constituintes do gás (CO , H_2 , CO_2 , CH_4 , H_2O), pode-se notar que a produção de CO é favorecida a elevadas razões de equivalência ($\phi > 1$), logo o processo termoquímico tende para a zona da pirólise e da gaseificação. A formação de CO_2 e H_2O tende a decrescer quando há o aumento da razão de equivalência, logo a produção desses gases é significativa na zona da combustão. A produção de H_2 e CH_4 tende a aumentar juntamente com o crescimento da razão de equivalência, logo esses gases tendem para a pirólise. O processo da gaseificação ideal geralmente ocorre na razão de equivalência ($\phi > 1$), geralmente no valor de ($\phi = 2,5$), ou seja, com uma quantidade de ar insuficiente para gerar a oxidação total (combustão) do combustível, empregado no processo (PARENTE, 2012). Segundo ALVES (2010), nessa região de ($\phi = 2,5$) que teoricamente as concentrações de H_2 e CO são máximas.

Na Figura 33 são apresentados os dados obtidos sobre a composição dos gases (frações mássicas) e razões de equivalência, relacionadas ao processo de gaseificação da casca do fruto do baru e da casca da árvore do jatobá-do-cerrado obtidos por meio de simulação computacional com o *software* Comgas.



(a)



(b)

Figura 32: Simulação da casca do fruto de baru (a) e casca da árvore do jatobá-do-cerrado (b) obtida através do *software* ComGas.

Fonte: (Autoria Própria).

Comparando o dado obtido por meio experimental da concentração de CO da gaseificação da casca do fruto do baru, de 33%, com o dado adquirido por meio da simulação computacional, é possível verificar que a razão de equivalência correspondente a essa concentração é de $\phi = 3,2$. Nesse mesmo contexto, comparando o dado experimental da concentração de CO, de 35,6%, para a gaseificação da casca da árvore de jatobá-do-cerrado com o resultado alcançado por meio da simulação para este gás, é possível verificar que a razão de equivalência correspondente a essa concentração é de $\phi = 3,4$, valor bem próximo do encontrado para a simulação da casca do fruto do baru. Segundo (ITAI, 2011), os melhores resultados de composição de gases oriundos do processo de gaseificação são obtidos, quando se adota razões de equivalência no intervalo entre 2,5-5. Comparando os valores de razão de equivalência obtidos por meio da simulação, pode-se concluir que no ensaio de gaseificação real para as duas espécies, o valor adotado dessa variável foi próximo ou igual ao encontrado na simulação.

As concentrações de H₂, CO₂, CH₄ e outros gases obtidas através da gaseificação, para a casca do fruto do baru e para a casca da árvore de jatobá-do-cerrado, foram respectivamente: 24,7%, 13,7% e 28,6% (Baru) e 15,4%, 4% e 44,9% (Jatobá). Relacionando esses dados obtidos no experimento com os adquiridos por meio da simulação, se pode observar que a tendência da

concentração de hidrogênio e metano é crescer de acordo com o aumento da razão de equivalência adotada na simulação, porém, as concentrações destes gases não foram coerentes com a simulação. O alto teor de H_2 e o significativo aumento no teor de CO é indicação de produção de um gás de síntese classificado, como rico. De acordo com BRIDGWATER (2003) & GRASSI (1991), o gás de síntese para ser classificado como rico, deve possuir concentrações maiores que 11% de H_2 e 24% de CO, para gases oriundos de reatores do tipo contracorrente, como o utilizado no experimento. Uma provável justificativa para a diferença entre as concentrações dos gases produzidos pela gaseificação da casca do baru em relação as da casca da árvore do jatobá-do-cerrado é a diferença de granulometria das partículas de biomassa utilizadas em cada ensaio laboratorial. Segundo ASSUMPÇÃO (1981), materiais lignocelulósicos exercem certa influência na composição dos gases, pois materiais com granulometria pequena queimam rapidamente no interior do reator, prejudicando o andamento das reações químicas, principalmente, as de gaseificação.

Constatou-se, ao se confrontarem os resultados das simulações com os dados práticos das duas espécies analisadas, que com razões de equivalência baixas, o processo termoquímico que ocorre no reator fica próximo a combustão completa da biomassa, pois as concentrações de CO_2 e de água H_2O aumentam. Como dentro do reator ocorrem várias reações químicas ao mesmo tempo, a concentração de H_2 é resultado de dois processos opostos, de um lado ocorre à reação de deslocamento de água que tende a decompor a H_2O em H_2 a altos teores de umidade. Entretanto, quando a temperatura abaixa para altas razões de combustível e ar, e altos teores de umidade, parte do H_2 é convertido em gás metano CH_4 (ITAI, 2011).

Através da realização de cálculos envolvendo a razão de equivalência e o beta estequiométrico, foi possível encontrar os valores da relação ar-combustível para o processo de gaseificação com a casca do fruto do baru, que foi de 1,25, e para a casca da árvore de jatobá-do-cerrado, que foi de 1,13. Todos esses resultados foram baseado no estudo de Tiangco *et.al.*, (1996). A partir da relação ar-combustível foi encontrado o valor para a taxa de gaseificação específica (ψ) para o ensaio da casca do fruto do baru e para a casca da árvore de jatobá-do-cerrado, que

foi de 100 kg/m².h, conforme pode ser observado na Figura 34 (a) e (b). Considerando as informações adotadas pelo autor, o experimento foi conduzido com uma boa taxa específica de gaseificação, pois o valor encontrado está dentro do intervalo considerado por Tiangco *et.al.*, (1996) para reatores de pequena escala, como o utilizado em escala experimental.

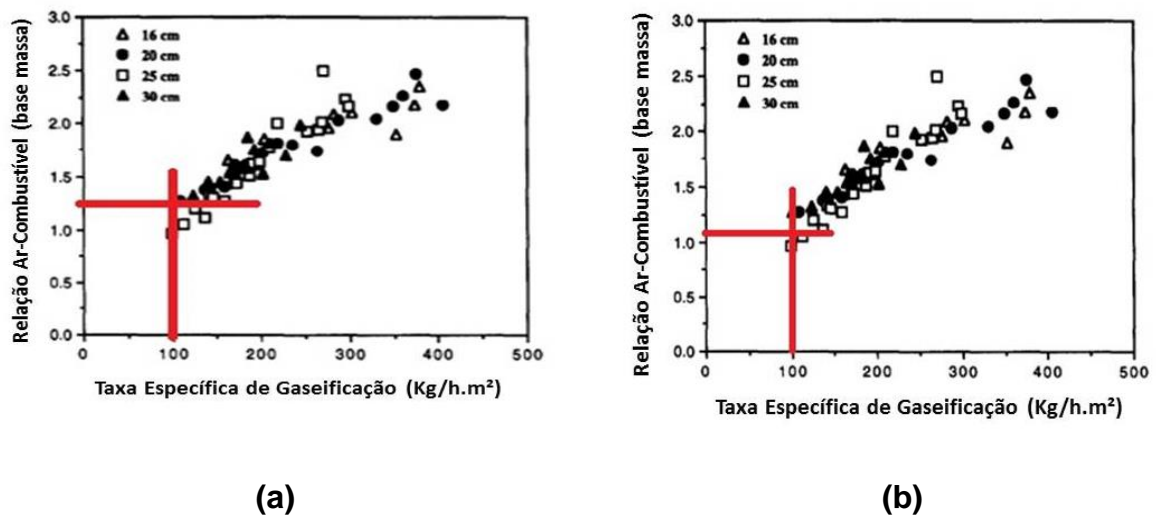


Figura 33: Comparação com os resultados de Tiangco *et.al.*, (1996) encontrados em relação à razão ar-combustível versus taxa específica de gaseificação (ψ): (a) Casca do fruto do baru e (b) Casca da árvore do jatobá-do-cerrado.

Fonte: (TIANGCO *et.al.*, 1996).

O valor encontrado da eficiência do gás frio gerado a partir da gaseificação da casca do fruto do baru e, também do ensaio de gaseificação com a casca da árvore do jatobá-do-cerrado foi de 40%, conforme pode ser observado na Figura 35. Este valor foi considerado significativo em relação à taxa específica de gaseificação de 100 kg/m².h, pois ficou dentro do intervalo esperado em relação aos dados encontrados por (Tiangco *et.al.*,1996). A eficiência do gás frio é um parâmetro importante para quantificar o desempenho do processo de gaseificação, pois baseado nesse fator de saída é possível determinar qual a melhor maneira de se utilizar o gás, seja como fonte térmica, elétrica ou para a fabricação de produtos (MCKENDRY, 2002).

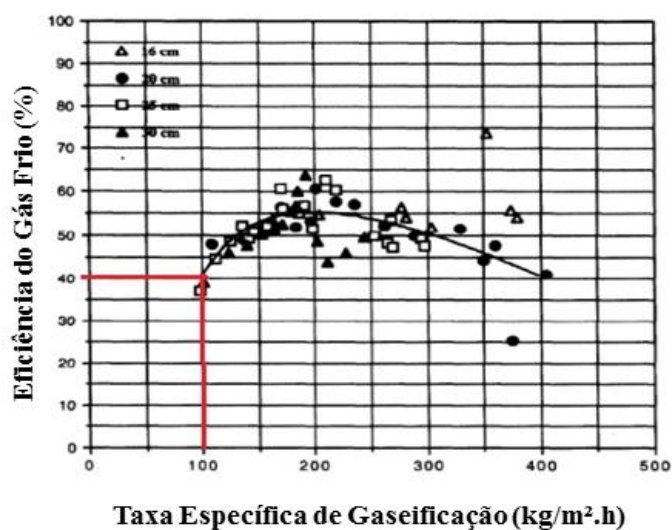


Figura 34: Valor estimado para a eficiência do gás frio gerado através da gaseificação da casca do fruto do baru e gaseificação da casca da árvore do jatobá-do-cerrado.

Fonte: (TIANGCO *et.al.*, 1996)

O valor encontrado para o PCI do gás gerado através da gaseificação da casca do fruto do baru foi de 7,31 MJ/kg, e o valor para o PCI do gás oriundo da gaseificação da casca da árvore do jatobá-do-cerrado foi de 7,70 MJ/kg. Segundo SORDI *et.al.* (2006), esses valores classificam o gás, como de médio poder calorífico. O poder calorífico do gás é considerado significativo, quando comparado ao valor médio do poder calorífico do gás de síntese, produzido através de processos de gaseificação, utilizando o ar como agente gaseificante é de 5 MJ/kg. A justificativa principal para esses valores de poder caloríficos encontrados é a alta concentração de Nitrogênio (N₂) presente no ar utilizado, como agente gaseificante.

Em decorrência da utilização do ar como agente gaseificante, o produto da gaseificação sai do reator diluído em N₂, que possui a característica principal de ser inerte. Além dessa justificativa para o médio valor de poder calorífico dos gases encontrados, pode se considerar também, o tipo de reator utilizado no experimento, que é do tipo contracorrente. Esse reator é considerado o mais simples dentre os reatores existentes de gaseificação, mas possui como desvantagem a produção de um gás extremamente impuro. Segundo CORTEZ (2008), reatores deste tipo geram gás de síntese com elevado teor de alcatrão e particulados, o teor de alcatrão situa-

se na faixa de 20-100 g/Nm³ e o teor de particulados (fuligem) entre 0,1-0,2 g/Nm³ (CORTEZ, 2008 e GOMÉZ, 2011 e MCKENDY, 2002). A melhor alternativa para se obter um gás de síntese com alto poder calorífico, é utilizar como agente gaseificante o oxigênio puro, vapor d'água ou uma mistura de outros gases (SORDI *et.al.* 2006).

5.10.2-Simulação para o caroço de pequi

Na Figura 36 é possível observar os dados da simulação para o caroço de pequi. Comparando o dado real da concentração de CO, de 6,5%, com o dado adquirido por meio da simulação para este gás, é possível verificar que a razão de equivalência correspondente a essa concentração é de $\phi = 1,3$, valor bem distante do encontrado para as demais simulações. Este valor não é adequado para a condução do processo de gaseificação, pois está localizado bem próximo da região onde o $\phi=1$, correspondente à região onde a reação é dita estequiométrica.

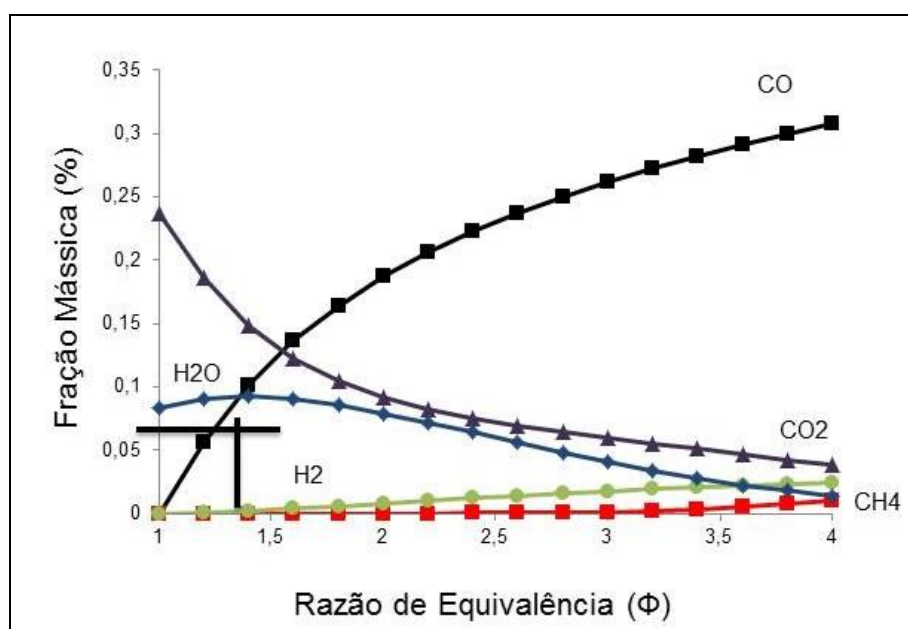


Figura 35: Simulação do caroço de pequi obtido através do software ComGas.

Fonte: (Autoria Própria).

O resultado adquirido por meio da simulação serviu para comprovar que no ensaio laboratorial de gaseificação não ocorreu de fato o dito processo termoquímico, e sim foi gerado no interior do reator o processo da combustão, pois o valor de ϕ ficou próximo da região dessa reação. Isso indica que para manter a reação química no reator foi necessário injetar muito ar, logo o processo termoquímico predominante foi deslocado para a combustão, pois o processo da gaseificação não conseguiu se sustentar com as condições operacionais adotadas no ensaio laboratorial. De fato, durante o ensaio realizado em laboratório, pode-se observar que o material combustível não queimou de forma uniforme, devido principalmente, ao tamanho da granulometria do material utilizado no ensaio de gaseificação e, em decorrência das propriedades químicas intrínsecas da biomassa.

As concentrações de H_2 , CO_2 , CH_4 e outros gases, adquiridas dos dados experimentais, foram respectivamente: 0%, 11,8% e 81,7%, comprovando que de fato que não ocorreu à gaseificação. Comparando os dados adquiridos a respeito das concentrações dos gases gerados no presente estudo com os obtidos por meio da simulação computacional, pode-se observar que o ensaio realizado em laboratório não obteve resultados significativos em relação à produção dos gases e a condução de operação do reator. Entretanto, no resultado obtido por meio da simulação computacional, pode-se observar que a biomassa comportou-se de maneira significativa para a produção de gás de síntese, pois no cenário considerado no *software* são adotadas as condições ideais para condução do processo termoquímico citado.

O valor encontrado por meio de cálculos para a razão ar-combustível do caroço de pequi foi de 4,3. Comparando este resultado com a taxa específica de gaseificação esperada por Tiangco *et.al.*, (1996), pode-se comprovar que não houve o processo de gaseificação no ensaio laboratorial gerado, pois o valor encontrado para a razão ar-combustível está fora do intervalo imposto pelo autor, e, além disso, o valor fica fora da área do gráfico como pode ser observado na Figura 37.

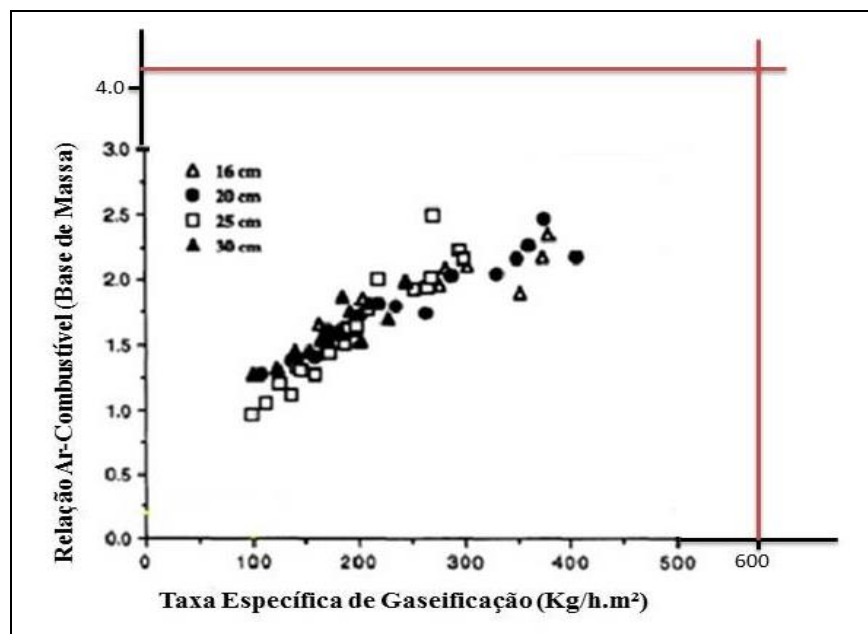


Figura 36: Comparação da simulação com os resultados de Tiangco *et.al.*, (1996) encontrados em relação à razão ar-combustível *versus* taxa específica de gaseificação (ψ).

Fonte: (Autoria Própria com adaptações).

6. CONCLUSÕES

As tecnologias de conversão da biomassa para a geração de energia são várias, mas é necessário descobrir a melhor forma de gerar energia. A tecnologia adotada deve ser precisa e correta do ponto de vista econômico, ambiental e social. É necessário impor critérios para o aproveitamento dos resíduos da biomassa, analisando a quantidade disponível e verificando principalmente as características químicas e físicas da biomassa que será utilizada, com fim energético. Neste estudo, pode-se concluir que a gaseificação de biomassa é uma alternativa econômica e socialmente viável para a geração de energia mundialmente, pois ajuda a reduzir a pressão sobre as fontes tradicionais de energia, e, além disso, oferece um destino sustentável para os resíduos florestais, agroindustriais e urbanos.

Para as biomassas estudadas, exceto o caroço do pequi, pode-se concluir que a gaseificação foi viável baseado nos resultados experimentais apresentados e na comparação desses resultados com as simulações computacionais realizadas com o *software* Comgas, conclui-se que:

- A partir dos dados gerados sobre a composição física e química das cascas do fruto do baru, casca da árvore do jatobá e caroço de pequi é possível concluir que possuem significativo valor energético para a geração de energia, por meio de processos termoquímicos.
- É necessário o desenvolvimento de uma metodologia específica de análise lignocelulósica para resíduos florestais, que não sejam como a madeira, pois os reagentes e temperaturas utilizadas na análise podem atingir outros materiais constituintes desconhecidos. Portanto, os dados obtidos pelas análises podem ser subestimados ou superestimados pela heterogeneidade de composição.
- O tipo de reator de gaseificação utilizado e as condições operacionais adotadas nos ensaios experimentais foram significativos para a geração de gás de síntese, a partir das cascas do fruto do baru e da casca da árvore do jatobá-do-cerrado. Em geral todos os ensaios de gaseificação com essas

biomassas foram bem sucedidos, o gás produzido gerou uma chama duradoura e consistente.

- Em relação ao caroço de pequi, os parâmetros adotados nos ensaios laboratoriais (tipo de reator, condições de operação e granulometria adotada) não foram adequados para a geração do processo da gaseificação, mas pôde-se observar a partir dos resultados adquiridos das propriedades físicas, químicas e térmicas, que esta biomassa apresenta um elevado potencial energético. Portanto, recomendam-se mais estudos relacionados às características intrínsecas do caroço de pequi e ao comportamento térmico da espécie supracitada em outros processos termoquímicos, como: pirólise, liquefação, gaseificação (em outro tipo de reator), entre outros.
- A aplicação adequada do tamanho dos resíduos com o sistema de gaseificação específico, permite maior eficiência do processo, como pode ser observado nos resultados experimentais obtidos acerca da gaseificação real, dados da simulação e dados correlatos com o estudo de TIANGCO *et.al*, (1996).
- O valor encontrado para o PCI do gás gerado através da gaseificação da casca do fruto do baru que foi de 7,31 MJ/kg, e para a casca da árvore do jatobá-do-cerrado foi de 7,70 MJ/kg. Esses valores foram superiores quando comparados ao valor médio do poder calorífico do gás de síntese, produzido a partir da gaseificação, utilizando o ar como agente gaseificante, que é, em média, de 5 MJ/kg.
- Os problemas apresentados pelo reator utilizado no experimento, como: produção de faíscas, pequenos locais de vazamento, incrustações de alcatrão nas tubulações e acúmulo de cinzas podem ser amenizados com manutenção constante das peças constituintes do gaseificador, e, além disso, sugere-se adaptações de algumas peças para melhoramento da eficiência do equipamento.
- A gaseificação é um processo capaz de tornar viável o uso de resíduos de biomassa, sejam florestais ou de outra origem, para a geração de energia, e, além do mais, contribui para a renovabilidade da matriz energética mundial, auxiliando também, na descentralização de geração de energia.

- O estudo da biomassa florestal para geração de energia através da gaseificação propicia uma ampla faixa de oportunidades para a pesquisa acadêmica. Há margem para vários estudos, que vão desde a variação de temperatura no reator, utilização de outros agentes de gaseificação diferentes do ar, variação na pressão de operação, utilização de diferentes biomassas (individuais ou uma mistura das mesmas), entre outros.
- A área da gaseificação é promissora em razão das possíveis utilizações do gás de síntese, que pode ser utilizado na fabricação de produtos químicos, geração de energia elétrica e térmica, entre outras possibilidades. A alta demanda mundial por energia de fontes renováveis é um dos principais motivadores para o crescente emprego e estudo dos sistemas de gaseificação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, de Y. V.; SILVA, da C.M; NASCIMENTO, H.R; GUERRA, S.M.G. **Aproveitamento da Biomassa Florestal: Produção de Energia Verde no Brasil.** 48º Congresso SOBER, Campo Grande, Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 25-28 de julho, 2009.

ALAUDDIN, Z. A. B. Z., LAHIJANI, P., MOHAMMADI, M., & MOHAMED, A. R. **Gasification of Lignocellulosic Biomass in Fluidized Beds for Renewable Energy Development: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9), 2852-2862, 2010.

ALBERS, A. P. F., MELCHIADES, F. G., MACHADO, R., BALDO, J. B., & BOSCHI, A. O. **Um Método Simples de Caracterização de Argilominerais por Difração de Raios X.** *Cerâmica*, 48(305), 34, 2002.

ALMEIDA, S.P. de, C.E.B. PROENÇA, S.M. SANO & J.F. RIBEIRO. **Cerrado: Espécies Vegetais Úteis.** Embrapa-CPAC, Planaltina. 464 p., 1998.

ALVES, C. D. D. L. **Caracterização de um Gaseificador do Tipo Downdraft.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 2010.

ANDRADE, AM de. **Efeitos da Fertilização Mineral e da Calagem na Produção e na Qualidade da Madeira e do Carvão de Eucalipto.** Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 105 P., 1993.

ANDRADE, Rubenildo Vieira. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, 2007.

ANDRADE, R. V., LORA, E. S. L., MELO, B. A., SALES, C. S. V. B., & GOMEZ, E. O. **Gaseificação de Biomassa em Leito Fluidizado: Avaliação de um Reator Operando com Casca de Arroz como Combustível.** In 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, 2007.

ANTUNES, E. C., ZUPPA NETO, T. O., ANTONIOSI, Filho, N. R., & CASTRO, S. S. **Utilização do Pequi (*Caryocar brasiliense* Camb) como Espécie Recuperadora de Ambientes Degradados no Cerrado e Fornecedora de Matéria Prima para a Produção de Biodiesel.** In: I Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel, Brasília, 2006.

ASSUMPÇÃO, R. M. V. **Gaseificação de Madeira e Carvão Vegetal.** In: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. Gaseificação de madeira e carvão vegetal. Belo Horizonte. p. 51-72, 1981.

ÁVILA, de R.; OLIVEIRA, L.F; ASCHERI, D.R.P. **Caracterização dos Frutos Nativos dos Cerrados.** *Revista de Agrotecnologia*, v.1, número 1, p.53-69, 2012.

BAJAY, S. V., ROSILLO-CALLE, F., & ROTHMAN, H. **Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira**. Campinas, SP. Editora da Unicamp, 2008.

BATISTA, A. G.; ESTEVES, E. A.; DESSIMONI-PINTO, N. A. V.; OLIVEIRA, L. G.; PIRES, S. T.; SANTANA, R. C. **Chemical Composition of *Jatobá-do-Cerrado (Hymenaea stigonocarpa Mart.)* Flour and Its Effect on Growth of Rats**. Alim. Nutr., Araraquara, v. 22, n. 2, p. 173-180, abr./jun. 2011.

BEENACKERS, A. A. C. M. **Biomass Gasification in Moving Beds, a Review of European Technologies**. Renewable Energy, 16(1), 1180-1186, 1999.

BHATTACHARY, S.; SIDDIQUE, A.M; Pham H-L. **A Study on Wood Gasification for Low-Tar Gas Production**. Energy, 24:285,96, 1999.

BORTOLIN, T. A.; TRENTIN, A.C.; PERESIN, D.; SCHNEIDER, E. **Estimativa da Geração de Resíduos Florestais no Brasil**. 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, Bento Gonçalves – RS, Brasil, p. 2-9, 25- 27 de Abril de 2012.

BRASIL. MINISTERIO DA AGRICULTURA, PECUARIA E ABASTECIMENTO (MAPA). EMBRAPA. **Frutas Nativas do Cerrado Brasileiro: Aproveitamento Alimentar**. Brasília: Embrapa, 2002.

BREBU, M.; VASILE, C. **Thermal Degradation of Lignin- a review**. Cellulose Chemistry & Technology, v. 44, n. 9, p. 353, 2010.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide Technique de La Carbonisation: La Fabrication du Charbon de Bois**. Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985. 180p.

BRIDGWATER, A.V. **Towards the “Bio-Refinery” Fast Pyrolysis of Biomass**. Renewable Energy World, v. 4, p.66-83, 2001.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Correlações entre Características Físicas e Químicas da Madeira e a Produção de Carvão Vegetal I: densidade e teor lignina da madeira de eucalipto**. Circular Técnica IPEF, v. 14, p. 9-20, 1977.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. **Características do Eucalipto como Combustível: Análise Química Imediata da Madeira e da Casca**. ESALQ/USP, v.16, p.63-78, Piracicaba, 1978.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Carvão Vegetal de Madeira de Desbaste de Pinus**. Circular Técnica IPEF, Piracicaba, v. 146, p. 1-12, jun. 1982.

BRITO, J. O. **Expressão da produção florestal em unidades energéticas**. In CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1, CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7, 1993, Curitiba, Anais...Curitiba, p.280-82, 1993.

BROWNE, F. L. **Theories of the Combustion of Wood and its Control**. Madison, A Survey of the Literature, FPL - Forest Products Laboratory, p. 68, 1958.

- BYRD, A. J., KUMAR, S., KONG, L., RAMSURN, H., & GUPTA, R. B. **Hydrogen Production from Catalytic Gasification of Switchgrass Biocrude in Supercritical Water**. International Journal of Hydrogen Energy, 36(5), 3426-3433, 2011.
- BUCHANAN, M.A. - **Extraneous Components of Wood**. In: **BROWNING, B.L.**, ed. The chemistry of wood. New York, John Wiley, p.313-68, 1963.
- BUCHANAN, M. A. **Extraneous Components of Wood: the Chemistry of Wood**. New York: R. Krieger, 689 p., 1981.
- CARDOSO, M.T. **Da Iluminação das Cidades do Século XIX às Biorrefinarias Modernas: História Técnica e Econômica da Gaseificação**. (Dissertação de Mestrado), Universidade de São Paulo-USP, 125f., 2013.
- CARRANZA, L.R.; ÁVILA, J.C.C.e. **Manual Tecnológico do Aproveitamento Integral do Fruto do Baru (*Dipteryx alata*)**. 2ª edição, Brasília, Instituto Sociedade, População e Natureza- ISPN, Brasil, 2010.
- CARVALHO, P.E.R. **Jatobá-do-Cerrado**. Conservation International. Biodiversity Hotspots. (Circular Técnico), Colombo/PR: Embrapa Florestas, 133p., 2007.
- CENBIO. **Estado da Arte da Gaseificação. Comparação entre Tecnologias de Gaseificação de Biomassa Existentes no Brasil e no Exterior e Formação de Recursos Humanos na Região Norte**. Centro Nacional de Referência em Biomassa, p. 1-108, Setembro, 2002.
- CHANG, Y. K.; SILVA, M. R.; GUTKOSKI, L. C.; SEBIO, L.; SILVA, M. A. A. P. **Development of Extruded Snacks Using Jatoba (*Hymenaea stigonocarpa* Mart) Flour and Cassava Starch Blends**. v. 78, n. 1, p. 59-66, 1998.
- CHANG, A. C., CHANG, H. F., LIN, F. J., LIN, K. H., & CHEN, C. H. **Biomass Gasification for Hydrogen Production**. International Journal of Hydrogen Energy, 36(21), 14252-14260, 2011.
- CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. (Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais)–Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba), 2011.
- CINTRA, T.C. **Avaliação Energética de Espécies Florestais Nativas Plantadas na Região do Médio Paranapanema-SP**. Dissertação (Mestrado), ESALQ/USP, Piracicaba, São Paulo, 84p., 2009.
- CLEARFIELD, A.; REIBENSPIES, J. H.; BHUVANESH, N. **Principles and Applications of Powder Diffraction**. John Wiley and Sons, Ltd., 2008.
- CONESA, J. A. et al. **Analysis of Different Kinetic Models in the Dynamic Pyrolysis of Cellulose**. Thermochemica Acta, Amsterdam, v. 254, n. 1, p. 175- 192, Apr. 1995.
- CORREA, G.C.de.; NAVES, R.V.; ROCHA, M.N.; CHAVES, J.L.; BORGES, J.D. **Determinações Físicas em Frutos e Sementes de Baru (*Dipteryx alata* Vog.), Cajuzinho (*Anacardium othonianum* Rizz.) e Pequi (*Caryocar brasiliense***

Camb.), Visando Melhoramento Genético. Biosci.J., Uberlândia, v.24, n.4, p.42-47, Oct./Dec., 2008.

CORTEZ, L. A. B; LORA, E. E. S.; E. O. GOMEZ. **"Biomassa para energia."** Livro, Editora da Unicamp: Campinas, 2008.

CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. **Estudo Químico de 55 Espécies Lenhosas Para Geração de Energia em Caldeiras.** In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.

DA SILVA, M. G., NUMAZAWA, S., ARAÚJO, M. M., RODRIGUES, T. Y., & NAGAISHI, G. R. G. **Carvão de Resíduos de Indústria Madeireira de Três Espécies Florestais Exploradas no Município de Paragominas, PA1.** Acta Amazonica, 37(1), 2007.

DEGANI, A. L. G.; CASS, Q. B.; VIEIRA, P. C. **Cromatografia um breve ensaio.** Química Nova na Escola, v. 7, 2011.

DELLA, V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. **Caracterização de Cinza de Casca de Arroz para Uso como Matéria-Prima na Fabricação de Refratários de Sílica.** Química Nova, v. 24, n. 6, p. 778-782, 2001.

DEMAJORIVIC, J. **Da Política Tradicional de Tratamento do Lixo à Política de Gestão de Resíduos Sólidos: As Novas Prioridades.** *Revista de Adm. De Empresas*, 35 (3), pp. 88-93, 1995.

DEMIRBAS, A. **Progress and Recent Trends in Biofuels.** Prog Energy Combust Sci, 33:1–18, 2007.

DEMIRBAS, A. **Combustion Characteristics of Different Biomass Fuels.** Journal Progress in Energy and Combustion Science, v.30, n.02, p.219-230, 2004.

DEVI, L., PTASINSK, K., JANSSEN, F. **A Review of the Primary Measures for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes.** Biomass Bioenergy, 24: 125–40, 2003.

DO CANTO, J. L. **Colheita Mecanizada de Biomassa Florestal para Energia.** Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. MG, 121 f., 2009.

EGITO, M. **Boletim Informativo da Rede de Comercialização Solidária de Agricultores Familiares e Extrativistas do Cerrado.** Ano I, nº 01, GOIÂNIA, Dezembro, 2004. Disponível em: <<http://www.emporiodocerrado.org.br/pt-br/documentos/boletim-cerrado-em-rede-n1.pdf>>, Data de Acesso: 23 de Agosto de 2013.

EMAMI, T. L; IRFAN M.F; WAN, D. W.; Chakrabarti M.H. **The Effect of Temperature on Various Parameters in Coal, Biomass and CO-Gasification: A Review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews; 16: 5584–96, 2012.

ESCOBAR, J. C., LORA, E. S., VENTURINI, O. J., YÁNEZ, E. E., CASTILLO, E. F., & ALAZAN, O. **Biofuels: environment, technology and food security.** *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6), 1275-1287, 2009.

FAO. **Energy Conservation in the Mechanical Forest Industries.** Forestry paper, Rome, p. 130,v.93, 1990.

FARINHAQUE, R. **Influência da Umidade no Poder Calorífico da Madeira de Bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth), e Aspectos Gerais de Combustão Indústria florestal.** Brasil, Série Técnica-Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná (Brazil). no. 6., 1981.

FEITOSA N.G. B.; OLIVEIRA, A. G. D. P.; & Coutinho, H. W. M. **Caracterização Energética de Biomassas Amazônicas.** Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural, 2006.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood Chemistry, Ultrastucture, Reactions.** New York: De Gruyter, 1989.

FERNANDES, D. C.; FREITAS, j. B.; CZEDER, I. P.; NAVES, M. M. V. **Nutritional Composition and Protein Value of the Baru (*Dipteryx alata* Vog.) Almond from the Brazilian Savanna.** *Journal of the Science of Food and Agriculture*, New York, v. 90, n. 10, p. 1650-1655, 2010.

FERREIRA, V. **Produção de β -glucosidase em *Saccharomyces cerevisiae* Recombinante e Avaliação de seu Emprego no Processo de Hidrólise Enzimática Simultânea à Fermentação para a Produção de Etanol de Segunda Geração.** Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2010.

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.** *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 33, n. 2, p. 165-174, jul./dez., 2012.

FREDDO, A. **Elementos Minerais em Madeira de Eucaliptos e Acácia Negra e sua Influência na Indústria de Celulose Kraft Branqueada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 69 f., 1997.

FROEHLIC, F.G.; JUSTEN, G.S.; LUPPI, L.; MORAES, S, de. **Utilização de Biomassa para Geração de Energia: Estudo de Caso em uma Indústria Madeireira de Aripuanã-MT.** VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão. 8-9 de junho, Rio de Janeiro, 2012.

GALINDO, A. L., LORA, E. S., ANDRADE, R. V., GIRALDO, S. Y., JAÉN, R. L., & COBAS, V. M. **Biomass Gasification in a Downdraft Gasifier with a Two-Stage Air Supply: Effect of Operating Conditions on Gas Quality.** *Biomass and Bioenergy*, 61, 236-244, 2014.

GANI, A.; NARUSE, I. **Effect of Cellulose and Lignin Content on Pyrolysis and Combustion Characteristics for Several Types of Biomass.** Renewable Energy, Oxford, v. 32, n. 4, p. 649-661, 2007.

GOMES, B. L.; MARTELLI, F. H.; DA SILVA, W. T. L. **Caracterização Físico-Química e Morfológica de Biomassa de Capim-Elefante, Capim-Mombaça, Brachiaria, Sorgo- Embrapa e Bagaço de Cana-de-Açúcar.** III Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management, March 12-14, Sao Pedro, SP, Brazil, 2013.

GÓMEZ-BAREA, A., OLLERO, P., & LECKER, B. **Optimization of Char and Tar Conversion in Fluidized Bed Biomass Gasifiers.** Fuel, 103, 42-52, 2011.

GÓMEZ, E.O.; LORA, E.E.S.; CORTEZ, L.A.B. **Biomassa Para Energia. Capítulo I: Biomassa no Brasil e no Mundo.** Editora Unicamp, 2ª reimpressão, 2011.

GUO, F., DONG, Y., DONG, L., & GUO, C. **Effect of Design and Operating Parameters on the Gasification Process of Biomass in a Downdraft Fixed Bed: An Experimental Study.** International Journal of Hydrogen Energy, 39(11), 5625-5633, 2014.

HAN, J., KIM, H. **“The Reduction and Control Technology of Tar during Biomass Gasification/Pyrolysis: An Overview”.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, pp. 397-416, 2008.

HASLER, P., NUSSBAUMER, T. H. **“Gas Cleaning for IC Engine Application from Fixed Bed Biomass Gasification”.** Biomass and Bioenergy, vol. 16, pp. 385-395, 1999.

HIGMAN, C. **State of the Gasification Industry – the Updated Worldwide Gasification Database.** International Pittsburgh Coal Conference, 16-19 september, China, 2013.

HOGAN, D. J.; CUNHA, J. M. C.; CARMO, R. L. **Uso do Solo e Mudança de sua Cobertura no Centro-Oeste do Brasil: Consequências Demográficas, Sociais e Ambientais.** In: HOGAN, D. J. et al. (Orgs.) Migração e ambiente no Centro-Oeste. Campinas: PRONEX/UNICAMP, p. 149-174, 2002.

HOWARD, J. O. **Wood for Energy in the Pacific Northwest: An Overview.** US forest service, general technical report , 50-24,59 p., 1979.

ITAI, Yuu. **Simulação Numérica da Gaseificação de Biomassa em Leito Fixo.** Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2011.

JAOJARUEK, K., JARUNGTHAMMACHOTE, S., GRATUITO, M. K. B., WONGSUWAN, H., & HOMHUAL, S. **Experimental Study of Wood Downdraft Gasification for an Improved Producer Gas Quality Through an Innovative Two-Stage Air and Premixed Air/Gas Supply Approach.** Bioresource technology, 102(7), 4834-4840, 2011.

J.A. Ruiz, M.C. Juárez, M.P. Morales, P. Munõs, M.A. Mendivil. **Biomass Gasification for Electricity Generation: Review of Current Technology Barriers.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174–183, 2013.

JARA, E.R.P. **O Poder Calorífico de Algumas Madeiras que Ocorrem no Brasil.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, 1797).

KLASS, D. L. **Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals.** Academic press, 1998.

KLEINLEIN, W. A. **Caracterização Energética de Biomassas Amazônicas.** Dissertação (mestrado)-Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação Strictu Sensu em Engenharia Mecânica–Belém, 64p. FILGUEIRAS, T, 2010.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. **A Conservação do Cerrado Brasileiro.** *Megadiversidade*, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 148-155, jul. 2005.

KLOCK, U.; MUNIZ, G.I.B.de.; HERNANDEZ, J.A.; ANDRADE, A.S.de. **Química da Madeira.** Apostila, 3ª edição revisada, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2005.

KOLLMAN, F. F. P.; COTÊ, J.. W. A. **Principles of Wood Science and Tecnology, I. Solid wood.** Editora Springer – Verlag, Berlim, p. 592, 1988.

LEWIN, M.; GOLDSTEIN, IS. **Wood Structure and Composition.** New York: M. Dekker; 488 p., 1991.

LIMA, A.E. **Alternativa para Estimar o Preço da Madeira para Energia.** Comunicado técnico Embrapa, Colombo, Paraná, dezembro, 2010.

LIMA, E. A. D., SILVA, H. D. D., & LAVORANTI, O. J. **Caracterização Dendroenergética de Árvores de *Eucalyptus benthamii*.** *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(65), 09, 2011.

LIRA, C. S. **Pirólise Rápida da Semente de Tucumã-do-Amazonas (*Astrocaryum aculeatum*): Caracterização da Biomassa *In Natura* e dos Produtos Gerados.** 2012. 135 f. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LEVAN , S. L.; WINANDY, J. E. **Effects of Fire Retardants Treatment on Wood Strent: a review.** *Wood Science and Techonology*, v. 22, p. 113-131, 1990.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil.** Nova Odessa: Plantarum, 352p., 1992.

LORENZI, H. & MATOS, F. J. A. **Plantas Medicinais no Brasil: Nativas e Exóticas.** Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 512p., 2002.

LU, Y., GUO, L., ZHANG, X., & Ji, C. (2012). **Hydrogen Production by Supercritical Water Gasification of Biomass: Explore the Way to Maximum**

Hydrogen Yield and High Carbon Gasification Efficiency. International Journal of Hydrogen Energy, 37(4), 3177-3185.

LV, P. M., XIONG, Z. H., CHANG, J., WU, C. Z., CHEN, Y., & ZHU, J. X. **An Experimental Study on Biomass Air–Steam Gasification in a Fluidized Bed.** Bioresource technology, 95(1), 95-101, 2004.

M. OUADI a, J.G. BRAMMER, M. KAY, A. HORNUNG. **Fixed Bed Downdraft Gasification of Paper Industry Wastes.** Applied Energy, 103, 692–699, 2013.

MABEE, W. E.; MCFARLANE, P. N.; SADDLER, J. N. **Biomass Availability for Lignocellulosic Ethanol Production.** Biomass and bioenergy, v. 35, n. 11, p. 4519-4529, 2011.

MCKENDRY, P. **Energy Production from Biomass (part 3): Gasification Technologies.** Bioresource Technology, 83: 55–63, 2002.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S.. **Effects of Compressive Force, Particle Size and Moisture Content on Mechanical Properties of Biomass Pellets from Grasses.** Biomass and Bioenergy, v. 30, n. 7, p. 648-654, 2006.

MARKS, J. **Wood Powder: An Upgraded Wood Fuel.** Forest Prod J, 42:52–6, 1992.

MARTINS, H. **Madeira como Fonte de Energia.** In: PENEDO, W.R. Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte, M.G. CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.9- 26, 1982.

MATUDA, T.J; NETTO, F.M. **Caracterização Química Parcial da Semente de Jatobá-do-Cerrado.** Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 25(2): 353-357, abr.-jun. 2005.

MENDES, A.S.M. **Curso de Manejo e Conservação do Solo e da Água promovido pela superintendência Federal de Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Estado da Bahia – SFA -BA/SDC/MAPA.** Apostila, p.1-64, Embrapa- semi-árido, 2007.

M. I. B. OLIVEIRA.; e M. R. SIGRIST. **Fenologia, Polinização e Reprodução de *Dipteryx alata*.** Revista Brasil. Bot., V.31, n.2, p.195-207, abr.-jun. 2008.

MORAIS, S. A. L. de; NASCIMENTO, E. A. do; MELO, D. C. de. **Análise da Madeira de *Pinus oocarpa*, parte I: Estudo dos Constituintes Macromoleculares e Extrativos Voláteis.** Revista Árvore, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005.

NAKAI, DIOGO KEIJI. **Avaliação do Potencial Energético de *Eucalyptus spp.* em Gaseificador do Tipo Contracorrente.** (Dissertação de Mestrado), Universidade de Brasília, Ciências Mecânicas, 73p., 2014.

NBR 8112/86. (1986). **Carvão Vegetal – Análise Imediata.** São Paulo, SP, Brasil: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

NBR 8633/84. (1984). **Carvão Vegetal - Determinação do Poder Calorífico**. São Paulo, SP, Brasil: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

NBR 6922/81. (1981). **Carvão Vegetal - Determinação da Massa Específica (Densidade à Granel)**. São Paulo, SP, Brasil: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

NETO, V. C, **Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana de açúcar e Gás Natural**. (Dissertação de Mestrado), COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2001.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **Physical Characterisation and Chemical Composition of Densified Biomass Fuels with Regard to their Combustion Behaviour**. *Biomass and bioenergy*, v. 27, n. 6, p. 653-669, 2004.

OLIVEIRA, J. B. **Propriedades e Controle de Qualidade do Carvão Vegetal**. Belo Horizonte, M.G., CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.77-89, 1982.

OLIVEIRA, J. T. D. S., SOUZA, L. C. D., DELLA L. R. M., & Souza J., W. P. D. **Influence of Extracts in Decay Resistance of Six Wood Species**. *Revista Árvore*, 29(5), 819-826, 2005.

OLIVEIRA, de J.L; SILVA, da J.N; PEREIRA, E.G; Filho, D.O; CARVALHO, D.R. **Characterization and Mapping of Waste from Coffee and Eucalyptus Production in Brazil for Thermochemical Conversion of Energy Via Gasification**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 52–58, 2013.

OMASHI, I. H., RODRIGUES, L. G., STOLF, M., CANNAVAL, R., & SOBREIRO, R. **Produção de Biomassa Florestal para Exportação: o caso da Amcel**. *Biomassa & Energia*, 1(1), 29-36, 2004.

PAES, J.B.; NETO, P.N.M.; LIMA, C.R.de.; FREITAS, M.F.de.; DINIZ, C.E.F. **Efeitos dos Extrativos e Cinzas na Resistência Natural de Quatro Madeiras a Cupins Xilófagos**. *Revista Cerne, Lavras*, v. 19, n. 3, p. 399-405, jul./set. 2013.

PARENTE, R. B. **Desenvolvimento de Reator Poroso de Gaseificação de Biomassa Líquida por Oxidação Parcial Aplicado ao Glicerol**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2012.

PASANGULAPATI, V.; RAMACHANDRYA, K.D.; KUMAR, A.; WILKINS, M.R.; JONES, C.L.; HUNKE, R.L. **Effects of Cellulose, Hemicellulose and Lignina on Thermochemical Conversion Characteristics of the Selected Biomass**. *Bioresource Technology* 114 (2012) 663-669.

PEREIRA, J. C. D., STURION, J. A., HIGA, A. R., HIGA, R. C. V., & SHIMIZU, J. Y. **Características da Madeira de Algumas Espécies de Eucalipto Plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 113p.,(Embrapa Florestas. Documentos, 38), 2000.

PEREIRA, E. G., da SILVA, J. N., de OLIVEIRA, J. L., & MACHADO, C. S. **Sustainable Energy: a Review of Gasification Technologies**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4753-4762, 2012.

PEREIRA, B. L. C., CARNEIRO, A. D. C. O., CARVALHO, A. M. M. L., TRUGILHO, P. F., MELO, I. C. N. A., & OLIVEIRA, A. C. **Estudo da Degradação Térmica da Madeira de Eucalyptus Através de Termogravimetria e Calorimetria**. *Revista Árvore*, 37(3), 567-576, 2013.

PINHEIRO, G.F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J.T. **Densidade Energética de Resíduos Florestais**. *Biomassa e Energia*, v.2, n.2, p.113-123, 2005.

PROBSTEIN,R.F.; HICKS,R.E. **Synthetic Fuels**. 1^o edition. New York: Mcgraw Hill Book Company, 490p., 1982.

QUIRINO, W. F. **Utilização Energética de Resíduos Vegetais**. Brasília: LPF/IBAMA, 2004.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; & AZEVEDO, A. D. S. **Poder Calorífico da Madeira e de Materiais Lignocelulósicos**. *Revista da Madeira*, 89, 100-106, 2005.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. **Equação Geral de Mecanismos Cinéticos da Carbonização do *Eucalyptus spp.*** *Cerne*, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.

RABAÇAL, M. **Influência das Características do Combustível no Desempenho Energético e Ambiental de Caldeiras Domésticas**. Tese de Doutorado. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

RAPAGNA, S; MAZZIOTTI, di C. G. **Devolatilization of Wood Particles in a Hot Fluidized Bed: Product Yields and Conversion Rates**. *Biomass Bioenergy*, 32, 1123–9, 2008.

RATH, A. **A Biomassa e a Indústria Açucareira na Matriz Energética**. Opiniões, *Revista da Madeira*, n.140, 2014.

RIBEIRO, J. F. et al. **Baru (*Dipteryx alata* Vog.)**. Jaboticabal: Funep, 2000.

REIS, B. D. O., SILVA, I. T. D., & SILVA, I. M. O. D. (2002). **Produção de Briquetes Energéticos a Partir de Caroços de Açaí**. *Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural*.

RENDEIRO, G. **Combustão e gasificação de biomassa sólida**. Ministério de Minas e Energia (MME), 2008.

REZAIYAN, John; CHEREMISINOFF, Nicholas P. **Gasification technologies: a primer for engineers and scientists**. CRC press, 2005.

ROCHA, G.O.; ANDRADE, J.B.; GUARIEIRO, L.L.A.; GUARIEIRO, L.L.N. **Química Sem Fronteiras: O Desafio da Energia**. *Revista Química Nova*, v. 36, n.10, p. 1540-1551, 2013.

ROWELL, R. M., PETERSSSEN, R., HAN, J. S., ROWELL, J. S., & TSHABALALA, M. A. Cell Wall Chemistry. In: R. M. Rowell (Ed.), **HANDBOOK OF WOOD CHEMISTRY AND WOOD COMPOSITES** (First ed., p. 487). CRC Press, 2005.

RUGGIERO, M.; MANFRIDA, G. **An equilibrium model for biomass gasification processes**. Renewable energy, v. 16, n. 1, p. 1106-1109, 1999.

RUIZ, J. A., JUÁREZ, M. C., MORALES, M. P., MUÑOZ, P., & MENDÍVIL, M. A. **Biomass Gasification for Electricity Generation: Review of Current Technology Barriers**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, 174-183, 2013.

SANCHEZ, *et.al.* **Apostila Sobre Gaseificação**. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Conteúdo do 7º Capítulo, Julho, 2002.

SANO, S. M. ; RIBEIRO, F. J. ; BRITO, M. A. **Baru: Biologia e Uso**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, p. 52, 2004.

SANO, S. M.; BRITO, M. A. de; RIBEIRO, J. F. Baru. In: VIEIRA, R. F.; COSTA, T. da S. A.; SILVA, D. B. da; FERREIRA, F. R.; SANO, S. M. (Ed.). **Frutas Nativas da Região Centro-Oeste do Brasil**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2006.

SANO, S.M.; VIVALDI, L.J.; SPEHAR, C.R. **Diversidade Morfológica de Frutos e Sementes de Baru (*Dipteryx alata* Vog.)**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 34, n. 14, p. 13-518, 1999.

SANT'ANNA, M. C. S., CASTRO, G. D. A., ARAÚJO, L. H. D. N., SILVA, G. F. D., & LUCENA, S. **Quantificação de Tecnologias em Gaseificação através da Análise dos Pedidos de Patentes e Artigos Literários**. GEINTEC-Gestão, Inovação e Tecnologias, 3(1), 001-011, 2013.

SANTIAGO, S.L.F. **Aproveitamento de Resíduos Florestais de *Eucalyptus spp.* na Indústria de Fabricação de Celulose para Geração de Energia Térmica e Elétrica**. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, p. 1-109, 2013.

SANTOS, I, D. **Influência dos Teores de lignina, Holocelulose e Extrativos na Densidade Básica, Contração da Madeira e nos Rendimentos e Densidade do Carvão Vegetal de Cinco Espécies Lenhosas do Cerrado**. Departamento de Ciências Florestais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade de Brasília-UnB, p. 57, Dissertação de Mestrado, 2008.

SANTOS, F.A.; QUEIRÓZ, J.H.de.; COLODETTE, J.L.; FERNANDES, S.A.; GUIMARÃES, V.M.; REZENDE, S.T. **Potencial da Palha de Cana de Açúcar para Produção de Etanol**. Revista Química Nova, Vol. 35, No. 5, 1004-1010, 2012.

SANTOS, M.A; BARBIERI, A.F. **Minas Gerais e o Marco Inicial da Ocupação do Cerrado Brasileiro: O Papel do Estado**. REDES - Rev. Des. Regional, Santa Cruz do Sul, v. 19, n. 1, p. 261 - 275, jan/abr., 2014.

SAXENA, R, ADHIKARI, D, GOYAL, H. **Biomass-Based Energy Fuel Through Biochemical Routes: A Review**. *Renew. Sust. Energy Rev.*,13:167–78, 2009.

SCHIMIDT, F.; BUENO, M. I. M. S.; POPPI, R. J. **Aplicação de Alguns Modelos Quimiométricos à Espectroscopia de Fluorescência de Raios-x de Energia Dispersiva**. *Química Nova*, v. 25, n. 6/A, p. 949-956, 2002.

SCHNEIDER, V.E.; PERESIN, D.; TRENTIN, A.C.; BORTOLIN, T.A.; SAMBUICHI, R.H.R. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas**. Relatório de Pesquisa, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2012.

SCHÜTZ, F. C. A., ANAMI, M. H., & TRAVESSINNI, R. **Desenvolvimento e Ensaio de Briquetes Fabricados a Partir de Resíduos Lignocelulósicos da Agroindústria**. *Inovação e Tecnologia*, 1(1), 1-8, 2010.

SCINTAG, I. Chapter 7: **Basics of X-Ray Diffraction**. *Providing Solution To Your Diffraction Needs*, p. 7.1-7.24, 1999.

SILVA, J.N.; Sobrinho, J.C.; SAIKI, E.T. **Utilização de Biomassa na Secagem de Produtos Agrícolas Via Gaseificação com Combustão Adjacente dos Gases Produzidos**. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.24, n.2, p.405-411, maio/ago. 2004.

SILVA, M. G. D., NUMAZAWA, S., ARAÚJO, M. M., NAGAISHI, T. Y. R., & GALVÃO, G. R. (2007). **Carvão de Resíduos de Indústria Madeireira de Três Espécies Florestais Exploradas no Município de Paragominas, PA**. *Acta amaz*, 37(1), 61-70.

SILVA, J. V. H; BITTAR, A.P; SERRA, J. C. V; JÚNIOR, J. C. Z. **Diagnóstico do Reaproveitamento de Resíduos com Potencial Energético no Município de Palmas-TO**. *Revista de Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal*, v.8, n.2, p. 226-233, abr./jun. 2011.

SILVA, J.A. da, D.B. da SILVA, N.T.V. JUNQUEIRA & L.R.M. de ANDRADE. **Frutas Nativas dos Cerrados**. Embrapa, Brasília. 166 p.,1994.

SILVA, E. B., SILVA, F. A. N. G., GARRIDO, F. M. S., AMADO, R. S., & SAMPAIO, J. A. **Beneficiamento do Quartzo de Tanhaçu-BA Visando a Preparação de Silício de Grau Metalúrgico de Alta Pureza**. *Holos*, 30(3), 88, 2014.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; GOMIDE, J. L.; REIS, F. P.; VELOSO, D. P. **Metodologia de Extração e Determinação do Teor de Extrativos em Madeiras de Eucalipto**. *Revista Árvore, Viçosa*, v. 30, n. 6, p. 109-116, nov./dez. 2006.

SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. **Cadeia Produtiva de Energia de Biomassa na Região do Planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva**. *Rev. Árvore, Viçosa*, v. 34, n. 6, Dec. 2010.

SOUZA, Z.J.de.; AZEVEDO, P.F. **Geração de Energia Elétrica Excedente no Setor Sucroalcooleiro: Um Estudo a Partir das Usinas Paulistas**. *RER, Rio de Janeiro*, vol. 44, nº 02, p. 179-199, abr/jun., 2006.

SOUZA, A. G. de o.; FERNANDES, D. C.; AIVES, A. M.; FREITAS, j. B. de.; NAVES, M. M. V. **Nutritional Quality and Protein Value of Exotic Almonds and Nut from the Brazilian Savanna compared to Peanut.** Food Research International, Barking, v. 44, n.7, p. 2319 -2325, 2011.

SOUZA-SANTOS, M. L. **Solid Fuels Combustion and Gasification: Modeling, Simulation.** CRC Press, 2004.

SORDI, A., SILVA, E. P. D., & LOBKOV, D. D. (2006). **Gaseificação de Biomassa e Célula a Combustível: Sistema com Célula Tipo PEMFC.** *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2006.

STUBBLEBINE, W.H. & LANGENHEIM, J.H. **Estudos Comparativos da Variabilidade na Composição da Resina da Folha entre Árvore Parental e Progênie de Espécies Seleccionadas de Hymenaea: Comparação de populações Amazônicas com uma População do Sudeste Brasileiro.** Acta amazonica, Manaus, v.10, n.2, p.293-309, 1980.

TAKEMOTO, E.; OKADA, I. A.; GARBELOTTI, M. L.; TAVARES, M.; AUED-PIMENTEL, S. **Composição Química da Semente e do Óleo de Baru (*Dipterix alata* Vog.) Nativo do Município de Pirenópolis, Estado de Goiás.** Revista do Instituto Adolfo Lutz, São Paulo, v. 60, n. 2, p. 113-117, 2001.

TAPPI - T 204 om-88. (s.d.). TAPPI - T 204 om-88 - **Solvent Extratives of Wood and Pulp.** Atlanta, GA: TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry.

TAPPI - T 211 om-93. (s.d.). TAPPI - T 211 - **Ash in Wood, Pul, Paper and Paperboard: Combustion at 525°C.** Atlanta, GA: Technical Association of the Pulp and Paper Industry.

TAPPI - T222 om-88. (s.d.). TAPPI - T222 om-88 - **Acid-Insoluble Lignin in Wood and Pulp.** Atlanta, GA: TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry.

TAPPI - T250. (s.d.). TAPPI - T250 - **Acid-Soluble Lignin in Wood and Pulp.** Atlanta, GA: Technical Association of the Pulp and Paper Industry.

TAPPI - T-264 om-88. (1996). T-264 om-88 - **Preparation of Wood for Chemical Analysis.** Atlanta, GA: TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry.

Templeton, D., & Ehrman, T. (1995). **Determination of Acid-Insoluble Lignin in Biomass - LAP-003.** National Renewable Energy Laboratory - NREL.

Templeton, D., & Ehrman, T. (1995). **Determination of Acid-Soluble Lignin in Biomass - LAP-004.** National Renewable Energy Laboratory - NREL.

TIANGCO, V. M.; JENKINS, B. M.; GOSS, J. R. **Optimum Specific Gasification Rate for Static Bed Rice Hull Gasifiers.** Biomass and Bioenergy, v. 11, n. 1, p. 51-62, 1996.

THOMAS, E., LESLIE H. **Groom Pilot-scale gasification of woody biomass.** Biomass and Bioenergy, v.35, p. 3522-3528, 2011.

TSOUMIS, G. **Science and technology of Wood: structure, properties, utilization.** New York: Chapman & Hall, p. 309-339, 1991.

VALE, A. T., BRASIL, M. A. M., CARVALHO, C. M., VEIGA, R. A. **Produção De Energia Do Fuste De *Eucalyptus Grandis* Hill Ex-Maiden e *Acacia Mangium* Willd em Diferentes Níveis De Adubação.** v.6, n.1, p.83-88, 2000.

VALE, A.T.do.; BRASIL, M.A.M.; LEÃO, A.L. **Quantificação e Caracterização Energética da Madeira e Casca de Espécies do Cerrado.** Ciência Florestal, v.12, n.1, p. 71-80, 2002.

VALE, A. T., GENTIL, L. V., GONÇALEZ, J. C., & COSTA, A. F. **Caracterização Energética e Rendimento da Carbonização de Resíduos de Grãos de Café (*Coffea arabica* L.) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), Duke.** Cerne, 13(004), 416-420, 2007.

VALE, A.R.; GENTIL, L.V. **Produção e Uso Energético de Biomassa e Resíduos Agroflorestais.** In: Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III. Rio Branco: Suprema, p. 195 – 241, 2008.

VERA, R.; JÚNIOR, M.S; NAVES, V.R.; SOUZA, B.R.E.; FERNANDES, P.E.; CALIARI, M.; LEANDRO, M.W. **Características Químicas de Amêndoas de Barueiros (*Dipteryx alata* Vog.) de Ocorrência Natural de Cerrado no Estado de Goiás, Brasil.** Revista Brasileira de Fruticultura de Jaboticabal, São Paulo, v.31, n.1, p.112-118, março, 2009.

VERA, R.; SOUZA, E. R. B. de. **Baru.** Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal-SP, v.31, n. 1, p. 1, 2009.

VERA, R.; NAVES, R. V.; NASCIMENTO, J. L.; CHAVES, L. J.; LEANDRO, W. M.;SOUZA, E. R. B. **Caracterização Física de Frutos do Pequizeiro (*Caryocar brasiliense* Camb.) no Estado de Goiás.** Pesquisa agropecuária Tropical, 35(2), p. 71-79, 2005.

WANG, L; Weller C.L; Jones D.D; Hanna M.A. **Contemporary Issues in Thermal Gasification of Biomass and its Application to Electricity and Fuel Production.** Biomass Bioenergy;32:573–81, 2008.

WARNECKE, R. **Gasification of Biomass: Comparison of Fixed Bed and Fluidized Bed Gasifier.** Biomass Bioenergy,18; 489–97, 2000.

YANG, H.; YAN, R; CHEN, H.; LEE, H. D.; ZHENG, C. **Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis.** Fuel v. 86, p.1781–1788, 2007.

YOKOYAMA, S.; MATSUMURA, Y. (eds). **The Asian Biomass Handbook – A Guide for Biomass Production and Utilization.** The Japan Institute of Energy, 326 p., 2008.

ZAINAL, Z. A. et al. **Prediction of Performance of a Downdraft Gasifier Using Equilibrium Modeling for Different Biomass Materials.** Energy conversion and management, v. 42, n. 12, p. 1499-1515, 2001.

ZANUNCIO, A. J. V., COLODETTE, J. L., GOMES, F. J. B., CARNEIRO, A. D. C. O., & VITAL, B. R. **Composição Química da Madeira de Eucalipto com Diferentes Níveis de Desbaste.** Revista Ciência Florestal, v.23, n.4, 2013.

ZHANG, K., CHANG, J., GUAN, Y., CHEN, H., YANG, Y., & JIANG, J. **Lignocellulosic Biomass Gasification Technology in China.** Renewable Energy, 49, 175-184, 2013.

ZHOU, J., CHEN, Q., ZHAO, H., CAO, X., MEI, Q., LUO, Z., & CEN, K. **Biomass-Oxygen Gasification in a High-Temperature Entrained-flow Gasifier.** Biotechnology advances, 27(5), 606-611, 2009.

ANEXOS A

Composição Química/ Reatores de Gaseificação

Composição Química

A biomassa vegetal em termos químicos, estando livre de umidade, é definida como um biopolímero tridimensional composto por uma rede de celulose, hemicelulose e lignina, com menores quantidades de extrativos e substâncias inorgânicas (ROWELL, *et.al.*; 2005).

Biomassa Lignocelulósica

A composição básica dos materiais lignocelulósicos irá depender de diversos fatores, como: vegetal de origem, espécie da planta, região de cultivo, clima, idade, período do ano em que foi colhida, dentre outros fatores que a influenciam (HASSUANI, 2005).

A biomassa lignocelulósica (Figura 1), em termos de composição química da parede celular é formada principalmente por celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, podendo apresentar outros componentes químicos, como: amidos, proteínas, entre outros (ROWELL, 2005).

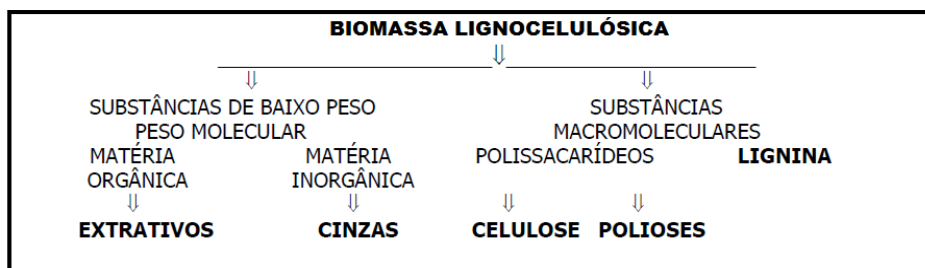


Figura 1: Composição Química da Biomassa Lignocelulósica.

Fonte: (KLOCK *et.al.*, 2005)

Celulose

A celulose é classificada como um polímero orgânico, pois é formada por unidades repetidas de glicose (monômero), além disso, é o maior componente da biomassa celular e o polímero orgânico mais abundante do planeta. Ela pode ser encontrada de duas formas na natureza: forma pura, como no algodão e na forma associada à hemicelulose e lignina na parede celular, como na madeira (LYND, 2002). A celulose é um homopolissacarídeo linear de ocorrência natural, ela apresenta uma estrutura relativamente simples, formada por monômeros de D-glicose, unidos por ligações glicosídicas do tipo β (1 \blacktriangleright 4). Duas unidades adjacentes de D-glicose originam uma ligação glicosídica por meio da eliminação de uma molécula de água, que envolve os grupos hidroxílicos dos carbonos 1 e 4, esta estrutura dissacarídica é denominada de celobiose. A celobiose é classificada como unidade conformacional mínima da celulose, enquanto a glicose é definida como unidade fundamental das cadeias do homopolímero (FENGER, D., WEGENER, 1989).

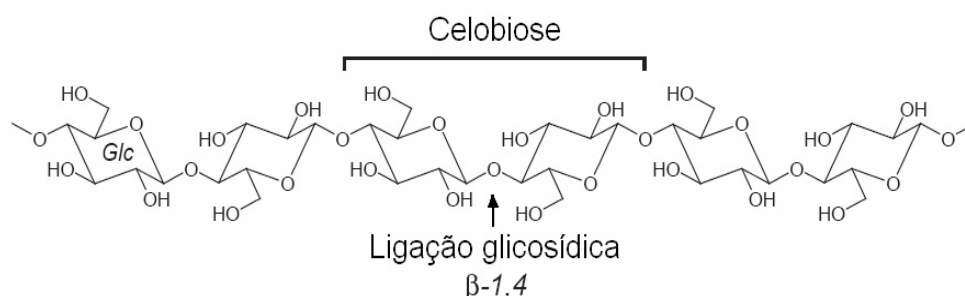


Figura 2: Estrutura da celobiose e da ligação glicosídica na celulose.

Fonte: (Adaptado de Ferreira, 2010).

Hemicelulose

A hemicelulose (Figura 3) é um polissacarídeo que possui uma estrutura complexa, com baixa massa molar que inclui carboidratos poliméricos com cinco a seis átomos de carbono na estrutura das suas unidades de açúcares. Ela é

constituída de pentoses (xilose e arabinose) e/ou hexoses (glucose, manose e galactose), ácidos urônicos e grupos acetilas. Em decorrência da complexidade estrutural das hemiceluloses, ele apresenta ausência de cristalinidade, baixa massa molar e alta absorção de água (CARVALHO, 2004).

A hemicelulose associada com a celulose é denominada de holocelulose. Os principais açúcares que formam a hemicelulose são: D-xilopirranose, D-glucopirranose, D-galactopirranose, D-mannopirranose, L-arabinofuranose e os ácidos D-glucopiranosilurônico e D-galactopiranosilurônico. A hemicelulose é formada geralmente por mais de um tipo de açúcar e devido a isso, é nomeada pelos açúcares que contém. Em coníferas ou gimnospermas e folhosas ou angiospermas dicotiledôneas a hemicelulose difere significadamente de espécie para espécie (ROWELL *et.al.* 2005).

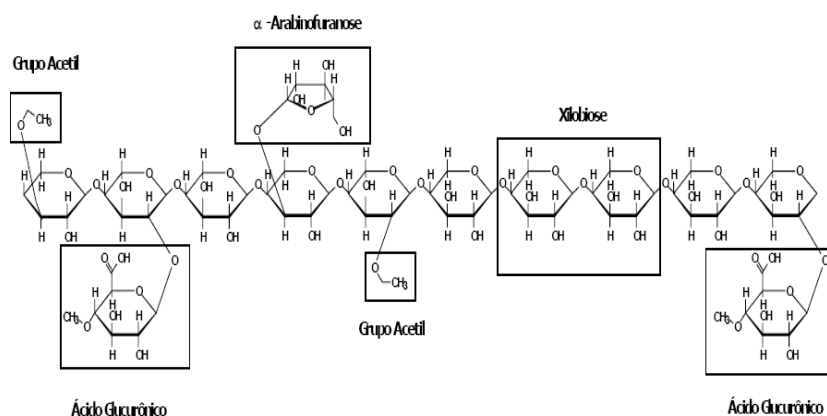


Figura 3: Estrutura de uma hemicelulose, na qual a cadeia linear representa a xilana.

Fonte: (Adaptada de Ferreira Verônica, 2010).

Lignina

A lignina é um recurso valioso para a área química e para a obtenção de energia, é um dos principais componentes da madeira, juntamente com a hemicelulose e celulose. A lignina é o segundo material mais abundante do reino vegetal, além disso, é a substância química que gera rigidez a parede celular e atua como um composto de ligação entre celulose e polioses, conferindo uma estrutura

rígida, resistente ao impacto, compressão e dobra, como a madeira (BREBU & VASILE, 2009).

Essa estrutura representa cerca de 20-35% da biomassa vegetal, a lignina (Figura 4) é classificada de acordo com a quantidade dos monômeros guaiacila (G), siringila (S) e p- hidroxifenila, derivados de alcoóis coniferílico, sinapílico e p- cumarílico. A lignina é formada por macromoléculas tridimensionais de fenilpropano, além disso, apresenta uma estrutura complexa e de alta massa molecular, devido a isso ela apresenta-se predominantemente amorfa (DEL-RÍO *et.al.*, 2005).

Diferentemente da celulose, a lignina só aparece em plantas vascularizadas que desenvolvem tecidos especializados no transporte de soluções aquosas e suporte mecânico. As plantas primitivas, como os fungos e as algas não possuem em sua constituição, lignina (KLOCK *et.al.*, 2005).

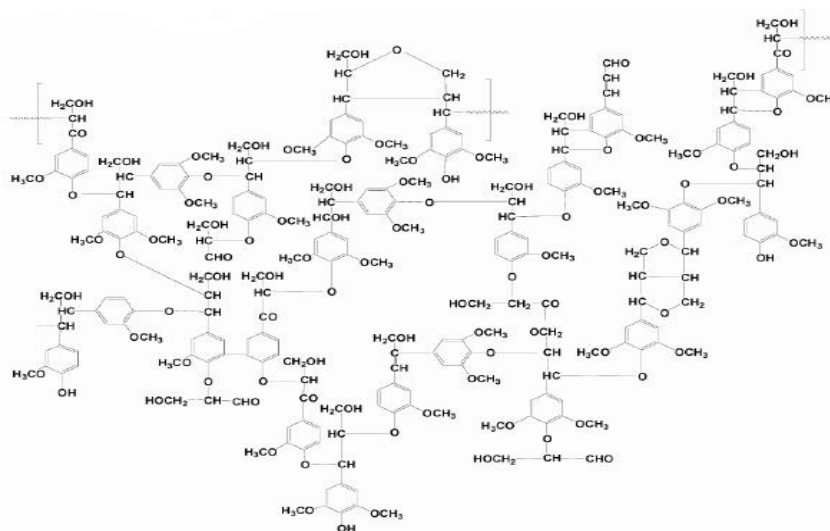


Figura 4: Estrutura Parcial da Lignina da Madeira.

Fonte: (Adaptada de BREBU & e VASILE, 2010).

Extraíveis

Os extrativos dos materiais vegetais são formados por uma ampla variedade de compostos químicos, embora representem uma pequena parte dos vegetais, principalmente os lenhosos, como a madeira. Estes compostos não fazem parte da composição estrutural dos vegetais e de maneira geral, são relativamente fáceis de

serem extraídos dos vegetais, pois são solúveis em solventes orgânicos ou água, devido a isso são chamados de extrativos. Na maioria das vezes, essas substâncias são as responsáveis pelo cheiro, cor, sabor e resistência natural ao apodrecimento de certas espécies (KLOCK *et.al.*, 2005). Os extrativos são componentes da biomassa que possuem baixo peso molecular e não estão presentes na parede celular, apresenta-se em outras regiões, como no cerne das árvores, o que explica a coloração escura em algumas espécies. Os extrativos estão presentes principalmente na casca das árvores. Esses compostos estão presentes em pequenas quantidades nos vegetais, eles englobam os óleos essenciais, resinas, taninos, graxas e pigmentos (BRITO & SILVA, 2005).

Principais tipos de reatores para sistemas de gaseificação

Gaseificadores de Leito Fixo

De acordo CENBIO, a maioria dos gaseificadores construídos e em operação no mundo são desse tipo. Dos projetos de gaseificadores 77,5% são do tipo leito fixo, 20% do tipo fluidizado e 2,5% de outros tipos. Esses tipos de reatores são mais indicados para serem usados em pequena escala. Quando se aumenta a escala, o mais indicado é o gaseificador concorrente (CENBIO, 2002; SANCHEZ, 2002).

Gaseificadores Contracorrentes (*Updraft*)

O gaseificador de fluxo ascendente (Figura 5) é aquele em que o combustível é inserido na parte superior do reator e se movimenta pela ação da gravidade conforme é consumido. Ele é o gaseificador mais antigo e mais simples construído até hoje. O ar entra pela parte inferior do reator, logo o fluxo de gases é ascendente, contrário ao fluxo de combustível (K. ZANG *et.al*, 2013).

O gaseificador contracorrente é uma tecnologia viável e adequada para a gaseificação de biomassa úmida, pois esse tipo de reator não tem tantas peculiaridades em relação ao tamanho do combustível e ao teor de umidade da biomassa. Estes gaseificadores apresentam uma eficiência térmica alta, devido aos gases quentes oriundos da zona de combustão pré-aquecerem o combustível ao passar por ele. Seu grande problema é a notável quantidade de alcatrão resultante do processo, fator pouco relevante se o gás combustível for utilizado imediatamente para queima em uma caldeira. O teor de alcatrão desse tipo de reator fica entre 20 a 100 g/Nm³ e o teor de particulados (fuligem), situa-se na faixa de 0,1 a 0,2 g/Nm³. A temperatura de saída dos gases é de aproximadamente 400 °C (GOMEZ, 2011; ENSINAS, 2011; MCKENDRY, 2002).

Segundo GOMEZ *et.al.* (2011), neste tipo de reator a biomassa deve ter uma granulometria entre 10-100 mm e o teor de umidade deve ser $\leq 40\%$. Geralmente o teor de cinzas coletado nesse tipo de reator é $\leq 2\%$ e a temperatura de fusão das cinzas é de 1000 °C, mas esses fatores dependem das características da biomassa utilizada na operação. Esses gaseificadores podem utilizar uma ampla variedade de combustíveis, desde resíduos agroindustriais até resíduos sólidos urbanos.

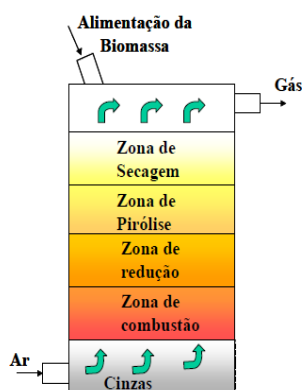


Figura 5: Esquema de um gaseificador contracorrente.
Fonte: (ANDRADE, 2007).

Gaseificadores Co-Correntes (*Downdraft*)

Os gaseificadores de fluxo descendente (Figura 6) são os mais conhecidos no mundo, devido principalmente a sua ampla utilização em veículos durante a Segunda Guerra Mundial. Nesse tipo de reator, as zonas de combustão e redução estão dispostas de maneira inversa à dos reatores contracorrentes. Esses gaseificadores são projetados e construídos com o intuito de reduzir a produção de alcatrão e particulados. O alcatrão e os particulados da zona de pirólise são direcionados à zona de combustão, onde, serão craqueados e convertidos. O alcatrão é convertido em compostos de peso molecular menor e em coque, logo a mistura de gases na saída do reator é relativamente livre de alcatrão, situa-se na faixa de 0,1 a 1,2 g/Nm³ (GÓMEZ, 2011; ENSINAS, 2011, CALLE, 2008, K. ZANG, 2013).

Neste tipo de reator são produzidas quantidades significativas de cinzas e particulados (fuligem), pois a saída dos gases ocorre diretamente da zona de redução. O teor de cinzas é < 6 % e a temperatura de fusão das cinzas é por volta de 1000 °C. A temperatura de saídas dos gases do reator é de aproximadamente 700 °C, pois não ocorre a troca de calor com as zonas de pirólise e secagem. Em relação às características que a biomassa deve apresentar para a utilização eficiente neste tipo de reator, ela precisa ter uma granulometria de 10-100 mm e que o teor de umidade seja ≤ 25 % (GÓMEZ, 2011).

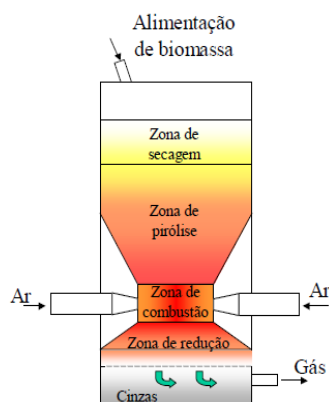


Figura 6: Esquema de um gaseificador Co-corrente.
Fonte: (ANDRADE, 2007).

Fluxo Cruzado (*Cross Flow*)

De acordo com K. Zhang *et.al.* (2013) no gaseificador de fluxo cruzado (Figura 7), a retirada do gás da câmara de gaseificação é feita pelo lado, na mesma altura do leito em que é injetado o ar. Em torno da entrada de ar se forma uma zona de combustão extremamente quente, devido a maior quantidade de ar injetada nessa zona em comparação aos outros reatores. A zona de secagem e pirólise apresentam-se na parte superior do gaseificador. O gás combustível produzido apresenta características intermediárias comparadas com o contracorrente e concorrente.

Esses gaseificadores apresentam como vantagens: a rápida resposta a variação de carga, construção relativamente simples e peso reduzido em relação a outros reatores. Entretanto, são muito sensíveis a variações das características da biomassa utilizada como: umidade, granulometria e composição, sendo assim, são mais indicados para uso com carvão vegetal limpo e seco. Esses reatores apresentam como desvantagem também, o custo com o sistema de resfriamento e limpeza do gás, que é necessário, pois a zona de combustão apresenta uma temperatura extremamente alta, logo a liberação dos gases é muito rápida da zona de redução. Além disso, eles produzem um gás com alto teor de fuligem e cinzas. Esses gaseificadores são mais utilizados em escala laboratorial (ENSINAS, 2011; SANCHEZ, 2002).

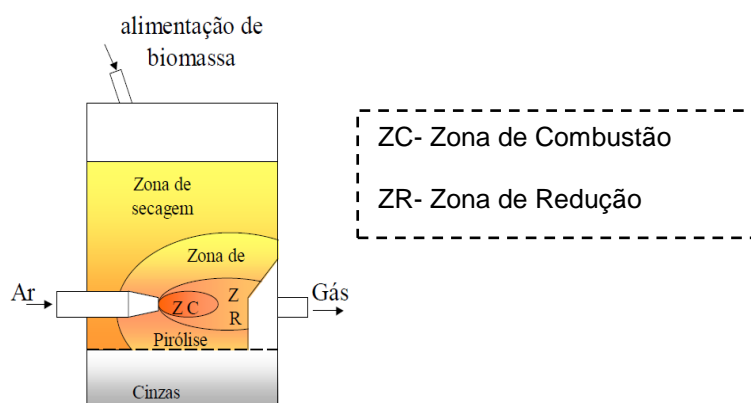


Figura 7: Esquema de um gaseificador Fluxo Cruzado.

Fonte: (ANDRADE, 2007)

Leito Fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser classificados em leito fluidizado circulante ou borbulhante. No caso dos gaseificadores borbulhantes as partículas do combustível arrastadas pelo processo não retornam para o leito e esse tipo de reator trabalha com velocidades menores (1m/s). A alimentação de biomassa é feita diretamente na zona do leito. No entanto, nos gaseificadores de leito fluidizado circulante as partículas arrastadas de combustível pelos gases, retornam ao leito por meio de um ciclone, mantendo-se em circulação. A conversão de carbono é eficiente, pois o tempo de residência das partículas é maior comparado ao borbulhante. Nesse tipo de reator o combustível atravessa o leito em velocidade mais alta (7-10 m/s), promovendo assim uma melhor mistura do ar com o combustível a ser gaseificado (CENBIO, 2002; K.ZANG, 2013; ANDRADE *et. al*, 2007).

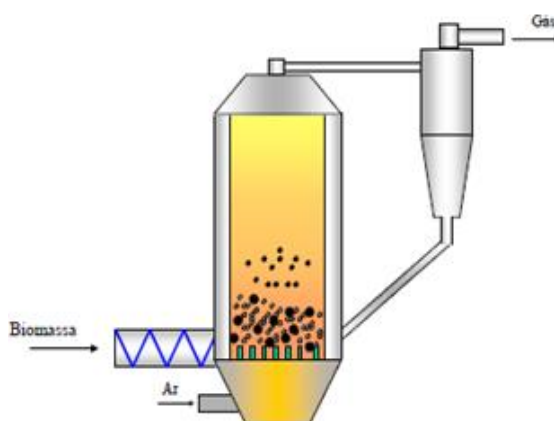


Figura 8: Esquema de um gaseificador de leito fluidizado circulante.

Fonte: (ANDRADE, 2007).

Nos gaseificadores de leito fluidizado, há melhores condições de transferência de calor e uniformidade da temperatura na câmara de reações, devido ao ambiente reacional gerado pelo fluxo do agente de gaseificação e das partículas inertes (areia, sílica, alumina, etc.), quando em contato com o combustível. O teor de alcatrão é alto, fica em torno de 15 g/Nm³, devido ao alcatrão produzido na zona da pirólise não ser gaseificado e esses reatores operarem com temperaturas relativamente baixas.

Já os teores de materiais particulados fica entre 30-35 g/Nm³. Esses gaseificadores têm sido bastante utilizados, pois podem operar com biomassa que tenha umidade elevada (até 65%), mas a granulometria exigida do combustível é de 5 a 10 mm. O teor de cinzas é < 20% e a temperatura de saída dos gases fica entre 500-900°C (GOMÉZ, 2011; ENSINAS, 2011).

Esses reatores foram construídos antes da Segunda Guerra Mundial, para operarem com carvão mineral em sistemas de gaseificação de grande capacidade (gaseificadores Winkler). Posteriormente, ao longo da história, eles foram adotados pela indústria petroquímica e química para o processo do craqueamento catalítico de hidrocarbonetos pesados, secagem e uma infinidade de aplicações. Esses equipamentos apresentam uma alta eficiência energética, pois as taxas de produção e de trocas de calor são elevadas. O processo de operação desses gaseificadores é mais complicado, devido a isso, eles são empregados majoritariamente em grandes instalações (CENBIO, 2002).

ANEXOS B

Fotos das Chamas das Gaseificações



Figura 8: Chama gerada pela gaseificação da casca do fruto do baru.

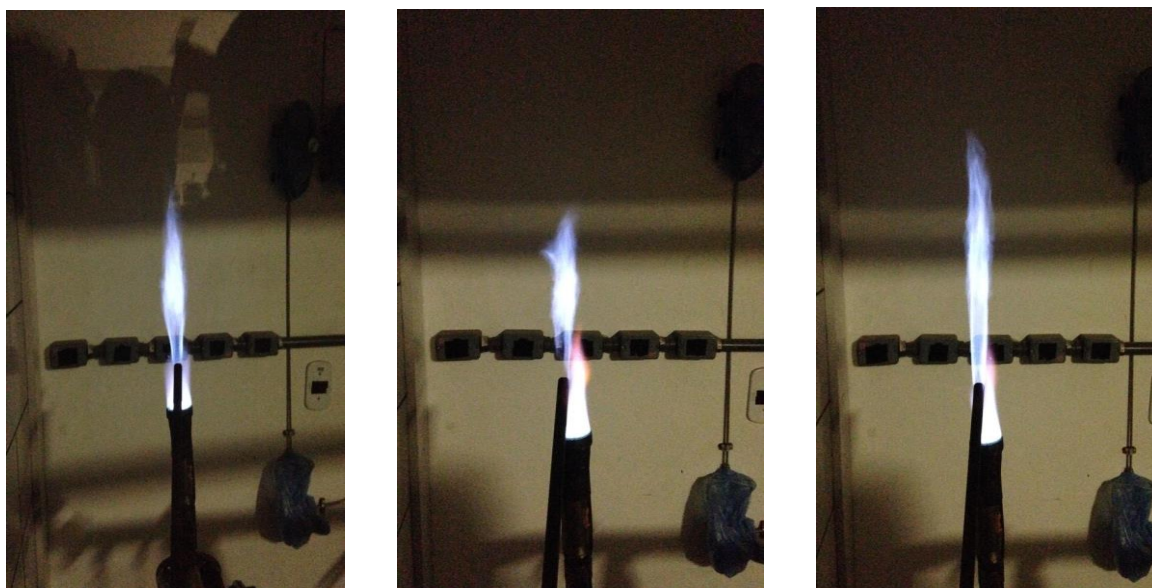


Figura 9: Chama gerada pela gaseificação da casca da árvore do jatobá-do-cerrado

ANEXOS C

Trabalhos Apresentados

CHARACTERIZATION OF PEQUI SEED TO UTILIZATION IN THERMOCONVERSION PROCESSES

N. A. VIANA¹, M. G. GUIMARÃES¹, A. C. M. VIEIRA¹, G. F. GHESTI¹, S. S. BRUM¹, A. T. do VALE².

¹University of Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Chemistry Institute, PO box 4478, Brasília-DF, ZIP CODE 70904-970, Brazil; nadiambiente@gmail.com, muniquegg@gmail.com, mvcaroline@hotmail.com, grace@unb.br, sarahsbrum@yahoo.com.br, ailton.vale@gmail.com. ²University of Brasília, Campus Darcy Ribeiro, College of Technology, Forest Engineering Department, PO box 04357, Brasília-DF, ZIP CODE 70910-900, Brazil.

The Brazilian Cerrado is extremely rich in fauna and flora. The pequi fruit (*Caryocar brasiliense* Camb.), whose popular name is pequi, has been considered one of the most representative species.¹ The Supply Center in Goiás reported that in 2011 the volume of commercialization of pequi in Brazil was 5.263,8 ton/year.² The pequi fruit has been used to direct consumption in Brazilian culinary.³ The aim of this work was to characterize residues of pequis in order to investigate the energetic feasibility to thermoconversion processes. Through immediate analysis (Standard NBR 8112/86 with adjustments) it was possible to verify that the seed of pequi presents 28.56 % of moisture content, 83.01% of volatile material, 1.22% of ash and 15.77 of fixed carbon. The biomass contains PCS 26.691 kJ/kg, PCI 24.857 kJ/kg and PCU 17.041 kJ/kg. Add to those, CHN /TG/EDX/FRX, it was possible to observe that the seed presents 55.09 % of Carbon content, 8.11 % of Hydrogen, 1.29% of Nitrogen and 34.30 % of Oxygen content. The analysis of lignin showed as a predominant result 48.45% of lignin content and 35,33% of extractable content. The wood of this species presents PCS 20.260 kJ/kg⁴ while the seed of its fruit presented a higher value to the same variable, showing that the oil content in the species positively affects the value of this factor. When comparing these data with other biomass widely used in the literature, it was possible to conclude that the pequi seed has potential feasible to be used in power generation.

Keywords: Pequi, Energy, Thermoconversion, Biomass, Cerrado.

References:

- [1] K.C. Geöcze *et al.* **Essentials Oils from Pequi Fruits from the Brazilian Cerrado Ecosystem.** Food Research International, nº 54, p.1-8, 2013.
- [2] CEASA, 2011, cited by Rodrigues.M.L. **Azeite de Pequi: Efeito do Aquecimento em Temperatura de Fritura e Utilização como Ingrediente na Formulação de Maionese.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, p.16, 2011.
- [3] A. de Lima. *et al.* **Composição Química e Compostos Bioativos Presentes na Polpa e na Amêndoa do Pequi (*Caryocar brasiliense*, Camb.).** Comunicação Científica, Revista Brasileira de Fruticultura, v.39, nº3, p. 695-698, Jaboticabal-SP, Dezembro, 2007.
- [4] Quirino, *et al.* **Poder Calorífico da Madeira e de Materiais Lignocelulósicos.** Revista da Madeira, nº89, p.100-106, Abril, 2005.

Presenting author's email: nadiambiente@gmail.com
grace@unb.br

Study of Urban Solid Waste Gasification Viability

Yuri Henrique de O. Falcão¹, Munique Gonçalves Guimarães¹, Nádia Alves Viana¹, Juliana Petrocchi, Rodrigues¹, Julio Lemos de Macedo¹, Grace Ferreira Ghesti¹

¹University of Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Chemistry Institute, PO box 4478, Brasília-DF, zip code 70904-970, Brazil;

Urban solid waste (USW) is being considered one of the greatest problems in actuality. The accumulation of USW causes social, environmental and economic impacts, as: degradation of watershed and permanent protection areas; proliferation of disease agents; siltation of rivers and streams; obstruction of drainage systems [1]. The Novo Gama's trash dump, Brazil, has been endangering the nature's preservation and the public health. Recently, a leachate lagoon, from the waste in the trash dump, overflowed and contaminated three streams that feed the river Corumbá, which will be used to supply Brasília in the near future [3]. The lack of public policies which address the disposal of the USW in the cities has been a major boost to generate new ends to the USW, mainly leverage then energetically [1][2]. The objective of this study was to evaluate the energetic power of the USW disposal in Novo Gama's trash dump to be worn as fuel in gasification, and studying the possibility of the installation of a gasificator reactor in the studded local for energy generation. For this study, samples were collected and immediate analysis was performed, according to the adapted ABNT NBR 8.112/86 standard, where were verified that the samples showed moisture content of 34,4%, volatile material 14,4%, ashes 5,1%, fixed carbon 80,5% and superior calorific value of 17.110,15kJ/kg. By elemental analysis was verified that the composition of the USW were 37% of Oxygen, 54% of Carbon, 7% of Hydrogen and 2% of Nitrogen, approximately [4]. From this and other results, it was possible to conclude that this USW can be used as energy source according to its composition and, by the volume and favorable composition of this waste, it is viable and recommended the construction of an *up draft* gasificator in the Novo Gama's trash dump.

Keywords: Gasification, Up Draft, Urban Waste, Trash Dump.

References:

[1] Access in:

<http://www.toledo.pr.gov.br/sites/default/files/book/schererpmgrstoledo06setembro2007alteracao02.pdf> accessed in August 14, 2013 at 16:20.

[2] Access in: www.bvsde.paho.org/bvsaidis/resisoli/iii-007.pdf accessed in August 07, 2013 at 13:13.

[3] Access in: http://www.eletrosul.gov.br/gdi/gdi/index.php?pg=cl_abre&cd=mffeXZ58%7CXjh accessed in April 24, 2014 at 20:29.

[4] Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8112 accessed in April 24, 2014 at 20:29.

Presenting author's email: yhofalcao@gmail.com; muniquegg@gmail.com; grace@unb.br

Aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos Secos Através da Reciclagem e de Tratamento Termoquímico

MunIQUE G. Guimarães (IC)^{1*}, Nádia A. Viana(PG)¹, Julio L. de Macedo (PQ)¹, Grace F. Ghesti(PQ)¹.

*muniquegg@gmail.com

¹Laboratório de Catálise, Instituto de Química, Universidade de Brasília, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil.

Palavras Chave: reciclagem, RSU, poder calorífico, processos termoquímicos.

INTRODUÇÃO

O Serviço de Limpeza Urbana (SLU) do Distrito Federal recolhe mensalmente, 70 mil toneladas de lixo. Desse total, apenas 2,1 mil são recicladas, o que equivale a 3% e o restante é jogado no lixão céu aberto.¹Conforme a lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010, a destinação final ambientalmente adequada para resíduos inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.²

A reciclagem e a recuperação de energia são as alternativas disponíveis em curto prazo para reduzir a quantidade de resíduos que é encaminhada aos vazadouros de lixo.

A reciclagem por requer mudanças de comportamento da população e dos interesses dos setores econômicos além da disponibilidade limitada de materiais e alto custos para transformação, portanto é muito mais lucrativo para uma empresa produzir a matéria- virgem do que transformar “o velho”.

Uma possível solução para “o velho” é transformá-lo em uma fonte de energia renovável, através do tratamento térmico, como por exemplo, a gaseificação.

O objetivo deste trabalho visa discutir a melhor utilização do lixo seco, se é através da reciclagem ou do processamento termoquímico desta biomassa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir de análises térmicas (TG/DTA) de amostra de lixo seco podem-se observar informações sobre a estabilidade térmica. Pode-se observar 4 quedas expressivas na Figura 1. A primeira perda que foi na faixa de 22°C a 95°C, mostra a perda de H₂O que foi de 2,185mg (11,36%). A segunda perda, de 95°C a 350°C, está associado a pirólise de compostos voláteis, que correspondeu a uma perda de 6,537mg (33,98%). A terceira perda, que vai de 350°C a 500°C, está associada à combustão de matéria orgânica constituinte da biomassa de mais alta massa molecular, como ácidos graxos, foi identificada a perda de 2,833mg (14,72%). A quarta e última perda que vai de 500°C a 700°C mostra a decomposição de compostos orgânicos poliméricos que corresponde de 0,4339mg (2,255%). O resíduo final foi de 7,274mg (37,81%), correspondente a cinzas e matérias inorgânicas. A análise de DTA apresentou 4 picos a 71,11°C (processo endotérmico) e 223,73°C, 316,48°C, 455,31°C (processos exotérmicos).

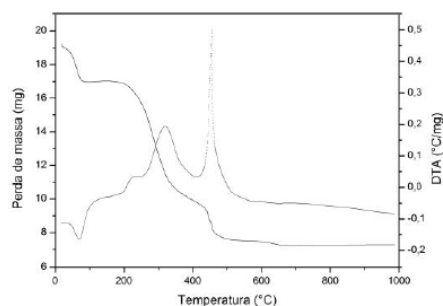


Figura 1. Curvas de TG e DTA (linha pontilhada) do lixo seco *in natura*.

De acordo com o alto valor de PCS encontrado: 4724,78Kcal/Kg, que pode ser comparado a madeiras de espécies florestais cujo média foi de 4.732 kcal/kg (3) e o baixo teor de umidade, espera-se a geração de gás de síntese limpo e eficiente para geração de energia.

A capacidade de destinação final para fins energéticos é viável a partir desta biomassa e seu processamento diário é superior a capacidade de manufatura por parte dos catadores, sendo assim é recomendável seu processamento termoquímico por meio de gaseificação com um sistema de geração de energia combinado com turbina a vapor ou motor de combustão interna.

CONCLUSÕES

Foi possível observar que ambos os processos são eficientes, pois eles evitam a expansão de aterros e a poluição associada à disposição final de resíduos. No caso da reciclagem, falta-se incentivos financeiros e capacitação de profissionais. Já o processamento termoquímico é uma tecnologia ainda não aplicada por viabilidade econômica e tecnológica, que em longo prazo, poderá gerar lucro com a venda de energia a partir deste resíduo. O uso desses processos pode ser a solução para dois problemas existentes hoje no DF, o aumento da produção de lixo e a crescente demanda energética.

AGRADECIMENTOS

CNPq, LabCat

- [1] http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2013/10/09/interna_cidadesdf,392382/distrito-federal-so-recicla-3-das-70-mil-toneladas-diarias-de-lixo.shtml
- [2] Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Presidência da República. Casa Civil.
- [3] QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; ABREU A. C. S.A. Poder calorificoda madeira e de materiais ligno-celulósicos.Revista da Madeira nº 89 abril 2005 pag 100-106.

CARACTERIZAÇÃO DA CASCA DA CASTANHA-DO-BRASIL VISANDO SUA UTILIZAÇÃO EM PROCESSOS DE TERMOCONVERSÃO

Nádia A. Viana (PG)^{1*}, Munique G. Guimarães (IC)¹, Ana Caroline M. Vieira (PG)¹, Ailton T. do Vale (PQ)², Júlio L. de Macedo (PQ)¹, Grace F. Ghesti (PQ)¹, *nadiambiente@gmail.com

1. Instituto de Química, Universidade de Brasília, CP 4478, 70904-970, Brasília, DF.

2. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, CP 04357, 70910-900, Brasília, DF.

Palavras Chave: Bioenergia, *Dipterix alata*, Resíduo, Aproveitamento.

Introdução

No Brasil, a energia oriunda da biomassa é uma alternativa bastante atraente, especialmente na Região Amazônica, onde energia hidrelétrica e derivados do petróleo são caros, pois precisam ser transportados por grandes distâncias. Após a exploração florestal, estima-se que 20% da massa de uma árvore são deixados na floresta, sem uma destinação final determinada. Abundantemente na Amazônia, onde se encontra a castanheira *Bertholletia excelsa* (Figura 1), somente a madeira e as castanhas são aproveitadas, logo o ouriço e as cascas das castanhas extraídas são largadas no campo, sem nenhuma utilização, se tornam resíduos florestais¹.

O objetivo desse trabalho é reportar a caracterização da casca das sementes da castanha-do-pará visando a sua utilização para fins energéticos por meio de processos de termoconversão, e, além disso, analisar os resultados obtidos, comparando-os com a literatura.



Figura 1. Ouriço e castanhas do Brasil retiradas.

Resultados e Discussão

Os valores da análise imediata para as cascas da castanha-do-brasil foram respectivamente: Umidade (23,76%), Voláteis (71,48%), Cinzas (2,18%) e Carbono Fixo (26,34%). Os valores encontrados em relação a essa análise se diferenciaram dos alcançados por Kleinlein (2010), principalmente pela diferença de norma adotada pelo autor, e, além disso, devido principalmente ao método de coleta e transporte da castanha, e principalmente com a forma de adubação química.

O PCS da biomassa foi de 4.730 kcal/kg, o PCI foi de 4.437,86 kcal/kg e o PCU foi de 3.240,86 kcal/kg, os resultados mostraram a viabilidade de se gerar energia através da biomassa analisada. Carneiro *et.al.* (2014) encontrou para madeira de *Eucalyptus sp.* poder calorífico superior (PCS) médio para as espécies analisadas de 4.633 kcal/kg, 4.660 kcal/kg e 4.542 kcal/kg, esses resultados demonstram que as cascas de castanha apresentam potencial energético significativo para a geração de energia, pois estas apresentaram poder calorífico superior (PCS) maior que o apresentado pela madeira de eucalipto que já é uma biomassa bastante utilizada para fins energéticos.

Conclusões

Por meio dos resultados, obtidos com este estudo sobre o potencial energético das cascas da castanha-do-pará, foi possível observar que os resíduos florestais que são deixados na floresta após exploração, e muitas vezes queimados sem levar em consideração os critérios ambientais, possuem significativo caráter energético. A coleta de parte do volume de resíduos florestais pós-colheita, diminui a probabilidade de incêndios florestais no plantio, e, além disso, se for usado como fonte energética pode ser parte da solução para a energização de pequenas comunidades na região Norte do Brasil.

A partir dos dados gerados sobre as cascas da castanha-do-pará, por meio da análise imediata e do poder calorífico é possível concluir que os resíduos da castanheira possuem significativo valor energético na geração de energia.

Referências Bibliográficas

- CARNEIRO, A. de C. O. **Potencial Energético da Madeira de Eucalyptus sp. em Função da Idade e de Diferentes Materiais Genéticos.** Rev. Árvore, Viçosa, v. 38, n. 2, 2014.
- KLEINLEIN, A.W. **Caracterização Energética de Biomassas Amazônicas** (Dissertação: Mestrado). Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, p.63, Belém, 2010.

Caracterização dos resíduos produzidos do beneficiamento do fruto do Baru (*Dipteryx alata* Vog.) visando a sua utilização na geração de bioenergia

Nádia A. Viana (PG)^{1*}, Munique G. Guimarães (IC)¹, Ana Caroline M. Vieira (PG)¹, Ailton T. do Vale (PQ)², Júlio L. de Macedo (PQ)¹, Grace F. Ghesti (PQ)¹. *nadiambiente@gmail.com

1. Instituto de Química, Universidade de Brasília, CP 4478, 70904-970, Brasília, DF.

2. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, CP 04357, 70910-900, Brasília, DF.

Palavras Chave: Bioenergia, *Dipteryx alata*, Resíduo, Aproveitamento.

INTRODUÇÃO

No Estado de Goiás, o extrativismo da espécie (*Dipteryx alata* Vog.), popularmente conhecido como baru, é comum entre as pequenas comunidades extrativistas. A atividade extrativista gera um significativo volume de resíduos florestais, principalmente na forma de casca dos frutos. Esses resíduos florestais precisam ter um fim determinado, pois se as cascas ou outro tipo de resíduo forem descartados no meio ambiente, eles contribuirão com a poluição ambiental [1]. O objetivo deste trabalho é caracterizar as cascas (Figura 1) oriundas do beneficiamento do fruto do baru, visando a sua utilização na geração de bioenergia e redução de impactos ambientais oriundo da manufatura do fruto.



Figura 1. Casca e amêndoa do fruto do baru.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os valores da análise imediata para as cascas do fruto do baru. O teor de umidade da biomassa analisada foi de 12,02%, considerado significativo para a utilização com fim energético, uma vez que a perda de geração de calor é reduzida durante o processo de queima, logo a eficiência energética aumenta. O teor de materiais voláteis para a amostra analisada foi de 71,71% e o teor de cinzas foi de 2,6%. Os dois teores obtidos são considerados relevantes, pois o teor de materiais voláteis tem uma influência direta na estabilidade da chama no processo de combustão, e também determina o controle do processo. Os combustíveis sólidos, como a madeira, apresentam quantidade de materiais voláteis entre 76 e 86%, base seca, esses materiais são responsáveis pela maior parte da geração de calor no processo de queima [2]. Os materiais voláteis estão diretamente relacionados com a composição química de cada material. O teor de carbono fixo da biomassa analisada foi de 25,7%, essa variável também é determinante no processo de queima; quanto maior o teor de carbono fixo no material, mais lenta será a queima.

Tabela 1. Resultados da Análise Imediata da amostra analisada.

Biomassa	Teor de Umidade (%)	Teor de Voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
Casca do fruto do baru	12,02	71,71	2,6	25,7

O PCS da biomassa analisada, apresentado na Tabela 2 foi de 4.700 kcal/kg e o seu PCI foi de 4.363,04 kcal/kg, os resultados mostraram a viabilidade de se gerar energia através da biomassa analisada. O PCS médio para cascas de madeira muito utilizadas para bioenergia é de 4.046 kcal/kg [3], valor próximo do resultado encontrado. O poder calorífico é uma das variáveis mais importantes quando se trabalha com geração de energia, pois ele é a quantidade de energia na forma de calor que é liberada pela combustão de uma unidade de massa do combustível.

Tabela 2. Resultados dos Poderes caloríficos e Densidade energética da amostra analisada.

Biomassa	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	PCU (kcal/kg)
Casca do fruto do baru	4.700	4.363,04	3.766,48

CONCLUSÕES

A partir dos dados gerados sobre as cascas do fruto do baru é possível concluir que os resíduos oriundos do beneficiamento do fruto, possuem significativo valor energético para a geração de energia. A utilização dos resíduos florestais para a geração de bioenergia minimiza potencialmente a poluição ambiental, uma vez que sua decomposição no meio ambiente gera gases que contribuem para o efeito estufa.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Catálise do IQ/UnB, ao IFB, ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília e aos seguintes agentes: CNPq, CAPES e UnB.

[1] Vale, T.A, Olsen LB. FLORESTA, 2013, v. 43, n. 1, p. 117 - 124.

[2] Morais, S.A.L. de, Nascimento, E.A. do, Melo D.C. Revista Árvore, 2004, v.16, n.3, 461-470.

[3] Reis, B. de O., Silva, I. T. da, S., Isa M. O. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 2002, 4, Campinas.

CARACTERIZAÇÃO DA CASCA DA ÁRVORE DO JATOBÁ-DO-CERRADO PARA GERAÇÃO DE BIOENERGIA ATRAVÉS DE GASEIFICAÇÃO

MunIQUE G. Guimarães (IC)^{1*}, Nádia A. Viana (PG)¹, Ana Caroline M. Vieira (PG)¹, Ailton T. do Vale (PQ)², Júlio L. de Macedo (PQ)¹, Grace F. Ghesti (PQ)¹. *nadiambiente@gmail.com

1. Instituto de Química, Universidade de Brasília, CP 4478, 70904-970 Brasília, DF.

2. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, CP 04357, 70910-900 Brasília, DF.

Palavras Chaves: Jatobá, Análise Imediata, Poder Calorífico, Análise Térmica.

INTRODUÇÃO

No Estado de Goiás, o extrativismo da espécie (*Hymenaea stigonocarpa* Mart. Vog.), popularmente conhecido como Jatobá-do-Cerrado, é comum entre as pequenas comunidades extrativistas. A atividade extrativista gera um significativo volume de resíduos florestais, principalmente na forma de casca dos frutos e cascas da árvore. A biomassa vem ganhando espaço no cenário energético, pois dentre as fontes renováveis de energia, ela é a que possui potencial de suprir grandes quantidades de energia, a preços competitivos e com um mínimo de impacto ambiental¹. O objetivo deste trabalho é caracterizar as cascas da árvore do jatobá-do Cerrado (Figura 1), visando a sua utilização na geração de bioenergia.



Figura 1. Casca da árvore do Jatobá-do-Cerrado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores encontrados para os teores da análise imediata da casca da árvore do jatobá foram respectivamente: teor de umidade (11,56%), voláteis (75,36%), cinzas (1,08%) e carbono fixo (23,56%) foram considerados significativos quando comparados aos encontrados por KLEINLEIN².

O PCS da biomassa analisada é de 4.876 kcal/kg, valor muito próximo ao relatado por Vale et.al.³ para a mesma biomassa, que foi de 4.795,40 kcal/kg. A diferença de valores pode estar associada à origem da casca da espécie, pois o local de plantio e o clima influenciam diretamente sobre as características físicas, químicas e biológicas do vegetal. O valor do PCI para a biomassa foi de 4.599,52 kcal/kg e o PCU de 3.998,45 kcal/kg. O PCI é extremamente importante quando se trabalha com combustíveis para energia, pois ele é a energia efetivamente disponível por unidade de massa, após a dedução das perdas com a evaporação da água presente no combustível⁴. O teor de umidade do combustível sempre precisa ser considerado em relação a geração de energia, pois quanto menor este valor há redução no manejo e transporte, agregando valor a biomassa utilizada⁵.

A análise elementar da biomassa influencia diretamente o seu poder calorífico, pois a maior presença de ligações Carbono-Hidrogênio aumenta o PCS, pois

essas ligações são mais energéticas do que as com o oxigênio. A composição química das cinzas permite avaliar o seu comportamento quanto ao ataque de refratários, ao amolecimento e fusão das cinzas⁶.

Os principais elementos encontrados na composição da biomassa foram Carbono (47,88%), Hidrogênio (5,12%), Oxigênio (45,37%) e Nitrogênio (0,53%), esses elementos químicos irão influenciar diretamente a composição dos gases oriundos da gaseificação, e, além disso, influenciam diretamente no valor do PCS⁷⁻⁸. Todos os teores encontrados foram considerados significativos em relação aos valores citados pela literatura.

A curva TG/DTG da casca do Jatobá foi obtida com uma taxa de aquecimento de 10 °C / min e apresentou três regiões principais de perda de massa⁹. Três zonas de perda de massa podem ser observadas no TG: a primeira, ~100°C é devida à evaporação da água, é a perda de água adsorvida, enquanto que na região entre 101- 350 °C pode ser observado o início da decomposição dos biopolímeros (principalmente hemiceluloses), acompanhado da perda de gases como monóxido e dióxido de carbono e líquido leves, como ácido acético e metanol. Entre 350-450 °C ocorre a intensa cisão das cadeias poliméricas (depolimerização) da celulose, acompanhada do início da decomposição da lignina, sendo a decomposição da celulose o processo dominante nessa etapa⁹.

CONCLUSÕES

A partir dos dados gerados sobre as cascas da árvore do jatobá é possível concluir que este resíduo apresenta significativo valor energético para a geração de energia através da gaseificação. A utilização dos resíduos florestais para a geração de bioenergia minimiza potencialmente a poluição ambiental.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Catálise do IQ/UnB, ao IFB, ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília e aos seguintes agentes: CNPq, CAPES e UnB.

[1] BATISTA, G. F. N. Caracterização energética de biomassa amazônica. Departamento de Engenharia Mecânica da UFPA, 2006.

[2] KLEINLEINW. A. Energy biomass characterization for amazon species. 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering Copyright © 2010 by ABCM December 05-10, 2010, Uberlândia, MG, Brazil.

[3] VALE, A.T.; BRASIL, M.A.M.; LEÃO, A.L. Quantificação e Caracterização Energética da Madeira e Cascas de Espécies do Cerrado. Revista Ciência Florestal, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.

ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO CAROÇO DE PEQUI PARA ESTIMATIVA DA ENERGIA DE ATIVÇÃO USANDO MODELOS ISOCONVERSIONAIS

INTRODUÇÃO

A utilização de fontes de energia oriundas da biomassa tem sido bastante estudada por pesquisadores e aparece como uma grande oportunidade para substituição de fontes de alternativas atuais. Isso porque atualmente, a maior parte da energia consumida provém primeiramente do petróleo e depois de fontes como, carvão e gás natural. A substituição não se baseia somente porque há uma previsão de escassez destas fontes alternativas atuais para o suprimento da demanda, mas também por causa dos aspectos ambientais discutidos diante da industrialização.

Diante deste contexto diversos autores têm estudado diferentes tipos de biomassas como uma versátil fonte de energia para a produção de biocombustíveis líquidos, gás de síntese ou carvão através de tecnologias de conversão (PUTUN et al., 2005; KAEWLUN e PIPATMANOMAI, 2011; PRAUCHNER et al., 2005). Neste sentido, o objetivo deste trabalho é analisar o resíduo industrial - Carvão de Pequi e através da análise termogravimétrica estudar a Energia de Ativação (E_a) para abordagem e uso na tecnologia de pirólise. Como objetivos específicos propõem-se: caracterizar o caroço de pequi para obtenção do poder calorífico superior (PCS) e a composição química, realizar a análise termogravimétrica, obter através de alguns modelos a E_a e os resultados para cada componente da biomassa, comparar os resultados com a literatura e por fim, concluir sobre as potencialidades da biomassa como fonte de energia utilizando a pirólise como tecnologia de conversão.

METODOLOGIA

A análise termogravimétrica foi realizada para três diferentes taxas de aquecimento (5, 10, 20°C/min) com uma massa inicial de 15mg 5% de amostra até uma temperatura de 1000°C. A Tabela 1 apresenta os modelos cinéticos utilizados para o cálculo da energia de ativação.

Modelo Cinético	Equação	Referência
Isoconversional – Osawa	$\log \beta = -0,4567 \frac{E_a}{RT} + \left(\log \frac{k_0 E_a}{R} - \log g(\alpha) - 2,315 \right)$	(OSAWA, 1963)
Isoconversional – Starink	$\ln \frac{\beta}{T^{1.8}} = -A \frac{E_a}{RT} + C_1$	(STARINK, 1996)

O método de Starink é teoricamente mais preciso que o de Osawa, já que é uma adaptação do mesmo, e reproduziu com precisão a energia de ativação para reações que apresentam mínima variação de energia de ativação medida com a taxa de aquecimento (STARINK, 1996).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O PCS do caroço de pequi resultou em 6375 Kcal/kg e o PCS do bagaço de cana encontrado por El-Sayed e Mostafa (2014) foi de 4165,95 Kcal/g. Ou seja, o poder calorífico deste resíduo aqui estudado é um atrativo para o processo de pirólise. A partir dos dados fornecidos pela análise termogravimétrica observa-se que com o aumento da taxa de aquecimento há um aumento também da temperatura de pico e esse fato também foi observado por Biagini et al. (2008).

As regressões obtidas aplicando os modelos de Osawa, K-A-S e Starink permitiram notar que em todos os modelos há um paralelismo das linearizações, mas a partir da conversão de 0,6 há uma discrepância nos resultados. Este mesmo fato pôde ser observado por Vyazovkin e Comput (2001) e por Biagini et al. (2008) e pode ser explicado pelas diversas reações complexas que acontecem no decorrer da decomposição da biomassa e por causa da mudança da taxa de aquecimento. Neste contexto, o resultado da E_a estimada para a hemicelulose corresponde a conversão de 0,05. Já a E_a da celulose resultou numa média de 89032,115; 84984,480; 85249,730 kJ/mol para os métodos de Osawa, K-A-S e Starink respectivamente, considerando as conversões de 0,15 ; 0,30 e 0,45.

CONCLUSÃO

Seguindo o mesmo raciocínio de Vyazovkin e Comput (2001) e Biagini et al. (2008) calculou-se neste trabalho a energia de ativação global referente as conversões de 0,15; 0,3 e 0,45, pois as outras conversões resultaram numa linearização não paralela e com desvios maiores. Os resultados de E_a global foram de 89032,115 kJ/mol para o método de Osawa, 84984,48 kJ/mol para K-A-S e 85249,73 kJ/mol para Starink. Ou seja, foram métodos com valores bem próximos um do outro. É possível ainda concluir que há um grande potencial na extração de produtos do caroço de pequi por meio de tecnologias de conversão, visto que pela análise termogravimétrica os valores de E_a foram menores que os encontrados na literatura de outras biomassas. Segundo Biagini et al. (2008) os valores globais de E_a menores significam um sólido mais reativo e valores maiores, um sólido menos reativo.

REFERÊNCIAS

- BIAGINI, E.; FANTEI, A.; TOGNOTTI, L. Effect of the heating rate on the devolatilization of biomass residues. *Thermochimica Acta* 472 (2008) 55-63.
- KAEWLUN, S.; PIPATMANOMAI, S. Potencial of synthesis gas production from rubber wood chip gasification in a bubbling fluidized bed gasifier. *Energy Conv Manage* 2011; 52:75-84.
- PRAUCHNER, M.J.; PASA, V.M.D.; MOLHALLEM, N.D.S. OTANI, C.; OTANI, S.; PARDINI, L.C. Structural evolution of Eucalyptus tar pitch-based carbons during carbonization. *Biomass Bioenergy* 2005; 28:53-61.
- STARINK, M.J. A NEW METHOD FOR THE DERIVATION OF ACTIVATION ENERGIES FROM EXPERIMENTS PERFORMED AT CONSTANT HEATING RATE. *THERMOCHIMICA ACTA*, VOL.288, P.97-104, 1996.

Gaseificação de Resíduos Agroindustriais: Simulação com Comgas, Análise de Acordo com a Metodologia de Tiangco *et. al.*, (1996) e Comparação com os Dados Experimentais

Nádia Alves Viana¹, Munique Gonçalves Guimarães², Augusto César de Mendonça Brasil³, Ailton Teixeira do Vale⁴, Júlio Lemos de Macedo⁵, Grace Ferreira Ghesti⁶

¹Mestranda do curso de Tec. Químicas e Biológicas, nadiambiente@gmail.com, ²Graduanda em andamento em Química Tecnológica, muniquega@gmail.com, ³Professor da Universidade de Brasília, ambrasil@unb.br, ⁴Professor da Universidade de Brasília, ailton.vale@gmail.com, ⁵Professor na Universidade de Brasília, julio@unb.br, ⁶Professora da Universidade de Brasília, grace@unb.br

Introdução

A geração de energia através da gaseificação da biomassa é uma tecnologia termoquímica que já possui mais de 100 anos de existência. No decorrer dos anos 70, muitos países inauguraram uma nova etapa no setor energético, em razão do aumento da tarifa de energia elétrica, estimulados por fatores ambientais, tecnológicos, além da crise do petróleo e a recessão dos países industrializados as quais motivaram os países a tomarem iniciativas de reformas institucionais no setor energético. O objetivo desta reforma foi abrir mais espaço para produção de energia elétrica em pequena escala, a cogeração e o uso mais intensivo de fontes energéticas renováveis (ALVES, 2010). Dentre essas novas fontes energéticas, a gaseificação se destaca como uma excelente opção, pois o combustível utilizado para produção do gás de síntese pode ser a biomassa.

O objetivo deste trabalho é correlacionar os dados obtidos através do experimento de gaseificação da casca do fruto do baru, casca da árvore do jatobá-do-cerrado e caroço de pequi com os dados adquiridos por meio da simulação computacional com o *software* Comgas, além disso, foi utilizado o estudo de Tiangco *et.al.*, (1996) para se obter a taxa específica de gaseificação (ψ) e a eficiência do gás frio.

Metodologia

Simulação com Software Comgas

Para a execução da simulação da gaseificação foi introduzido os dados obtidos por meio da análise elemental (CHNO), o teor de cinzas obtido conforme a metodologia Norma ABNT NBR 8112/86 e o poder calorífico superior (PCS) adquirido de acordo com a norma NBR 8633 da ABNT/1984. Com base nas concentrações dos gases produzidos pela gaseificação real das biomassas analisadas CG/TCD neste estudo e nos gráficos gerados pelas simulações foi calculado o Beta real, considerando a razão de equivalência correspondente à concentração de Monóxido de Carbono (CO) real e o Beta estequiométrico fornecido pelo programa.

Correlação com a metodologia desenvolvida por TiangCO *et.al.*, (1996)

TIANGCO *et.al.*, (1996) desenvolveu uma metodologia para definir a Taxa Específica de Gaseificação (ϕ) de gaseificador de pequena escala, com o intuito de se obter a maior eficiência do gás. Essa variável é obtida por meio da razão entre o consumo de biomassa (kg/h) e a área da seção do reator (diâmetro), sendo que o seu valor fica na faixa entre 100-400 kg/m².h. No estudo executado pelo autor supracitado, foi possível comprovar que quando variava a taxa específica de gaseificação, havia alteração significativa na eficiência do gás.

Resultados e Discussão

As razões de equivalências encontradas através da simulação foram de 3,2 (baru), 3,4 (jatobá) e 1,3 (Pequi). A ψ encontrada para a gaseificação do baru e do jatobá foi de 100 Kg/m².h. As relações ar-combustível encontradas foram de 1,25 (Baru), 0,88 (Jatobá) e 0,23 (Pequi). O valor encontrado para o PCI do gás gerado através da gaseificação da casca do fruto do baru foi de 7,31 MJ/kg, e o valor para o PCI do gás oriundo da gaseificação da casca da árvore do jatobá-do-cerrado foi de 7,70 MJ/kg. Segundo SORDI *et.al.* (2006), esses valores classificam o gás, como de médio poder calorífico. O poder calorífico do gás é considerado significativo, quando comparado ao valor médio do poder calorífico do gás de síntese, produzido através de processos de gaseificação, utilizando o ar como agente gaseificante, que é de 5 MJ/kg.

A comparação dos dados das simulações com os dados da gaseificação real comprovaram que ocorreu a gaseificação nos ensaios reais com o baru e o jatobá. Assim, foi possível concluir que não houve gaseificação nos ensaios realizados com o pequi, pois as condições operacionais e o tipo de reator adotado não foram adequados para condução do processo.

Conclusões

Por intermédio dos resultados obtidos com este estudo sobre a simulação computacional da gaseificação do *software* Comgas, foi possível concluir que o tipo de gaseificador utilizado e as condições operacionais adotadas nos ensaios experimentais foram ótimas para a geração de gás de síntese, a partir das cascas do fruto do baru e da casca da árvore do jatobá-do-cerrado. Nesse contexto, em relação ao caroço de pequi, os parâmetros adotados nos ensaios laboratoriais não foram adequados para a geração do processo da gaseificação. São recomendados mais estudos relacionados ao processo de gaseificação, às características intrínsecas do caroço de pequi e ao comportamento térmico da espécie supracitada.

Agradecimentos

Aos professores do Laboratório de Catálise do Instituto de Química da Universidade de Brasília, ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília e aos seguintes agentes: CNPq, CAPES e UnB.

Referências Bibliográficas

- SORDI, Alexandre *et. al.* Gaseificação de biomassa e célula a combustível: sistema com célula tipo PEMFC. Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural, 2006.
- TIANGCO, Valentino M.; JENKINS, Bryan M.; GOSS, John R. Optimum specific gasification rate for static bed rice hull gasifiers. Biomass and Bioenergy, v. 11, n. 1, p. 51-62, 1996.
- RENDEIRO, Gonçalo. Combustão e gasificação de biomassa sólida. Ministério de Minas e Energia (MME), 2008.

PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL LÍQUIDO A PARTIR DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL: CAROÇO DE PEQUI.

MunIQUE Gonçalves Guimarães¹, Nádia Alves Viana², Júlio Lemos de Macedo³, Grace Ferreira Ghesti⁴

¹Graduanda em andamento em Química Tecnológica, muniquegg@gmail.com, ²Mestranda do curso de Tec. Químicas e Biológicas, nadiambiente@gmail.com, ³Professor na Universidade de Brasília, julio@unb.br, ⁴Professora da Universidade de Brasília, grace@unb.br.
¹Laboratório de Catálise, Instituto de Química, Universidade de Brasília, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil. Tel.: (55 61) 3799-4547.

INTRODUÇÃO

O biodiesel é um dos biocombustíveis mais utilizados por vários países em decorrência de ser de fonte renovável e biodegradável. Assim, algumas indústrias estão realizando programas internos para reutilização dos seus resíduos, com o objetivo de reduzir custos operacionais, gerar um novo subproduto para a indústria, além de controlar a poluição.

O objetivo deste trabalho consiste em caracterizar o óleo do caroço de pequi *in natura* para posterior extração de material graxo, por diferentes solventes. Logo após, o material extraído foi submetido a reações para obtenção de biodiesel em diferentes condições operacionais sempre visando processos mais limpos, utilizando o etanol que é de origem renovável, propondo uma nova rota tecnológica de produção de biodiesel para o subproduto estudado, o caroço de pequi.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a extração do óleo foram às diretivas TAPPI 204 om-88 Associação técnica da indústria de celulose e papel (*Technical association of the pulp and paper industry*), com adaptações. A caracterização físico-química dos óleos foi realizada em triplicata e baseada nos procedimentos descritos pela metodologia oficial Sociedade Americana de Oleoquímica (*American Oil Chemists' Society*) AOCS, feita em triplicata. Para determinar a composição química do óleo de pequi foi utilizado o método da cromatografia gasosa acoplada a um espectrofotômetro de massa (CG-EM). As reações de esterificação foram realizadas em mini-reatores de 5 mL contendo 1 g de óleo extraído conforme diretivas TAPPI 204 om-88, sob agitação constante de 1000 rpm. As reações de esterificação foram realizadas em um sistema de soxhlet em escala laboratorial, no qual as diretivas TAPPI 204 om-88 foi adaptada. As amostras oriundas da síntese do biodiesel foram analisadas em um espectrômetro Avance III HD 600 da Brüker, utilizando clorofórmio deuterado

como solvente e nas seguintes condições de trabalho: duração de pulso de 4,9 μ s, intervalo entre pulsos de 5 segundos e 16 varreduras. Os espectros foram referenciados ao TMS ($\delta = 0,0$ ppm) duração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solvente que apresentou melhor rendimento de extração do óleo foi a mistura etanol: tolueno (25/75) (v/v), no qual se extraiu 40% (m/m) de óleo. Esse valor pode variar de acordo com a forma de processamento do pequi, cor, tamanho, peso, tamanho da amêndoa e polpa podendo variar conforme o local de plantio, colheita, ponto de maturação e fatores ambientais (ALMEIDA et al., 1998). O óleo extraído do caroço de pequi apresentou uma constituição de 92,29% de ácidos graxos insaturados, sendo 20,12% representado pelo ácido graxo polinsaturado linoléico e 72,17% pelo ácido graxo monoinsaturado oléico e 7,71% representam a composição de ácidos graxos saturados. Pode-se observar através da comparação com a literatura, que o caroço de pequi apresenta elevados índices de acidez e de saponificação. Isto se deve aos seus sítios oxidativos que advêm das duplas ligações do AGL's que o constitui, gerando a formação de substâncias ácidas e que, consequentemente, apresentará menor eficiência de conversão na reação de transesterificação catalisada por base, além de ocasionar uma maior emulsificação entre ésteres e o glicerol, formando sabão e dificultando a separação (AMARAL, 2007). As taxas de conversão dos ésteres pelo processo convencional de produção de biodiesel foram as seguintes: 91% (Etanol) e 91% (Metanol). As taxas de conversão dos ésteres etílicos em sistema acoplado foram: Etanol (75%) e Etanol+Tolueno (67%).

CONCLUSÃO

A produção de biocombustíveis ainda encontra barreiras, dentre elas a viabilidade técnica e econômica. Vale ressaltar que com este trabalho foi possível demonstrar que a utilização de resíduos derivados de óleos e gorduras vegetais para a produção de biocombustíveis é possível, porém requer investimento e capacitação de mão-de-obra para operar a nova planta proposta e análises relacionadas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. P.; PROENÇA, C. E. B.; SANO, S. M.; RIBEIRO, J. F. Cerrado: espécies vegetais úteis. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1998b. 464p. Brasília.

AMARAL, Fabiano Pereira do. Estudo das características físico-químicas dos óleos da amêndoa e polpa da macaúba [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart. 2007. xiii, 52 f. Dissertação (mestrado)- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2007.

ANEXOS D

Notas Fiscais dos Resíduos

 <p>COOP MISTA DOS AGRIC FAM EXTR PESC Rodovia BR 153 KM 4, 4, QD AREA GM A CASA 5 - CHACARA RETIRO Goiania - GO CEP: 74.675-090 - PONE: (62) 3202-7515</p>	<p>DANFE Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica</p> <p>0 - ENTRADA 1 - SAÍDA</p> <p>Nº 6365 SÉRIE 1 FOLHA 1/1</p>	
	<p>CHAVE DE ACESSO 5113 1005 5731 5800 0174 5500 1000 0063 6514 8263 4519</p> <p>CONSULTA DE AUTENTICIDADE NO PORTAL NACIONAL DA NF-E WWW.NFE.FAZENDA.GOV.BR/PORTAL OU NO SITE DA SEFAZ AUTORIZADORA</p>	
<p>NATUREZA DA OPERAÇÃO Remessa de amostra grátis</p> <p>CPT (Código de Regime Tributário) 3 - Regime Normal</p>	<p>INSCRIÇÃO ESTADUAL 103599142</p>	<p>PROT. DE AUTORIZAÇÃO 152130375288873 11/10/2013 16:33:30</p> <p>DISC. ESTADUAL SUBST. TRIBUTARIA 05.573.158/0001-74</p>

<p>DESTINATÁRIO/REMETENTE NOME / RAZÃO SOCIAL NADIA LAVES VIANA</p>		<p>CNPJ 008.012.681-25</p>	<p>DATA DE EMISSÃO 11/10/2013</p>
<p>ENDEREÇO ONM SN, CONJUNTO CASA</p>		<p>BARRIO CEILANDIA NORTE</p>	<p>DATA DE ENTRADA/SAÍDA</p>
<p>MUNICÍPIO Brasília</p>	<p>UF PAIS DF Brasil</p>	<p>CEP 72.231-204</p>	<p>HORA DE ENTRADA/SAÍDA</p>

NÚMERO	VENCIMENTO	VALOR	NÚMERO	VENCIMENTO	VALOR	NÚMERO	VENCIMENTO	VALOR

BASE DE CÁLCULO DO ICMS	0,00	VALOR DO ICMS	0,00	BASE DE CÁLCULO DO ICMS DE SUBSTITUIÇÃO	0,00	VALOR DO ICMS DE SUBSTITUIÇÃO	0,00	VALOR TOTAL DOS PRODUTOS	118,20
VALOR DO FRETE	0,00	VALOR DO SEGURO	0,00	DESCONTO	0,00	OUTRAS DESPESAS ACESSÓRIAS	0,00	VALOR TOTAL DO IPI	0,00
VLR APROX DOS TRIBUTOS								VALOR TOTAL DA NOTA	118,20

<p>TRANSPORTADOR/VOLUMES TRANSPORTADOS</p>		<p>RAZÃO SOCIAL</p>	<p>FRETE POR CONTA 0 - EMITENTE 1 - DESTINATÁRIO 2 - TERCEIROS 3 - SEM FRETE</p>	<p>CÓDIGO ANTT</p>	<p>PLACA DO VEÍCULO</p>	<p>UF</p>	<p>CNPJ</p>
<p>ENDEREÇO</p>		<p>MUNICÍPIO</p>		<p>UF</p>	<p>INSCRIÇÃO ESTADUAL</p>		
<p>QUANTIDADE</p>	<p>ESPÉCIE</p>	<p>MARCA</p>	<p>NUMERAÇÃO</p>	<p>0</p>	<p>PESO BRUTO</p>	<p>PESO LÍQUIDO</p>	

CÓDIGO	DESCRIÇÃO DO PRODUTO	NCM/SH	ORIGEM	CFOP	UNID	QTD	VLR UNIT	DESC	VLR TOTAL	Y TRIB	NC ICMS	VLR ICMS	VLR IPI	ALÍQUOTAS ICMS IPI
0050	BURITI KG	00	0/40	5911	KG	10,0000	0,1200		1,20					
00970	JATOPA SEMINTE KC N.Lotes - L.T. INV - Qtd: 7,70 / L.T. 11/09 - Qtd: 0,10 / L.T. 02/10 - Qtd: 2,20 /	06	0/40	5911	KG	10,0000	0,7100		7,10					
03051	PEQUI SEMINTE N.Lotes - L.T. 1211 - Qtd: 3,60 / L.T. 0402 - Qtd: 1,50 / L.T. 1703 - Qtd: 4,90 /	13079990	0/40	5911	KG	10,0000	0,0800		0,80					
01958	MACAUBA FRUTO KG	00	0/40	5911	KG	10,0000	7,0000		70,00					
00573	JATOPA CASCA KG N.Lotes - L.T. FO - Qtd: 10,00 /	00	0/40	5911	KG	10,0000	1,4100		14,10					
01006	BARU CASCA MOIDA KG	00	0/40	5911	KG	10,0000	2,5000		25,00					

<p>DADOS ADICIONAIS</p> <p>INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES AMOSTRA GRATIS Banco: Agência: Conta:</p>	<p>RESERVADO AO FISCO</p>
---	---------------------------



COOPERATIVA MISTA DOS AGRICULTORES FAMILIARES DO ESTADO DE GOIÁS
 COOP MISTA DOS AGRICULTORES FAMILIARES DO ESTADO DE GOIÁS
 RUA JOSÉ DE SOUZA, 100 - JARDIM SÃO JOSÉ - GOIÁS - GO
 CEP: 74.675-090 - FONE: (62) 3202-7515

COOP MISTA DOS AGRIC FAM EXTR PESC

Rodovia BR 153 KM 4, 4, QD AREA GM A CASA 5 -
 CHACARA RETIRO
 Goiânia - GO
 CEP: 74.675-090 - FONE: (62) 3202-7515

DANFE

Documento Auxiliar da
 Nota Fiscal Eletrônica



0 - ENTRADA
 1 - SAÍDA

1

Nº 7757
 SÉRIE 1
 FOLHA 1/1

CHAVE DE ACESSO 5214 0705 5731 5800 0174 5500 1000 0077 5716 9084 5224

CONSULTA DE AUTENTICIDADE NO PORTAL NACIONAL DA NF-E
 WWW.NFE.FAZENDA.GOV.BR/PORTAL
 OU NO SITE DA SEFAZ AUTORIZADORA

NATUREZA DA OPERAÇÃO

Remessa de amostra gratis

PROT. DE AUTORIZAÇÃO

152140432161512 07/07/2014 08:33:57

CRT (Código de Regime Tributário)
 3 - Regime Normal

INSCRIÇÃO ESTADUAL
 103599142

INSC. ESTADUAL SUBST. TRIBUTÁRIA

CNPJ
 05.573.158/0001-74

DESTINATÁRIO/REMITENTE

NOME / RAZÃO SOCIAL

NADIA LAVES VIANA

CNPISCF

008.012.681-25

DATA DE EMISSÃO

07/07/2014

ENDEREÇO

QNM, SN, CONJUNTO CASA

BARRIO

CEILANDIA NORTE

CEP

72.231-204

DATA DE ENTRADA/SAÍDA

MUNICÍPIO

Brasília

UF

DF

PAÍS

Brasil

FONE/FAK

INSCRIÇÃO ESTADUAL

HORA DE ENTRADA/SAÍDA

FATURA/DUPLICATA

NÚMERO	VENCIMENTO	VALOR	NÚMERO	VENCIMENTO	VALOR	NÚMERO	VENCIMENTO	VALOR

CÁLCULO IMPOSTO

BASE DE CÁLCULO DO ICMS	0,00	VALOR DO ICMS	0,00	BASE DE CÁLCULO DO ICMS DE SUBSTITUIÇÃO	0,00	VALOR DO ICMS DE SUBSTITUIÇÃO	0,00	VALOR TOTAL DOS PRODUTOS	15,00
VALOR DO FRETE	0,00	VALOR DO SEGURO	0,00	DESCONTO	0,00	OUTRAS DESPESAS ACESSÓRIAS	0,00	VALOR TOTAL DO IPI	0,00
								VLX APROX DOS TRIBUTOS	
								VALOR TOTAL DA NOTA	15,00

TRANSPORTADOR/VOLUMES TRANSPORTADOS

RAZÃO SOCIAL	FRETE POR CONTA 0 - REMISSOR 1 - DESTINATÁRIO 2 - SEM FRETE	CODIGO ANTT	PLACA DO VEICULO	UF	CNPJ
	0				
ENDEREÇO	MUNICÍPIO	UF	INSCRIÇÃO ESTADUAL		
QUANTIDADE	ESPÉCIE	MARCA	NUMERAÇÃO	PESO BRUTO	PESO LÍQUIDO
				0	

DADOS DO PRODUTO/SERVICOS

CÓDIGO	DESCRIÇÃO DO PRODUTO	NCM/SH	ORIG/ST	CFOP	UNID	QTDE	VLX UNIT	DESC	VLX TOTAL	VTRIB	IC ICMS	VLX ICMS	VLX IPI	ALÍQUOTAS ICMS	ALÍQUOTAS IPI
02051	PEQUI SEMENTE N.Lotes - LT: 1703 - Qtd: 50,00 /	12079990	0 / 40	6911	KG	50,0000	0,1000		5,00						
00573	JATOBA CASCA KG N.Lotes - LT: FO - Qtd: 50,00 /	00	0 / 40	6911	KG	50,0000	0,1000		5,00						
00069	BARU IN NATURA CASCA KG N.Lotes - LT: 01/10 - Qtd: 50,00 /	00	0 / 40	6911	KG	50,0000	0,1000		5,00						

DADOS ADICIONAIS

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

Banco:
 Agência:
 Conta:

RESERVADO AO FISCO