



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA



ANÁLISE DA TORREFAÇÃO DE PELETES DE CASCA DE AMENDOIM

FELIPE BORGES GOMES

Dourados – MS

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

ANÁLISE DA TORREFAÇÃO DE PELETES DE CASCA DE AMENDOIM

FELIPE BORGES GOMES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Grande Dourados, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Dourados – MS

2022

ANÁLISE DA TORREFAÇÃO DE PELETES DE CASCA DE AMENDOIM

Por

Felipe Borges Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Energia

Aprovado em: 04 de novembro de 2022.

Banca Examinadora

Orientador: ANTONIO CARLOS
CAETANO DE SOUZA

Assinatura:



Membro: OMAR SEYE

Assinatura:



Membro: RAMÓN EDUARDO
PEREIRA DA SILVA

Assinatura:



Prof. Ramon Eduardo Pereira da Silva, PhD
Aeronautics, Propulsion and Energy
Aerospace and Mechanical Engineering

RESUMO

Os Peletes são combustíveis granulados industrializados de alta densidade, comparado à biomassa *in natura*, na qual apresentam um caráter renovável. Apesar disto, a biomassa possui baixo conteúdo energético, comparado ao combustível fóssil, sendo essa característica um fator limitante ao seu uso como combustível. Com o propósito de melhorar esse aspecto, é necessário a aplicação de processos termoquímicos, tais como a torrefação, para aumentar o conteúdo energético dos peletes. Diante disso, essa pesquisa tem como objetivo realizar a torrefação de peletes de casca de amendoim e verificar se houve melhoria das características das amostras de casca de amendoim, como o poder calorífico superior, bem como identificar quais condições do tratamento térmico são as mais ideais. A torrefação ocorreu na faixa de temperatura de 250,275 e 300°C e tempo de residência de 20 e 60 minutos, sendo avaliados seus principais efeitos nas propriedades energéticas e químicas das amostras analisadas. Com o aumento do tempo e temperatura de torrefação dos peletes, houve diminuição do rendimento gravimétrico, chegando a 43,14%, e da higroscopicidade, atingindo valor mínimo de 0,65% de umidade presente nos peletes. Adicionalmente, houve aumento do poder calorífico, atingindo 43% de aumento em relação ao valor de referência. Conclui-se que o processo de torrefação se mostrou eficiente no aumento do conteúdo energético dos peletes torrados, comparados ao peletes originais.

Palavras-chave: Casca de Amendoim, Densidade Energética; Energia da Biomassa; Poder Calorífico; Peletes; Torrefação.

ABSTRACT

Pellets are high-density industrialized granulated fuels, compared to in natura biomass, in which they have a renewable character. Despite this, biomass has a low energy content, compared to fossil fuel, and this characteristic is a limiting factor to its use as a fuel. In order to improve this aspect, it is necessary to apply thermochemical processes, such as torrefaction, to increase the energy content of the pellets. Therefore, this research aims to carry out the torrefaction of peanut husk pellets and verify if there was an improvement in the characteristics of the peanut husk samples, such as the higher calorific value, as well as identify which heat treatment conditions are the most ideal. The torrefaction took place in the temperature range of 250, 275 and 300°C and residence time of 20 and 60 minutes, and its main effects on the energetic and chemical properties of the analyzed samples were evaluated. As the pellet torrefaction time and temperature increased, there was a decrease in gravimetric yield, reaching 43.14%, and in hygroscopicity, reaching a minimum value of 0.65% of moisture present in the pellets. Additionally, there was an increase in calorific value, reaching a 43% increase in relation to the reference value. It was concluded that the torrefaction process was efficient in increasing the energy content of the torrefied pellets, compared to the original pellets.

Keywords: Peanut Husk; Energy Density; Biomass Energy; Heat Value; Pellets; Torrefaction.

ANÁLISE DA TORREFAÇÃO DE PELETES DE CASCA DE AMENDOIM

Felipe Borges Gomes

Universidade Federal da Grande

Dourados – UFGD

E-mail: felipeborgesgomes@hotmail.com

Resumo

Os Peletes são combustíveis granulados industrializados de alta densidade, comparado à biomassa *in natura*, na qual apresentam um caráter renovável. Apesar disto, a biomassa possui baixo conteúdo energético, comparado ao combustível fóssil, sendo essa característica um fator limitante ao seu uso como combustível. Com o propósito de melhorar esse aspecto, é necessário a aplicação de processos termoquímicos, tais como a torrefação, para aumentar o conteúdo energético dos peletes. Diante disso, essa pesquisa tem como objetivo realizar a torrefação de peletes de casca de amendoim e verificar se houve melhoria das características das amostras de casca de amendoim, como o poder calorífico superior, bem como identificar quais condições do tratamento térmico são as mais ideais. A torrefação ocorreu na faixa de temperatura de 250,275 e 300°C e tempo de residência de 20 e 60 minutos, sendo

avaliados seus principais efeitos nas propriedades energéticas e químicas das amostras analisadas. Com o aumento do tempo e temperatura de torrefação dos peletes, houve diminuição do rendimento gravimétrico, chegando a 43,14%, e da higroscopicidade, atingindo valor mínimo de 0,65% de umidade presente nos peletes. Adicionalmente, houve aumento do poder calorífico, atingindo 43% de aumento em relação ao valor de referência. Conclui-se que o processo de torrefação se mostrou eficiente no aumento do conteúdo energético dos peletes torrados, comparados ao peletes originais.

Palavras-chave: Casca de Amendoim, Densidade Energética; Energia da Biomassa; Poder Calorífico; Peletes; Torrefação.

Abstract

Pellets are high-density industrialized granulated fuels, compared to *in natura* biomass, in which they have a renewable character. Despite this, biomass has a low energy content, compared to fossil fuel, and this characteristic is a limiting factor to its use as a fuel. In order to improve this aspect, it is necessary to apply thermochemical processes, such as torrefaction, to increase the energy content of the pellets. Therefore, this research aims to carry out the torrefaction of peanut husk pellets and

verify if there was an improvement in the characteristics of the peanut husk samples, such as the higher calorific value, as well as identify which heat treatment conditions are the most ideal. The torrefaction took place in the temperature range of 250,275 and 300°C and residence time of 20 and 60 minutes, and its main effects on the energetic and chemical properties of the analyzed samples were evaluated. As the pellet torrefaction time and temperature increased, there was a decrease in gravimetric yield, reaching 43.14%, and in hygroscopicity, reaching a minimum value of 0.65% of moisture present in the pellets. Additionally, there was an increase in calorific value, reaching a 43% increase in relation to the reference value. It was concluded that the torrefaction process was efficient in increasing the energy content of the torrefied pellets, compared to the original pellets.

Keywords: Peanut Husk; Energy Density; Biomass Energy; Heat Value; Pellets; Torrefaction.

1. INTRODUÇÃO

Um dos fundamentos da sustentabilidade econômica de um país, que visa alcançar o desenvolvimento sustentável, é a sua capacidade de prover logística e energia para o desenvolvimento

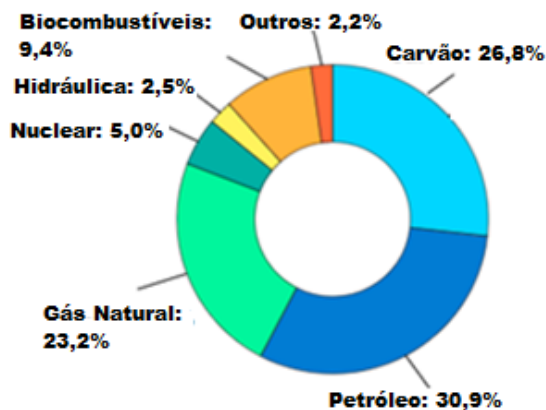
de sua produção, com segurança e em condições competitivas e ambientalmente sustentáveis (TOLMASQUIM, 2012). O mundo atual depende, para o seu funcionamento, do abastecimento de vetores energéticos modernos que são: carvão mineral, petróleo, gás natural, energia nuclear e hidroeletricidade. Os quatro primeiros são as principais fontes energéticas primárias, porém não são renováveis e dispõem de reservas finitas, uma vez que a reposição na natureza é muito lenta. O quinto, que é renovável, se encontra em quantidade limitada e se concentra em apenas alguns países (BARROS, CARASCHI e VENTORIM, 2007).

As fontes de energias renováveis demonstram poder sustentar a economia mundial de várias maneiras. Entretanto os altos custos (comparado às tecnologias concorrentes e consolidadas, além dos preços oscilantes e não competitivos entre os tipos de energias renováveis e fósseis), a baixa eficiência (por exemplo, os painéis solares em sistemas fotovoltaicos e os geradores eólicos, ambos afetados pela intermitência de suas respectivas fontes) e a falta de políticas públicas em alguns países (com incentivos fiscais que impulsionem as pesquisas e o desenvolvimento das fontes renováveis, a fim de baratear a energia e diversificar a matriz energética), vêm

dificultando a transição energética global e gerando um cenário de incertezas futuras (PAGEL, CAMPOS e CAROLINO, 2018).

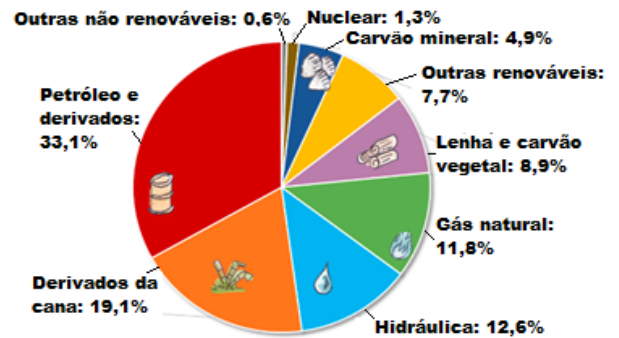
A matriz energética brasileira possui uma participação significativa de fontes energéticas renováveis, o que contrasta com a matriz energética mundial, cujas principais fontes são os combustíveis fósseis. A participação dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial, indicada na figura 1, é de 30,9% para petróleo, 26,8% para carvão mineral, 23,2% de gás natural e 5% de energia nuclear, o que representa mais de 85% de fontes não renováveis (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021). Na contramão desse cenário, destaca-se a matriz energética brasileira com mais de 48% de fontes renováveis, sendo 19,1% biomassa de cana, 12,6% hidráulica e 8,9% lenha e carvão vegetal, conforme apresenta a figura 2. (EPE, 2021).

Figura 1 – Matriz Energética Mundial



Fonte: IEA, 2021

Figura 2 – Matriz Energética Brasileira



Fonte: EPE, 2021

As fontes de energias não renováveis, como os combustíveis fósseis, por possuírem um alto teor de carbono propiciam uma elevada liberação de dióxido de carbono em sua queima, causando um forte impacto ambiental por contribuir com o efeito estufa. Diferentemente, os combustíveis renováveis, a base de biomassa, são constituídos por carbono orgânico fixado por meio da reação de fotossíntese e não contribuem para o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera. Nesse cenário, destaca-se a lenha, que é uma fonte renovável e menos poluente que os combustíveis fósseis, uma vez que o CO₂ liberado na queima foi inicialmente estocado na produção de madeira pela árvore. (SOUZA; VALE, 2016).

Embora o uso da biomassa como combustível gere um efeito positivo no meio ambiente, a biomassa apresenta um poder calorífico, três vezes menor que os combustíveis fósseis. Desta forma,

processos que aumentem a quantidade de material lenhoso por unidade de volume, por meio da peletização, bem como processos térmicos por meio da torrefação que aumentem o poder calorífico da biomassa, promovem a formação de combustíveis de melhor qualidade para o mercado consumidor. (MOLINARI, 2017).

A peletização é o processo onde a biomassa é transformada por uma sequência de diferentes processos térmicos e mecânicos em biomassa densificada em formatos geralmente cilíndricos (GILBERT *et al*, 2009). O principal processo térmico é a secagem que, em geral, reduz a umidade da biomassa de 15% para 8% (SULTANA; KUMAR; HARFIELD, 2010). Para biomassa lenhosa, o alto teor de lignina é suficiente para manter a aderência dos peletes; entretanto para biomassas palhosas são necessários outros processos térmicos para condicionamento adequado da biomassa e, às vezes, adição de substâncias ligantes, como parafina, resina sintética e melaço de cana em pó, para encontrar o correto ponto de aglutinamento. A peletização aumenta a densidade de cerca de 150kg/m^3 para aproximadamente 600kg/m^3 (GILBERT *et al* 2009). Os peletes devem possuir tamanho de 3 a 10 milímetros de diâmetro, pois uma produção de peletes inferiores a esse tamanho podem levar a grandes perdas de finos e da

característica fibrosa da biomassa (SULTANA; KUMAR; HARFIELD, 2010). Outras duas propriedades importantes dos peletes são a durabilidade e a umidade (GILBERT *et al*, 2009). Essas propriedades dependem diretamente das variáveis de processo, que são: a qualidade da biomassa, medida pela composição e umidade da biomassa; as características da planta de peletização, ou a sequência de processos, tipos de moagem, tipos de prensa e tipos de aglutinantes utilizados; e as condições operacionais da planta, temperaturas e pressões de operação (GILBERT *et al* 2009; SULTANA; KUMAR; HARFIELD, 2010). Adicionalmente, o manuseio dos peletes é facilitado por sua capacidade de escoamento, favorecendo a sua aplicação em processos de automatização industrial, além de serem usados para geração de energia térmica em sistemas industriais de aquecimento e em fornalhas de caldeiras das termelétricas para geração de energia elétrica (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2013).

Os peletes podem ser submetidos ao tratamento térmico de pirólise branda denominada torrefação, gerando um combustível de maior densidade energética e de menor umidade. O tratamento térmico de torrefação consiste em submeter à biomassa, no caso dos peletes, em faixas de

temperaturas que variam de 200 a 300°C, em tempos variados, gerando um combustível com poder calorífico entre a lenha *in natura* (16.000 kJ/kg) e o carvão vegetal (30.000 kJ/kg), (NUNES; MATIAS; CATALÃO, 2014).

Sob condições de torrefação é degradada, principalmente a hemicelulose, que consiste em uma fração hidrofílica da biomassa cuja degradação térmica promove diminuição da higroscopicidade dos peletes torrados. Conseqüentemente, a biomassa higroscópica tende a ser hidrofóbica após a torrefação e o teor de umidade (U) na biomassa é reduzido significativamente (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

Nesse processo de redução de hemiceluloses, resulta adicionalmente em um combustível de propriedade energéticas intermediário entre a biomassa e o carvão vegetal, com maior poder calorífico (CHEN; PENG; BIN, 2015).

A torrefação permite concentrar a energia da biomassa em um produto formado em curto tempo (comparado à pirólise e à carbonização do carvão vegetal) baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, permitindo reter os componentes de maior poder calorífico no produto (FELFLI *et al*, 2011). As alterações após o processo de torrefação são indicadas na figura 3.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo realizar o processo de torrefação em peletes de casca de amendoim e analisar se o tratamento térmico produz combustíveis de maior potencial energético em relação aos peletes *in natura* (peletes comerciais como recebidos), além de comparar as composições elementar e imediata para verificar a influência nas demais características.

Figura 3 – Alteração da coloração conforme aumento da temperatura na torrefação



2. METODOLOGIA

2.1. MÉTODO EXPERIMENTAL

Neste estudo foram utilizados peletes comerciais obtidos (figura 4) a partir de resíduos de casca de amendoim, indicados na figura 5.

Figura 4 – Peletes comerciais (*in natura*)



Fonte: Autor próprio

Figura 5 – Casca de Amendoim



Fonte: Portal Vida Livre, 2021

Os peletes foram submetidos a ensaios de torrefação em um forno tipo mufla. Inicialmente as amostras *in natura* foram colocadas em uma estufa a 105°C, num período mínimo de 2 horas, para que fosse removida a umidade presente no material. Posteriormente, colocou-se em média 45 gramas de peletes *in natura* em cadinhos (100 ml) com tampas na mufla para o processo térmico. O processo de torrefação dos peletes ocorreu para uma combinação de 3 x 2 experimentos (temperaturas de 250, 275 e 300°C; tempo de residência de 20 e 60 minutos).

A característica hidrofóbica dos peletes após a torrefação e o comportamento do teor de umidade (U) foram determinados usando-se um dessecador (figura 6). O teor de umidade (U) é definida como a proporção de massa da amostra antes da secagem e a massa da amostra após processo de secagem.

Figura 6 – Amostras nos dessecadores



Fonte: Autor próprio

Para determinação da densidade a granel após a torrefação, utilizou-se a metodologia estabelecida pela norma NBR 6922, para carvão vegetal. Promoveu-se uma adaptação da norma, utilizando-se cadinhos de porcelana com volume conhecido de 100ml, que foi preenchido até a borda com peletes. Para as medições de massa foi utilizada uma balança analítica com precisão de 0,001 g.

2.2. ANÁLISE IMEDIATA

Para a análise imediata das amostras torradas e *in natura*, foram utilizados como referências os procedimentos e metodologia apropriados para resíduos de biomassa, conforme as seguintes normas para ensaio do Comitê Europeu de Normalização (CEN). Para a análise imediata foram consideradas as seguintes normas:

- CEN/TS 14774-1:2004 (*Methods for Determination of Moisture Content*);
- CEN/TS 15148:2005 (*Solid Biofuels-Method for the Determination of the Content of Volatile Matter*);
- CEN/TS 14775:2004 (*Method for the Determination of Ash Content*)

Todas as análises foram feitas com 5 amostras para se obter melhores resultados. A determinação do teor de carbono fixo foi calculada por diferença, relacionando o teor de voláteis e cinzas.

2.2.1. Determinação de Umidade

O teor de umidade representa a quantidade de água presente na biomassa. A análise do teor de umidade (U) é realizada por diferença de massa entre a biomassa *in natura*, antes de ser submetida a secagem na estufa e após ser inserida na estufa. O procedimento consiste em colocar uma amostra de biomassa úmida (1,0g) em um cadinho calcinado e de peso conhecido, pesar o cadinho com amostra, anotar o valor, inserir o conjunto na estufa a 105 °C e realizar a pesagem do conjunto após 2h. A umidade em porcentagem é obtida através da equação 1, calculada na base úmida.

$$U(\%) = \frac{m_2 - (m_3 - m_1)}{m_2} * 100 \quad (1)$$

Sendo m_1 a massa do cadinho vazio; m_2 a massa da amostra úmida; m_3 a massa do cadinho vazio mais amostra depois da estufa e (U) representa o resultado da umidade em porcentagem mássica da amostra original.

2.2.2. Determinação do teor de matéria volátil

O teor de material volátil representa a parte da biomassa que volatiliza a temperaturas altas. Semelhante à análise do teor de umidade, a determinação da quantidade de matéria volátil é realizada por diferença de massa entre a massa antes de entrar na mufla (m_i) (descontando-se o percentual de umidade) e após aquecida por 7 minutos dentro da mufla (m_f), que se encontra a 900°C. Durante esse processo, é interessante notar que a amostra permanece dentro de um cadinho tampado, portanto, não entra em contato direto com o ambiente da mufla. Este procedimento segue a norma CEN/TS 15148:2005. O teor de material volátil (VM) é determinado a partir da equação 2, considerando-se que o resultado é obtido em base seca.

$$VM(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (2)$$

2.2.3. Determinação do teor de cinzas

O teor de cinzas representa a massa da biomassa que não sofre combustão, ou seja, sua composição é de caráter inorgânico. A determinação do teor de cinzas (CZ) é realizada avaliando a quantidade de material residual no cadinho (m_r), após a amostra de 1g ser aquecida por

4 horas na mufla em uma temperatura de 550°C. A equação 3 apresenta o cálculo do teor de cinzas em base seca, conforme a norma CEN/TS 14775:2004.

$$CZ(\%) = \frac{m_r}{m_i} * 100 \quad (3)$$

2.2.4. Determinação do teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo representa a porcentagem da biomassa após a retirada das cinzas e do material volátil. A determinação do teor de carbono fixo é realizada pela diferença entre os teores de material volátil e cinzas. A equação 4 apresenta o cálculo do teor de carbono fixo em base seca.

$$CF(\%) = 100 - VM(\%) - CZ(\%) \quad (4)$$

2.2.5. Rendimento gravimétrico da torrefação

O tratamento térmico de torrefação foi avaliado inicialmente por meio do rendimento gravimétrico (R_g) conforme a equação 5, onde (m_t) é a massa seca dos pellets, em gramas, após torrefação, e o (m_i) é a massa seca dos peletes antes do processo de torrefação.

$$R_g(\%) = \frac{m_t}{m_i} * 100 \quad (5)$$

2.2.6. Densidade a granel

Para determinação da densidade a granel (DG) após a torrefação, utilizou-se a metodologia estabelecida pela norma NBR 6922, para carvão vegetal. Promoveu-se uma adaptação da norma, utilizando-se cadinhos de porcelana com volume (V) conhecido de 100ml, que foram preenchidos até a borda com peletes torrados m_t , como mostrado na equação 6.

$$DG(kg/m^3) = \frac{m_t}{V} \quad (6)$$

2.2.7. Densidade energética

Segundo Souza e Vale (2016) “a densidade energética (DE) é uma das principais propriedades que definem a qualidade da biomassa, pois resume as características químicas, as condições de umidade e a quantidade de calor do produto em uma única variável”, indicada na equação 7:

$$DE \left(\frac{MJ}{m^3} \right) = PCS * DG \quad (7)$$

2.3. ANÁLISE ELEMENTAR

A análise elementar fornece os percentuais mássicos dos elementos carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), contidos nas amostras de biomassa. Para a análise elementar foram utilizadas as normas:

- ASTM E777 (*Standard Test Methods for Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel*);
- ASTM E778 (*Standard Test Methods for Nitrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel*);
- ASTM E870 (*Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels*).

O valor de porcentagem de oxigênio é calculado pela diferença, como mostrado na equação abaixo:

$$O = 100 - (C + H + N) \quad (8)$$

A determinação experimental foi realizada no laboratório do Instituto SENAI de Inovação – Biomassa em Três Lagoas/MS, em um analisador elementar CHN/O FlashSmart da Thermo Fisher Scientific com um ciclo de análise de 720 s.

2.4. PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

O PCS é uma propriedade intrínseca do material que informa a quantidade de energia que está contida naquela matéria. Nesse estudo, o poder calorífico superior foi obtido utilizando a

bomba calorimétrica IKA modelo C200, conforme figura 7.

Figura 7 – Bomba Calorimétrica C200



Fonte: IKA, 2022

A preparação da amostra consiste em inserir uma quantidade de 0,5g de amostra seca em um cadinho metálico que é colocado em um ambiente rico em oxigênio, dentro de um invólucro de metal. Este invólucro de metal é, por sua vez, inserido em um recipiente com água que possui sua temperatura monitorada. O material é ignitado por um sistema de eletrodo com um pavio ligado à biomassa dentro do cadinho. Após a ignição, o material entra em combustão e o ambiente rico em oxigênio faz com que a queima do material seja completa. O calor liberado durante a combustão do material é transferido para o banho e quantificado pela diferença de temperatura da água, conforme a equação 9.

$$Q_r = m(H_2O) \times C \times (T_f - T_i) \quad (9)$$

No qual (Q_r) é o calor de reação; $m(H_2O)$ é a massa de água; C é calor específico da água; (T_f) é a temperatura final da água; (T_i) é a temperatura inicial da água.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 8 é apresentado o resultado da torrefação dos peletes. Observa-se uma variação gradual na coloração, com escurecimento mais acentuado nas condições de maiores tempo e temperatura de torrefação (ESTEVES *et al*, 2007). A aplicação do calor nos peletes promove dois tipos de efeitos:

- Desidratação até a temperatura de 100°C;
- Despolimerização das hemiceluloses, com liberação de voláteis, da temperatura de 200 a 300°C.

Os processos de desidratação e despolimerização dos peletes se acentuam em temperaturas em torno de 250°C, seguido do escurecimento dos peletes, como é indicado na figura abaixo.

Figura 8 – Amostras torradas de peletes de casca de amendoim



Fonte: Autor próprio

3.1. TEOR DE UMIDADE

A primeira etapa consiste em secar a biomassa antes de ser realizado o processo de torrefação, de modo que a umidade presente não atrapalhe o aquecimento do material e não interfira em suas propriedades. O teor de umidade (U) do material foi determinado para as amostras *in natura* e após o processo de torrefação, indicados na tabela 1. O processo de secagem foi realizado a uma temperatura de 105°C com tempo de residência de 2 horas.

Tabela 1 – Teor de umidade de equilíbrio

Amostras	U (%)
<i>in natura</i>	6,87 ± 0,35
250°C / 20 min	2,13 ± 0,41
275°C / 20 min	1,64 ± 0,13
300°C / 20 min	1,40 ± 0,79
250°C / 60 min	1,02 ± 0,38
275°C / 60 min	0,68 ± 0,35
300°C / 60 min	0,65 ± 0,43

Fonte: Autor próprio

O teor de umidade é usado em relação a um material higroscópico, como a biomassa, e os menores valores examinados significam a menor absorção de água (ESTEVES *et al*, 2007). Esse teor dos peletes torreficados é diminuído com o aumento da temperatura da torrefação e está na faixa de 0,65-2,13%, para 300°C/60 minutos e 250°C/20 minutos, respectivamente. Para a condição sem torrefação, os peletes possuem 6,87% de umidade presente em sua composição.

Pode-se notar que, conforme houve o aumento da temperatura, o teor de umidade diminuiu. Isso ocorreu em função da degradação da hemicelulose, que é um grupo de polissacarídeos de cadeia ramificada e atua como agente de ligação entre a celulose e a lignina. Além disso, a hemicelulose tem uma configuração irregular e ausência de cristalinidade, motivo pelo qual absorve água facilmente (KLOCK *et al*, 2005).

Com a nova configuração das estruturas, os materiais torrados se tornam mais resistentes à absorção de umidade. Dessa forma, o material pode ser preservado por mais tempo, já que não sofre tanta influência do ambiente externo.

3.2. ANÁLISE IMEDIATA

O processo de torrefação é caracterizado pela desvolatilização dos

peletes e degradação térmica de suas principais componentes. À medida que a temperatura de torrefação aumenta, o teor de voláteis do material tende a diminuir enquanto o teor de carbono fixo tende a aumentar, conforme observado na tabela 2. Porém, o aumento do carbono fixo se dá pela concentração do mesmo à medida que o material volátil é liberado da biomassa, visto que parte do carbono do material, que compõe o teor de carbono fixo, fica em sua maior parte preservado.

Tabela 2 – Análise imediata

Amostras	Voláteis (%)	Carbono fixo (%)	Cinzas (%)
<i>in natura</i>	78,74	18,69	2,57
250°C / 20 min	74,86	19,13	6,01
275°C / 20 min	74,57	19,18	6,25
300°C / 20 min	73,63	23,65	2,72
250°C / 60 min	67,06	28,24	4,70
275°C / 60 min	57,86	35,78	6,36
300°C / 60 min	46,84	46,76	6,40

Fonte: Autor próprio

Na medida em que aumenta a temperatura de torrefação, as características dos peletes tendem a se aproximar do material carbonizado, principalmente acima de 270°C quando o material entra em sua fase exotérmica. Os materiais torrados acima de 250°C e 60 minutos apresentaram teores de voláteis 10% menores em relação ao material *in natura*, enquanto os materiais submetidos à temperatura de 300°C e 60

minutos apresentaram diferenças acima dos 40% em seus teores de carbono fixo.

3.3. ANÁLISE ELEMENTAR

De modo a verificar as alterações químicas que o processo de torrefação causa nos peletes de casca de amendoim, foi realizado o procedimento de análise elementar nas amostras. A tabela 3 mostra os valores em base mássica dos elementos presentes na biomassa:

Tabela 3 – Análise elementar

Amostras	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
<i>in natura</i>	47,54	6,30	44,66	1,50
250°C / 20 min	51,8	6,21	40,50	1,54
275°C / 20 min	54,1	6,18	38,0	1,73
300°C / 20 min	57,4	6,05	34,9	1,75
250°C / 60 min	55,4	5,90	36,8	1,87
275°C / 60 min	56,3	5,74	36,2	1,79
300°C / 60 min	64,2	5,04	28,6	2,22

Fonte: Autor próprio

Diversas reações químicas ocorrem durante o processo de torrefação que resulta na liberação de voláteis devido à degradação da hemicelulose. Tais reações alteram a estrutura química do material como mostrado pela tabela 3. O teor de oxigênio, assim como o teor de hidrogênio tendem a diminuir, visto que boa parte destes elementos se encontra no material

volátil liberado, assim como parte do carbono na forma de CO, por exemplo, mas em menor quantidade que os demais. Deste modo o teor de carbono tende a aumentar, devido a sua concentração na biomassa.

Tal resultado mostra que à medida que o grau de torrefação se eleva a tendência é concentrar carbono no material e essa concentração será responsável pela alteração de seu potencial energético, como por exemplo, o Poder Calorífico Superior (PCS).

3.4. PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

A principal propriedade energética do combustível é o poder calorífico. A tabela 4 exhibe os valores de PCS do material *in natura* e das amostras torradas.

Tabela 4 – Poder Calorífico Superior

Amostras	PCS (MJ/kg)	Fator de melhoria (%)
<i>in natura</i>	18,82	1
250°C / 20 min	20,31	8
275°C / 20 min	20,71	10
300°C / 20 min	21,12	12
250°C / 60 min	23,98	27
275°C / 60 min	25,20	34
300°C / 60 min	26,94	43

Fonte: Autor próprio

Como pode ser observado na tabela 4, todas as amostras analisadas

apresentaram aumento quanto ao PCS em relação ao material *in natura*, atingindo faixas entre 8 a 43% de melhoria. Este cálculo foi feito a partir da divisão entre o novo PCS e o valor de referência (18,82 MJ/kg), determinando assim, o aumento em porcentagem.

O fator determinante para esses aumentos de PCS foi o tempo de residência, uma vez que contribuiu mais para a degradação das estruturas do que o aumento da temperatura. Essa análise pode ser confirmada quando são comparadas as amostras de mesma faixa de temperatura, mas com tempos de torrefação diferente. O aumento do PCS segundo HUANG *et al*, (2009) define que o aumento de PCS é diretamente proporcional aos teores de carbono e hidrogênio no material e inversamente ao teor de oxigênio.

3.5. RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO E PROPRIEDADES ENERGÉTICAS

Além de variações das propriedades apresentadas anteriormente, também ocorre variação em seu rendimento gravimétrico após a torrefação. Essa mudança acontece devido à degradação térmica dos constituintes da madeira com o tratamento térmico (PENG *et al*, 2013). A biomassa utilizada na peletização é constituída por componentes de alta massa

molar, como os polissacarídeos (celulose e hemiceluloses) e a lignina. Segundo (WINDEISEN; STROBEL; WEGENER, 2007) d9os três componentes, o mais sensível à aplicação do calor são as hemiceluloses que se degradam termicamente e geram componentes voláteis de baixa massa molar, com redução da massa final e conseqüentemente do rendimento gravimétrico, indicado na tabela 5.

Tabela 5 – Rendimento gravimétrico e valores energéticos

Amostras	R_g (%)	DG (kg/m ³)	DE (MJ/m ³)
in natura	100	458,01	8619,76
250°C / 20 min	96,18	438,24	8900,06
275°C / 20 min	95,98	446,47	9246,55
300°C / 20 min	95,45	432,73	9139,33
250°C / 60 min	72,88	337,34	8087,98
275°C / 60 min	59,29	275,18	6933,11
300°C / 60 min	43,14	192,79	5192,89

Fonte: Autor próprio

Como pode ser observado na tabela acima, para as condições em que o tempo de residência foi de 20 minutos, não houve tanta perda de massa em relação à condição in natura, chegando próximo aos 5%. Entretanto, com o aumento do tempo de residência para 60 minutos, houve maior severidade na degradação das estruturas, chegando a ultrapassar 50% em redução de massa. Essa alteração faz com que haja uma relação entre o rendimento gravimétrico e o

teor de matéria volátil, sendo que o material com maior degradação possui o menor valor de voláteis, em termos de massa, como é constatado na tabela 2, em que a condição de 300°C/60min apresenta menor valor, pois a maior parte foi eliminada na forma de gases.

Do mesmo modo, a densidade a granel é muito importante para quantificar volumes de produtos com formas irregulares, já que considera os espaços vazios entre uma partícula e fornece dados dos volumes ocupados para o transporte. Assim, os valores se encontram na faixa de 192,79 kg/m³ (300°C/60 minutos) a 446,47 kg/m³ (275°C/20 minutos).

Esse comportamento de redução vai de encontro com o rendimento gravimétrico e à diminuição de matéria volátil, uma vez que a degradação de estruturas e eliminação de substâncias voláteis, influenciam diretamente na ocupação de espaço do material. Além disso, a densidade a granel é usada para o cálculo da densidade energética, que é a quantidade de energia por unidade de volume de um combustível e foi obtida pelo produto do PCS com a densidade a granel. Em virtude dos resultados anteriores, a densidade energética obteve dois tipos de comportamento. Para a condição de 20 minutos, o maior valor ficou para a temperatura de 275°C, com 9246,55 MJ/m³,

sendo este o maior valor obtido, enquanto na condição de 60 minutos, o maior valor ficou para a temperatura de 250°C, com 8087,98 MJ/m³.

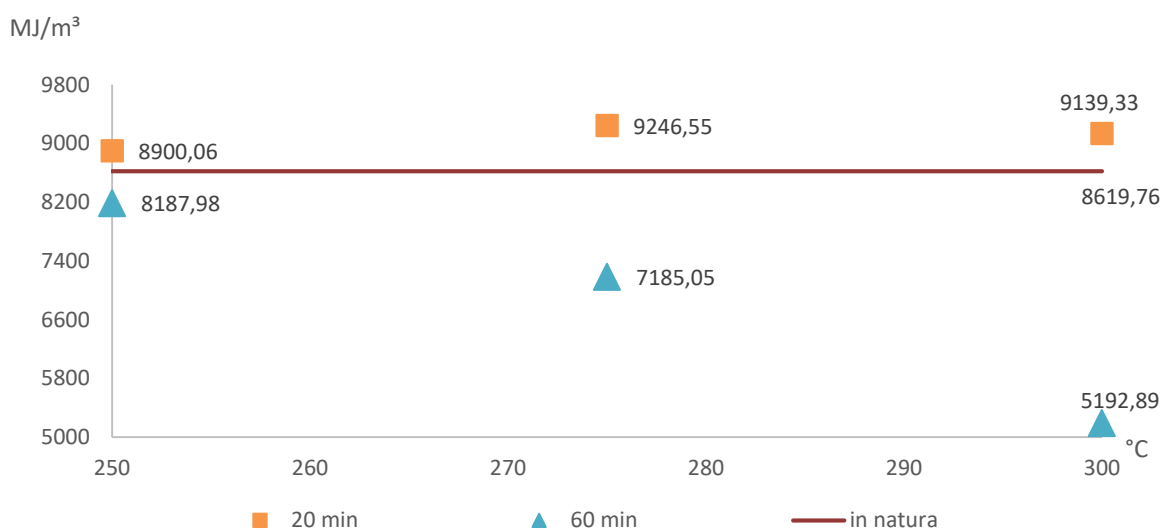
Para a condição mais severa (300°C/60 minutos), o valor da densidade energética é 5192,89 MJ/m³, o menor valor obtido. Isso ocorre, principalmente, por causa da maior taxa de degradação do material, que influencia a densidade a granel e conseqüentemente a densidade energética.

Para melhor evidenciar esses resultados apresentados, o gráfico 1 traz uma comparação entre as amostras torradas e in natura em relação à densidade energética após o processo de torrefação. Como pode ser observado na tabela 4, conforme houve aumento do tempo e temperatura, as amostras obtiveram maiores valores de PCS, com mínimo de 27% de aumento, entretanto, foram as amostras que

mais sofreram degradação de estruturas, e com isso, tiveram a maior perda de massa, indicado na tabela 5. Analisando apenas o fator densidade energética, as amostras com tempo de residência de 60 minutos possuem valor menor do que a amostra in natura, o que não a torna tão vantajosa e atraente em termos energéticos.

Já para as amostras com tempo de torrefação de 20 minutos, apresentou um aumento máximo de 12% em relação ao PCS, contudo, houve uma degradação menor de estruturas, com no máximo 5% de perda de massa, indicados na tabela 5. Considerando apenas a densidade energética, os valores para a condição de 20 minutos apresentaram valores melhores do que as amostras in natura, que em termos energéticos podem ser consideradas melhores.

Gráfico 1 – Densidade Energética (MJ/m³) x Temperatura (°C)



Fonte: Autor próprio

4. CONCLUSÃO

A torrefação dos peletes de casca de amendoim foi realizada para 250, 275 e 300°C com tempos de residência de 20 e 60 minutos para produzir um material torrado altamente homogêneo nesse estudo. Os resultados apontam que o teor de umidade dos peletes torrados diminuem significativamente enquanto a temperatura de torrefação aumenta, chegando ao valor mínimo de 0,65% para a condição mais severa de torrefação. Para esta condição ainda, obtém-se o maior valor de PCS, juntamente com maior valor de carbono fixo (CF). Essas características fazem com que o material seja mais bem aproveitado no processo de combustão, facilitando assim, a sua queima. Entretanto, quanto maior a severidade do processo, ou seja, maior grau de degradação térmica, menor é o rendimento gravimétrico, uma vez que ocorre maior degradação de estruturas e desvolatilização, como ocorreu para 300°C/60 minutos.

Apesar da condição mais intensa de torrefação apresentar vantagens em muitos aspectos, como menor teor de umidade e possuir maior valor de PCS, essa condição obteve menor valor para a densidade energética. Considerando apenas esse aspecto, a condição de 275°C/20 minutos se apresenta como uma boa alternativa a ser utilizada em processos de

combustão, pois apresenta teor de umidade de 1,64%, rendimento gravimétrico de 95,98% e PCS de 20,71 MJ/kg, valores melhores que as condições originais. Além dessas características, o transporte acaba sendo vantajoso, uma vez que o material possui mais energia concentrada.

Conclui-se que as limitações típicas de biomassa *in natura* podem ser superadas com os peletes torrados, os quais possuem maior PCS e melhores características hidrofóbicas, ou seja, menor teor de umidade é reabsorvido permitindo melhores condições de armazenamento.

5. BIBLIOGRAFIA

ASTM E775: **(Standard test methods for total sulfur in the analysis sample of refuse-derived fuel)**, 2008.

ASTM E777: **(Standard test methods for carbon and hydrogen in the analysis sample of refuse-derived fuel)**, 2008.

ASTM E778: **(Standard test methods for nitrogen in the analysis sample of refuse-derived fuel)**, 2008.

ASTM E870: **(Standard test methods for analysis of wood fuels)**, 2008.

Barros, E.V.; Caraschi, J. C.; Ventrone, G. **A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica**. Engevista, V. 9, P. 47-56, 2007.

CEN.TS 14774-1: **Methods for determination of moisture content – oven**

dry method – part 1: total moisture – reference method. Bruxelas – Bélgica, 2004.

CEN.TS 14775: **Methods for determination of ash content**. Bruxelas - Bélgica, 2004.

CEN.TS 15148: **Methods for the determination of the content of volatile matter**. Bruxelas – Bélgica, 2005.

Chen, W.H.; Peng, J.; Bin, X.T. **A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications**. Renewable and sustainable energy reviews, n. 44, p. 847-866, 2015.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balço energético nacional**. Brasília: ministério de minas e energia. (2021). Acesso: 20/05/2022. Fonte: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/publicacoesarquivos/publicacao-601/topico-596/ben2021.pdf>

Esteves, B.M., Pereira, H. M. **Wood modification by heat treatment: a review**. Bioresources, v. 4, p. 370-404, 2009.

Esteves, B; Velez, A; Domingos, I; Pereira, H. **Heat-induced colour changes of pine (pinus pinaster) and eucalypt (eucalyptus globulus) wood**. Wood science and technology, [s.l.], v. 42, n. 5, p.369-384, 4 ago. 2007. Springer nature.

Felfli, Felix Fonseca; Mesa, Juan M.; Rocha, José Dilcio; Filipetto, Daniele;

Luengo, Carlos A.; Pippo, Walfrido Alonso, 2011. **Biomass briquetting and its perspectives in brazil**. Biomass and bioenergy, n. 35, p. 236-242.

Garcia, D. P.; Caraschi, J. C.; Ventorim, G. **Caracterização energética de pellets de madeira**. Revista da madeira, v. 135, p. 14-18, 2013.

Gilbert, P.; Ryu, C.; Sharifi, V; Swithenbank, J. **Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops**. Fuel, v. 88, p. 1491-1497. 2009

Huang, C, Han, L; Yang, Z; Liu, X. **Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy**. Waste management. N. 29. P. 1793-1797, jan. 2009.

Ika. Descrição de equipamentos de laboratórios. Acesso: (01/07/2022). Disponível em: <https://www.ika.com/pt/produtos-lab-eq/calorimetros-csp-330/c-200-cpdt-8802500/>

International energy agency. Acesso: (01/07/2022). World total energy supply. Fonte: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply>.

Klock, U, Muniz, G.I.B, Hernandez, J.A, Andrade, A.S – **“química da madeira”**, 3ªed, Universidade Federal do Paraná, dep. Eng e tec florestal. Curitiba, Paraná. 2005.

Molinari, K. C. **Efeito da torrefação de pellets de pinus taeda I. Na produção de combustível com maior potencial energético.** Universidade Estadual do Centro-Oeste. Guarapuava, Paraná. p. 103. 2017.

NBR 6922: **carvão vegetal - ensaios físicos determinação da massa específica -densidade à granel.**1981.

Nunes, L.J.R.; Matias, J.C.O.; Catalão, J.P.S. **A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation. Renewable and sustainable energy reviews,** [s.l.], v. 40, p. 153-160, dez. 2014. Elsevier bv.

Pagel, U. R; Campos, A. F; Carolino, J. **Análise dos principais desafios ao desenvolvimento das energias renováveis no brasil. Congresso brasileiro de planejamento energético.** Cuiabá-MT, 2018.

Peng, J.H; Bi, H.T; Lim, C.J; Sokhansanj, S. **Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets.** Energy & fuels, [s.l.], v. 27, n. 2, p.967-974, 2013. American chemical society (acs).

Portal vida livre: como **plantar amendoim: na terra, dicas de plantio e muito mais.** (2021). Acesso em: (05/10/2022). Fonte: <https://portalvidalivre.com/articles/471>.

Protásio, T.P.; Bufalino, L; Tonoli, G.H.D; Couto, A.M; Trugilho, P.f; Júnior, M.G. **relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal.** Pesquisa florestal brasileira. Colombo, Paraná. 2011, v. 31, n. 66, p. 113-122.

Santos, F.H.B. **Análise de processo de torrefação em cavacos de madeira de cupituba.** Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Belém, Pará. 2018.

Souza, F; Vale. A.T. **Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação os parâmetros de briquetagem.** Pesquisa florestal brasileira. 2016. Acesso: (02/07/2022).

Sultana, A; Kumar, A; Harfield, D. **Development of agri-pellet production cost and optimum size.** Bioresource technology, v. 101, p. 5609-5621. 2010.

TOLMASQUIM, M. T. **Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil.** Estudos Avançados, [S. l.], v. 26, n. 74, p. 247-260, 2012. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10636>. Acesso em: 22 out. 2022.

Windeisen, E; Strobel, C; Wegener, G. **Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood.** Wood science and technology, [S.L.], v. 41, n. 6, p.523-536, 2007. Springer nature.