

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

MONICA LARISSA DE AZEVEDO FARIA

PANORAMA SOBRE A ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE PELLETS DE DIFERENTES BIOMASSAS

SÃO CARLOS - SP
2024

MONICA LARISSA DE AZEVEDO FARIA

**PANORAMA SOBRE A ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE PELLETS DE DIFERENTES BIOMASSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Graduado em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

Co-orientadora: Profa. Dra. Thalyne de Almeida Ferreira Rocha

SÃO CARLOS – SP
2024

Dedico este trabalho à minha amada avó, a pessoa mais bondosa que existe em meu mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que foi a força motriz por trás de todas as minhas conquistas hoje e sempre.

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Gaspar e Cleuza, e à minha querida família, verdadeiros alicerces em minha vida. Seu amor incondicional, apoio incansável e constante motivação foram fundamentais para que eu chegasse até este momento. Cada sacrifício de vocês foi um impulso a mais na busca pelo conhecimento, e por isso, me sinto imensamente grata.

Aos meus amigos, companheiros de jornada nesta universidade, agradeço por tornarem esta caminhada tão especial e inesquecível. Suas risadas, encorajamentos e ombros amigos tornaram os desafios mais leves e as conquistas mais significativas. Juntos, compartilhamos experiências que, sem dúvida, deixarão saudades e marcarão eternamente essa fase da minha vida.

Um agradecimento especial ao Professor Fábio Freire, cuja orientação foi crucial nos momentos de ansiedade durante o desenvolvimento do meu trabalho de graduação. Sua paciência, conhecimento e incentivo foram fundamentais para que eu superasse obstáculos e alcançasse um trabalho de qualidade. O Professor Fábio não apenas compartilhou seu conhecimento acadêmico, mas também se mostrou uma referência inspiradora. Que haja mais professores como ele, dedicados não apenas ao ensino, mas também ao bem-estar e crescimento de seus alunos.

Minha gratidão também à minha co-orientadora, Thalyne Rocha, pela contribuição valiosa que proporcionou ao nosso trabalho. Seus insumos e orientações foram cruciais para a especificação e aprimoramento do meu projeto. Agradeço por sua dedicação, disponibilidade e domínio no assunto, que enriqueceram significativamente o desenvolvimento deste trabalho de graduação. Sua orientação foi uma peça-chave para o sucesso deste trabalho, e sou grata por ter tido a oportunidade de aprender com uma profissional tão qualificada e comprometida.

Quero expressar minha sincera gratidão às minhas líderes Juliana e Letícia, cujo apoio foi vital para o sucesso desta empreitada acadêmica. O reconhecimento da importância deste momento por parte de vocês e o suporte que me ofereceram na empresa foram determinantes para que eu pudesse conciliar os desafios profissionais e acadêmicos. Sua liderança inspiradora foi

uma fonte constante de motivação e aprendizado, e por isso, expresso minha profunda gratidão por ter tido a oportunidade de trabalhar sob a direção de profissionais tão excepcionais.

Por fim, mas não menos importante, minha gratidão à minha psicóloga, Daniela. Ao longo desses anos, seu incentivo e apoio foram fundamentais para me ajudar a manter o equilíbrio emocional e psicológico, elementos essenciais que contribuíram para alcançar esta conquista acadêmica. Agradeço sinceramente por sua dedicação e por ser uma parte essencial do meu percurso até aqui.

"Ecologia sem luta de classes é jardinagem." – Chico Mendes

RESUMO

A biomassa é considerada uma opção de produção de energia mais sustentável do que os combustíveis fósseis. Porém, embora tenha muito potencial, características intrínsecas a ela, como a baixa densidade energética, tornam sua ampla utilização mais dificultosa. Uma vez que seu aproveitamento demanda grandes volumes, a peletização é um processo interessante para proporcionar a disseminação da biomassa como fonte de combustível sólido, compactando-a em unidades de tamanho uniforme, com ou sem aglutinantes, através de compressão mecânica. Assegurar, portanto, a integridade dos pellets, leva à valorização comercial deste produto, facilitando o transporte aos grandes centros de consumo e garantindo condições de queima mais uniformes possíveis para as etapas seguintes de geração de energia por combustão. Este Trabalho de Graduação visa definir um panorama sobre a análise das propriedades mecânicas de pellets de diferentes biomassas, abrangendo desde as metodologias e técnicas mais difundidas da peletização, com os seus respectivos critérios de qualidade, até os aspectos práticos de aplicações na área de reaproveitamento energético. Em seu desenvolvimento é possível comparar características de biomassas, processos e pellets distintos em termos de propriedades, tanto térmicas quanto mecânicas, que influenciam na qualidade final do produto. Finalmente, são comparadas as propriedades de quatro tipos de pellets de diferentes biomassas, obtendo-se uma visão que permite avaliar a importância da umidade final do pellet em sua durabilidade, assim como a disponibilidade de carbono juntamente à densidade do pellet, para a criação de um pellet com alta carga energética.

Palavras-chave: Peletização. Biocombustível. Propriedades mecânicas de pellets. Biomassa.

ABSTRACT

Biomass is considered a more sustainable energy production option than fossil fuels. However, although it has a lot of potential, its intrinsic characteristics, such as its low energy density, make its widespread use more difficult. Since its use requires large volumes, pelletization is an interesting process to provide the dissemination of biomass as a source of solid fuel, compacting it into units of uniform size, with or without binders, through mechanical compression. Therefore, ensuring the integrity of the pellets leads to increased commercial value of this product, facilitating transport to large consumption centers and guaranteeing the most uniform burning conditions possible for the following stages of energy generation through combustion. This Undergraduate Work aims to define an overview of the analysis of the mechanical properties of pellets from different biomasses, covering everything from the most widespread methodologies and techniques of pelletization, with their respective quality criteria, to the practical aspects of applications in the area of energy reuse. In its development, it is possible to compare characteristics of different biomasses, processes and pellets in terms of properties, both thermal and mechanical, which influence the final quality of the product. Finally, the properties of four types of pellets from different biomasses are compared, obtaining an insight that allows evaluating the importance of the pellet's final moisture in its durability, as well as the availability of carbon together with the density of the pellet, for the creation of a pellet with a high energy charge.

Keywords: Pelletization. Biofuels. Mechanical pellets properties. Biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa dos produtores brasileiros de pellets de biomassa vegetal, no ano de 2017.....	12
Figura 2 – Mapa da distribuição geográfica das termelétricas ao longo do território brasileiro.....	12
Figura 3 – Segunda e terceira gerações de matérias-primas com potencial para densificação.....	16
Figura 4 – Mecanismos de deformação de partículas durante a compressão.....	18
Figura 5 – Esquematização de um processo de pelletização em um moinho de pelota.....	19
Figura 6 – Ilustração e princípios operacionais de um moinho de pelota por matriz plana.....	20
Figura 7 – Ilustração e princípios operacionais de um moinho de pelota por matriz anelar.....	21
Figura 8 – Disposição geral de ambas peletizadoras: anelar (à esquerda) e plana (à direita).....	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferenças técnicas entre as peletizadoras de matriz plana e anelar.....	22
Tabela 2 – Distribuição ideal no tamanho das partículas para produção de pellets de qualidade a partir de biomassa agrícola.....	27
Tabela 3 – Composição química de palhas agrícolas selecionadas.....	28
Tabela 4 – Composição bioquímica da biomassa herbácea e lenhosa.....	28
Tabela 5 – Comparativo de valores de fontes de energia para produção de 1 tonelada de vapor.	37
Tabela 6 – Valor calorífico de fontes de biomassa.....	38
Tabela 7 – Propriedades relevantes do processo de peletização.....	39
Tabela 8 – Propriedades relevantes da composição da biomassa.....	40
Tabela 9 – Caracterização da biomassa.....	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVO	13
3. METODOLOGIA	14
4. DESENVOLVIMENTO / FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
4.1. DENSIFICAÇÃO: MECANISMOS DE LIGAÇÃO DAS PARTÍCULAS.....	17
4.1.1. Peletização	19
4.1.2. Variáveis no processo de densificação	23
4.1.2.1. Temperatura.....	23
4.1.2.2. Pressão.....	24
4.1.2.3. Geometria e velocidade da matriz.....	24
4.1.2.4. Umidade.....	25
4.1.2.5. Tamanho, forma e distribuição das partículas.....	26
4.2. COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA.....	27
4.2.1. Amido	29
4.2.2. Proteína	29
4.2.3. Lipídios	29
4.2.4. Celulose	30
4.2.5. Hemicelulose	30
4.2.6. Lignina	30
4.3. PRÉ-TRATAMENTO DA BIOMASSA.....	31
4.3.1. Moagem	32
4.3.2. Pré-aquecimento e o condicionamento à vapor	32
4.3.3. Explosão de vapor	32
4.3.4. Torrefação	33
4.3.5. Expansão da fibra de amônia (AFEX)	34
4.4. PROPRIEDADES DA BIOMASSA.....	34
4.4.1. Umidade	34
4.4.2. Densidade unitária e aparente	35
4.4.3. Durabilidade	35
4.4.4. Valor calorífico	36

5. COMPARATIVO ENTRE PROPRIEDADES DA BIOMASSA DE PELLETS.....	39
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
7. CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia ao redor do planeta tem aumentado o uso de combustível fóssil gerando uma quantidade massiva de emissão de gás carbônico (CO₂) na atmosfera, o que tem causado tanto poluição ambiental como mudança climática (FAWZY *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2022a, b). Segundo estudos da Agência Internacional de Energia (em inglês *International Energy Agency*; IEA, 2020), é estimado que tal demanda energética aumentará em 19% até 2040, seguida por um aumento de 1,9% na emissão de CO₂ atmosférico (CHEN *et al.*, 2022a). Assim, para diminuir a dependência de combustíveis fósseis e tentar mitigar os impactos negativos de sua queima ao longo das décadas passadas, é essencial a pesquisa e desenvolvimento de alternativas energéticas. Para tanto, o uso de recursos renováveis e facilmente disponíveis, e que tenham um mínimo, ou nenhum, impacto sobre a saúde humana, animal e ambiental seria uma ótima solução. Ademais, tais estudos e pesquisas são extremamente importantes, e até urgentes, tendo em vista o Acordo de Paris e a Conferência de Mudança Climática das Nações Unidas em 2021 (COP-2026), na qual foi acordada a emissão de 0% de CO₂ atmosférico, por meio de combustível fóssil, até a metade deste século a fim de limitar um aumento em 1,5°C na temperatura global (COP-2026, 2022).

Segundo o relatório de Estatísticas Bioenergéticas Globais (em inglês *Global Bioenergy Statistics*), de 2020, as fontes de energia renováveis contribuíram com 14% do total de suprimento primário em 2018 para produção energética, sendo que a bioenergia representou 67% (WORLD BIOENERGY ASSOCIATION, 2020). Também, o uso de biocombustíveis advindos de resíduos agrícolas ou orgânicos tem vantagens como, por exemplo, a interrupção de queimadas a céu aberto, o que traz benefícios ambientais diretos e a longo-prazo, além das novas utilidades da biomassa pelos fornecedores (SRIVASTAVA *et al.*, 2020; TANG *et al.*, 2020; OSMAN *et al.*, 2021).

Contudo, a biomassa crua possui propriedades intrínsecas que limitam seu uso direto como biocombustíveis como seu grande volume, baixa densidade, alta volatilidade, alta umidade, baixa energia e heterogeneidade (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008). Além disso, a biomassa com baixa densidade e volume natural requer um grande espaço para estoque e alto custo para transporte. A densificação da biomassa facilita o manuseio do material e, conseqüentemente, reduz custos de armazenamento e transporte (MORENO-LOPEZ *et al.*, 2017; BAJWA *et al.*, 2018). Em comparação a outros biocombustíveis, a densificação em forma de pellets possui

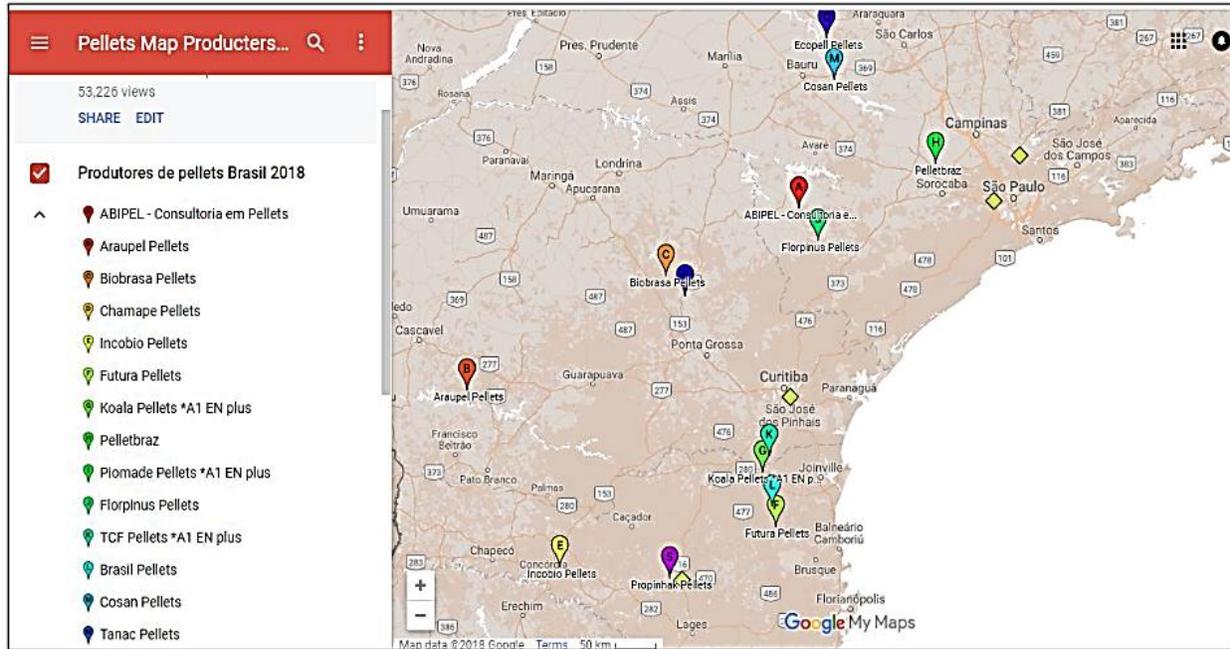
diversas vantagens comerciais, incluindo um processo relativamente simples e uma grande oferta de matéria-prima (KANG *et al.*, 2019). Soma-se a isso o fato de que a peletização é útil também para alcançar maior poder calorífico, por unidade de volume, dos materiais originais ao promover melhores e mais rápidos processos de combustão. (MORENO-LOPEZ *et al.*, 2017).

Infelizmente, os biocombustíveis ainda não são muito bem reconhecidos como potenciais fontes energéticas principalmente por países subdesenvolvidos, onde são subutilizados (SILVA-MARTÍNEZ, 2020). Contudo, o aumento da demanda por energia elétrica tem motivado uma nova visão de pesquisadores, gestores de resíduos e agricultores destes países para aperfeiçoarem os tratamentos opcionais dos resíduos e, em especial, tendo em vista a produção de energia (KOLDISEVS; ALBERTO; GONZALES, 2014). Estudos indicam que a demanda global por pellets de madeira como biocombustíveis chegará a 26 milhões de toneladas em 2027 (CANADIAN BIOMASS MAGAZINE, 2021). Estatísticas indicam que a produção desse tipo de pellet, em 2020, foi liderada pela União Europeia seguida pelos EUA, China e América do Sul com, respectivamente, 13, 11, 10 e 4,4 toneladas (STATISTICA, 2020).

No Brasil, de acordo Garcia *et al.* (2018), e por meio do Mapa dos Produtores Brasileiros de Pellets (Fig. 1), existem atualmente 66 produtores espalhados pelos estados do Sul e em São Paulo. Segundo o autor, em 2017 o Brasil teve uma produção de 4,7 toneladas de pellets, sendo a biomassa principal advinda da Acácia-negra e pinus. Contudo, há um potencial imenso para o crescimento nessa área, visto que existem outros tipos de biomassa a serem explorados, como será apresentado no presente trabalho. Também, considerando que apenas os estados do Sul e SP possuem fábricas de peletização, mas que as usinas termoelétricas encontram-se espalhadas por todo o território republicano (Fig. 2), o adensamento da biomassa, por meio de peletização, é de grande importância para o transporte da matéria-prima para longas distâncias.

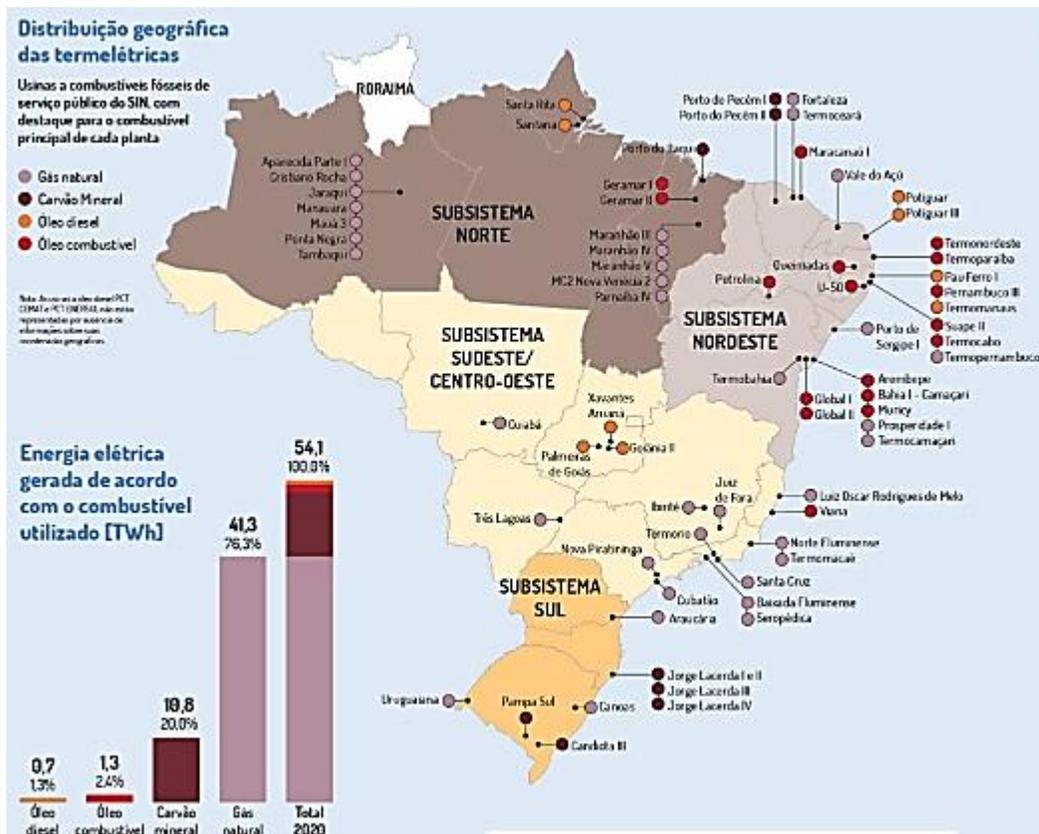
Além disso, há outras formas conhecidas de tratamento de resíduos para produção energética, como a briquetagem e torrefação. Contudo, considerando as vantagens apresentadas pela peletização, sua importância e expectativa de aumento, não apenas com pellets de madeira, mas de diversos outros resíduos, tal técnica foi a escolhida para o presente trabalho. Desta forma, este estudo tem como objetivo revelar, através da análise de referências bibliográficas, um cenário atual sobre a valorização de biomassa por peletização e o aproveitamento energético como biocombustíveis.

Figura 1 – Mapa dos produtores brasileiros de pellets de biomassa vegetal, no ano de 2017.



Fonte: Garcia *et al.* (2018)

Figura 2 – Mapa da distribuição geográfica das termelétricas ao longo do território brasileiro.



Fonte: IEMA (2022).

2. OBJETIVO

Realizar uma revisão sobre métodos de peletização em biomassas de resíduos orgânicos, discorrer sobre as propriedades da biomassa e as vantagens da peletização, comparar parâmetros de pellets de diferentes tipos de biomassa.

Ainda, para alcançar o objetivo geral apresentado acima, serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento, nos principais sites de busca de periódicos científicos, sobre os trabalhos publicados mais recentes relativos ao tema proposto;
- Discorrer sobre os métodos de peletização e suas variáveis;
- Discorrer sobre as propriedades da biomassa de resíduos orgânicos; e
- Comparar os parâmetros de qualidade para diferentes biomassas em processos de peletização.

3. METODOLOGIA

Com o objetivo de apresentar os métodos de peletização, os componentes da biomassa de resíduos orgânicos e apresentar as variáveis que influenciam a peletização, foi realizada a pesquisa metodológica Método de Busca de Arquivo (ou em inglês *Archival Research Method* – ARM) que conduz e avalia a existência de arquivos de domínio. Ela consiste no exame de fatos previamente registrados em documentos oficiais primários e secundários, bem como registros realizados por pesquisadores e investigadores (SEARCY; MENTZER, 2003). Tal metodologia segue as seguintes etapas:

- a) *Definição da fonte de base de dados*: a revisão abrangeu uma base de dados bem estabelecida que foram o Google Acadêmico, a *PubMed* e a *SciELO*;
- b) *Delimitação do escopo*: o recorte foi atemporal e abrangeu publicações recentes e antigas;
- c) *Definição da unidade de análise*: a revisão incluiu a pesquisa de artigos científicos individuais, de grupos de pesquisas, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado.
- d) *Amostragem*: foi realizada a busca de documentos relacionada ao tema utilizando-se os seguintes descritores em português “Peletização” e “Biocombustível” e, em inglês, “Pelletizing” e “Biofuel”, sendo que a primeira amostra possui 7555 publicações.
- e) *Compilação geral*: para evitar informações repetidas e evitar duplicidades os documentos foram armazenados e organizados, reduzindo-se a quantidade amostral inicial das publicações e especificando-as dentro do tema abordado.

Uma vez que os dados foram selecionados, foi realizada a técnica de Análise de Conteúdo (NEUENDORF, 2017). Esta análise avalia profundamente o texto para convertê-los em informações valiosas com um objetivo específico, no caso, trazer informações sobre os métodos de peletização, as variáveis que os influenciam, bem como os componentes existentes na biomassa de resíduos orgânicos. Desta forma, os periódicos foram lidos e os dados foram apresentados em forma textual e de esquemas, figuras e tabelas, a fim de serem apresentados da forma mais clara possível.

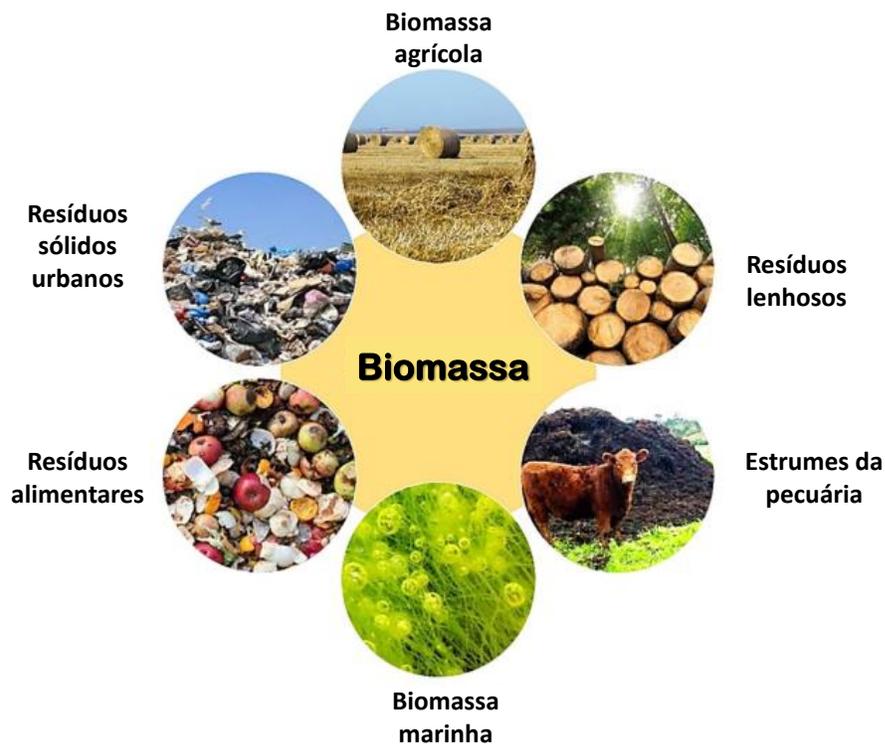
Para a escolha das fontes utilizadas, a partir da primeira amostra de publicações, as principais citações e referências que dialogavam com o tema proposto neste trabalho foram selecionadas, afinando assim a especificidade das publicações para o assunto abordado.

A catalogação dos registros se deu de maneira uniforme, ao relacioná-los no texto através de suas fontes e anos de publicação, para posteriormente descrever cada uma das publicações nas citações e referências bibliográficas.

4. DESENVOLVIMENTO / FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Todos os anos, milhares de toneladas de resíduos florestais, agrícolas e urbanos são gerados ao redor do mundo. Atualmente, eles são considerados como fontes de biomassa com grande potencial em se tornarem biocombustíveis. Estudos classificaram tais resíduos por gerações de fontes de biomassa (NANDHINI *et al.*, 2022). A primeira geração de biomassa é baseada em materiais contendo amido como os grãos, milho, batata e mandioca; contudo, esta geração encontra controvérsia entre ser um alimento e um combustível, além de competir pelo uso nas plantações. A segunda e terceira gerações de matéria-prima não competem em ser um complemento alimentar ou aproveitáveis para plantações, visto que são resíduos não comestíveis advindos da agricultura, silvicultura, pecuária, ecossistemas marinhos e lixões municipais (NANDHINI *et al.*, 2022; ver Fig. 3). Ainda, tanto as biomassas advindas da agricultura como de resíduos de madeira são referidas como biomassas lignocelulósicas, afinal são feitas de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos (SPIRIDON, 2020; KALOUDAS *et al.*, 2021; PATTNAIK *et al.*, 2021).

Figura 3 – Segunda e terceira gerações de matérias-primas com potencial para densificação.



Fonte: adaptado de Sarker *et al.* (2023).

Enfim, para que não sejam apenas descartados e causem uma poluição ambiental, é ideal que sejam reaproveitados todos estes materiais, não apenas para gerar lucro para as empresas, mas para serem aproveitados inteligentemente, de forma sustentável e, ainda mais, para contribuir para algo muito maior que é ajudar no alcance da meta de emissão de gás carbônico (CO₂), como proposto pela COP-26 e citado anteriormente (STELTE *et al.*, 2012).

Sendo assim, uma das formas de reaproveitamento desses diversos resíduos é a densificação da matéria-prima a qual traz diversos benefícios como, por exemplo, propriedades físicas mais consistentes, maior durabilidade, facilidade no armazenamento, no transporte e no manuseio e, por conseguinte, maior qualidade da matéria-prima e diminuição de custos. Ademais, após a densificação do resíduo, que pode ser de até mais de 10 vezes (TUMULURU *et al.*, 2010a), a sua queima com outros combustíveis, como por exemplo o carvão, é muito mais eficiente, pois é facilitada a sua alimentação e queima nas caldeiras de usinas termelétricas (VAN; KOPPEJAN, 2008).

4.1. DENSIFICAÇÃO: MECANISMOS DE LIGAÇÃO DAS PARTÍCULAS

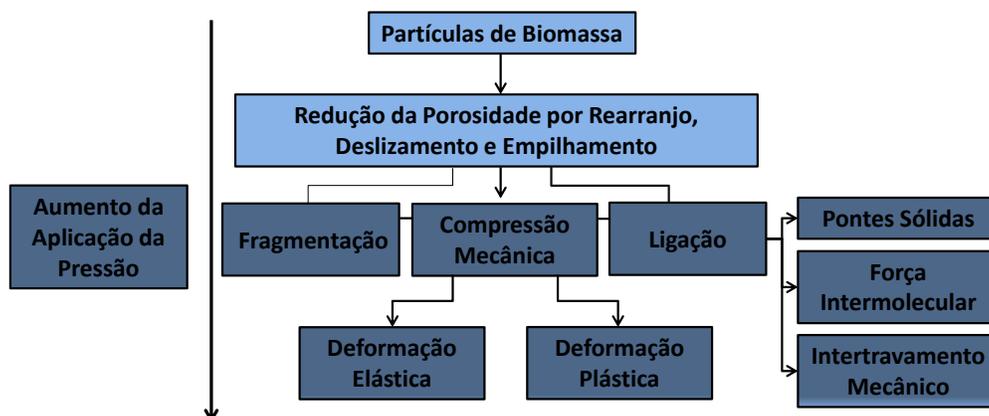
A qualidade da biomassa, após a densificação, depende da resistência e durabilidade das ligações de suas partículas as quais são influenciadas por uma série de variáveis durante o processo de densificação. Dentre estas variáveis estão o diâmetro da matriz, a temperatura da matriz, a pressão exercida, os ligantes e o pré-aquecimento da mistura. Estudos de Tabil (1996) e Tabil e Sokhansanj (1996ab) sugeriram que a compactação da biomassa, durante a peletização, pode estar relacionada as deformações elásticas e plásticas das partículas em pressões mais elevadas. Além disso, tais estudos afirmam que dois processos são importantes durante a peletização: I) a capacidade das partículas na formação de pellets com resistência mecânica considerável, e II) a capacidade do processo em aumentar a densidade do resíduo.

O primeiro caso, detalha quais são os tipos de mecanismos de ligação, ou intertravamento mecânicos, que resultam numa melhor biomassa densificada. Estudos de Rumpf (1962) e Sastry e Fuerstenau (1973) sugeriram que os mecanismos de ligação, durante a aglomeração da biomassa, podem ser a partir de pontes sólidas. Tais pontes são desenvolvidas a partir de reações químicas, solidificação, sinterização de diversos componentes, endurecimento de ligantes, endurecimento das substâncias fundidas ou cristalização dos materiais dissolvidos. Além disso, a pressão aplicada durante o processo reduz o ponto de fusão das partículas fazendo com que elas movam-

se uma em direção à outra, o que aumenta a área de contato e modifica o ponto de fusão para um novo ponto de equilíbrio (YORK; PIPEL, 1973; PIETSCH, 1984). Além disso, a presença de líquidos durante o processo de densificação, como a água, resulta em forças interfaciais e pressões capilares que aumentam a ligação das partículas. Segundo Schineberger (1971), a atração das partículas ocorre por meio das forças eletrostáticas de van der Waals ou forças magnéticas, e é inversamente proporcional à distância entre as partículas, ou seja, quanto mais distante possuem menor atração.

Ainda sobre o processo de densificação, Mani e colaboradores (2022), postularam três etapas durante o processo de densificação da biomassa (ver Fig. 4). Na primeira etapa, as partículas são reorganizadas para formarem uma massa compacta na qual a maioria delas retém suas propriedades e a energia é dissipada devido a interação entre partículas e o atrito entre as partículas e a parede. Na segunda etapa, as partículas são forçadas umas contra as outras e sofrem deformações plástica e elástica, o que aumenta significativamente o contato interpartículas; nesta etapa as partículas ligam-se por meio de ligações van der Waals e forças eletrostáticas. Na terceira etapa, a redução significativa de volume da biomassa faz com que o material atinja a densidade real dos componentes dos ingredientes. No final da terceira etapa, as partículas deformadas e quebradas não mais podem mudar de posição devido à diminuição do número de cavidades ocasionada pela conformidade de cerca de 70% das partículas. Ainda, a aplicação de pressão fraturará as partículas menores e mais frágeis resultando num o intertravamento mecânico entre fibras e partículas (DENNY, 2002; COMOGLU, 2007; KIRSTEN *et al.*, 2016).

Figura 4 – Mecanismos de deformação de partículas durante a compressão.



Fonte: adaptado de Sarker *et al.* (2022).

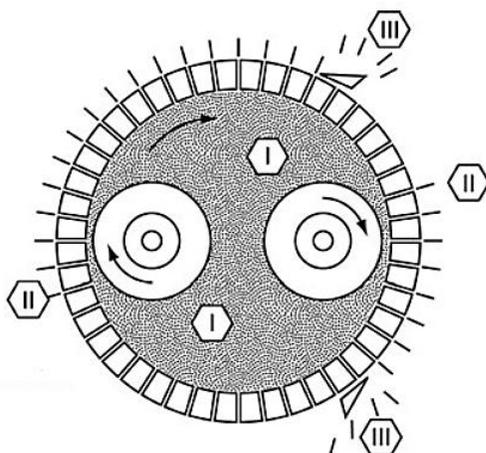
A composição química da biomassa, que inclui celulose, hemiceluloses, proteínas, amido, lignina, fibra bruta, gordura e cinzas afetam o processo de densificação também. Durante a compressão em altas temperaturas, a proteína e o amido plastificam e atuam como um aglutinante, o que auxilia no aumento da resistência do pellet (WOOD, 1987; THOMAS; van ZUILICHEN; van der POEL, 1997; BRIGGS *et al.*, 1999;; van DAM *et al.*, 2004). A lignina na biomassa, por sua vez, em temperaturas acima de cerca de 140°C, amolece-se e melhora a ligação das partículas (TABIL; SOKHANSANJ, 1996ab; ADAPA *et al.*, 2002; ADAPA, P.K.; TABIL, L.G.; SCHOENAU, 2009).

4.1.1. Peletização

Como outros métodos de densificação (cuber, extrusora de parafuso, prensa de briquetagem, prensa de rolo, prensa de comprido e aglomerador), a peletização é capaz de produzir matéria-prima em formato uniforme, sendo o sistema mais comumente utilizado para produção de rações e aplicações bioenergéticas, além de ser o mais econômico também (TUMULURU *et al.*, 2011; STELTE *et al.*, 2012).

O método de peletização consiste em moer os resíduos e convertê-los finamente em pellets densos, de fluxo livre e duráveis (29, 30). Um pellet possui características de produto uniformes em termos de tamanho (comprimento: 13–19 mm; diâmetro: 6,3–6,4 mm), formato (cilíndrico) e densidades unitárias (1125–1190 kg/m³) (TUMULURU *et al.*, 2010a). Um peletizador consiste em uma matriz de aço duro perfurada com um ou dois rolos. Ao girar a matriz e os rolos, a matéria-prima é forçada através das perfurações para formar pelotas (LEAVER, 1970) (Fig. 5).

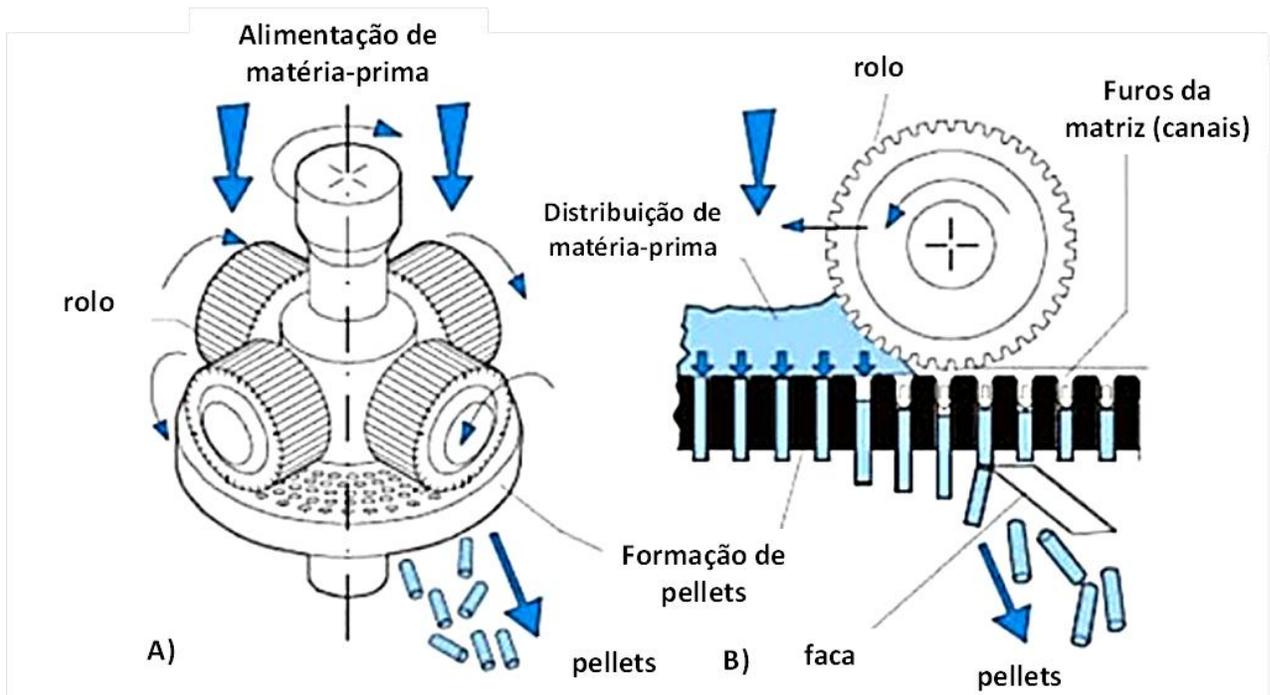
Figura 5 – Esquemática de um processo de peletização em um moinho de pelota.



Fonte: adaptado de Tumuluru *et al.* (2011). Legenda: I = material inicial; II = Pellets extrudado através da placa de matriz; III = Facas de Pellets.

As prensas de pellets consistem em dois tipos: matriz plana e matriz anular. Segundo Joaquim (2020), a peletizadora de matriz plana é utilizada na posição horizontal; enquanto a matriz permanece estática, os rolos compactadores percorrem sua superfície em movimentos circulares fazendo pressão sobre a matéria-prima, a fim de se formarem os pellets (Fig. 6).

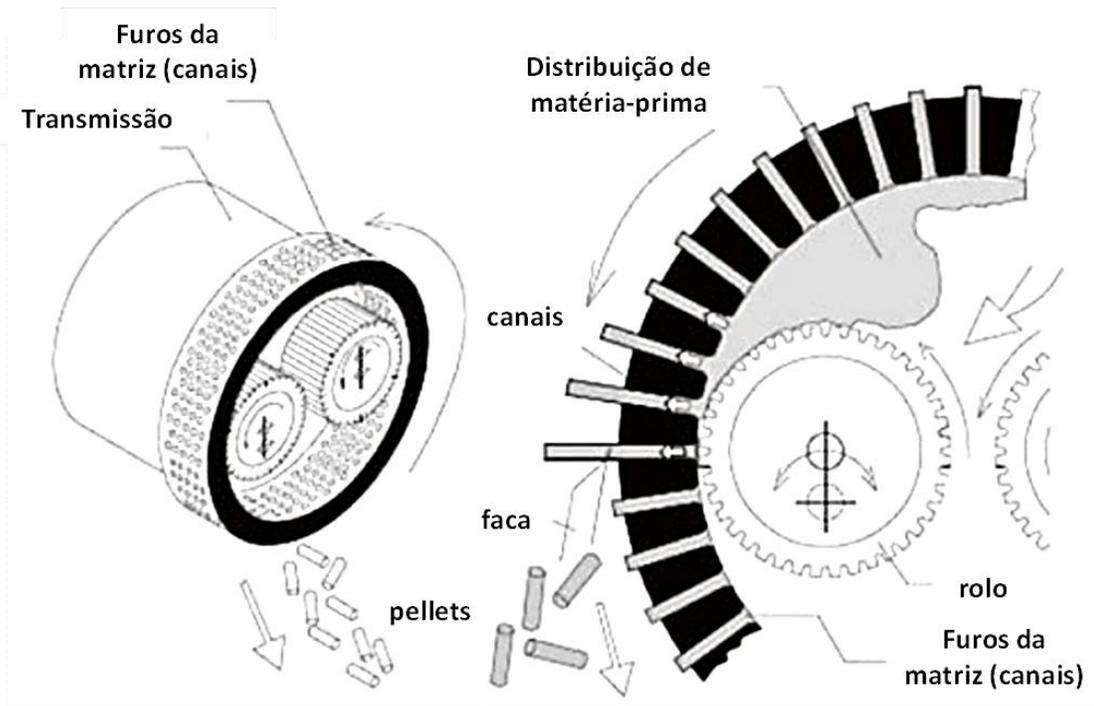
Figura 6 – Ilustração e princípios operacionais de um moinho de pelota por matriz plana.



Fonte: adaptado de Joaquim (2020)

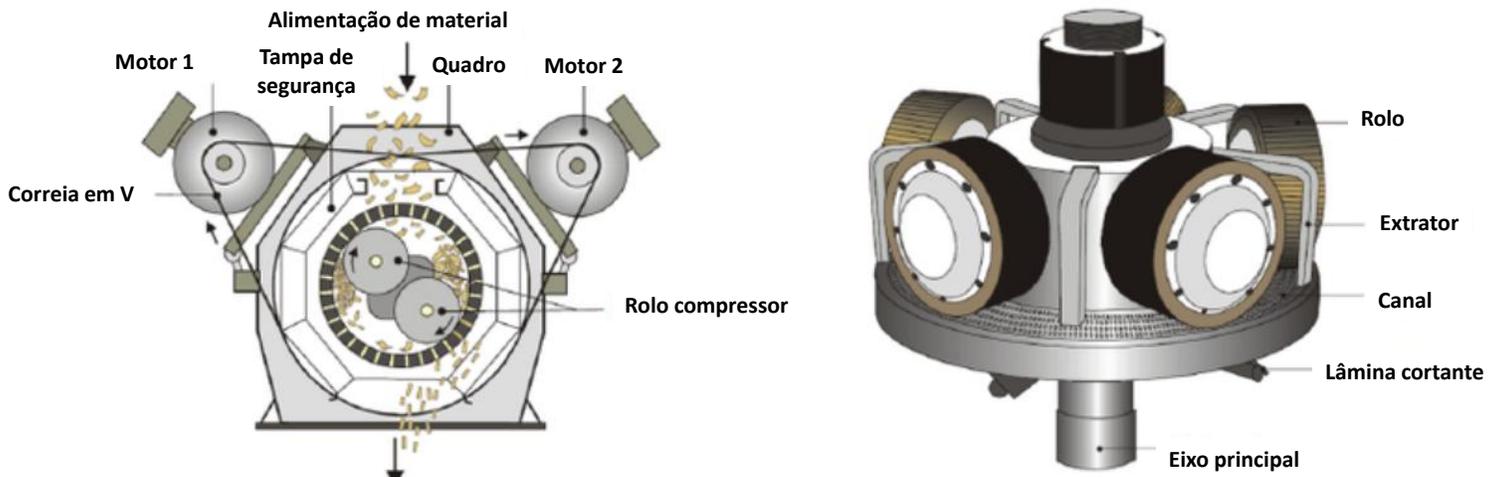
Ao contrário, a matriz de peletização anular consiste de um anel perfurado e dois rolos montados em dois eixos fixos na parte interna. Neste caso a matriz movimenta-se e os rolos permanecem na mesma posição e girando apenas em seu próprio eixo para compactar o material (ver. Fig. 7).

Figura 7 – Ilustração e princípios operacionais de um moinho de pelota por matriz anelar.



Fonte: adaptado de Joaquim (2020).

Figura 8 – Disposição geral de ambas peletizadoras: anelar (à esquerda) e plana (à direita).



Fonte: adaptado de Joaquim (2020).

Apesar de ambos os equipamentos possuírem o mesmo objetivo, que é a produção de pellets, tais diferenças técnicas (Fig. 8) acompanham outras distinções, como observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Diferenças técnicas entre as peletizadoras de matriz plana e anelar.

Anelar		Plana
↑	Velocidade de giro	↓
↑	Potência instalada	↓
↑	Comprimento do canal de compactação da matriz	↓
↓	Granulometria de entrada da matéria prima	↑
↓	Quantidade de rolos	↑

Fonte: Joaquim (2020).

Tais diferenças são importantes principalmente com relação à aplicação da peletizadora. Por exemplo, a peletizadora de matriz anelar possui uma maior velocidade de giro, o que traz uma maior produtividade para produtos que precisam de apenas pouca compactação para a formação de um pellet. Um bom exemplo é o farelo de milho para a produção de ração, pois a densidade do pellet final é praticamente a mesma da matéria-prima (Joaquim, 2020). Ao contrário, para matéria-prima como as biomassas, que são mais fibrosas e de menor densidade, a peletizadora plana tende a apresentar melhor desempenho em função da maior quantidade de rolos que possui e devido a realizar maior compactação da matéria-prima (Joaquim, 2020). Apesar de ambas realizarem a produção de pellets, seja de matéria-prima fibrosa (como madeiras) ou de baixa compactação (farelo de trigo), é importante salientar que para a produção de pellets para o consumo de animais a peletizadora anelar possui a opção de cozimento da matéria-orgânica, o que é importante para a melhor digestão após a ingestão, futuramente, pelos animais (SILVA, 2021).

No caso da peletizadora anelar a vapor, após a entrada da biomassa para o condicionador, é realizada a adição controlada de vapor, o qual amolece a ração e gelatiniza parcialmente o amido a fim de criar pellets mais duráveis. A maioria destes moinhos de pellets possui uma ou mais unidades de condicionamento montadas acima de uma unidade principal. Assim, a partir do condicionador, a alimentação é descarregada dentro de um bico de alimentação que a levará à matriz de granulação. As hélices da tampa distribuem uniformemente os dois rolos compressores.

Então, os rolos forçam a saída da matéria-prima pelos canais da matriz, a medida que esta gira (Fig. 6). As lâminas cortantes, na saída dos canais, cortam os pellets no comprimento padronizado, os quais caem pela descarga da porta giratória (LEAVER, 1970). Unidades comerciais são capazes de produzir cerca de 2,5 a 5 ton./h (FEED MACHINERY, 2023), e sua potência é aproximadamente entre 15 a 40 kwh/ton (GROVER; MISHRA, 1996).

4.1.2. Variáveis no processo de densificação

Os moinhos de pelotas são sistemas comumente usados para se criar uma matéria-prima uniforme com características específicas para aplicações de energia alternativa, ou seja, bionergia. O controle destas variáveis, incluindo o processo em si e as variáveis da matéria-prima, é de grande importância para se alcançar os desejados valores de densidade, durabilidade e qualidade dos pellets (MacMAHON, 1984). Por exemplo, Shaw (2008) identificou que as variáveis do processo (temperatura da matriz, pressão e geometria), variáveis da matéria-prima (umidade, formato e tamanho das partículas) e a composição da matéria-prima (proteína, gordura, celulose, hemicelulose e lignina) desempenham um importante papel na qualidade final da biomassa densificada.

4.1.2.1. Temperatura

Atributos de qualidade como, por exemplo, a durabilidade e a densidade das biomassas densificadas, são significativamente influenciados pela temperatura. Hall e Hall (1968) descobriram que para um determinado teor de umidade, a pressão necessária para obter uma determinada densidade de grama bermuda e alfafa era menor se houvesse adição de calor na matriz. Tabil (1996) descobriu que temperaturas de peletização acima de 90°C melhoraram significativamente os valores de durabilidade de pellets de alfafa. Experimentos com briquetagem de palha de trigo (SMITH *et al.*, 1977) demonstraram que o grau de compactação e estabilidade dimensional aumentavam à medida que a temperatura aumentava de 60 para 140°C, e que acima de 110°C ocorria degradação química e com aparecimento de descoloração dos briquetes. Por fim, Kaliyan e Morey (2006) utilizaram a temperatura de transição vítrea¹ da lignina para entender seu comportamento de densificação. De seus estudos, eles incluíram três temperaturas diferentes: duas dentro da temperatura de transição vítrea (75 e 100°C) e uma externa (150°C). O

¹ Temperatura de transição vítrea é a energia de ativação necessária para que ocorra um movimento cooperativo das cadeias poliméricas, fazendo com que o material/partícula passe de um estado sólido rígido para borrachoso. Ao atingir essa temperatura as cadeias são capazes de deslizarem-se umas sobre as outras quando uma força é aplicada (COWIE; ARRIGI, 2007).

interessante é que os valores de durabilidade da biomassa densificada fora da temperatura de transição vítrea (150°C) foram inferiores em comparação com aqueles dentro da faixa, o que demonstra que há uma temperatura ideal para este componente, e provavelmente para os outros também.

4.1.2.2. Pressão

A pressão desempenha um importante papel para a qualidade de pellets advindos da biomassa agrícola. Estudos em briquetagem com resíduos de azeitona e papel demonstraram que há uma pressão ideal e que acima dela podem resultar em fraturas devido a dilatação (YAMAN *et al.*, 2000). Altas pressões e temperaturas durante a densificação podem desenvolver pontes sólidas, por difusão de moléculas de uma partícula para outra, nos pontos de contato, aumentando a densidade. Ainda, Li e Liu (2000) observaram que a compressão da serragem de carvalho, em taxas de aplicação de pressão de 0,24 a 5,0 MPa/s, gerou um efeito significativo na densidade seca do produto. Também, Demirbas *et al.* (2004) observaram que o aumento da pressão de 300 para 800 Mpa na biomassa com cerca de 7% de umidade inicialmente aumentou sua densidade acentuadamente (de 0,182 para 0,325 g/ml), e depois ligeiramente para 0,405 g/ml. Butler e McColly (1959) observaram que a densidade dos pellets é diretamente proporcional ao logaritmo natural da pressão aplicada durante a densificação, e ao se elevar a pressão ocorre um aumento significativo da densidade da unidade.

4.1.2.3. Geometria e velocidade da matriz

A geometria da matriz refere-se tanto ao tamanho como ao formato da matriz. Estas dimensões afetam a quantidade de material que pode ser peletizado e quantidade de energia necessária para a compressão. Além disso, a geometria da matriz também influencia as propriedades do produto como o teor de umidade, sua densidade aparente e durabilidade. A razão comprimento/diâmetro da matriz de peletização pode ser uma boa métrica para o grau de compressão necessária durante a peletização. Um aumento no comprimento da matriz de pellets, para a formação de pellets maiores, torna necessário um aumento na pressão de peletização, enquanto um aumento no diâmetro da matriz de pellets diminui a pressão de peletização. Consequentemente, as dimensões da matriz e dos canais de prensagem na matriz possuem forte

influência na determinação necessária da pressão para impulsionar a produção dos pellets através da matriz (HOLM *et al.*, 2006).

Ainda, Butler e McColly (1959) descobriram que para uma massa constante de material peletizado, a densidade e o comprimento dos pellets eram maiores para câmaras de menor diâmetro e a uma determinada temperatura. Tabil e Sokhansanj (1996b) ao estudarem o efeito de parâmetros de processo de peletização como o condicionamento de vapor, a geometria da matriz, a razão comprimento/diâmetro, a velocidade da matriz e os tamanhos de partículas da biomassa, descobriram que em temperaturas de condicionamento mais altas (>95°C) a durabilidade dos pellets aumentava. Tais pesquisadores também concluíram que a durabilidade dos pellets melhorava quando se utilizava uma matriz com razões de comprimento/diâmetro mais altas. Também, Hill e Pulkinen (1998) observaram que a durabilidade dos pellets de alfafa aumentava em cerca de 30-35% em uma razão de comprimento/diâmetro entre 8 e 10. Já, Heffner e Pfof (1973) avaliaram o efeito de três tamanhos de matrizes (4,8 × 44,5; 6,4 × 57,2; e 9,5 × 76,2 mm) sobre a durabilidade, constatando que os pellets produzidos na matriz menor tiveram os melhores valores de durabilidade. Por fim, em seu estudo de grãos secos de destilaria com solúveis (DDGS), Tumuluru *et al.* (2010b) descobriram que os diâmetros maiores de matriz, de 7,2 mm, produziam pellets de DDGS menos duráveis em comparação com diâmetros de matriz menores, de 6,4 mm, com e sem adição de vapor.

4.1.2.4. Umidade

A umidade desempenha um papel importante na formação de pellets (KALIYAN; MOREY, 2009), facilitando a gelatinização do amido, o desdobramento de proteínas e os processos de solubilização de fibras durante a densificação. A biomassa tratada com vapor é superior à biomassa bruta, pois com a adição de calor são modificadas as propriedades físico-químicas das partículas e, conseqüentemente, ocorre uma melhor ligação entre elas, o que resulta numa melhor qualidade de densificação também (THOMAS *et al.*, 1997). Mani *et al.* (2003; 2006) observaram que, durante a densificação, a umidade na biomassa aumenta a ligação através das forças de van der Waals das partículas, aumentando assim a área de contato delas; também, descobriram que a biomassa com baixa umidade (5–10%) resulta em briquetes mais densos, mais estáveis e mais duráveis em comparação com uma biomassa de maior umidade (15%). Já, estudos de Li e Liu (2000) observaram um teor de umidade ideal de aproximadamente 8% para produzir

briquetes de alta densidade. Ademais, eles também recomendaram um teor de umidade entre 5 a 12% para a produção de toras de boa qualidade em termos de densidade e propriedades de armazenamento de longo prazo para madeira dura, macia e casca.

Desta forma, se a densificação com teor de umidade ideal for realizada concomitantemente com adição de calor, ocorrerá um aumento da fusão da lignina e melhorará as características de ligação entre as partículas. Kaliyan e Morey (2009) sugerem que a umidade na biomassa afeta as temperaturas de transição vítrea durante a densificação; eles descobriram que, na palha de milho, em umidades ótimas entre 10 a 15%, a temperatura de transição vítrea diminuiu, o que resultou numa melhor ligação em temperaturas mais baixas de 70 a 90°C. Somado a isto, Chirife e Del Pilar (1994) observaram que o aumento no teor de umidade diminuiu significativamente as temperaturas de transição vítrea da lignina, amido e glúten. Posto isto, pode-se afirmar que o teor de umidade da biomassa na densificação possui efeito triplo: (i) reduzir a temperatura de transição vítrea; (ii) promover a formação de pontes sólidas; e (iii) aumentar a área de contato das partículas pelas forças de van der Waals.

4.1.2.5. Tamanho, forma e distribuição das partículas

Em geral, a densidade e a durabilidade dos pellets são inversamente proporcionais ao tamanho das partículas, pois partículas menores possuem maior área superficial durante a densificação. Estudos dos pesquisadores MacBain (1966) e Payne (1978) concluíram que materiais de moagem média ou fina são desejáveis na peletização, pois, por possuírem uma maior área superficial para adição de umidade durante o condicionamento a vapor, aumentará a gelatinização do amido e promoverá uma melhor ligação; além disso, seus estudos demonstraram que uma certa porcentagem de partículas finas a médias melhora a eficiência da peletização e reduz o seu custo. Contudo, partículas muito pequenas podem levar ao emperramento das peletizadoras e afetar a capacidade de produção, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição ideal no tamanho das partículas para produção de pellets de qualidade a partir de biomassa agrícola.

TAMANHO DA PENEIRA (mm)	MATERIAL RETIDO NA PENEIRA
3,0	≤1%
2,0	≤5%
1,0	≈20%
0,5	≈30%
0,25	≈24%
<0,25	≥20%

Fonte: adaptado de Payne (1987).

4.2. COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA

A composição da matéria-prima também contribui significativamente para a qualidade dos materiais densificados. A biomassa bruta possui baixo peso molecular e composições macromoleculares. As substâncias de baixo peso molecular incluem as matérias orgânica e inorgânica, enquanto as substâncias macromoleculares incluem a celulose, a hemicelulose e a lignina (MOHAN *et al.*, 2006). Compreender as principais mudanças de composição que ocorrem durante o processamento de biomassa pode ser útil para compreender o seu comportamento de compactação. Thomas *et al.* (1998) identificaram alguns dos ingredientes importantes que influenciam a qualidade do pellet, incluindo amido, proteína, polissacarídeos não-amiláceos (PNA), açúcar, gordura, fibra, matéria e água. As Tabelas 3 e 4 mostram a composição de algumas biomassas agrícolas e lenhosas. A madeira apresenta maior teor de lignina do que os outros materiais de biomassa; já a palha apresenta uma certa porcentagem de teor de proteína, o que pode promover a ligação.

Tabela 3 – Composição química de palhas agrícolas selecionadas.

COMPOSIÇÃO (%MS ^a)	PALHA DE CEVADA	PALHA DE CANOLA	PALHA DE AVEIA	PALHA DE TRIGO
Proteína	3,62	6,3	5,34	2,33
Gordura	1,91	0,69	1,65	1,59
Amido	0,11	0,34	0,12	2,58
Lignina	17,13	14,15	12,85	13,88
Celulose^b	33,25	42,39	37,60	34,20
Hemicelulose^c	20,36	16,41	23,34	23,68
Conteúdo de cinzas	2,18	2,10	2,19	2,39
^a MS = matéria seca				

Fonte: Adapa *et al.* (2009).

Tabela 4 – Composição bioquímica da biomassa herbácea e lenhosa.

MATERIAL VEGETAL	CONTEÚDO DE LIGNOCELULOSE (%)		
	HEMICELULOSE	CELULOSE	LIGNINA
Gramma de pomar (maturidade média)	40	32,0	4,7
Palha de arroz	27,2	34,0	14,2
Madeira de bétula	25,7	40,0	15,7
Pinheiro silvestre	28,5	40,0	27,7
Abeto	30,6	39,	27,5
Eucalipto	19,2	45,0	31,3
Bétula prateada	32,14	41,0	22,0

Fonte: Sjöstrom (1993) e Mohan, Pittman e Steele (2006).

4.2.1. Amido

O amido é um polímero D-glicose contendo cadeias ramificadas (amilopectina) ou não ramificadas (amilose) (COLLADO; CORKE, 2003) Seu comportamento é controlado principalmente pela gelatinização que sofre em altas temperaturas de processamento. Os grânulos de amido em altas temperaturas e umidade influenciam as propriedades de ligação de muitos alimentos e rações. A gelatinização do amido é um processo irreversível e influenciado pelas variáveis do processo de densificação, como o calor, a água, o cisalhamento e o tempo de residência (THOMAS *et al.*, 1999) Durante a peletização, o amido não atua apenas como um aglutinante, mas também como um agente lubrificante, facilitando o fluxo de materiais através do canal da matriz. Na indústria farmacêutica, o amido é amplamente utilizado como aglutinante ou enchimento em formulações de comprimidos (ALEBIOUWU; ITIOLA, 2002).

4.2.2. Proteína

A proteína que é aquecida durante o processo de densificação sofre desnaturação, levando à formação de novas ligações e estruturas com outras proteínas, lipídios e amidos disponíveis, ajudando a melhorar a capacidade de ligação (NIANZY; MAGA, 1992; COLLADO; CORKE, 2003). Também, segundo Briggs *et al.* (1999) e Wood (1987), ao se aumentar o teor de proteína aumenta a durabilidade do pellet. A proteína crua melhora a qualidade física dos pellets em comparação com as proteínas desnaturadas. Tabil (1996) relatou uma melhoria nas propriedades de ligação do material se houverem suficientes proteínas naturais durante a peletização. Também, Sokhansanj *et al.*(200) identificaram que a matéria-prima que contém maiores proporções de amido e proteína, produzirá pellets mais duráveis e de maior qualidade do que uma biomassa contendo apenas material celulósico. Além disso, estes autores demonstraram que o teor de umidade ideal para peletização de materiais celulósicos é de 8 a 12%, enquanto para materiais de alcatrão e proteínas (principalmente em rações animais), a umidade ideal pode variar até 20%.

4.2.2. Lipídeos

O teor de gordura na biomassa atua como lubrificante durante a peletização, aumentando o rendimento e reduzindo a pressão de peletização (TABIL, 1996). Contudo, elevados teores de gordura pode dificultar a ligação entre as partículas. Briggs *et al.* (1999) descobriram que o

aumento do teor de óleo produziu pellets de qualidade inferior, uma vez que a gordura é hidrofóbica e tende a interferir na ligação das partículas durante a peletização.

4.2.4. Celulose

A celulose é um composto polissacarídeo orgânico ($C_6H_{10}O_5$) e que consiste de uma cadeia linear de várias centenas a mais de dez mil unidades de D-glicose ligadas β (1 \rightarrow 4) (UPDEGRAFF, 1969; CRAWFORD, 1981). Dentro das células vegetais, a celulose forma microfibrilas cristalinas que são cercadas por celulose amorfa (CHEN; LICKFIELD; YANG, 2004). A integridade estrutural da celulose é produzida por ligações de hidrogênio que ocorrem entre os monômeros de glicose (GOLDSTEIN, 1981). Segundo Nelson e Cox (2005) a celulose é considerada uma abundante fonte de carbono da biomassa; devido a sua estrutura semicristalina e suas ligações de hidrogênio, a celulose não é um adesivo adequado; porém, tal limitação pode ser superada por tratamento térmico na faixa de secagem, tornando a molécula mais flexível (HON, 1989).

4.2.5. Hemicelulose

A hemicelulose é qualquer um dos vários heteropolímeros (polissacarídeos de matriz), como as arabinoxilanos, presentes junto à celulose em quase todas as paredes celulares das plantas. Enquanto a celulose é cristalina, forte e resistente à hidrólise, a hemicelulose tem uma estrutura aleatória e amorfa com pouca resistência. Ela é facilmente hidrolisada usando-se um ácido ou base diluídos, como muitas enzimas hemicelulases. A estrutura amorfa das hemiceluloses – que é facilmente hidrolisada ou dissolvida em solução alcalina – resulta de suas ramificações. Alguns pesquisadores acreditam que a ligação natural pode ocorrer devido aos produtos adesivos produzidos pela degradação da hemicelulose (GROVER; MISHRA, 1996).

4.2.6. Lignina

A lignina é um composto químico complexo mais comumente derivado da madeira e parte integrante das paredes celulares secundárias das plantas e de algumas algas (LEBO *et al.*, 2001; MARTONE *et al.*, 2009). A lignina é um polímero de rede aleatória com uma variedade de ligações baseadas em unidades de fenil-propano (ZANDERSONS, 2004). A molécula de lignina fornece diversas finalidades estruturais como, por exemplo, atuar como “cola” para as fibras de

celulose. Além disso, a lignina desempenha um papel crucial na condução de água nos caules das plantas. Enquanto os componentes polissacarídeos das paredes celulares das plantas são altamente hidrofílicos e, portanto, permeáveis à água, a lignina é mais hidrofóbica, o que ajuda a melhorar o comportamento de armazenamento.

A lignina ajuda na construção de pontes sólidas em temperaturas elevadas e desempenha um papel significativo na densificação da biomassa. A lignina é o componente que permite a adesão à estrutura da madeira e atua como um agente enrijecedor e de volume. Acredita-se, em geral, que a madeira altamente lignificada é mais durável e, portanto, uma boa matéria-prima para muitas aplicações. É também um excelente combustível, pois a lignina rende mais energia quando queimada do que a celulose. A presença de lignina em materiais vegetais permite a peletização sem adição de ligantes (Tabela 4). Van Dam *et al.* (2004) relataram que a lignina apresenta propriedades termofixas em temperaturas de trabalho $>140^{\circ}\text{C}$ e atua como uma resina intrínseca, produzindo pellets mais duráveis.

Acreditava-se que níveis mais elevados de lignina conduziriam a formação de pellets mais duráveis devido a lignina atuar semelhantemente a uma “cola” ao unir as partículas. Entretanto, Lehtikangas (1999, 2000) relatou uma fraca correlação entre o teor de lignina e a durabilidade dos pellets. Da mesma forma, Wilson (2010) concluiu que não existe uma relação consistente entre o teor de lignina e a durabilidade dos pellets para madeiras duras e macias. Ademais, demonstrou que uma mistura de biomassa lenhosa com um maior teor de lignina proporcionou pellets menos duráveis em comparação à amostras puras. Bradfield e Levi (1984) relataram que, em amostras de madeira, quando o conteúdo de lignina mais extrativos ultrapassam o limite de 34%, ocorre uma diminuição na durabilidade dos pellets.

4.3. PRÉ-TRATAMENTO DA BIOMASSA

O pré-tratamento desempenha um papel muito importante durante a densificação, pois prepara a biomassa lignocelulósica para diferentes sistemas de densificação. Ele é capaz de produzir diferentes produtos densificados de alta qualidade para diferentes aplicações de uso final. Em geral, o pré-tratamento melhora os atributos de qualidade (maior durabilidade e densidades), as características de armazenamento e manuseio e, conseqüentemente, a logística de transporte. Alguns métodos promissores de pré-tratamento para aplicações de bioenergia incluem

(i) moagem, (ii) pré-aquecimento/condicionamento de vapor, (iii) explosão de vapor, (iv) torrefação e (v) AFEX (ERANKI; BALS; DALE, 2011).

4.3.1. Moagem

Antes da densificação, a biomassa é moída até um determinado tamanho de partícula. Essa moagem é responsável por decompor parcialmente a lignina, aumentar a área de superfície de contato dos materiais e, portanto, contribuir para uma melhor ligação. Estudos de Peleg (1977) Peleg e Mannheim (1973) e Mani *et al.* (2006) concluíram que o tamanho das partículas tem um efeito significativo nas características de ligação e nas propriedades mecânicas dos pellets. Em primeiro lugar, os pós finos apresentam maiores vantagens por possuírem maior número de pontos de contato, maior área superficial exposta, bem como maior energia superficial por unidade de peso, independentemente de suas características físicas e químicas.

4.3.2. Pré-aquecimento e o condicionamento à vapor

O pré-aquecimento da biomassa, antes da densificação, é amplamente utilizado, pois resulta num produto de maior qualidade. A maioria dos produtores comerciais de pellets, e briquetes também, utiliza o pré-aquecimento para a formação de um produto mais estável e denso (BHATTACHARYA *et al.*, 1986; BHATTACHARYA, 1993). Os pesquisadores Aqa e Bhattacharya (1992) demonstraram que o pré-aquecimento pode aumentar o rendimento da densificação e reduzir a energia necessária exercida para a produção de um quilograma de produto formado. Também, o condicionamento à vapor é um processo em que o vapor é adicionado à biomassa para a lignina, um aglutinante natural, se tornar mais disponível durante a densificação (LIU; WYMAN, 2005). Desta forma, pode-se afirmar que a ruptura de materiais de biomassa lignocelulósica, por meio do condicionamento à vapor, melhorará as características de compressão da biomassa.

4.3.3. Explosão a vapor

A explosão a vapor é uma técnica na qual um vapor de alta pressão é introduzido em um reator, por um curto período de tempo, e depois liberado, o que faz com que o material se expanda rapidamente (LAM *et al.*, 2011). Este processo produz mudanças físicas, químicas e estruturais significativas na biomassa, tornando a lignina mais disponível ainda para ligações durante a peletização (LIU; WYMAN, 2005). Além disso, a explosão a vapor é capaz de decompor a lignina em produtos de baixo peso molecular e que retêm sua estrutura básica, além

de serem moderadamente mais reativos. Mosier *et al.* (2005) e Zandersons *et al.* (2004) afirmam que as características de compressão e compactação da biomassa podem ser melhoradas por meio do pré-tratamento por explosão a vapor devido a ativação da lignina e mudanças na estrutura da celulose, o que gera novas ligações e, por sua vez, criam pellets mais duráveis.

A explosão a vapor também traz benefícios em termos de hidrólise enzimática. Por exemplo, a lignina, com a explosão a vapor, torna-se mais solúvel em soluções alcalinas ou certos solventes orgânicos, devido à clivagem de suas ligações por meio da despolimerização; já hemicelulose torna-se parcialmente decomposta, deixando-a solúvel em água e permitindo que se condense com a lignina, o que aumenta o teor de lignina. O principal efeito da explosão a vapor é o grande aumento na acessibilidade da celulose à hidrólise enzimática, além de ser mais ecológica que métodos químicos de tratamento (FOODY, 1980; MARCHESSAULT *et al.*, 1981ab; DeLONG, 1981; KAAR, 1998)

4.3.4. Torrefação

A torrefação é o aquecimento lento da biomassa em um ambiente inerte até uma temperatura máxima de 300°C (FELFLI *et al.*, 1998; BOURGEOIS; DOAT, 1985; ZANZI *et al.*, 2002). Esta técnica remove a maioria dos compostos produtores de fumaça e outros voláteis ali existentes, resultando em um produto final com aproximadamente 70% do peso inicial e entre 80 a 90% do conteúdo energético original (ARCATE, 2002; 2011). As principais reações de decomposição afetam as hemiceluloses e, em menor grau, a lignina e a celulose (SHAFIZEDEH, 1985; WILLIAMS; BESLER, 1996).

Ainda, a torrefação ajuda a desenvolver uma matéria-prima uniforme e melhora a ligação durante a peletização, por aumentar o número de locais de lignina disponíveis, quebrar a matriz de hemicelulose e formar estruturas gordurosas insaturadas, resultando, por conseguinte, em densidades aparentes de 750 a 850 kg/m³ e densidades energética de 20 GJ/ m³ (KOUKIOS, 1993; LIPINSKY *et al.*, 2002). Bergman (2005) indicou que a torrefação resulta em polímeros de biomassa enfraquecidos (isto é, menos fibrosos e mais plásticos) e catalisa modificações químicas que levam a estruturas mais gordurosas, que atuam como agentes de ligação durante a densificação. Além disso, o teor de lignina aumenta normalmente de 10 a 15% à medida que o processo de desvolatilização durante a torrefação leva à degradação da hemicelulose. Estudos de densificação de biomassa torrada a 250°C indicaram que a pressão e a energia necessárias para a

densificação podem ser reduzidas pela metade e que o rendimento aumenta em duas vezes quando comparado com a densificação de uma biomassa bruta (REED; BRYANT, 1978; LINPINSLY *et al.*, 2002; BERGMAN, 200).

4.3.5. Expansão da fibra de amônia (AFEX)

O pré-tratamento AFEX da biomassa (do inglês *Ammonia fiber explosion*, ou explosão de fibra de amônia) utiliza amônia aquosa a temperaturas e pressões elevadas para produzir rendimentos de hidrólise mais elevados para muitas matérias-primas herbáceas (TEYMOURI *et al.*, 2005). Este processo reduz a lignina e remove alguma hemicelulose; concomitantemente, descristaliza a celulose na biomassa. A principal vantagem deste processo é a pouca degradação da biomassa (DALE, 2009). Esse processo também possui a vantagem de eliminar uma fase líquida separada e a possibilidade na produção de uma carga muito elevada de sólidos. O processo resulta num produto preto que oferece características de densificação melhoradas ao abrir a estrutura celulósica da biomassa e disponibilizar mais locais para a ligação da lignina. Eranki *et al.* (2011), em seu estudo sobre depósitos avançados de processamento de biomassa, avaliaram que a densificação de produtos por AFEX resolveram a logística de armazenamento e transporte.

4.4. PROPRIEDADES DA BIOMASSA

4.4.1. Umidade

A umidade final da biomassa densificada é muito importante e depende muito das condições do processo em si, como a umidade inicial, temperatura e pressão. Uma maior umidade no produto final ocorre quando a umidade inicial é superior a 15%. Mani *et al.* (2006) observaram que umidade inicial >15% e pressão >15 MPa possuem um efeito negativo na qualidade final do briquete por ocorrerem trincas. Ao contrário, uma menor umidade nos pellets (<5%) pode resultar em perda de receita, pois os pellets tendem a se quebrar, pois se tornam mais finos durante o armazenamento e o transporte pelo atrito entre si. Por sua vez, pellets com alto teor de umidade podem estar sujeitos a deterioração devido à decomposição microbiana, resultando em perda significativa de matéria durante armazenamento e transporte (TUMULURU *et al.*, 2010c).

4.4.2. Densidade unitária e aparente

A densidade unitária e a densidade aparente são parâmetros importantes para armazenamento e transporte. Vários pesquisadores descobriram que esses parâmetros são grandemente influenciados pelo teor de umidade e tamanho das partículas do material, bem como pela pressão e temperatura durante o processo (RHEN *et al.*, 2005; MANI *et al.*, 2006). Além disso, afirmam que materiais com maior umidade e tamanhos de partículas maiores reduzem a unidade e a densidade aparente do produto, enquanto frente à temperaturas e pressões de processo mais altas resultam em pellets com maior unidade e a densidade aparente. Rhen *et al.* (2005) também descobriram que alta densidade unitária seca corresponde a alta resistência à compressão. Tumuluru *et al.* (2010d) em seu artigo sobre peletização de DDGS, concluíram que tanto a densidade unitária quanto a aparente dependem da umidade de alimentação e da temperatura da matriz, onde uma densidade unitária máxima de 1.200 kg/m^3 e uma densidade aparente de 700 kg/m^3 são alcançáveis em temperaturas de cerca de 100°C e umidade de alimentação de cerca de 5–7%.

4.4.3. Durabilidade

A durabilidade é um parâmetro de qualidade definido como a capacidade dos materiais densificados de permanecerem intactos quando manuseados durante o armazenamento e transporte; ou seja, a durabilidade do pellet é seu poder físico e resistência para não ocorrer um rompimento. Medições de durabilidade, ou de resistência abrasiva, ajudam a simular forças de manuseio mecânicas ou pneumáticas para ajudar ou controlar a qualidade da alimentação. Diferentes tipos de equipamentos (testador Holmen, tambor rotativo, testador Ligno e testador Dural) são usados para testar a durabilidade (MANI *et al.*, 2003). Resumidamente, sobre os dois primeiros, o Testador Holmen consiste em colocar uma amostra previamente pesada de pellets para ser movimentada por ar comprimido ao redor de um tubo fechado, geralmente por 30 segundos; já no tambor rotativo, uma amostra previamente pesada de material é colocada em uma câmara rotativa por um determinado período de tempo, geralmente 10 minutos a 50 rotações por minuto (KENNY; ROLLINS, 2008).

A umidade aumenta a durabilidade quando compostos solúveis em água, como açúcar, amido, carbonato de sódio, fosfato de sódio, sal de potássio e cloreto de cálcio, estão presentes na

ração (KALYIAN; MOREY, 2009). O alto teor de amido atua como um aglutinante e aumenta sua durabilidade. Entretanto, o amido natural possui menor capacidade de ligação que o amido gelatinizado, onde a umidade e o calor aceleram o processo (REECE, 1966; Van DAM *et al.*, 2004; ISRAELSEN *et al.*, 1981; THOMAS *et al.*, 1998). Também, a proteína plastificará com o calor e a umidade e atuará como aglutinante, aumentando a durabilidade dos produtos (23, WINOWISKI, 1988; BRIGGS *et al.*, 1999). Ao contrário, um alto teor de gordura resultará numa baixa durabilidade devido a gordura atuar como um lubrificante entre as partículas de alimentação e a parede da matriz (RICHARDSON; DAY, 1976; BRIGGS *et al.*, 1999; STARK, 1994; ÂNGULO *et al.*, 1996; CAVALCANTI, 2004).

A lignina, em temperaturas elevadas (140°C), atua como um aglutinante e aumenta a durabilidade. Porém, Bradfield e Levi (1984) observam que quando o teor de lignina e outros extrativos aumentam para acima de 35%, os valores de durabilidade tendem a diminuir. Eles afirmam que isto ocorre devido à natureza autoadesiva da lignina e dos outros extrativos que diminuem em concentrações mais elevadas por causa de sua natureza excessiva de mástique.

Outros fatores que aumentam a durabilidade são pré-aquecimento ou condicionamento a vapor, os quais aumentam a atividade de ligantes inerentes como lignina e amido, produzindo assim pellets mais duráveis. Contudo, este pré-aquecimento geralmente está restrito a 300°C, a fim de limitar a decomposição da biomassa (KALIYAN; MOREY, 2009). Sobre o condicionamento à vapor, tal técnica ajuda a liberar e ativar ligantes e lubrificantes naturais na ração, aumentando assim a gelatinização do amido, a desnaturação da proteína e a durabilidade do pellet (KALIYAN; MOREY, 2009).

Por fim, o tamanho das partículas e variáveis do processo, como dimensões da matriz, relações L/D e velocidades de rotação, também influenciam os valores de durabilidade dos pellets (19, KALIYAN; MOREY, 2009, MANI *et al.*, 2002, 2003).

4.4.4. Valor calorífero

Em geral, o valor calorífero de pellets, e dos briquetes também, depende das condições do processo, como temperatura, tamanho das partículas e pré-tratamento da ração. Geralmente, pellets com maior densidade apresentam maior valor calorífero. Os valores caloríficos típicos de pellets à base de madeira e palha variam de 17 a 18 MJ/kg (TUMULURU *et al.*, 2010b;

SATYANARAYANA *et al.*, 2010). Muitos pesquisadores observaram que os processos de pré-tratamento, como a explosão a vapor ou torrefação, antes da densificação, são capazes de aumentar o valor calorífico para 20 a 22 MJ/kg (SADAKA; NEGI, 2009; LAM *et al.*, 2021;; KLEINSCHMIDT, 2011).

Como comparativo com uma fonte não renovável, Silva *et al.* (2021), estudaram o gás liquefeito de petróleo (GLP) e duas fontes de biomassa como fontes de energia (Tabela 5).

Tabela 5 – Comparativo de valores de fontes de energia para produção de 1 tonelada de vapor.

MATERIAL	Quantidade (Kg) de combustível para 1 ton de vapor	Valor de Compra (R\$/ton)	R\$ combustível / ton de vapor	Redução de custo	Referências
GLP (m ³)	56,6	4.000,00	226,40	-	Copergas (2020)
Pellets de eucalipto (Kg)	152,3	797,00	121,40	46%	PelletBraz (2020)
Cavaco	246,3	150,00	37,00	84%	Pallebras (2019)

Fonte: adaptado de Silva *et al.* (2021)

É possível observar uma redução de custo significativa no uso das fontes de biomassa em relação ao GLP. Também, apesar de haver uma redução muito maior nos custos para o uso do cavaco, é importante salientar que o mesmo não é densificado como os pellets e, portanto, outros fatores devem ser considerados como o local disponível para estocagem de matéria-prima e seus custos de transporte, afinal a densidade do cavaco (380 Kg/m³) é muito inferior a dos pellets (657 Kg/m³). Por tais valores, seria necessária uma área de aproximadamente 2 vezes maior em para o cavaco em relação a área de estocagem necessária para os pellets. Ademais, a umidade de ambos é totalmente diferente sendo, em média, de 40% para o cavaco e 6% para os pellets, o que facilita grandemente o manuseio dos pellets (SILVA *et al.*, 2021).

Na Tabela 6, Pereira estudou outros tipos de biomassa de resíduos orgânicos, e seu valor calorífico comparando-o com o GLP e verificou que eles encontram-se próximo ao valor de 150 Kg de massa para a combustão de 1 tonelada de vapor.

Tabela 6 – Valor calorífico de fontes de biomassa

MATERIAL	Valor calorífico (Kcal/Kg)	Massa (Kg) de combustível para 1 ton de vapor
GLP	11.750,00	56,60
Madeira de Pinus	4.433,00	150,00
Ponteira de eucalipto	4.356,50	152,70
Resíduos de algodoeiro	4.523,70	147,00
Pellets de eucalipto	4.366,10	152,30
Bagaço de cana de açúcar	3.924,20	169,50
Casca de eucalipto	2.700,00	246,30
Capim elefante	4.745,90	140,10
Palha de arroz	4.366,10	152,30
Cavaco	4.241,90	156,80

Fonte: Pereira (2014).

5. COMPARATIVO ENTRE PROPRIEDADES DA BIOMASSA DE PELLETS

Nos capítulos anteriores foram abordados aspectos relativos tanto ao processo de peletização, como propriedades da biomassa que podem ser comparados entre as diversas fontes disponíveis. Para melhor visualização dos fatores relativos ao processo de produção dos pellets, a Tabela 7 a seguir traz as informações discutidas na fundamentação teórica acima de maneira a ressaltar os pontos relevantes que influenciam na qualidade mecânica do pellet.

Tabela 7 – Propriedades relevantes do processo de peletização

Propriedade	Descrição da influência na durabilidade
Temperatura	A adição de calor na matriz reduz a pressão necessária para densificação. Porém, para materiais lignocelulósicos, há uma temperatura ideal que está abaixo da temperatura de transição vítrea da lignina (150°C).
Pressão	Ao se elevar a pressão ocorre um aumento significativo da densidade da unidade, porém ultrapassar a pressão ideal pode resultar em fraturas devido à dilatação.
Geometria e velocidade da matriz	A durabilidade dos pellets melhora quando se utiliza uma matriz com razões de comprimento/diâmetro mais altas. O aumento no comprimento da matriz de pellets torna necessário um aumento na pressão, enquanto um aumento no diâmetro da matriz de pellets diminui a pressão de peletização.
Umidade	Efeito triplo: (i) reduzir a temperatura de transição vítrea; (ii) promover a formação de pontes sólidas; e (iii) aumentar a área de contato das partículas pelas forças de van der Waals. O teor de umidade ideal é de aproximadamente 8% para produzir briquetes de alta densidade.
Tamanho, forma e distribuição das partículas	Partículas menores possuem maior área superficial, aumentando a densidade e a durabilidade dos pellets durante a densificação. Porém, partículas muito pequenas podem levar ao emperramento das peletizadoras e afetar a capacidade de produção.

Fonte: adaptados de Butler e McColly (1959), Chifre e Del Pilar (1994), Hall e Hall (1968), HOLM *et al.* (2006), Kaliyan e Morey (2006), Li e Liu (2000), MacBain (1966), Payne (1978), Tabil e Sokhansanj (1996b) e YAMAN *et al.* (2000).

Assim como foram elencados os fatores relativos ao processo, também para fins de melhor visualização, a Tabela 8 abaixo traz as características da biomassa em relação a sua durabilidade mecânica.

Tabela 8 – Propriedades relevantes da composição da biomassa

MATERIAL	Bagaço de cana de açúcar
Amido	A gelatinização do amido auxilia como aglutinante do pellet e também como lubrificante do canal da matriz.
Proteína	Quando aquecida sofre desnaturação formando novas ligações que ajudam a melhorar a durabilidade e ligação do pellet. Materiais ricos em proteína tem mais umidade ideal (20%).
Lipídeos	Atua como lubrificante aumentando o rendimento e diminuindo a pressão necessária, porém elevados teores podem dificultar a ligação entre partículas por ser hidrofóbica.
Celulose	Abundante fonte de carbono, não é um adesivo adequado, porém pode melhorar através do tratamento térmico que a torna mais flexível.
Hemicelulose	Facilmente hidrolisada, pode ocorrer ligação natural devido aos produtos adesivos formados na degradação da hemicelulose.
Lignina	Apresenta propriedades termofixas em temperaturas de trabalho >140°C. Porém quando o conteúdo de lignina mais extrativos ultrapassam o limite de 34%, ocorre uma diminuição na durabilidade dos pellets.

Fonte: adaptados de ALEBIOWU; ITIOLA (2002), Bradfield e Levi (1984), Briggs *et al.* (1999), GROVER; MISHRA (1996), HON (1989), Nelson e Cox (2005), Sokhansanj *et al.* (2000), Tabil (1996), THOMAS *et al.* (1999) e Van Dam *et al.* (2004).

Após a descrição dos métodos de peletização e suas variáveis, da biomassa e seus componentes, dos pré-tratamentos existentes e das propriedades da biomassa, foram escolhidas quatro tipos de biomassa de resíduos orgânicos que foram peletizadas para comparação entre si, o que pode ser observado na Tabela 9. Tal seleção foi feita com base na disponibilidade das informações acerca de propriedades dos pellets destas biomassas e experimentos feitos para definição dos parâmetros escolhidos para serem abordados, principalmente em relação a parâmetros mecânicos, como a durabilidade do pellet.

Tabela 9 – Caracterização da biomassa

MATERIAL	Bagaço de cana de açúcar	Poda de árvore	Serragem	Colmos de Sorgo
Densidade aparente (kg.m ⁻³)	470	524	490	660
Durabilidade (%)	80,39	83,64	85,93	98,4
Umidade (%)	5,9	10,3	12,8	7,3
Poder Calorífico (MJ.kg ⁻¹)	12,51	18,76	20,02	17,66
Densidade energética (GJ.m ⁻³)	4,93	8,31	8,30	10,04
Carbono (%)	34,6	46,8	49,1	41,4
Oxigênio (%)	25,0	37,2	39,7	49,1

Fonte: adaptados da Silva *et al.* (2016) e Simone *et al.* (2017).

Os valores obtidos na caracterização das biomassas demonstram uma densidade aparente mais elevada foi encontrada nos pellets de colmos de Sorgo (660 kg.m⁻³) quando comparado aos pellets de poda de árvore, serragem e bagaço de cana de açúcar. Em quase todas as normas internacionais, aceitam-se valores superiores a 600 kg.m⁻³ para caracterizar um combustível com alto padrão. Obernberger *et al.* (2006) salientam que valores baixos na densidade aparente resultam em diversas desvantagens como um maior custo de transporte e influenciam a capacidade de estocagem de produtores e consumidores.

Para a durabilidade mecânica, a Tabela 9 apresenta registros mais elevados para pellets de colmos de Sorgo, estando acima de 98%, valor muito mais elevado que as outras biomassas. Como exposto na fundamentação teórica (Mani *et al.*, 2006), existe uma correlação negativa entre “extremos” de umidade e durabilidade em pellets. No caso dos pellets de poda de árvore e serragem uma menor durabilidade, quando comparada a dos pellets de colmo de Sorgo, pode estar associada com uma mais elevada umidade apresentada que foi, respectivamente, de 10,3% e 12,8%, o que traz um efeito negativo na qualidade final do briquete por ocorrerem trincas (Mani *et al.*, 2006). Ao contrário, uma menor umidade nos pellets, como ocorreu nos pellets de bagaço de cana de açúcar pode resultar em perda de receita também, pois os pellets tendem a se quebrar, pois se tornam mais finos durante o armazenamento e o transporte pelo atrito entre si (Mani *et al.*, 2006). Considerando a Norma ISO 17225-2, que exige uma durabilidade de pelo menos 97,5%, tais pellets (EPC, 2015) não possuem alto padrão de qualidade para esta característica e não suportaria a desintegração física, devido a impactos mecânicos durante o armazenamento e o transporte (TUMULURU, 2014).

Sobre os dados apresentados de poder calorífico, houve um alto valor nos pellets da serragem, da poda de árvore e de colmos de Sorgo, respectivamente, 20,02 MJ/kg, 18,76 MJ/kg e 17,66 MJ/kg, quando comparado com o baixo valor de pellets de bagaço de cana de açúcar (12,51 MJ/kg). Os três primeiros possuem uma maior quantidade de carbono e oxigênio, como apresentado na Tabela 9, em comparação com o bagaço de cana, e tais elementos químicos estão diretamente relacionados com o poder calorífico dos materiais (JENKINS *et al.*, 1998).

Por fim, a densidade energética de pellets da serragem, da poda de árvore e de colmos de Sorgo, respectivamente, 8,30 GJ/m³, 8,31 GJ/m³ e 10,04 GJ/m³, também foram superiores a dos pellets de bagaço de cana de açúcar (4,93 GJ/m³). Tais valores estão diretamente relacionados à densidade aparente e ao poder calorífico de cada pellet, sendo resultado da interação entre ambos os aspectos, com alguma eficiência de queima energética agregada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do presente trabalho e o estudo dos artigos citados, foi possível considerar que os métodos de peletização são importantes, não apenas para diminuir a emissão de gases CO₂ por meio de fontes de energia não renovável, mas também para utilizar os resíduos orgânicos de forma sustentável, diminuindo os impactos ambientais pelo incorreto descarte desses resíduos. Além disso, vale destacar que são necessários investimentos em tecnologias mais avançadas, junto à divulgação de informações sobre as técnicas existentes, bem como a criação políticas públicas para fomentar a utilização de tais resíduos como fonte de energia alternativa.

Outro ponto chave é que os trabalhos analisados apresentaram apenas resultados laboratoriais e, portanto, ainda são necessárias pesquisas que demonstrem a viabilidade e aplicabilidade de tais resultados em projetos de produção de larga escala e, conseqüentemente, a real produção energética para uma determinada região e os benefícios ali gerados.

Por fim, o desenvolvimento deste trabalho permitiu que os conhecimentos da graduação fossem usados de forma integrada para a análise global do problema, que tem um cunho tecnológico e também prático. Tanto a parte térmica e de propriedades de uso dos pellets quanto sua produção a partir da biomassa *in natura* passam por áreas tradicionais da engenharia química, portanto, há um contexto muito claro de estudo.

7. CONCLUSÕES

Por meio do presente trabalho foi possível concluir que os métodos de peletização de biomassa de resíduos orgânicos são importantíssimos para:

a) diminuir o volume de estocagem, o que pode chegar a uma diminuição pela metade do volume;

b) aumentar a durabilidade dos pellets, o que é essencial para sua manutenção física principalmente durante o manuseio e transporte por maquinários e a longas distâncias;

c) aumentar o valor calorífico por unidade de volume através da densificação e alterações em suas variáveis, o que é fundamental para uso como energia alternativa frente a fontes de energia não renováveis.

Além disso, foi possível comparar pellets de diferentes biomassas, avaliando a importância da umidade do pellet no resultado final de durabilidade do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, R.; POLLEX, A.; ZENG, T.; KIRSTEN, C.; RÖVER, L.; BERGER, F.; LENZ, V.; WERNER, H. Systematic homogenization of heterogenous biomass batches: Industrial-scale production of solid biofuels in two case studies. **Biomass and Bioenergy**, v.173, n. 106808. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106808>
- ADAPA, P.K.; BUCKO, J.; TABIL, L.G.; SCHOENAU, G.; SOKHANSANJ, S. Pelleting Characteristics of Fractionated Suncure and Dehydrated Alfalfa Grinds. **ASAE/CSAE North-Central Intersectional Meeting**, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, September 27–28 (2002).
- ADAPA, P.K.; TABIL, L.G.; SCHOENAU, G. Compression characteristics of selected ground agricultural biomass. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, Manuscript1347, 11. 2009.
- ALEBIOWU, G.; ITIOLA, O.A. Compression characteristics of native and pregelatinized forms of sorghum, plantain, and corn starches and the mechanical properties of their tablets. **Drug Development and Industrial Pharmacy**, v.28, n.6, p.663–672. 2002.
- AQA, S.; BHATTACHARYA, S.C. Densification of preheated sawdust for energy conservation. **Energy**, v.17, n.6, p.575–578. 1992.
- ARCATE, J.R. New process for torrefied wood manufacturing. *Bioenergy Update 2 (2000) [Online]*. Disponível em https://www.bioenergyupdate.com/magazine/security/NL0400/bioenergy_update_april_2000.htm. Acesso em 11 jan. 2024.
- ARCATE, J.R. Global markets and technologies for torrefied wood in 2002. **Wood Energy**, v.5, p.26–28. 2002.
- BAJWA, D.S.; PETERSON, T.; SHARMA, N.; SHOJAEIARANI, J.; BAJWA, S.G. A review of densified solid biomass for energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.96, p.296–305. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040>
- BERGMAN, P.C.A. Combined torrefaction and pelletisation: The TOP process, **Energy research Centre of the Netherlands Report # ECN-C-05-073**. 2005.
- BRADFIELD, J.; LEVI, M.P. Effect of species and wood to bark ratio on pelleting of southern woods. **For Prod Journal**, v.34, p.61–63. 1984.
- BHATTACHARYA, S.C. State-of-the-art of utilizing residues and other types of biomass as an energy source. **International Energy Journal**, v.15, n.1, p.1–21. 1993.
- BHATTACHARYA, S.C.; SETT, S.; SHRESTHA, R.M. State of the art for biomass densification. **Energy Source**, v.11, p.161–182. 1989.

- BOURGEOIS, J.; DOAT, J. Proceedings conference on bioenergy. **Göteborg**, v.3, p.153. 1985.
- BRIGGS, J.L.; MAIER, D.E.; WATKINS, B.A.; BEHNKE, K.C. Effects of ingredients and processing parameters on pellet quality. **Poultry Science**, v.78, p.1464–1471. 1999.
- BUTLER, J.L.; McCOLLY, H.F. Factors affecting the pelleting of hay. **Journal of Agricultural Engineering**, v.40, p.442–446. 1959.
- CAVALCANTI, W.B. The effect of ingredient composition on the physical quality of pelleted feeds: A mixture experimental approach. **Tese de Doutorado** (Ciência e Indústria de Grãos), Kansas State University, Manhattan, KS, USA. 2004.
- CHEN, W.; LICKFIELD, G.C.; YANG, C.Q. Molecular modeling of cellulose in amorphous state, part I: Model building and plastic deformation study. **Polymer**, v.45, p.1063–1071. 2004.
- CHEN, P.Y.; CHEN, S.T.; HSU, C.S.; CHEN, C.C. Modeling the global relationships among economic growth, energy consumption and CO₂ emissions. **Renew Sustain Energy Review**, v.65, p.420–431. 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.074>
- CHEN, W-H; ZHUANG, Y-Q; LIU, S-H; JUANG, T-T; TSAI, C-M. Product characteristics from the torrefaction of oil palm fiber pellets in inert and oxidative atmospheres. **Bioresour Technology**, v.199, p.367–374. 2016b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.066>
- CHIRIFE, J.; DEL PILAR, M. Water activity, glass transition, and microbial stability in concentrated/semimoist food systems. **Journal of Food Science**, v.59, n.5, p.921–927. 1994.
- COLLADO, L.S.; CORKE, H. Starch properties and functionalities. *In: Characterization of Cereals and Flours*. Ed. KALETUNÇ, G.; BRESLAUER, K.J. Marcel Dekker, Inc.: York, USA. 2003.
- COMOGLU, T. An overview of compaction equations. **Journal of Ankara University Faculty of Pharmacy**, v.36, n.2, p.123–133. 2007.
- COP26. UN climate change conference. Disponível em <https://ukcop26.org/cop26-goals/>. Acesso em 21 dez. 2023.
- COWIE, J.M.G.; ARRIGHI, V. **Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials**, 3rd Edn. (CRC Press, 2007) ISBN 0748740732.
- CRAWFORD, R.L. **Lignin Biodegradation and Transformation**. John Wiley and Sons Inc.:New York, USA. 1981.
- DALE, B.E. **Densifying and handling AFEX biomass: A cooperative research project**. Northern Plains Biomass Economy. Fargo:ND, USA. 2009.
- DeLONG, E.A. Method of rendering lignin separable from cellulose and hemicellulose in lignocellulosic material and the product so produced. **Canada Patent**, 1096374. 1981.

DENNY, P.J. Compaction equations: A comparison of the Heckel and Kawakita equations. **Powder Technology**, v.127, p.162–172. 2002.

DEMIRBAS, A.; SAHIN-DEMIRBAS, A.; HILAL-DEMIRBAS, A. Briquetting properties of biomass waste materials. **Energy Sources**, v.26, p.83–91. 2004.

ERANKI, P.L.; BALS, B.D.; DALE, B.E. Advanced regional biomass processing depots: A key to the logistical challenges of the cellulosic biofuels industry. **BioFPR** (under review) (2011).

EPC - **European Pellet Council**. Sistema de Certificação de Qualidade para Pellets de Madeira. Manual ENPlus®. 2015. Portal ENPlus. Disponível em <https://enplus-pellets.eu/pt/component/attachments/?task=download&id=216#:~:text=As%20classes%20de%20qualidade%20ENplus,%E2%89%A5%2098%2C0%20w%2D%25>. Acesso em 12 jan. 2024.

FAWZY, S.; OSMAN, A.I.; DORAN, J.; ROONEY, D.W. Strategies for mitigation of climate change: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v.18, p.2069–2094. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>

FEED MACHINERY. Pellet Mill description. [Online]. Disponível em http://www.feedmachinery.com/glossary/pellet_mill.php. Acesso em 31 dez. 2023.

FELFLI, F.F.; LUENGO, C.A.; BEATON, P.A. Bench unit for biomass residues torrefaction, in **Biomass for Energy and Industry**: Proceedings in International Conference. Ed KOPETZ, H. Wurzburg, Germany, p.1593–1595. 1998;

FOODY, P. Optimization of steam explosion pretreatment, DOE **Contract AC02-79ET23050**, Final Report. 1 B80. 1980.

GARCIA, D.P.; CARASCHI, J.C.; DAL BEM, E.A.; FERREIRA, J.P.; SOUZA, F.M.L.; VIEIRA, F.H.A.; DIAS, R.R. Mapa dos produtores brasileiros de biocombustíveis pellets. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v.12, n.4, p.333-339. 2018.

GOLDSTEIN, I.S. Composition of biomass. *In: Organic Chemicals from Biomass*. Ed. GOLDSTEIN, I.S. CRC Press In.: Boca Raton, FL, USA. 1981.

GROVER, P.D.; MISHRA, S.K. Biomass briquetting: Technology and practices. **Regional Wood Energy Development Program in Asia**, Tech. Report GCP/RAS/154/NET. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Bangkok, Thailand. 1996.

HALL, G.E.; HALL, C.W. Heated-die wafer formation of alfalfa and Bermuda grass. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.11, p.578–581. 1968.

HILL, B.; PULKINEN, D.A. **A study of factors affecting pellet durability and pelleting efficiency in the production of dehydrated alfalfa pellets**: A special report. Saskatchewan Dehydrators Association:Tisdale, SK, Canada. 1998.

HOLM, J.K.; HENRIKSEN, U.B.; HUSTAD, J.E.; SØRENSEN, L.H. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production. **Energy Fuels**, v.20, p.2686–2694. 2006.

IEA – **International Ergonomics Association**. World Energy Outlook. Disponível em <https://www.iea.org/reports/worldenergy-outlook-2020?mode=overview>. Acesso em 21 de dez. 2023.

IEMA – **Instituto de Energia e Meio Ambiente**. Nordeste concentra o maior número de termelétricas fósseis de serviço público conectadas ao SIN do Brasil, mostra estudo do IEMA, **Portal Energia e Ambiente**. 2022. Disponível em <https://energiaeambiente.org.br/nordeste-concentra-o-maior-numero-de-termeletricas-fosseis-de-servico-publico-conectadas-ao-sin-do-brasil-mostra-estudo-do-iema-20220630>. Acesso em 4 jan. 2024.

ISRAELSEN, M.; BUSK, J.; JENSEN, J. Pelleting properties of dairy compounds with molasses, alkali-treated straw and other byproducts. **Feedstuffs**, v.7, p.26–28 (1981)

JENKINS, B.; BAXTER, L.; MILES JR, T.; MILES, T. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v.54, n.1, p. 17-46. 1998

JOAQUIM, M. Peletizadora de matriz plana ou anelar? Qual escolher? **Portal LinkedIn**. 2020. Disponível em <https://pt.linkedin.com/pulse/peletizadora-de-matriz-plana-ou-anelar-qual-escolher-marcelo-joaquim>. Acesso em 31 dez. 2023.

KALIYAN, N.; MOREY, R. Densification characteristics of corn stover and switchgrass, ASABE Paper No. 066174, **ASABE Annual International Meeting**, Portland, OR. ASAE, St Joseph, MI, USA, July 9–12. 2006.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass Bioenergy**, v.33, n.3, p.337–359. 2009.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass Bioenergy**, v.33, n.3, p.337–359. 2009.

KALOUDAS, D.; PAVLOVA, N.; PENCHOVSKY, R. Lignocellulose, algal biomass, biofuels and biohydrogen: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v.19, p.2809–2824. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01213-y>

KANG, K.; QIU, L.; SUN, G.; ZHU, M.; YANG, X.; YAO, Y.; SUN, R. Codensification technology as a critical strategy for energy recovery from biomass and other resources—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.116, n.109414. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109414>

KENNY, M.; ROLLINS, D. A Qualidade Física da Ração. **Aviagen Brasil Tecnologia**, p.1-8. Fev. 2008. Disponível em http://en.aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/Portuguese/fevereiro2008-aqualidadefisicadaracao.pdf. Acesso em 10 jan. 2024.

KIRSTEN, C.; LENZ, V.; SCHRÖDER, H-W.; REPKE, J-U. Hay pellets — The influence of particle size reduction on their physical–mechanical quality and energy demand during production. **Fuel Processing Technology**, v.148, p. 163–174, 2016.

KLEINSCHMIDT, C. Overview of international developments in torrefaction. **Central European Biomass Conference 2011**, Graz, Austria. 2011.

KOLDISEVS, J.; ALBERTO, J.; GONZALES, R. Biogas Production in Rural Areas of Mexico, 2014.

KOUKIOS, E.G. Progress in thermochemical, solid-state refining of biofuels: From research to commercialisation, **Advances in Thermochemical Biomass Conversion**, 2, Bridgwater. 1993.

LAM, P.K.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C.J.; BI, X.; MELIN, S. Energy input and quality of pellets made from steam exploded Douglas Fir (pseudotsugamenziesii). **Journal of Energy Fuels**. 2011. *in press*

LEAVER, R. **The Pelleting Process**. Andritz Publications:USA. 1970.

LEBO, S.E. JR.; GARGULAK, J.D.; McNALLY, T.J. Lignin. *In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons, Inc.:New York, USA. 2001.

LEHTIKANGAS, P. Quality properties of fuel pellets from forest biomass. 52 f. 1999. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Manejo e Produto Florestal). Universidade de Ciências Agrárias da Suécia, Uppsala, Suécia. 1999.

LEHTIKANGAS, P. Quality properties of pelletised sawdust: Logging residues and bark. **Biomass Bioenergy**, v.20, p.351–360. 2000.

LI, Y.; LIU, H. High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. **Biomass Bioenergy**, v.19, p.177–186. 2000.

LIPINSKY, E.S.; ARCATE, J.R.; REED, T.B. Enhanced wood fuels via torrefaction, **Fuel Chemistry Division Preprints**, v.47, n.1, p.408–410. 2002.

LIU, C.; WYMAN, C.E. Partial flow of compressed-hot water through corn stover to enhance hemicellulose sugar recovery and enzymatic digestibility of cellulose. **Bioresource Technology**, v.96, p.1978–1985. 2005.

MACBAIN, R. **Pelleting Animal Feed**. American Feed Manufacturers Association:Arlington, VA, USA. 1966.

MacMAHON, M.J. Additives for physical quality of animal feed. *In: Manufacturing of Animal Feed*. BEAVEN, D.A. Turret-Wheatland Ltd: Herts/ England. 1984.

- MANI, S.; TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. Compaction characteristics of some biomass grinds. **AIC 2002 Meeting**, CSAE/SCGR Program, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, July 14–17. 2002.
- MANI, S.; TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. An overview of compaction of biomass grinds. **Powder Handling and Processing**, v.15, n.3, p.160–168. 2003.
- MANI, S.; TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. Specific energy requirement for compacting corn stover. **Bioresource Technology**, v.97, p.1420–1426. 2006.
- MARCHESSAULT, R.H.; COULOMBE, S.; HANAI, T.; MORIKAWA, H. Vinylic monomers from bioconversion of wood. **181st National Meeting of the American Chemical Society**, Atlanta, GA, USA. 1981.
- MARCHESSAULT, R.H.; COULOMBE, S.; MORIKAWA, H.; ROBERT, D. Characterization of aspen exploded wood lignin. **Canadian Journal of Chemistry**, v.1082, n.60, p.2372. 1981.
- MARTONE, P.T.; ESTEVEZ, J.M.; LU, F.; RUEL, K.; DENNY, M.W.; SOMERVILLE, C.; RALPH, J. Discovery of lignin in seaweed reveals convergent evolution of cell-wall architecture. **Current Biology**, v.19, n.2, p.169–175. 2009.
- MOSIER, N.; HENDERSON, R.; HO, N.; SEDLAK, M.; LADISCH, M.R. Optimization of pH-controlled liquid hot water pretreatment of corn stover. **Bioresource Technology**, v.96, p.1986–1993. 2005.
- NYANZI, F.A.; MAGA, J.A. Effect of processing temperature on detergent solubilized protein in extrusion-cooked cornstarch/soy protein subunit blends. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.40, p.131–133. 1992.
- MARTÍ-HERRERO, J.; PINO-DONOSO, M.; GALLO-MENDOZA, L.; PEDRAZA, G.X.; RODRÍGUEZ-JIMENEZ, L.; VÍQUEZ-ARIAS, J. Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biodigestores de pequeña y mediana escala en LAC. Redbiolac. 2016. Disponível em https://energypedia.info/images/4/49/Oportunidades-desarrollo-sector_seg%C3%BA-RedBioLAC.pdf. Acesso em 27 nov. 2023.
- MOHAN, D.; PITTMAN, C.U.; STEELE, P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy & Fuels**, v.20, p.848–889. 2006.
- MORENO-LOPEZ, M.; ALARCON-HERRERA, M.T.; MARTIN-DOMINGUEZ, I.R. Feasibility of pelletizing forest residues in northern Mexico. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, p.923–932. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9623-0>.
- NANDHINI, R.; BERSLIN, D.; SIVAPRAKASH, B.; RAJAMOHAN, N.; VO, D.V.N. Thermochemical conversion of municipal solid waste into energy and hydrogen: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v.20, p.1645–1669. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01410-3>

NEUENDORF, K.A. *The Content Analysis Guidebook*, 2^o ed., SAGE Publications, Inc., Los Angeles, 2017.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. **Biomass and Bioenergy**, v.30, n.11, p.973-982. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>

OSMAN, A.I.; MEHTA, N.; ELGARAHY, A.M.; AL-HINAI, A.; AL-MUHTASEB, A.H.; ROONEY, D.W. Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v.19, p.4075–4118. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01273-0>

PALLEBRAS (São Paulo). **Cotação de fornecimento**. Disponível em: <https://pallebras.com.br/>. Acesso em 9 jan. 2024.

PELEG, M. Flowability of food powders and methods for its evaluation—A review. **Journal of Food Process Engineering**, v.1, p.303–328. 1977.

PELEG, M.; MANNHEIM, C.H. Effect of conditioners on the flow properties of powdered sucrose. **Powder Technology**, v.7, p.45–50. 1973.

PELLETBRAZ. **Cotação de fornecimento**. 2020. Disponível em: <http://pelletbraz.com.br/>. Acesso em 9 jan. 2024.

PAYNE, J.D. Improving quality of pellet feeds. **Milling Feed Fertil**, v.161, p.34–41. 1978.

PATTNAIK, F.; TRIPATHI, S.; PATRA, B.R.; NANDA, S.; KUMAR, V.; DALAIM A.K.; NAIK, S. Catalytic conversion of lignocellulosic polysaccharides to commodity biochemicals: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v.19, p.4119–4136. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01284-x>

PEREIRA, B.L.C. Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico. 2014. 74 f. **Tese de Doutorado** (Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2014.

PIETSCH, W.B. **Size enlargement methods and equipments**, part 2: Agglomerate bonding and strength, in *Handbook of Powder Science and Technology*. Fayed ME and Otten L. Van Nostrand Reinhold Co.:New York. 1984.

REECE, F.N. Temperature, pressure, and time relationships in forming dense hay wafers, **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.9, p.749–751. 1966.

REED, T.B.; BRYANT, B. Densified biomass: A new form of solid fuel. **Solar Energy Research Institute Report #SERI-35**, Golden, CO. 1978.

RHEN, C.; GREF, R.; SJÖSTRÖM, M.; WÄSTERLUND, I. Effects of raw material moisture content: Densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. **Fuel Process Technology**, v.87, n.1, p.11–16. 2005.

RICHARDSON, W.; DAY, E.J. Effect of varying levels of added fat in broiler diets on pellet quality. **Feedstuffs**, 48:24. 1976.

RUMPF, H. **The strength of granules and agglomerates, in Agglomeration**. Knepper WA. Interscience Publishers:New York, USA. 1962. pp. 379–418.

SADAKA, S.; NEGI, S. Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics via torrefaction process. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v.28, n.3, p.427–434. 2009.

SARKER, T.R.; NANDA, S.; MEDA, V.; DALAI, A.K. Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v.21, p.231–24. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01510-0>

SASTRY, K.V.S.; FUERSTENAU, D.W. Mechanisms of agglomerate growth in green pelletization. **Powder Technology**, v.7, p.97–105. 1973.

SATYANARAYANA, N.; TAO, Y.; GLASER, C.; HANS-JC€ORG, G.; AY, P. Increasing the calorific value of rye straw pellets with biogenous and fossil fuel additives. **Energy Fuel**, v.24, p.5228–5234. 2010.

SEARCY, D.L.; MENTZER, J.T. A framework for conducting and evaluating research. **Journal of Accounting Literature**, v.22, p.130-167. 2003.

SCHINEBERGER, G.L. **Understanding Adhesives**. Hitchcock Publishing Co:Wheaton. 1971.

SHAFIZEDEH, F. Pyrolytic reactions and products of biomass. *In* **Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion**. Ed. OVEREND, R.P.; MILNE, T.A.; MUDGE, L.K. Elsevier, London, UK, p.183–217. 1985.

SHAW, M. Feedstock and process variables influencing biomass densification. 159f. 2008. Tese de Doutorado (Engenharia Agrícola e de Recursos Biológicos). Universidade de Saskatchewan, Saskatoon, Canadá. 2008.

SILVA, R.R. Peletizadora de Matriz Plana x Peletizadora de Matriz Anular. Canal **Youtube Portal R2S**. 2021. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=FQVgvt2F0lc>. Acesso em 31 de dez. 2023.

SILVA, D.P.; CONTRI, M.A.; FARIA, S.C.; MORAES, S.L. Biomassa e tecnologias de adensamento para aplicação energética. **Revista IPT Tecnologia e Inovação**, v.5, n.16, p.6-37. 2021.

SILVA-MARTÍNEZ, R.D.; SANCHES-PEREIRA, A.; ORTIZ, W.; GALINDO, M.F.G.; COELHO, S.T. The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: Challenges and opportunities. **Renewable Energy**, v.156, p.509-525. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.056>

SIMONE, M.L.F.; PARRELA, R.A.C.; MAY, A.; SCHAFFERT, R.E. Produção e caracterização de pellets de sorgo biomassa. **Brazilian Applied Science Review**, v.2, n.5, p.1682-1695, 2018.

SJOSTROM, E. Wood chemistry. *In: Fundamentals and Applications*, 2nd Edition, Academic Press:San Diego, CA, USA. 1993.

SMITH, I.E.; PROBERT, S.D.; STOKES, R.E.; HANSFORD, R.J. The briquetting of wheat straw. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.22, p.105–111. 1977.

SOKHANSANJ, S.; MANI, S.; BI, X.; ZAINI, P.; TABIL, L.G. Binderless palletization of biomass, ASAE Paper No. 056061, **ASAE Annual International Meeting**, Tampa, FL, USA, July 17–20, 2005. ASAE, St Joseph, MI, USA. 2005.

SPIRIDON, I. Extraction of lignin and therapeutic applications of lignin-derived compounds. A review. **Environmental Chemistry Letters**, v.18, p.771–785. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00981-3>

SRIVASTAVA, R.K.; SHETTI, N.P.; REDDY, K.R.; AMINABHAVI, T.M. Biofuels, biodiesel and biohydrogen production using bioprocesses. A review. **Environmental Chemistry Letters**, v.18, p.1049–1072. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00999-7>.

STARK, C.R. I. Pellet quality and its effect on swine performance; II. Functional characteristics of ingredients in the formation of quality pellets. 1994. **Tese de Doutorado** (Ciência e Indústria de Grãos), Kansas State University, Manhattan, KS, USA. 1994.

STELTE, W.; SANADI, A.R.; SHANG, L.; HOLM, J.K.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U.B. Recent developments in biomass pelletization-a review. **Bioresource Technology**, v.7, p.4451–4490. 2012.

TABIL, L.G. Binding and pelleting characteristics of alfalfa. 219f. 1996. **Tese de Doutorado** (Engenharia Agrícola e de Recursos Biológicos). Universidade de Saskatchewan, Canada. 1996.

TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. Compression and compaction behavior of alfalfa grinds, Part 1: Compression behavior. **Powder Handling Process**, v.8, n.1, p.17–23. 1996a.

TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. Compression and compaction behavior of alfalfa grinds, Part 2: Compaction behavior. **Powder Handling Process**, v.8, n.2, p.117–122. 1996b.

TANG, D.Y.Y.; YEW, G.Y.; KOYANDE, A.K.; CHEW, J.W.; VO, D.V.N.; SHOW, P.L. Green technology for the industrial production of biofuels and bioproducts from microalgae: a review. **Environmental Chemistry Letters**, 18:1967–1985. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01052-3>.

TEYMOURI, F.; LAUREANO-PEREZ, L.; ALIZADEH, H.; DALE, B.E. Optimization of the ammonia fiber explosion (AFEX) treatment parameters for enzymatic hydrolysis of corn stover. **Bioresour Technology**, v.96, n.18, p.2014–2018. 2005.

THOMAS, M.; van ZUILICHEM, D.J.; van der POEL, A.F.B. Quality of pelleted animal feed, part 2: Contribution of processes and its conditions. **Animal Feed Science and Technology**, v.64, p.173–192. 1997.

THOMAS, M.; van VLIET, T.; van der POEL, A.F.B. Physical quality of pelleted animal feed, part 3: Contribution of feedstuff components. **Animal Feed Science and Technology**, v.70, p.59–78. 1998.

THOMAS, M.; HUIJNEN, P.T.H.J.; van VLIET, T.; van ZUILICHEM, D.J.; van der POEL, A.F.B. Effects of process conditions during expander processing and pelleting on starch modification and pellet quality of tapioca. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.79, p.1481–1494. 1999.

TUMULURU, J.S. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. **Biosystems Engineering**, v.119, p.44-57. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.11.012>

TUMULURU, J.S.; WRIGHT, C.T.; KENNEY, K.L.; HESS, J.R. A review on biomass densification technologies for energy applications. [Online]. Tech. Report INL/EXT-10-18420, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho, USA (2010a). Disponível em https://www.researchgate.net/publication/236941299_A_Review_on_Biomass_Densification_for_Energy_Applications/link/0046351a446f28518f000000/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpbnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19. Acesso em 21 dez. 2023.

TUMULURU, J.S.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C.J.; BI, X.; ANTHONY, L.; STAFFAN, M.; SOWLATI, T.; EHSAN, O. Quality of wood pellets produced in British Columbia. **Applied Engineering in Agriculture**, v.26, n.6, p.1013–1020. 2010b.

TUMULURU, J.S.; KUANG, X.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C.J.; BI, X.; STAFFAN, M. Development of laboratory studies on the off-gassing of wood pellets. **Canadian Biological Engineering**, v.52, p.8.1–8.9. 2010c.

TUMULURU, J.S.; TABIL, L.G.; OPOKU, A.; MOSQUEDA, M.R.; FADEYI, O. Effect of process variables on the quality characteristics of pelleted wheat distiller's dried grains with soluble (DDGS). **Biosystems Engineering**, v.105, n.4, p.466–475. 2010d.

TUMULURU, J.S.; WRIGHT, C.; HESS, J.R.; KENNEY, K.L. Review: A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.5, p.683–707. 2011. DOI: 10.1002/bbb.

UPDEGRAFF, D.M. Semimicro determination of cellulose in biological materials. **Analytical Biochemistry**, v.32, n.3, p.420–424. 1969.

van DAM, J.E.G.; van den OEVER, M.J.A.; TEUNISSEN, W.; KEIJSERS, E.R.P.; PERALTA, A.G. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk, part 1: Lignin as intrinsic thermosetting binder resin. **Industrial Crops and Products**, v.19 n.3, p.207–216. 2004.

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. **Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing**. Earthscan Publication Ltd:London. 2008.

VIANA, R.S.; LOPES, P.R.M.; MOREIRA, B.R.A.; CRUZ, V.H. Produção de péletes combustíveis de cigarros contrabandeados. **Instituto Nacional da Propriedade Industrial**, BR 102021015464-0 A2. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/cf130e07-71ce-4da6-b060-9697cc48ea64/content>. Acesso em 6 de dez. 2023.

WINOWISKI, T. Wheat and pellet quality. **Feed Management**, v.39, p.58–64. 1988.

WILLIAMS, P.T.; BESLER, S. The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. **Renew Energy**, v.7, p.233–250. 1996.

WILSON, T.O. Factors affecting the wood pellet durability. 89f. 2010. **Dissertação de Mestrado** (Engenharia Agrícola e Biológica). Universidade do Estado da Pensilvânia, EUA. 2010.

WOOD, J.F. The functional properties of feed raw materials and the effect on the production and quality of feed pellets. **Animal Feed Science and Technology**, v.18, p.1–17. 1987.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. Global bioenergy statistics, vol. 3, p. 49. 2020

YAMAN SAHAN, M.; HAYKIRI-AÇMA, H.; SESEN, K.; KÜÇÜKBAYRAK, S. Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste. **Fuel Process Technology**, v.68, p.23–31. 2000.

YORK, P.; PILPEL, N. The tensile strength and compression behavior of lactose: Four fatty acids and their mixture in relation to tableting. **Journal Pharmacy and Pharmacology**, v.25, p.1–11. 1973.

ZANDERSONS, J.; GRAVITIS, J.; ZHURINSH, A.; KOKOREVICS, A.; KALLAVUS, U.; SUZUKI, C.K. Carbon materials obtained from self-binding sugar cane bagasse and deciduous wood residues plastics. **Biomass Bioenergy**, v.26, p.345–360. 2004.

ZANZI, R.; FERRO, D.T.; TORRES, A.; SOLER, P.B.; BJORNBOOM, E. Biomass torrefaction, in **The 6th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization**, Kuala Lumpur, May 20–22. 2002.

Frases de Chico Mendes - Pensador. Disponível em https://www.pensador.com/frases_de_chico_mendes/. Acesso em 09 jan. 2023.