



TORREFAÇÃO DA BIOMASSA PROVENIENTE DE RESÍDUOS DO CACAU (*Theobroma cacao L.*) PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL SÓLIDO NO ESTADO DA BAHIA.

Graziele Ribeiro Santos¹; Allison Gonçalves Silva².

¹ Universidade Federal da Paraíba - graziribeiro95@hotmail.com

² Instituto Federal da Bahia – Campus Porto Seguro - allison.goncalves@yahoo.com.br

RESUMO

A busca por novas fontes de energia que provoquem um menor impacto ambiental é cada dia mais evidente e importante na contemporaneidade. Neste contexto, tem-se o uso da biomassa que é de baixo custo e possui eficiência tecnológica para ampliar o uso de energia renovável. A Bahia é o maior produtor nacional da cultura do cacau, para cada 1 tonelada de sementes são geradas aproximadamente 6 toneladas de casca de cacau in natura, que geralmente é deixada na própria plantação como adubo orgânico, porém para finalidade energética, será estudado a capacidade de reaproveitamento da casca para produção de biocombustível sólido. O resíduo de *Theobroma cacao L.* foi caracterizado por análise imediata (umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo) e poder calorífico, regidos pela norma ASTM (American Society for Testing and Materials). A torrefação, processo de conversão termoquímico, foi realizado em temperaturas de 220, 230, 240 e 250°C, este processo aumentou o poder calorífico das amostras de 17,33 MJ kg⁻¹ in natura para 22,46 MJ Kg⁻¹ a 250°C, o teor de umidade diminuiu de 15,96 % in natura para 5,88% em biomassa torreficada a 250°C, o teor de voláteis diminuiu de 94,40% para 43,39%, o teor de cinzas aumentou de 2,2% para 3,02% e o teor de carbono fixo também aumentou de 3,39% para 53,58%. Assim pode-se verificar, com base nos resultados obtidos que o resíduo de *Theobroma cacao L.*, deixados nas plantações cacauzeiras para única finalidade de adubo orgânico, também apresenta um potencial energético que pode ser aproveitado como biocombustível sólido.

Palavras-chave: Biomassa, resíduos de cacau, torrefação e biocombustível sólido.

1. INTRODUÇÃO

A cultura do cacau (*Theobroma cacao L.*, Família *Sterculiaceae*) é originária de regiões que possuem florestas pluviais da América Tropical, onde até hoje, é encontrado em estado silvestre, desde o Peru até o México. Atualmente o Estado da Bahia é o maior produtor de cacau do Brasil, cujas regiões produtoras são o Sudeste e no Recôncavo Baiano com um total de 90 municípios produtores correspondendo a 95,3 % da produção nacional. [CEPLAC, 1982]. O fruto do cacau é formado

pela casca, amêndoa e a polpa, os resíduos gerados em maiores quantidades são provenientes da casca. O tegumento das amêndoas do cacau, que é um subproduto da indústria de moagem, corresponde à testa da semente (película que envolve a amêndoa) em que é retirada para obtenção do líquido (matéria prima para a fabricação do chocolate). A polpa do cacau geralmente é utilizada para fabricação de geléia, vinho e sucos. A casca do cacau é maior geradora de resíduos, utiliza-se geralmente para a realização de sistema de compostagem, em que durante esse



processo há a liberação de extratos significativos de reaproveitamento para ser transformado em adubo orgânico que, concomitantemente, contribui para inativação do inoculo do agente causal da podridão parda *Phytophthora spp*, no cultivo do cacauzeiro, porém é uma prática pouco realizada.

Para produzir 1 tonelada de amêndoas são geradas 6 toneladas de casca do cacau fresca com cerca de 90% de umidade. [SODRÉ, 2008]

Segundo o IBGE, no ano de 2013 foram produzidas 261.788 toneladas de amêndoas do cacau, ou seja, foram produzidas no ano de 2013 aproximadamente 1.570.728 toneladas de casca de cacau fresca, uma enorme quantidade de resíduos gerados.

Nos últimos anos, com o grande avanço tecnológico e o crescente aumento da população, a atividade humana passou a causar sérios impactos ao meio ambiente, e para amenizá-los, vários países estão em busca de sustentabilidade tanto ecológica em que há a redução dos resíduos tóxicos e da poluição, reciclagem de materiais e energia, quanto da ambiental, para a conservação geográfica e equilíbrio de ecossistemas, e estão investindo em iniciativas relacionadas à produção de energias renováveis, que no cenário atual possam atuar de maneira significativa em suas matrizes energéticas, para promover um crescimento econômico de forma menos agressiva ao meio ambiente.

Por sua vez, analisando as tecnologias das fontes energéticas alternativas renováveis, já suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa, utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica, possui a flexibilidade de suprir energéticos tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes. [COUTO E MULLER, 2008].

1.1. Biomassa

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal, agrícola e rejeitos urbanos, dentre eles industriais. [ANEEL, 2008]

A energia proveniente da biomassa pode ser transformada em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos, através de processos de conversão físicos, biológicos e químicos. Neste contexto, com a larga produção do fruto do cacauzeiro na Bahia e conseqüentemente com enorme quantidade de resíduos gerados, que não é agregado tanto valor e acabam sendo de pouca utilidade, poderá ser reaproveitado para fins energéticos trazendo benefícios em relação ao melhoramento das condições socioeconômicas da região, visando a eficiência econômica viável e de forma sustentável.

Basicamente a biomassa é composta por carbono, hidrogênio e oxigênio. A presença de O₂ faz com que a biomassa requeira menos oxigênio do ar, sendo menos poluente, mas conseqüentemente sua quantidade de energia a ser liberada é reduzida, diminuindo assim o seu Poder Calorífico Superior. A celulose, hemicelulose e lignina são os principais componentes da biomassa vegetal, sendo que o teor de celulose varia de 40 a 50%, a hemicelulose de 20 a 40% e o teor de lignina de 25%, por isso a biomassa vegetal também é considerada como resíduo lignocelulósico. [VIEIRA, 2012].

1.2. Torrefação

A torrefação é um tratamento térmico da biomassa com temperaturas relativamente baixas (225 – 300°C) que produz um combustível com melhores características energéticas. Tal tratamento caracteriza-se pela ausência parcial ou completa de agentes oxidantes. [RODRIGUES, 2009].



O objetivo fundamental da torrefação é concentrar a energia da biomassa em um produto formado em curto tempo, baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, permitindo reter os voláteis de maior poder calorífico no próprio produto. Desta forma, o produto final é um sólido, denominado de biomassa torrificada, composto basicamente de celulose e lignina, caracterizada pelo aumento da fragilidade, hidrofobicidade, resistência à degradação microbiana e densidade energética. [SILVA, 2013].

2. METODOLOGIA

Para avaliar a possibilidade de utilização de determinada biomassa, neste caso, da casca do cacau, como biocombustível sólido, é necessário conhecer as propriedades físico-químicas do material e suas particularidades, e para isso são realizadas análises que a depender dos resultados mostram a possível potencialidade da biomassa que são regidas pela norma ASTM.

Os cacaus utilizados nas análises são oriundos do Sítio Histórico da Cidade Alta em Porto Seguro-Bahia, com a data de coleta 03/06/13, os experimentos foram realizados nos Laboratórios de Química Analítica, Química Orgânica, Inorgânica do IFBA- Instituto Federal da Bahia- campus Porto Seguro em parceria com a UFBA – Universidade Federal da Bahia – Salvador. Em primeiro momento foi separada a casca da semente e da polpa, sendo utilizada somente a casca, após isto foi triturada e colocada na estufa para secagem a 105°C por 24 horas. Todas as análises foram realizadas com a amostra seca.

A análise imediata de um combustível qualquer fornece as frações mássicas de umidade, de voláteis, de cinzas e de carbono fixo da amostra. Sua importância está relacionada com a classificação da biomassa e caracterização do combustível para

aplicação industrial, bem como para efeito comparativo entre alternativas energéticas. Seguem abaixo as metodologias adotadas para análise imediata do resíduo de cacau.

2.1. Análise Imediata

2.1.1 Análise do teor de materiais voláteis

O procedimento utilizado foi estabelecido pela ASTM E872-82 [1998] (*Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*). Em três cadinhos de porcelana foram pesados cerca de 1g da amostra da casca de cacau. Os cadinhos foram conduzidos para uma mufla regulada a 950°C durante 7 minutos. Os cadinhos foram então retirados da mufla, conduzidos para um dessecador para resfriar e novamente pesados. O teor de voláteis foi calculado então pela diferença entre a massa final e inicial.

2.1.2 Determinação do teor de cinzas e carbono fixo

A determinação do teor de cinzas foi realizada de acordo com a norma ASTM D1102 – 84 [1995] (*Standard Test Method for Ash in Wood*). Foram pesados cerca de 1 g de resíduo de cacau em três cadinhos de porcelana previamente tarados. Estes foram conduzidos para uma mufla pré-aquecida à 750°C, durante o período de 6 horas. Quando retirado da mufla, foi colocado em um dessecador com sílica até o resfriamento da amostra até a temperatura ambiente e então, foi novamente pesado em uma balança analítica.

O teor de carbono fixo pode ser entendido como a fração mássica da biomassa que é de fato queimada, formando CO₂ e H₂O. Ou seja, desconsidera o teor de voláteis e o resíduo que sobra após a queima.

2.2. Análise do teor de umidade



A análise do teor de umidade foi realizada aplicando a norma ASTM E871-82 [1998] (*Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*). Em três cadinhos, antecipadamente secos e tarados, foram pesados aproximadamente 1g da amostra em cada e levado a uma estufa a 110°C por 24 horas. Após o processo foram pesados novamente, em que, a umidade é quantificada pela perda de massa. [NOGUEIRA, 2007].

2.3. Poder Calorífico

A determinação do poder calorífico superior foi realizada utilizando uma bomba calorimétrica de acordo norma ASTM D-2015 [2000] (*Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter*). Um Calorímetro da IKA Works 2000 foi utilizado, usando pastilhas de 0.5 g de amostra. O poder calorífico superior também foi analisado a partir de três fórmulas empíricas com base nos teores de carbono fixo, voláteis e cinzas.

2.4. Torrefação da biomassa – Resíduo de cacau

A torrefação foi realizada através de uma mufla nas temperaturas de 220, 230, 240 e 250°C e as amostras foram mantidas por um tempo de residência de 60 minutos em um meio anaeróbio sem oxigênio para que não ocorresse a formação de cinzas, para isso utilizou-se gás hélio.



Figura 1: Sistema de Torrefação

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 01, são apresentados os resultados referentes às análises realizadas com os resíduos do cacau seco e torreficados que possibilitam avaliar a possibilidade da utilização destes resíduos como biocombustível sólido.

Tabela 1: Análise imediata nos resíduos de cacau in natura e torreficados (% m,m)

Análise	Resíduo do cacau in natura	Torreficada 220°C	Torreficada 230°C	Torreficada 240°C	Torreficada 250°C
Umidade (%)	15,96	11,04	9,59	7,97	5,88
Teor de Voláteis (%)	94,4	67,32	67,58	63,79	43,39
Teor de Cinzas (%)	2,2	1,88	2,99	2,85	3,02
Teor de Carbono Fixo (%)	3,39	30,79	29,41	33,35	53,58

O teor de umidade diminuiu conforme o aumento da temperatura no processo de torrefação, pois com a elevação da temperatura há a eliminação da hemicelulose, a qual confere a absorção de água por ligação de hidrogênio, sendo assim caso a umidade seja alta, o poder calorífico superior irá diminuir e consequentemente a eficiência da biomassa também.

O teor de voláteis diminuiu conforme a temperatura aumenta, a biomassa in natura em relação a torreficada a 250°C diminuiu de 94,4% para 43,39% próximo a metade, pois os voláteis são a parte da biomassa que evapora como gás, estes também em valores altos, maior será a facilidade de ignição, porém a quantidade de voláteis pode dificultar o controle da combustão em geral. Quando os voláteis evaporam, restam cinzas e carbono fixo.

As cinzas são resultantes do processo de combustão, de origem natural de acordo com o crescimento e



colheita da biomassa. A quantidade de cinzas difere de acordo com a biomassa utilizada, no caso do resíduo de cacau que possui alto teor de minerais como fósforo e potássio, o teor de cinzas tende a ser maior, mas um teor alto poderá alterar o desempenho do gaseificador, em equipamentos metálicos.

O teor de cinza maior que 7% já causa certos tipos de problema na combustão, o valor encontrado mais alto durante as análises foram 3,02% na biomassa torrificada a 250°C, mas houve um valor pequeno de variação em relação a *in natura* e demais temperaturas de torrefação.[VIEIRA, 2007].

O carbono fixo aumenta de acordo com a temperatura aumenta, a quantidade de carbono fixo estabelece a quantidade de calor gerado, é preferível que o carbono fixo seja alto em seu teor, pois quanto maior este percentual mais lentamente o combustível irá queimar, o seu teor é, também, de grande importância para a redução de óxidos de ferro, nos altos fornos de siderurgias. Desta forma, o resíduo torrificado em 250°C apresenta um teor consideravelmente alto em relação às outras temperaturas e *in natura*.

As análises químicas das cascas recém colhidas e secas a 70° C tem revelado teores de elementos que correspondem a 1,20 dag Kg⁻¹ de N; 1,10 dag Kg⁻¹ de P; 3,88 dag Kg⁻¹ de K; 0,52 dag Kg⁻¹ de Ca e 0,36 dag Kg⁻¹ de Mg.32.

A torrefação é um processo termoquímico que aumenta consideravelmente o poder calorífico superior da biomassa, consequentemente aumenta os teores de hidrofobicidade, resistência à degradação microbiana e densidade energética, a biomassa torrificada é composta basicamente por celulose e lignina somente. [ARAUJO, 2010].

3.1 Balanço de Massa

O balanço de massa demonstra como a temperatura final do processo tem influência no produto final, ou seja, em temperaturas mais altas há maior perda de massa, por causa do desprendimento de voláteis. O resultado do rendimento mássico dos resíduos de cacau pode ser observado através da figura abaixo.

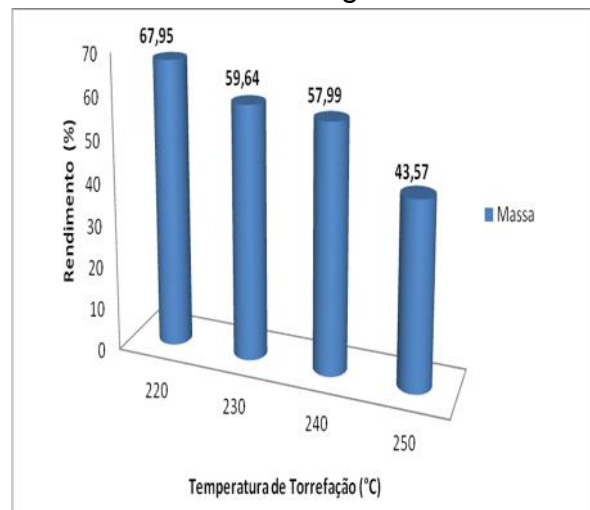


Figura 2: Rendimento Mássico obtido pela torrefação dos resíduos de cacau

O maior rendimento em sólido torrificado foi obtido à temperatura de 220°C, correspondendo a 67,95%. Em contraste, a uma temperatura de 250°C foi obtido 43,57%, conforme o esperado, já que a redução da fração mássica da biomassa torrificada ocorre pela influência de temperatura, e a degradação da hemicelulose, perdendo assim também parte da água presente na parede celular da biomassa.

3.2 Poder Calorífico Superior

O poder calorífico superior, foi realizado a partir de fórmulas empíricas para as amostras torrificadas e com uma bomba calorimétrica para a amostra *in natura*.

De acordo com o resultado a partir da bomba calorimétrica, o resíduo *in natura* obteve um PCS equivalente a 16,88 MJ Kg⁻¹.



Segue abaixo nas Figuras 3, 4 e 5 o resultado do poder calorífico superior a partir das fórmulas empíricas com base nos teores de Carbono Fixo e Voláteis, Carbono Fixo e Cinzas, respectivamente.

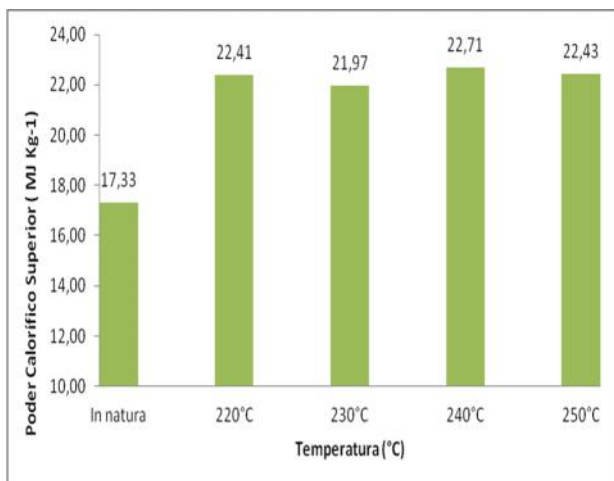


Figura 3: Influência da Temperatura no Poder Calorífico Superior com base nos teores de Carbono Fixo e Voláteis

Pode ser observado que houve um aumento do PCS de acordo com o aumento da temperatura, já que na amostra da biomassa *in natura* correspondeu a um índice de 17,33 MJ Kg⁻¹, em relação a 240°C que obteve a 22,71 MJ Kg⁻¹. Com a torrefação os resultados a partir da temperatura de 220°C até 250°C não variaram muito, porém a temperatura de torrefação com um PCS maior foi de 240°C.

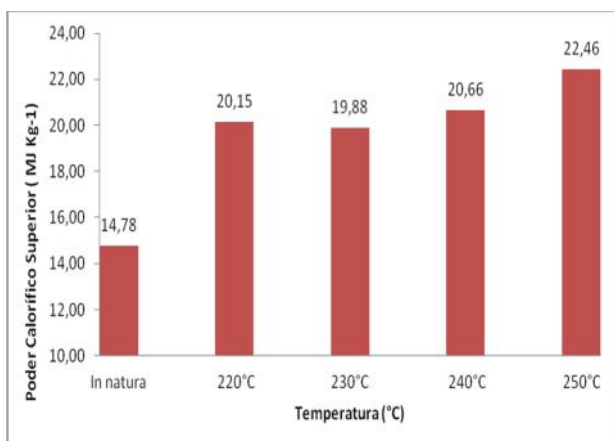


Figura 4: Influência da Temperatura no Poder Calorífico Superior com base no teor de Carbono Fixo

Já na Figura 4, com base somente no carbono fixo, o PCS da biomassa *in natura* diminuiu correspondendo a 14,78 MJ Kg⁻¹, enquanto nas temperaturas de torrefação em 220, 230 e 240°C diminuiu em relação ao gráfico anterior, porém a biomassa torreficada a 250°C correspondeu a 22,46 MJ Kg⁻¹ sendo um poder calorífico maior do que as temperaturas anteriores, porém permaneceu um valor próximo ao gráfico com base no carbono fixo e volátil.

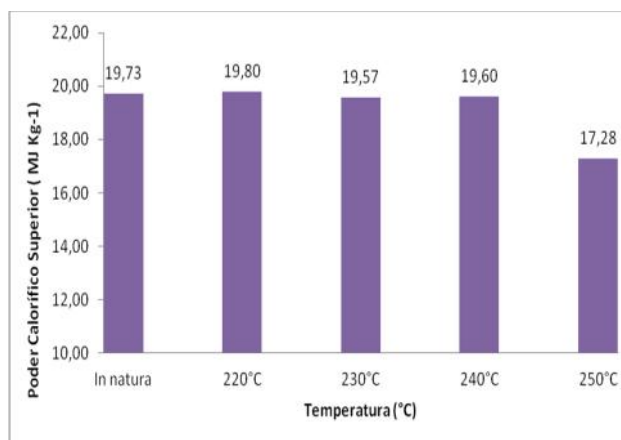


Figura 5: Influência da Temperatura no Poder Calorífico Superior com base no teor de Cinzas

Na Figura 5, mostra o PCS através do teor de cinzas, podendo ser observado que a biomassa *in natura* correspondeu a 19,73 MJ Kg⁻¹, um valor bem próximo às demais temperaturas, com um índice até superior a temperatura de 250°C, com 17,28 MJ Kg⁻¹. Porém os valores de PCS através do teor de cinza ficaram abaixo dos valores em relação aos gráficos correspondentes as outras duas fórmulas empíricas. Sendo assim, estes resultados com base no teor de cinzas, podem ter uma maior margem de erro do que os outros 2 gráficos já que com a torrefação nas temperaturas de 230, 240 e 250°C não aumentou o poder calorífico superior.

3.3 Rendimento Energético



O rendimento energético assim como o mássico tende a diminuir com o aumento da temperatura.

Sabe-se que a torrefação de biomassa inicia-se numa faixa de temperatura entre 160 e 200°C para hemicelulose e 240 a 400°C para a celulose e a partir destes ocorre liberação de produtos de decomposição como CO, CO₂ e H₂O, indicando em grande parte que a presença da hemicelulose e água na biomassa diminui o poder calorífico. [ARAUJO, 2010].

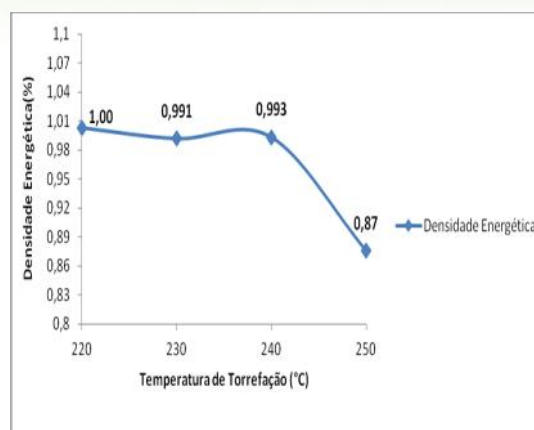


Figura 7: Influência da temperatura de torrefação da biomassa na densidade energética com base no teor de cinzas

A densidade energética com base no teor de cinzas, diminuiu de acordo com a elevação da temperatura em que 220°C correspondeu a 1% e à 250°C com 0,87%, em 230 e 240°C permaneceu valores próximos com 0,99%, logo os resultados a partir do teor de cinza, obteve um bom resultado em relação a densidade energética com a diminuição ao longo do acréscimo de temperatura.

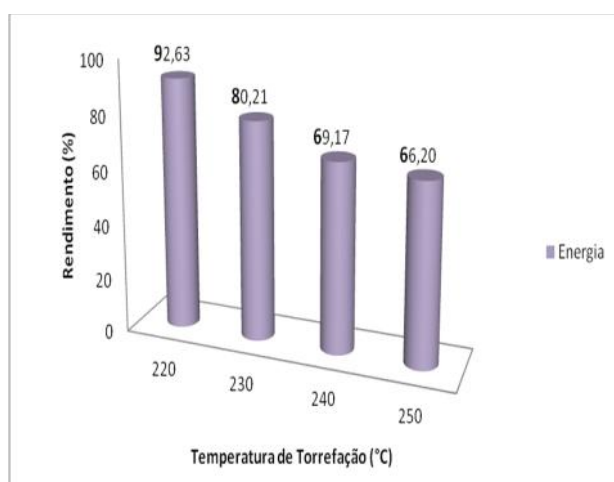


Figura 6. Influência da temperatura de torrefação da biomassa no rendimento energético com base no teor de carbono fixo.

O rendimento energético (Figura 6), com base no teor de carbono fixo diminuiu, em que 220°C obteve 92,63% e em 250°C com uma temperatura elevada obteve o menor índice com 66,20%, conforme o esperado.

3.4 Densidade Energética

A relação entre os rendimentos mássico e energético é definida como densidade energética, e facilita o entendimento da influência da temperatura de torrefação na produção do biocombustível.



Figura 8: Resíduo do cacau *in natura* e torreficado a 220°, 230° e 240°C, respectivamente da esquerda para direita.

Conforme a Figura 8, é possível perceber a mudança de cor a partir da temperatura de 220°C, com o



escurecimento das amostras ao elevar a temperatura durante a torrefação.

A partir dos resultados obtidos de poder calorífico superior, rendimento mássico e energético e densidade energética, através das 3 fórmulas empíricas com base nos teores de carbono fixo, voláteis e cinzas, pode-se afirmar que os valores próximos esperados tanto in natura quanto na biomassa torreficada nas temperaturas de 220, 230, 240 e 250°C, foi os resultados com base nos teores de carbono fixo e voláteis, já que a correspondeu próximo ao resultado com a bomba calorimétrica na biomassa in natura e que de acordo com a elevação da temperatura o poder calorífico superior aumentou, enquanto os resultados com base no teor de cinzas não foi compatível conforme os esperado no poder calorífico superior, uma vez que com o aumento da temperatura, o PCS diminuiu, obtendo bom resultado em relação a densidade energética que diminuiu conforme a elevação de temperatura durante a torrefação.

4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados e discutidos neste trabalho indicam que o aproveitamento dos resíduos de *Theobroma cacao L.* para fins energéticos é viável, conforme pontuado a seguir:

- A torrefação do resíduo de cacau na faixa de 220 e 250°C, leva ao aumento do poder calorífico superior e diminuição do teor de umidade e da densidade energética, com base nos teores de cinzas.

- O conjunto das propriedades físico-químicas, térmicas, energéticas aponta para a produção de um biocombustível de qualidade a uma temperatura de 250°C, com bons índices de umidade, voláteis, carbono fixo, poder calorífico superior e densidade energética.

- Entre a biomassa in natura e torreficada, a torreficada é mais adequada

ao processo de produção de energia, devido a maior quantidade de calor gerado, mesmo obtendo um rendimento energético e mássico menor.

- Pela análise dos resultados obtidos com os experimentos, evidenciou-se o potencial da utilização dos resíduos de *Theobroma cacao L.* para produção de biocombustível sólido reaproveitando-o para fins energéticos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livro:

CEPLAC, Cacau. **Ano 25. Desenvolvimento e Participação. (Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira).** Brasília, 1982.

COUTO, L.; MULLER, M. D. **Biomassa para energia.** In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. São Paulo. Editora da Unicamp, 2008.

Artigo de periódico:

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil, fontes renováveis – biomassa.** 2008

ASTM D1102 – 84: **Standard Test Method for Ash in Wood.** United States, 1995.

ASTM E 871-82: **Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels.** United States, 1998.

ASTM D-2015: **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter.** United States, 2000.

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola.** Brasil, 2013.

NOGUEIRA, M. F. M. **Biomassa Energética: Caracterização da biomassa.** Florianópolis – SC, 2007.



SODRÉ, G. A. **Resíduos regionais usados como substratos na região sul da Bahia.** 2008.

Tese/dissertação:

RODRIGUES, T.O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos.** 2009, 71p. Dissertação de Mestrado, Publicação PPGEFL. DM-109/Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília. Brasília-DF.

SILVA, A. G. **Condicionamento de resíduo de *Eucalyptus grandis* para produção de biocombustível sólido.** 2013, 135p. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia. Instituto de Química. Salvador-BA.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia.** 2012, 56p. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Cascavel-PR.