

Artigo técnico

Biomassa e tecnologias de adensamento para aplicação energética

*Biomass and densification technologies for energy application*Dafne Pereira da Silva^a, Marcos Alexandre Contri^b, Samantha Custodio de Faria^b, Sandra Lúcia de Moraes^{a,c}

^a Laboratório de Processos Metalúrgicos, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Mestrado Profissional IPT: Processos Industriais.

^c Unidade de Negócios em Materiais Avançados, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

E-mail: sandralm@ipt.br

Palavras-chave:

adensamento; energia; biomassa; processo, densidade energética.

Keywords:

biomass; densification; energy; biomass; process, energy density.

Resumo

A mitigação dos impactos ambientais causados pelo uso expressivo de combustíveis fósseis tem se tornado cada vez mais urgente, e sua substituição inevitável. A biomassa se apresenta como uma promissora fonte renovável de energia, o que é demonstrado pelo percentual de participação da biomassa na matriz energética brasileira, da ordem de 9 % do total de cerca de 83 %. Isso representa 15.118 MW produzidos por 572 usinas de biomassa, com destaque para o uso de bagaço de cana-de-açúcar. Porém, em função da sua heterogeneidade e baixa densidade bulk o seu uso in natura apresenta desvantagens energéticas quando comparada com o petróleo ou carvão mineral, por exemplo. Dessa forma, o presente trabalho contemplou a avaliação da viabilidade técnica de adensamento, por peletização e briquetagem, de três diferentes biomassas: serragem de madeira, bagaço de cana e poda de árvore. Os produtos adensados apresentaram maior densidade energética em relação às biomassas in natura, valores satisfatórios de durabilidade mecânica, indicando que é possível obter produtos adensados com resistência ao manuseio e alta densidade energética a partir das biomassas avaliadas. Entretanto, ficou evidenciado que fatores como granulometria e umidade têm impacto importante no tipo de tecnologia de adensamento a ser utilizado, afetando diretamente a qualidade do produto, bem como a rota de processo a ser utilizada. A escolha da melhor configuração de parâmetros de processo e das características necessárias na preparação da biomassa a ser adensada são fatores determinantes para a viabilização técnica e econômica do uso desse tipo de material como fonte energética.

Abstract

The mitigation of environmental impacts caused by the expressive use of fossil fuels has become increasingly urgent, and its replacement inevitable. Biomass presents itself as a promising renewable source of energy, which is demonstrated by the percentage of participation of biomass in the Brazilian energy matrix, in the order of 9% of the total of about 83%. This represents 15,118 MW produced by 572 biomass plants, with emphasis on the use of sugarcane bagasse. However, due to its heterogeneity and low bulk density, its use in natural state presents energy disadvantages when compared to oil or coal, for example. Thus, the present work included the assessment of the technical viability of densification, by pelletizing and briquetting, of three different biomasses: wood sawdust, cane bagasse, and tree pruning. The dense products showed higher energy density compared to biomass in the natural state, satisfactory values of mechanical durability, indicating that it is possible to obtain densified products with handling resistance and high energy density from the evaluated biomasses. However, it became evident that factors such as particle size and moisture have an important impact on the type of densification technology to be used, directly affecting the quality of the product, as well as the process route to be used. The choice of the best configuration of process parameters and the characteristics required in the preparation of the biomass to be densified are determining factors for the technical and economic viability of using this type of material as an energy source.

1 Introdução

O consumo de combustíveis fósseis se intensificou a partir do século XVIII com a Revolução Industrial, se tornando a fonte de energia mais importante durante todo o século XX. Foram por meio dele que diversos avanços tecnológicos puderam ser alcançados, entretanto, estes avanços por vezes trouxeram consequências negativas, principalmente em relação ao aspecto ambiental.

Os impactos ambientais causados pelas atividades antrópicas e o uso decorrente de combustíveis fósseis têm alavancado o interesse por fontes renováveis de energia. Essas fontes alternativas têm se tornado promissoras para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), e mitigar os efeitos das alterações climáticas em curso, que de acordo com Edenhofer et al. (2012) é fundamental que essas emissões sejam reduzidas na ordem de 50 % a 85 % até 2050.

Neste contexto, a biomassa surge como potencial fonte renovável de energia, como substituta para combustíveis fósseis, tais como o carvão ou produtos derivados de petróleo. No entanto, em seu estado original, a biomassa apresenta algumas desvantagens, principalmente baixa densidade energética, grande volume para transporte, granulometria heterogênea e umidade elevada. Estas características podem gerar problemas no transporte, na manipulação, no armazenamento e na combustão da biomassa.

Quando utilizada para fins energéticos, a biomassa é classificada em três categorias: florestal, agrícola e de resíduos urbanos. Segundo Cardoso (2012) o potencial energético de cada um desses grupos depende tanto da matéria-prima quanto da tecnologia utilizada no processamento para obtê-los.

1.1 Contribuição das diferentes biomassas na matriz energética brasileira

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel (2020), as fontes renováveis representam 82,78 % da nossa matriz energética, ao passo que as não renováveis representam 17,22 %, como pode ser visualizado na Tabela 1. Tal condição coloca o Brasil em uma posição de destaque no cenário internacional, visto que a maioria dos países faz uso, em grande parte, de fontes não renováveis na sua matriz energética. De acordo com o relatório publicado pela Agência Internacional de Energia - IEA (2020), 28 % da energia consumida no mundo provêm de fontes não renováveis.

Tabela 1 - Distribuição das fontes renováveis e não renováveis na matriz energética brasileira

Renováveis			82,78%
	Quantidade	Potência (kW)	%
Biomassa	572	15.118.027,45	8,75
Hídrica	1368	109.118.715,24	63,19
Solar	3898	2.929.373,95	1,70
Eólica	646	15.793.932,86	9,15
Undi-elétrica	1	50,00	0,00003
Não Renováveis			17,22%
	Quantidade	Potência (kW)	%
Petróleo e outros	2296	9.219.184,75	5,34
Gás Natural	166	14.944.086,79	8,65
Carvão mineral	22	3.582.830,00	2,07
Nuclear	2	1.990.000,00	1,15

Fonte: adaptado de Aneel (2020)

Observa-se que, dentre as fontes renováveis, a biomassa representa 8,75 % do total da energia elétrica gerada no país em 2020, o que equivale a 15.118 MW, produzidos por 572 usinas de biomassa espalhadas pelo país.

A Figura 1 apresenta a distribuição das usinas de biomassa no Brasil. Observa-se uma grande concentração de usinas na porção centro sul do país, com destaque para o estado de São Paulo. Tal fato se deve principalmente ao grande número de usinas que utilizam o bagaço de cana-de-açúcar como a sua fonte de biomassa para a produção de energia elétrica.

Figura 1 - Distribuição das usinas de biomassa no Brasil



Fonte: Aneel (2020)

Das 572 usinas de produção energética presentes no país, 406 fazem uso do bagaço de cana-de-açúcar, conforme pode ser visualizado na Tabela 2.

Observa-se na Tabela 2 que, além do uso do bagaço de cana para a geração de energia elétrica, outras fontes também têm se destacado como a casca de arroz que hoje já conta com 13 usinas em operação, concentrada, especialmente, nos estados do sul do país. Outras 2 usinas empregam capim elefante, sendo que uma destas usinas está localizada na Bahia e outra no estado do Amapá, 14

usinas empregam o licor negro, oriundo de fábricas de papel e celulose, e 60 unidades que utilizam resíduos florestais, dentre outras fontes.

Tabela 2 - Distribuição das usinas de produção energética que utilizam biomassa em operação no Brasil

Combustível	Quantidade	Potência outorgada (kW)	Potência Outorgada (%)
Bagaço de Cana-de-Açúcar	406	11.659.341,20	76,34
Licor Negro	18	2.538.634,00	16,62
Resíduos Florestais	60	520.010,00	3,40
Biogás-RU	21	174.440,60	1,14
Gás de Alto Forno - Biomassa	12	127.705,05	0,84
Lenha	7	82.215,00	0,54
Casca de Arroz	13	53.333,00	0,35
Carvão Vegetal	8	48.197,00	0,32
Capim Elefante	2	31.700,00	0,21
Biogás - AGR	3	10.974,00	0,07
Carvão - RU	3	8.250,00	0,05
Biogás - Floresta	1	5.000,00	0,03
Biogás - RA	14	4.481,20	0,03
Óleos Vegetais	2	4.350,40	0,03
Resíduos Sólidos Urbanos - RSU	1	4.278,00	0,03
Etanol	1	320,00	0,00
Total	572	15.273.229,45	100,00

Fonte: Aneel (2020)

De acordo com a Aneel (2020), o Brasil tem mais de 46 usinas geradoras de energia elétrica que utilizam biomassa como fonte primária em construção ou com projetos já aprovados. Juntas somarão mais 2.032 MW na matriz energética brasileira, sendo que deste total, 46, 3 empregarão o capim elefante como fonte de energia, 2 de óleos vegetais e 12 de resíduos florestais. Essa informação evidencia que o país tem buscado diversificar cada vez mais as fontes de produção energética, aproveitando resíduos e outras fontes de insumos agroambientais disponíveis.

A Figura 2 apresenta a localização das futuras usinas já em fase de construção ou com projetos já aprovados pela Aneel, na qual se observa uma concentração de novos empreendimentos no norte do estado de São Paulo e sul de Minas Gerais, e algumas no norte do país.

Por ser uma potência agrícola, o Brasil também é um grande gerador de resíduos desse setor, como por exemplo, cascas, talos, raízes e folhagens. De acordo com Bellote et al. (2018), no caso do arroz, a casca representa 30 % da massa do cereal; para o coco, 60 % são resíduo. Outro potencial gerador de resíduos é o setor pecuário, no qual são geradas grandes quantidades de biomassa de esterco por cabeça de animal. Nessa mesma linha, outra fonte de biomassa atrativa são os resíduos sólidos urbanos, cujos estudos apontam uma geração média no Brasil de cerca de 1 kg/habitante/dia.

Figura 2 - Localização das futuras usinas já em fase de construção ou com projetos já aprovados.

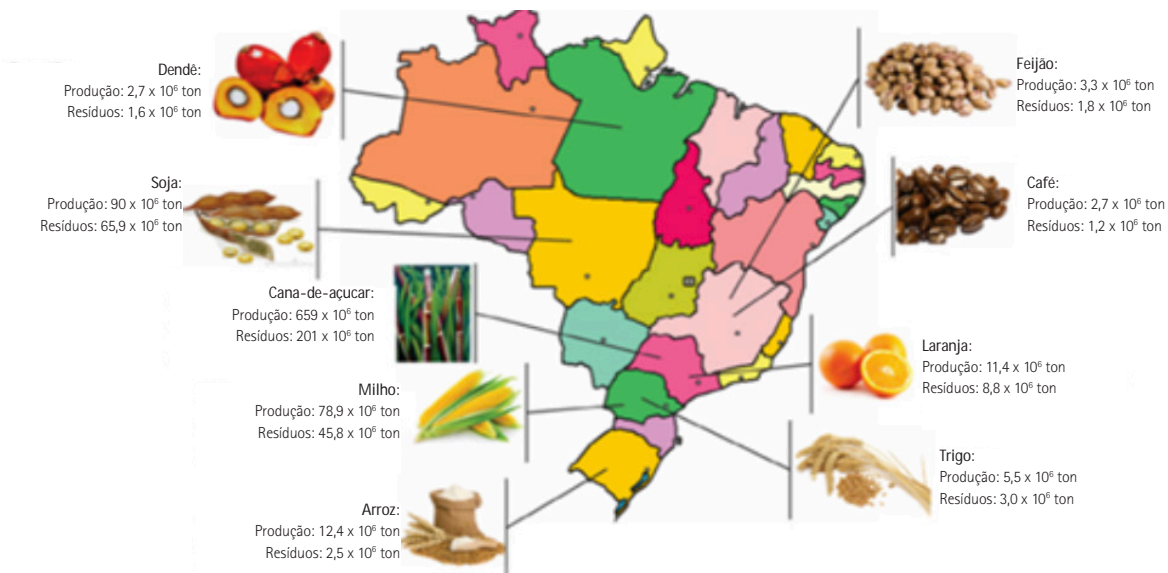


Fonte: Aneel (2020)

No caso do bagaço de cana, que é largamente usado na cogeração (calor e energia elétrica), o País produziu 121 milhões de toneladas no ano de 2016, os quais foram totalmente consumidos para gerar energia. Outro resíduo em destaque é a lixívia ou licor negro, com 16 milhões de toneladas produzidas nesse mesmo ano.

Na Figura 3 são apresentados vários produtos agrícolas característicos do Brasil com sua respectiva produção e resíduos gerados.

Figura 3 - Vários produtos agrícolas característicos do Brasil com sua respectiva produção e resíduos gerados



Fonte: Bellote et al. (2018)

Diante deste contexto, pode-se inferir que existe um grande potencial para se desenvolver processos de adensamento de resíduos com poder calorífico, de forma a possibilitar o aumento da geração de energia elétrica de fontes renováveis, auxiliando na preservação do meio ambiente e na geração de emprego e renda.

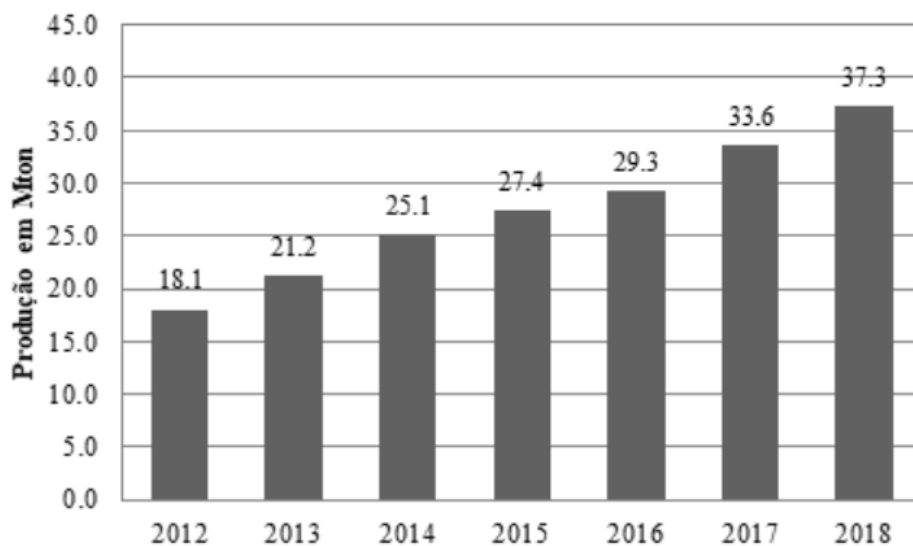
1.1.1 Evolução do mercado de pellets de madeira no Brasil e no mundo

Dentre os diversos tipos de biocombustível, existe um tipo que possui um grande mercado estabelecido e em crescimento, em especial na Europa e na Ásia, e que vem despertando cada vez mais o interesse das empresas do Brasil. Trata-se da produção de pellets de madeira que são utilizados em sistema de calefação e geração de energia.

De acordo com Kosman (2019), o mercado global de pellets de madeira atingiu em 2019 o faturamento de US\$ 8,5 bilhões e estima-se que entre 2019 e 2025 este faturamento cresça a uma taxa de 10 % ao ano. Embora o consumo seja liderado pelos países europeus, o Japão e a Coreia do Sul vêm aumentando substancialmente suas importações, sendo que entre 2016 e 2018 as importações mais do que dobraram.

A Figura 4 apresenta a evolução crescente do volume de produção mundial de 2012 a 2018 e que, de acordo com as tendências de mercado, irá continuar assim nos próximos anos.

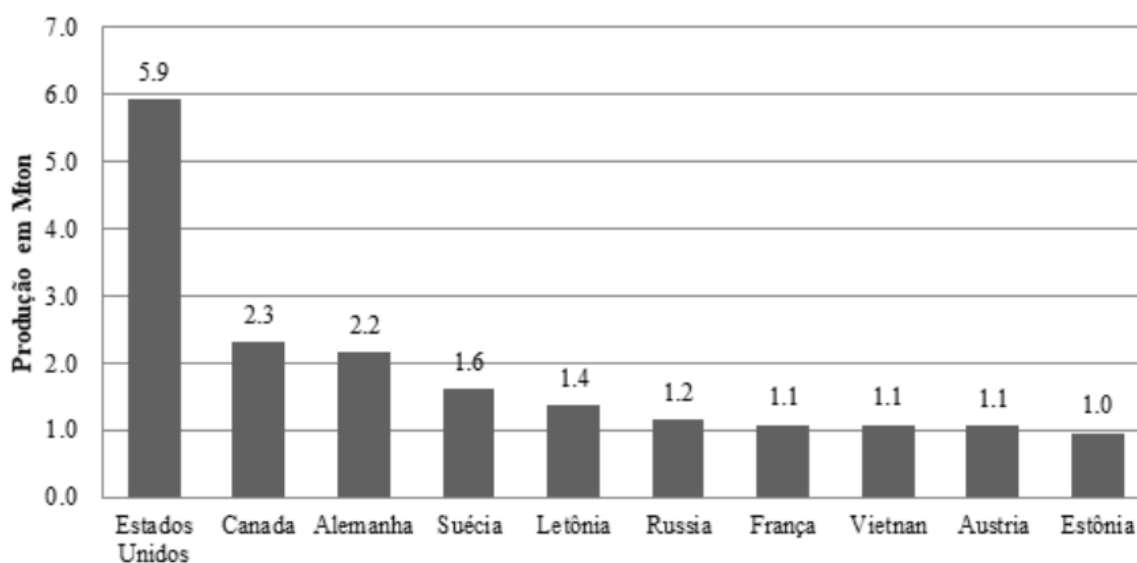
Figura 4 - Evolução do volume de produção mundial de pellets de madeira 2012 a 2018



Fonte: FAO (2020)

A Figura 5 apresenta o volume de produção dos 10 maiores produtores mundiais em 2018, sendo que os Estados Unidos produziram 15,8 % do volume global, com 5,9 milhões de toneladas.

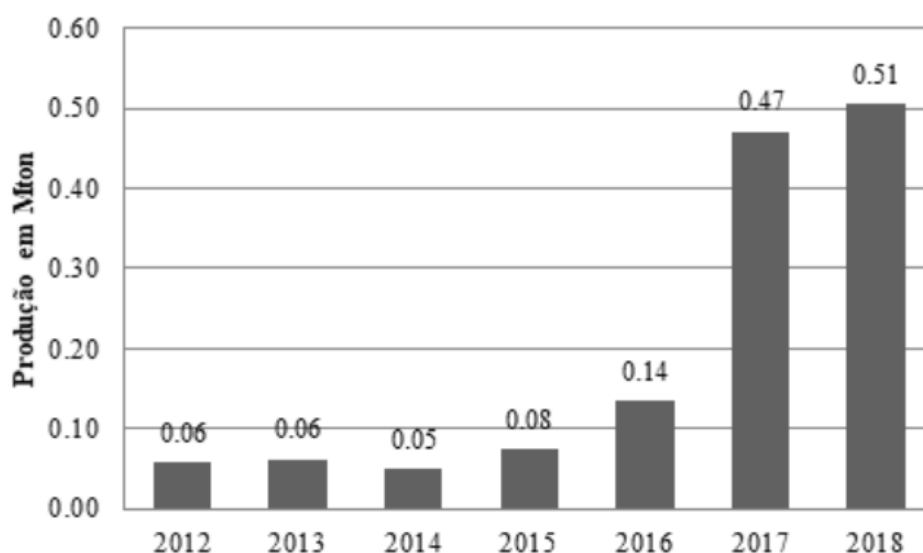
Figura 5 - Volume de produção de pellets de madeira dos 10 maiores produtores mundiais em 2018



Fonte: FAO (2020)

A Figura 6 apresenta a evolução do volume de produção brasileira de 2012 a 2018. Observa-se que entre 2016 e 2017 a produção brasileira deu um salto de 140 mil toneladas para 470 mil toneladas e a tendência é que esta indústria continue a crescer de forma significativa no país.

Figura 6 - Evolução do volume de produção brasileira de 2012 a 2018



Fonte: FAO (2020)

Segundo o Anuário de investimentos do Rio Grande do Sul (2019), um grupo brasileiro está investindo R\$ 1,4 bilhões de reais na construção de uma nova fábrica na cidade de Pinheiro Machado no estado do Rio Grande do Sul, o que evidencia o potencial desta indústria no Brasil. A expectativa é que a unidade entre em operação no início de 2022 e terá a capacidade de produzir em um primeiro momento 1,2 milhões de toneladas de pellets de madeira que serão destinados ao mercado externo, a começar pela Europa e Japão. Portanto, só com o incremento de produção desta unidade, se considerássemos a produção de 2018, o Brasil seria o quarto maior produtor mundial.

De forma majoritária, a produção de pellets de madeira no Brasil é destinada à exportação.

A Tabela 3 apresenta os principais consumidores mundiais de pellets de madeira entre 2012 e 2017, incluindo uma estimativa para 2018. A tendência é de aumento com diversos outros países passando a adquirir este produto.

Tabela 3 - Principais consumidores mundiais de pellets de madeira (Milhões de toneladas)

Ano Calendário	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018 ^e
Reino Unido	1,40	3,70	4,90	6,70	7,30	7,40	8,00
Itália	2,20	2,50	3,40	3,30	3,20	3,45	3,75
Dinamarca	2,10	2,40	2,45	2,50	2,57	3,26	3,50
Alemanha	1,70	2,08	1,84	1,76	2,00	2,10	2,19
Suécia	1,70	1,86	1,65	1,65	1,61	1,53	1,79
França	0,55	0,74	0,90	0,95	1,20	1,45	1,50
Bélgica	1,70	1,50	1,20	1,60	1,35	1,38	1,38
Áustria	0,79	0,88	0,82	0,85	0,90	0,96	0,95
Espanha	0,25	0,38	0,43	0,45	0,48	0,48	0,60
Holanda	1,25	1,20	0,50	0,12	0,19	0,35	0,40
Polônia	0,39	0,50	0,49	0,35	0,30	0,34	0,35
Total	14,03	17,74	18,57	20,23	21,08	22,69	24,40

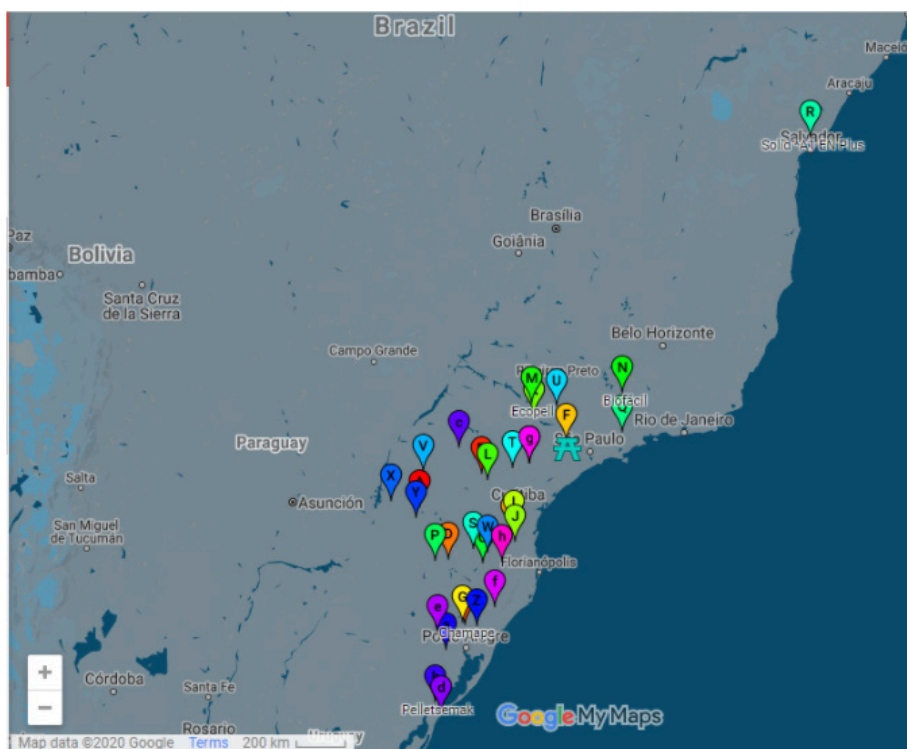
Fonte: Voengele (2019)

Para facilitar a exportação do pellet de madeira, em especial para a Europa e Japão, que são os grandes mercados consumidores, as empresas buscam obter o certificado internacional de origem e qualidade do material. Os requisitos são baseados na norma internacional ISO 17225-2 (2014), que garante a qualidade em toda a cadeia de produção.

De acordo com o site da EnPlus®, em 2020 o Brasil contava com 12 empresas certificadas e a tendência é que mais empresas busquem a certificação, visando facilitar o atendimento às exigências do mercado externo.

Garcia et al. (2018) prepararam um mapa dos produtores de pellets de madeira no Brasil. A Figura 7 apresenta o mapa dos produtores de pellets de madeira no Brasil em 2020.

Figura 7 - Mapa dos produtores de pellets de madeira no Brasil em 2020



Fonte: Garcia et al. (2020)

1.2 Biomassa como combustível

Além dos benefícios ambientais, a biomassa vem se tornando cada vez mais competitiva no âmbito financeiro frente a combustíveis como o gás liquefeito de petróleo (GLP), por exemplo. A Tabela 4 traz um comparativo econômico com as informações de duas fontes de biomassa com o GLP.

Tabela 4 - 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 vapor	Redução
GLP (m ³)*	56,6	4000,0	226,4	-
Pellets de eucalipto (kg)**	152,3	797,0	121,4	46 %
Cavaco***	246,3	150,0	37,0	84 %

Fonte: Copergas (2020)*; Pelletbraz (2020)**; Pallebras (2019)***

É possível observar que o emprego de biomassa promove uma redução de custo significativa em relação ao uso de GLP. Para o uso de biomassa também são necessárias outras análises como, por exemplo, o local disponível para estocagem de matéria-prima, ou o tamanho da câmara de combustão. Como se observa na **Tabela 4**, o cavaco parece muito mais vantajoso em relação aos pellets, mas a densidade do cavaco é muito inferior à densidade dos pellets, sendo 380 kg/m³ a densidade média do cavaco e 657 kg/m³ a densidade média de pellets. Dessa forma, o local para estocagem da matéria-prima seria aproximadamente 2 vezes maior em relação a área de estocagem necessária para os pellets. Além de facilidade de manuseio dos pellets, a umidade também varia bastante, podendo chegar a até 40 % no cavaco e 6 % nos pellets, dependendo do fornecedor, dentre outros benefícios.

Os valores de venda apresentados na **Tabela 4** referem-se a valores atualizados de 2020 com fontes de biomassa mais difundidas no momento, como o cavaco de madeira e pellets de pinus e de eucalipto. Outras fontes de biomassa ainda não são encontradas facilmente para fornecimento industrial, onde a demanda é relativamente alta, frente a pequenos comércios. Segundo mapeamento realizado pela ABIPEL, Associação Brasileira das Indústrias de Pellets (GARCIA et al. 2020), a maior disponibilidade de fornecedores está concentrada nos estados de São Paulo, Santa Catarina e Paraná.

Além dos pellets madeira, outras fontes provenientes da agricultura possuem grande potencial energético, como casca de coco, casca de café, semente de girassol, capim elefante, dentre outros. A **Tabela 5** mostra algumas fontes de biomassa e seu respectivo poder calorífico, em comparação com o GLP. É possível observar que o potencial energético de cada uma das fontes de resíduos é bem próximo, da ordem de 150 kg de combustível/ton de vapor, com exceção do cavaco de madeira, cujo valor é 246,3 kg de combustível/ton de vapor.

Tabela 5 - Poder calorífico de fontes de biomassa

Material	PCS (kcal/kg)	Massa (kg) de combustível para 1 ton de vapor
GLP	11750,0	56,6
Madeira de pinus	4745,9	140,1
Ponteira de eucalipto	4523,7	147,0
Resíduos de algodoeiro	4433,0	150,0
Pellets de eucalipto	4366,1	152,3
Bagaço de cana de açúcar	4366,1	152,3
Casca de eucalipto	4356,5	152,7
Capim elefante	4241,9	156,8
Palha de arroz	3924,2	169,5
Cavaco	2700,0	246,3

Fonte: Pereira (2014)

Há diversas fontes renováveis que estão sendo cada vez mais exploradas para fins energéticos. A dificuldade no momento é encontrar fornecedores em escala industrial para os diferentes tipos de combustíveis sólidos.

Diante do exposto, o adensamento de biomassa pode ser visto como uma solução promissora, transformando a biomassa in natura em um produto mais adequado para o transporte e em um combustível mais eficiente. Os processos de conversão energética da biomassa podem ser classificados como: processos físicos (adensamento e processamento mecânico), termoquímicos (combustão direta; pirólise e gaseificação) e biológicos (fermentação alcoólica e digestão anaeróbia) (NOGUERIA e LORA, 2003; BOYLE, 2004; e CORTEZ, 2011).

Neste contexto, o presente trabalho visou verificar a influência das propriedades físicas de biomassas (granulometria e umidade) e tipos de tecnologias de adensamento nos mecanismos de aglomeração de briquetes e pellets de madeira, bagaço de cana e poda de árvore.

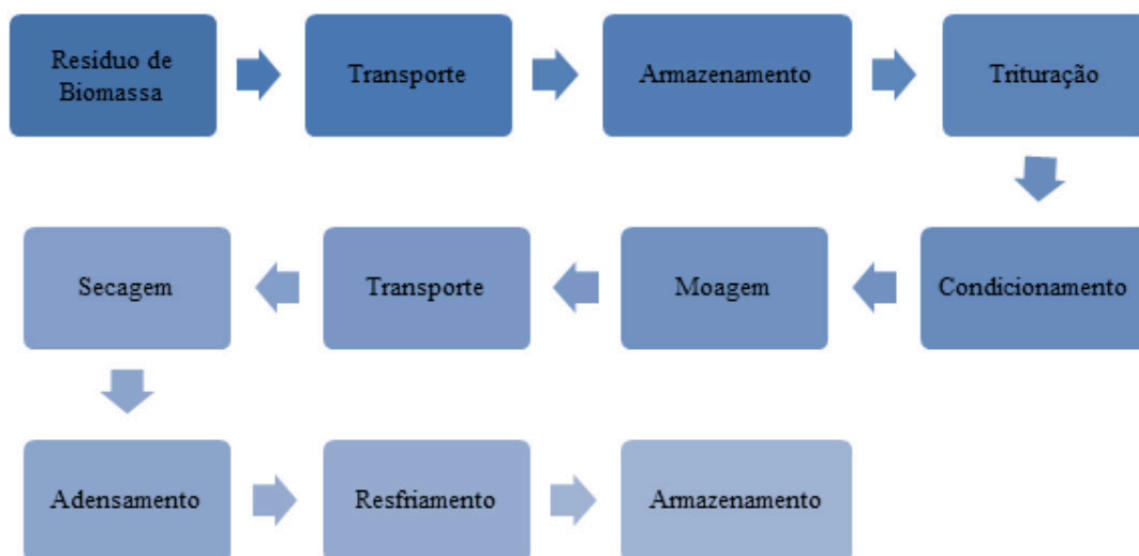
1.3 Beneficiamento de biomassa

O beneficiamento de biomassa tem como objetivo adequar a biomassa in natura para uma determinada finalidade, seja para o transporte ou para a conversão energética. Neste contexto, os processos físicos se encaixam em ambas as finalidades.

O processo físico de adensamento envolve o uso de pressão mecânica, com ou sem a presença de agente aglomerante, capaz de reduzir o volume da matéria-prima e aumentar seu conteúdo energético por unidade de volume. Em se tratando de um resíduo volumoso, pouco denso e heterogêneo, o processo físico de adensamento pode ser bastante vantajoso para a utilização da biomassa em termos econômicos, sociais e ambientais.

Antes de ser submetida ao adensamento, a biomassa deve passar por um pré-processamento. A **Figura 8** apresenta as etapas que compõem o processo de adensamento de biomassa: secagem, cominuição para adequação das dimensões das partículas, eventual tratamento térmico, e pressão mecânica para reduzir o volume; porém, dependendo de características específicas da biomassa considerada, nem todas as etapas são necessárias.

Figura 8 - Etapas do processo de adensamento dos resíduos de biomassa



Fonte: elaborado pelos autores

No processo de adensamento, os mecanismos de interação podem ser definidos como forças de atração entre partículas; forças interfaciais e de pressão capilar em superfícies líquidas móveis e forças de adesão e de coesão. Os mecanismos de compactação requeridos são distintos para cada tipo de biomassa (RUMPF, 1962 apud STELTE et al, 2011; PIETSCH, 2002), pois deve-se levar em consideração as propriedades químicas (análise elementar e poder calorífico) e físicas (teor de umidade, tamanho de partícula, densidade, volume de vazios e propriedades térmicas) de cada tipo de biomassa. O mecanismo de compactação escolhido determina a densidade, a estabilidade e a durabilidade do produto adensado na maioria de casos.

Durante o adensamento, as partículas originais retêm a maioria de suas propriedades, embora a energia seja dissipada devido à fricção entre partículas e partícula-parede. Em altas pressões, as partículas são forçadas umas contra as outras e são submetidas à deformação elástica e plástica, aumentando desse modo o contato entre partículas. Além disso, sob tensão, as partículas frágeis podem sofrer fatura.

Em geral, nenhum aditivo é utilizado para promover a ligação entre partículas de biomassa. A coesão, que ocorre internamente entre partículas, é causada pelo calor gerado pela compressão, que amacia e reorganiza a lignina entre as fibras, ligando-as naturalmente após seu resfriamento. Esta lignina solidificada na superfície faz com que os produtos adensados possam resistir à umidade. Dependendo da composição química e condições físico-químicas dos resíduos de biomassa, eles devem passar por diversos tratamentos até a produção de aglomerados.

Os seguintes fatores influenciam a compactação sem aglomerantes em experimentos utilizando equipamentos com um êmbolo-matriz:

- variáveis de processo: são os fatores que não são específicos do material, isto é, que são um conjunto de condições impostas à biomassa pelos equipamentos mecânicos de densificação, dentre eles temperatura; pressão e taxa de aplicação da pressão (velocidade de compressão); tempo de residência, geometria da matriz; e,
- variáveis do material: são os fatores característicos de uma dada biomassa como teor de umidade; tamanho, forma e distribuição das partículas; características bioquímicas e o pré-processamento.

O pré-processamento da biomassa antes da densificação é um método potencial para alterar a estrutura física e a estrutura dos constituintes químicos, em uma tentativa de reforçar as características de ligação. O pré-processamento pode ser físico-mecânico e químico.

Segundo Kaliyan e Morey (2009) a água presente na biomassa tem um importante papel na interação das partículas durante o processo de adensamento, visto que a água aumenta a área de contato entre elas, favorecendo a atuação das forças de van der Waals. Além disso, a água facilita a solubilização de fibras, açúcar, fosfato de sódio, sais de potássio, os quais ajudam no processo de adensamento. Entretanto, se por um lado a água facilita a compactação, em excesso pode levar à compactação e entupimento na saída do equipamento.

A utilização de água quente ou de vapor é outra abordagem que irá também aumentar a porosidade do material. Postula-se que a compressão e compactação de uma biomassa podem ser melhoradas pela ruptura do material lignocelulósico, por meio de pré-processamento por explosão a vapor, embora seja um método mais aplicado na preparação de biomassa para hidrólise enzimática (MACIEJEWSKA et al, 2006).

Na composição da biomassa são encontrados também materiais inorgânicos, que quando presentes em grandes quantidades aumentam o desgaste dos equipamentos utilizados no processo de adensamento, bem como resultam em emissão de particulados durante a queima. Essa matéria inorgânica é medida através do teor de cinzas, e pode ter duas fontes de origem: elementos inorgânicos que compõe as fibras da biomassa, e são inerentes a região onde é plantada e as condições de adubagem do solo; ou partículas inorgânicas (areias e argilas) provenientes do seu manuseio. Fredericci et al. (2012) concluiu que o produto proveniente da queima dos bagaços de cana-de-açúcar analisados no seu estudo é uma mistura do material inorgânico que compõe o bagaço mais o quartzo proveniente da areia do manuseio.

O tamanho das partículas tem influência direta na durabilidade mecânica do produto adensado, pois partículas maiores favorecem a ocorrência de pontos de ruptura. Entretanto, se a quantidade de finos originários do pré-processamento for elevada, provavelmente o custo do produto será maior, de forma que uma mistura de diferentes tamanhos de partículas pode gerar produtos de boa qualidade e economicamente viáveis. Para a adequação no tamanho das partículas podem ser usados

picadores, trituradores ou moinhos, sendo que o moinho só será usado quando houver necessidade de partículas menores.

A compactação de resíduos lignocelulósicos resulta em produtos adensados com diâmetros variando entre 4 mm e 16 mm, no caso dos pellets, ou diâmetros superiores a 50 mm (briquetes e extrudados), os quais são utilizados na geração de energia na forma de calor ou eletricidade.

Os equipamentos de compactação mais comuns têm sido adaptados de processos industriais existentes nas áreas de alimentação animal, de farmácia e de beneficiamento de resíduos finos de minérios. No entanto, a grande diversidade da composição da biomassa e a complexidade do material demandam muitas adaptações.

Samson et al. (2005) reportam que, em geral, pellets são comumente utilizados em usos finais mecanizados de pequena escala, enquanto os briquetes são usados em sistemas de combustão de biomassa de grande escala. Os briquetes foram considerados pelo autor mais apropriados para alimentação manual para aquecimento ou para cocção em países em desenvolvimento. Entretanto, é importante ressaltar que durante a queima dos combustíveis sólidos em locais fechados, devem-se analisar os teores de cloreto e sulfato existentes na biomassa, devido a possibilidade de geração de gases tóxicos na queima.

Os processos de adensamento aumentam a densidade energética da biomassa, dada pela quantidade de energia presente em um metro cúbico de material, entretanto, não altera o poder calorífico da biomassa em questão.

A seguir serão descritos os métodos de adensamento, bem como principais equipamentos utilizados em cada método.

1.4 Métodos de adensamento e principais equipamentos empregados

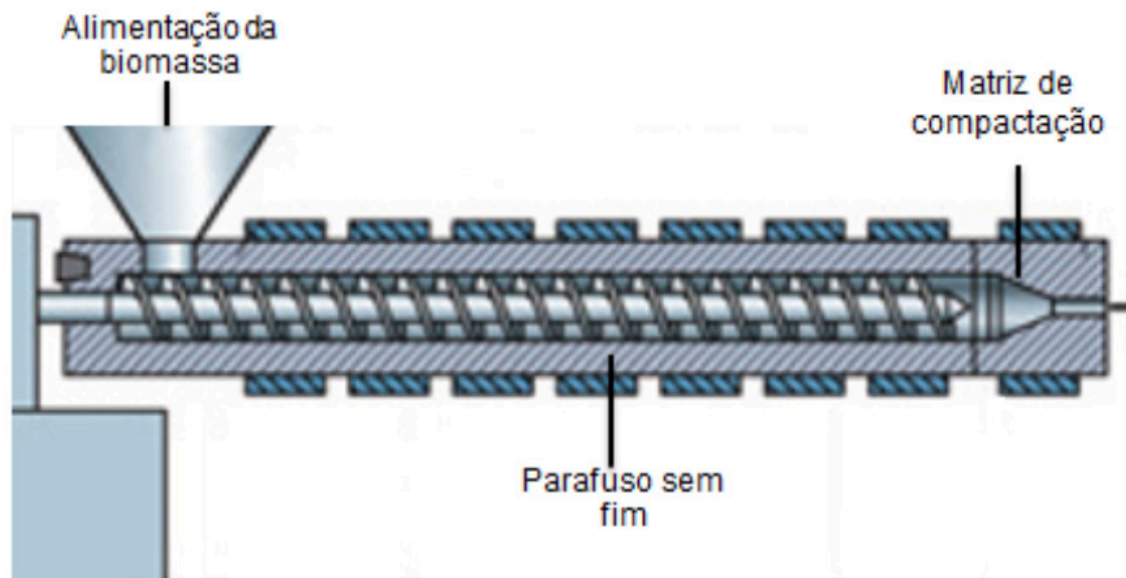
Existem vários métodos disponíveis para realizar a densificação de biomassa. Os processos convencionais de adensamento de biomassa podem ser classificados em três tipos: extrusão, briquetagem e peletização.

1.4.1 Extrusão

O processo de extrusão consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com o objetivo de torná-las um sólido geométrico compacto de alta densidade (FILIPPETTO, 2008). O processo de adensamento por extrusão é realizado em prensa de parafuso sem-fim, a qual transporta e empurra a matéria-prima com um parafuso através de uma matriz, onde sofre a extrusão dentro de um molde.

Todo o processo de adensamento é auxiliado pelo aumento de temperatura que ocorre dentro da câmara devido à combinação de velocidade de rotação interna do parafuso com a existência de atrito no processo (SAMSON et al., 2005). A Figura 9 exemplifica um dos tipos de prensa de parafuso sem-fim.

Figura 9 - Extrusora de parafuso sem fim



Fonte: Bhattacharya et al. (1989)

1.4.2 Briquetagem

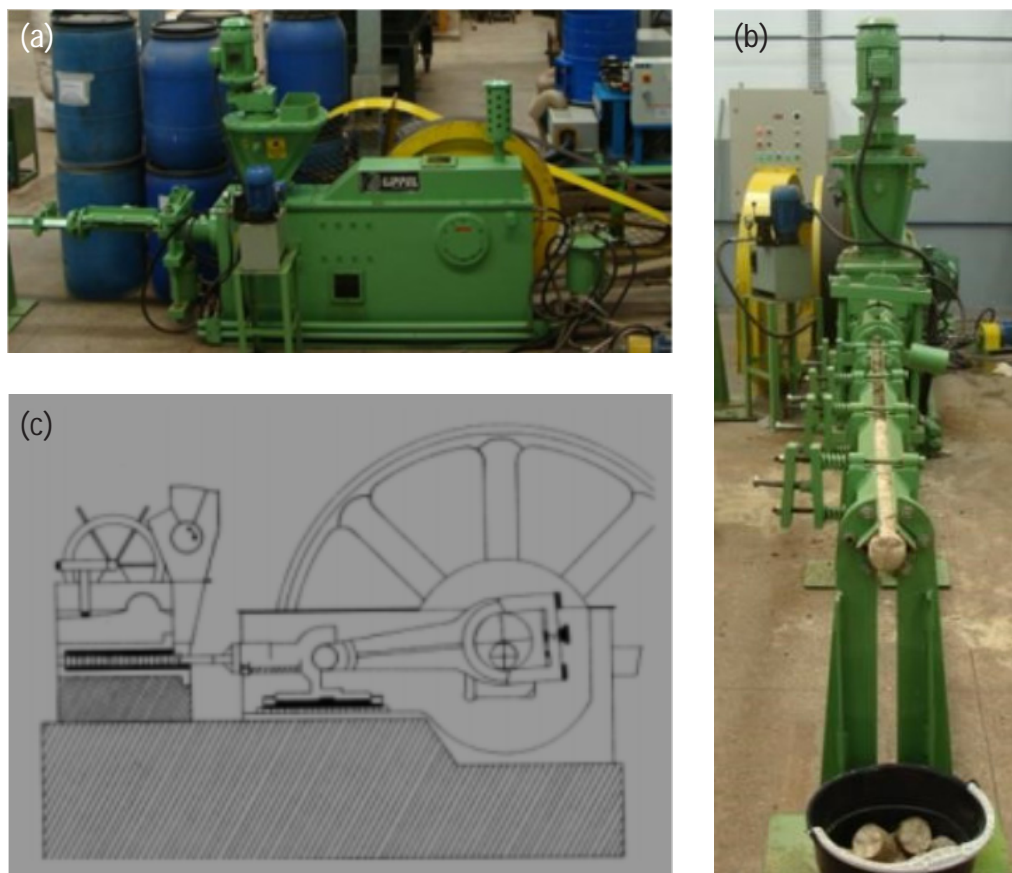
A briquetagem é um processo antigo que teve início em 1.848 nos Estados Unidos, visando à compactação de carvão moído (SAMPAIO et al 2007). Segundo Tumuluru et al. (2010) a briquetagem é geralmente realizada usando uma prensa de pistão mecânico ou hidráulico, ou uma prensa de rolos.

a. Prensa de pistão mecânico

Neste tipo de equipamento a matéria-prima é alimentada e compactada em uma matriz por meio de um pistão ligado excêntricamente a um grande volante que força e se movimenta alternadamente, gerando os briquetes (Figura 10).

A matriz é constituída por um duto afunilado de seção circular que serve para compactar a biomassa na forma de briquetes. A pressão gerada durante o processo acarreta o aumento de temperatura do sistema, favorecendo a fluidização da lignina contida na biomassa, a qual age como um ligante entre as partículas. A temperatura no processo pode variar de 150 °C a 300 °C.

Figura 10 - Prensa de pistão mecânico



Fonte: (a) e (b) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, (c) Quirino (1991)

O resfriamento é uma das etapas indispensáveis para a produção de briquetes, visto que está intrinsicamente relacionado com a qualidade do produto. É durante o resfriamento que ocorre a condensação do vapor, caso contrário, a pressão do vapor pode provocar fissuras superficiais que fragilizam os briquetes formados.

b. Prensa de pistão hidráulico

A prensa de pistão hidráulico apresenta um mecanismo semelhante ao pistão mecânico. Entretanto, neste caso a compactação é realizada com pressões e temperaturas mais baixas.

O sistema hidráulico de óleo a alta pressão é o responsável por transmitir energia ao pistão, via motor elétrico. Este tipo de prensa possui um cilindro hidráulico, o qual libera o briquete comprimido quando atinge a pressão desejada (Figura 11).

Figura 11 - Prensa de pistão hidráulico

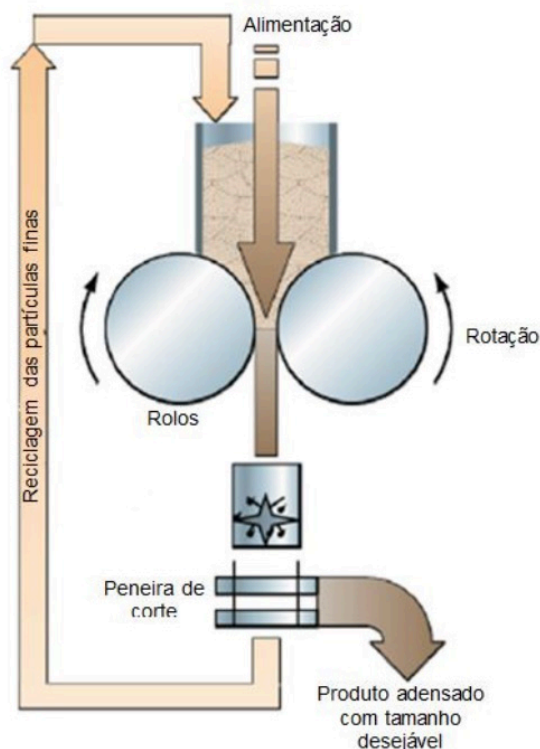


Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

c. Prensa de rolos

A prensa de rolos direciona a matéria-prima contra um par de rolos que giram em sentidos opostos (Figura 12). O material é comprimido no espaço entre os rolos produzindo um briquete cuja forma é moldada pelas cavidades presentes nas superfícies dos rolos.

Figura 12 - Prensa de rolos



Tumuluru et al. (2010)

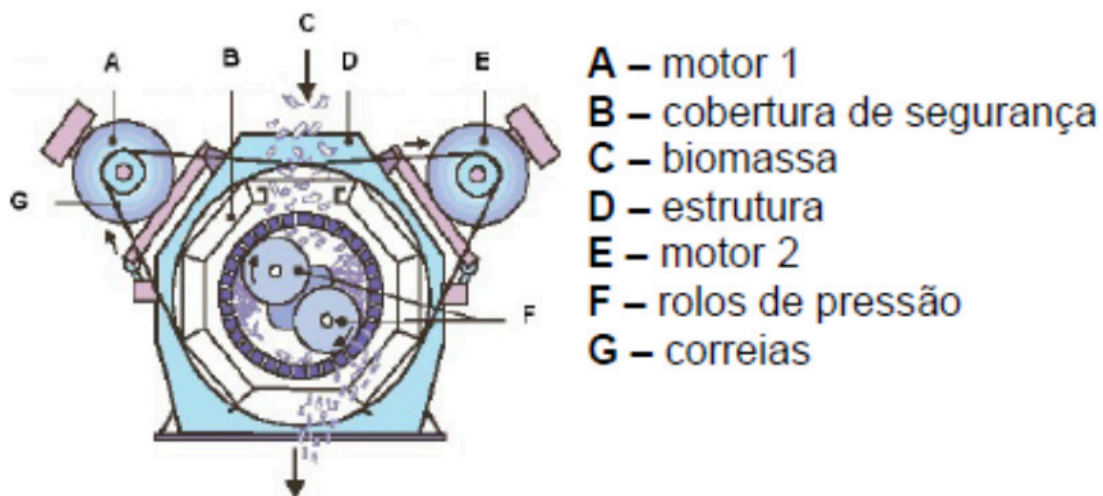
1.4.3 Peletização

Segundo Lethikangas (2001), durante o processo de adensamento por peletização, a pressão exercida entre os componentes causa uma força de fricção que aquece e pressiona o material através de perfurações da matriz. Loução (2008) reporta que o processo de adensamento por peletização pode ser realizado de duas formas:

a. Matriz do tipo cilíndrica vertical

Neste tipo de sistema o material é alimentado dentro de uma câmara entre a matriz e os rolos, de forma que ele é distribuído e esmagado entre as perfurações pela força dos rolos de pressão, percorrendo o diâmetro interno da matriz em sentido contrário à rotação (Figura 13).

Figura 13 - Matriz do tipo cilíndrica vertical, vista frontal

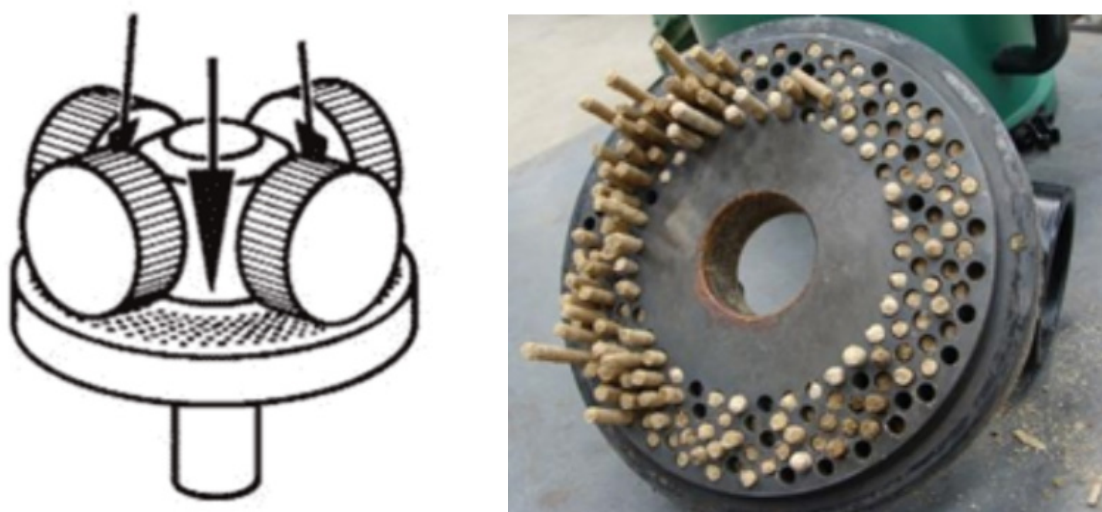


Fonte: Loução (2008)

b. Matriz do tipo plana (disco)

O mecanismo de compressão baseia-se numa matriz plana e redonda equipada com rolos de pressão sobre a superfície. O número de rolos varia entre 1 e 6, dependendo do tamanho da máquina. Em alguns modelos a matriz gira e os rolos mantêm-se estacionários, enquanto em outros a matriz se mantém estacionária e os rolos se movem (Figura 14).

Figura 14 - Matriz do tipo plana



Fonte: Gaviria (2007) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

2 Procedimento metodológico

Para análise do desempenho de cada equipamento em função da biomassa utilizada foram selecionados dois parâmetros: teor de umidade e granulometria da partícula de alimentação. O teor de umidade foi ajustado em três valores aproximados: 8 %, 10 % e 12 % de umidade (base úmida).

A serragem foi seca em estufa, visto que a umidade inicial, no momento do ensaio, estava em torno de 17 % (base úmida). Entretanto, foram enfrentados alguns problemas durante o processo de ajuste de umidade, pois caso a serragem não estivesse totalmente seca e fria ela poderia reabsorver a água rapidamente, aumentando o teor de umidade mais do que o esperado. Neste caso, decidiu-se secar a serragem até um teor de umidade de aproximadamente 5 % e depois ajustar até o valor desejado.

A secagem do bagaço de cana foi realizada no secador rotativo, em dois passes em função do seu alto teor de umidade (>50 %), de forma a obter umidade em torno de 8 %.

A poda de árvore utilizada no estudo estava armazenada em local aberto, o que favoreceu sua secagem natural, não havendo necessidade de secá-la para alguns ensaios.

A etapa de adequação granulométrica das biomassas foi realizada em moinho de facas, e posteriormente foi utilizado o peneirador vibratório para a classificação do material em totalmente passante nas malhas: 12,5 mm, 4,0 mm e 1,7 mm. O tamanho das partículas foi definido de acordo com a limitação de cada técnica de adensamento empregada.

O estudo de adensamento das biomassas foi realizado empregando-se a técnica de peletização e a briquetagem. Em função do diâmetro das cavidades da matriz da peletizadora (6 mm) foram utilizadas biomassas com a granulometria abaixo de 4,0 mm (serragem e bagaço de cana) e 1,7 mm (poda de árvore).

Nos ensaios realizados com a briquetadeira hidráulica foram utilizadas biomassas com partículas menores que 12,5 mm e partículas menores que 4,0 mm, nos três teores de umidade previamente escolhidos, 8 %, 10 % e 12 % (base úmida).

As biomassas in natura foram caracterizadas quanto a distribuição granulométrica; o teor de umidade; densidade bulk; análise imediata; teor de enxofre total; e teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, cloreto e sulfato. Já os produtos obtidos nos processos de adensamento foram caracterizados quanto a durabilidade mecânica e densidade bulk.

O ensaio de durabilidade mecânica determina a capacidade dos pellets e briquetes resistirem ao manuseio e ao transporte. A densidade bulk é um parâmetro importante para o transporte de combustíveis sólidos e quando analisado juntamente com o poder calorífico e umidade é possível calcular a densidade energética do combustível.

A densidade energética do produto adensado é calculada por meio da Equação 1, utilizando os valores de densidade bulk, umidade e poder calorífico inferior (PCI), encontrados para os produtos adensados. Este último pode ser calculado a partir da Equação 2.

$$\text{Densidade energética} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \right) = \text{PCI} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) \cdot \text{DB} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (1)$$

$$\text{PCI} = (1 - a) \cdot \text{PCS} - 9(1 - a) \cdot h \cdot \text{hlv}(25^\circ\text{C}) - a \cdot \text{hlv}(25^\circ\text{C}) \quad (2)$$

Onde:

PCI – Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)

PCS – Poder Calorífico Superior da biomassa in natura (kcal/kg)

DB – Densidade bulk (kg/m³)

a – Umidade base úmida (%)

h – Percentual de hidrogênio do material seco (%)

hlv – Entalpia de vaporização da água a 25°C (kcal/kg), igual a 583,58 kcal/kg

Os processos de adensamento aumentam a densidade energética da biomassa, dada pela quantidade de energia presente em um metro cúbico de material, entretanto, não altera o poder calorífico da biomassa em questão. Como exemplo, Werther et al. (2000) relatam que a densidade bulk de produtos adensados de bagaço de cana varia entre 450 kg/m³ a 650 kg/m³, ou seja, 5 a 10 vezes maior que a da matéria-prima, enquanto que sua densidade energética aumenta de 6 a 9 vezes, de 1,08 GJ/m³ para 6,48 GJ/m³ a 10,08 GJ/m³ devido ao adensamento.

3 Resultados e discussão

A Tabela 6 apresenta os resultados de caracterização química das biomassas in natura.

Tabela 6 - Caracterização das biomassas

Ensaio	Normas	Resultados			
		Serragem	Bagaço de cana	Poda de árvore	
Material Seco	Carbono fixo - % massa	ABNT NBR 8112/86	21,0	-	-
	Carbono - % massa	DIN EN 15104-05	49,1	34,63	46,8
	Hidrogênio - % massa	DIN EN 15104-05	5,62	4,83	5,69
	Nitrogênio - % massa	DIN EN 15104-05	0,3	0,4	1,2
	Teor de cinzas - % massa	ASTM D1102-84	5,3 ± 0,8	35,2 ± 4,2	9,1 ± 1,6
	Enxofre - % massa	ASTM D4239	< 0,1	<0,1	<0,1
	Teor de voláteis - % massa	ASTM D1762-84	73,7 ± 1,1	55,8 ± 1,1	71,6 ± 1,1
	Oxigênio - % massa	ASTM D3176-09	39,68	24,97	37,21
	Poder calorífico (MJ/kg)	DIN EN 14918-10	Superior: 20,02 ± 0,11 Inferior: 18,81	Superior: 12,51 Inferior: 11,47	Superior: 18,76 Inferior: 17,53
Tal qual	Teor de Umidade* - % massa	DIN EM 14774-3/10	12,8	5,9	10,3
	Poder calorífico (MJ/kg)	DIN EN 14918-10	Superior: 17,46 Inferior: 16,09	Superior: 11,77 Inferior: 10,65	Superior: 16,83 Inferior: 15,48
	Cloreto (Cl ⁻) - % massa	DIN 51727/11	0,030 ± 0,002	0,010 ± 0,001	0,025 ± 0,001
	Sulfato (SO ₄ ²⁻) - % massa	DIN 15289/11	0,051 ± 0,004	0,074 ± 0,003	0,25 ± 0,010
	S (enxofre total) - % em massa	DIN 15289/11	0,017 ± 0,001	0,025 ± 0,001	0,083 ± 0,003

Fonte: Moraes et al. (2016)

*após ajuste de umidade.

Os valores obtidos na caracterização das biomassas demonstram o alto poder calorífico da serragem e da poda de árvore, 20,02 MJ/kg e 18,76 MJ/kg, respectivamente, quando comparado com o bagaço de cana, 12,51 MJ/kg. Por se tratarem de resíduos madeiros, a poda e a serragem contêm maior quantidade de carbono e oxigênio em comparação com o bagaço de cana, uma vez que, as quantidades destes elementos estão relacionadas com o poder calorífico dos materiais.

Conforme mencionado na revisão da literatura, o teor de cinzas corresponde à matéria inorgânica presente na biomassa, seja da composição da biomassa ou de origem externa (areia e argila). O valor encontrado para a amostra de bagaço de cana no presente estudo (35,2 % de cinzas) é bastante expressivo e diferente dos valores encontrados na literatura, que variam de 4 % a 10 % (FREDERICCI et al., 2012; STELTE et al., 2012).

O bagaço de cana tem menores características comburentes que os resíduos madeireiros, corroborando os valores encontrados de poder calorífico. Segundo Brito e Barrichelo (1978) o teor de voláteis no combustível influencia diretamente nas características de queima do material, uma vez que os componentes voláteis, quando aquecidos, passam rapidamente para forma gasosa.

Os teores de cloreto (Cl-) das biomassas estudadas variaram de 0,01 % a 0,03 %, enquanto os teores de enxofre total (S) variaram de 0,017 % a 0,083 %. O teor destes elementos tem influência na comercialização de materiais adensados. A norma europeia ISO 17225-2 (2014), por exemplo, especifica três possíveis classes de pellets de madeira baseadas em seu uso, sendo A1, A2 e B para usos domésticos e I1, I2 e I3 para usos industriais, com base nos valores aceitáveis para Cl e S, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores aceitáveis de Cl e S para uso doméstico e industrial

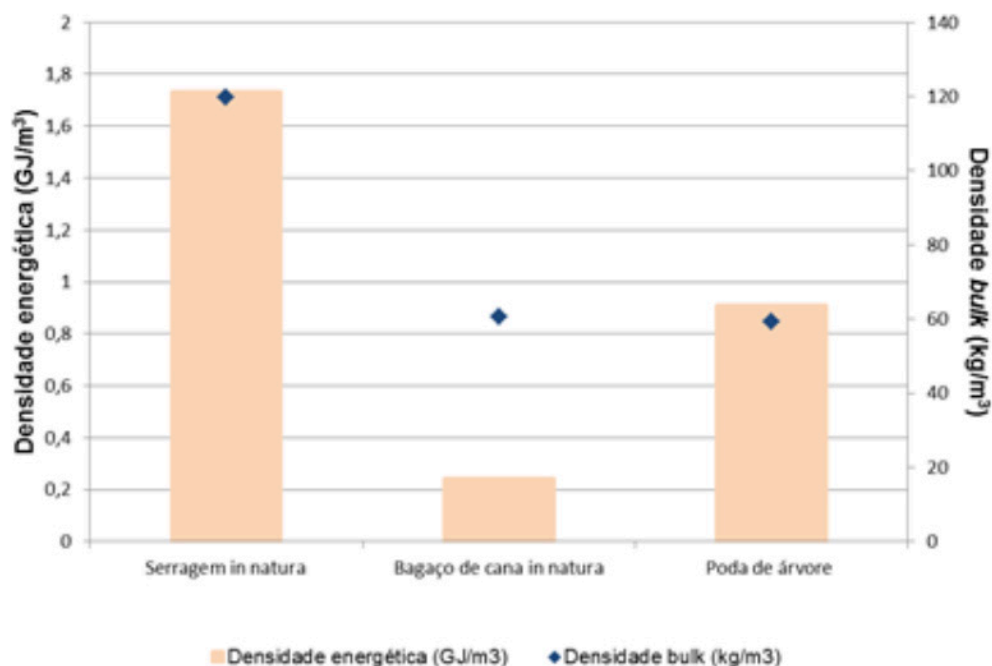
Uso doméstico	Propriedade	A1	A2	A3
	Cl (% - massa)	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,03
	S (% - massa)	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,05
Uso industrial	Propriedade	I1	I2	I3
	Cl (% - massa)	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,06
	S (% - massa)	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05

Fonte: ISO 17225-2 (2014)

De acordo com os valores apresentados na Tabela 7 e os dados obtidos nos ensaios de caracterização química das biomassas (serragem e poda de árvore), verifica-se que os pellets produzidos com resíduos de serragem poderiam ser classificados como B para usos domésticos e I1 para industrial. No caso dos pellets produzidos com resíduos de poda urbana, observa-se que eles se enquadrariam nas classificações se dependesse apenas do cloro; entretanto, o teor de enxofre ultrapassa em aproximadamente uma vez e meia o valor permitido. O alto teor de enxofre implica na emissão de gases poluentes durante a queima do combustível.

Na Figura 15 são apresentados os resultados de densidade energética e densidade bulk obtidos de acordo com a biomassa in natura estudada. Destaca-se que as dimensões dos galhos de árvore podados eram maiores que o recipiente para a realização do ensaio, inviabilizando tecnicamente a determinação da densidade bulk da poda de árvore baseada na norma DIN EN 15103:2010-04. Por esta razão, no caso específico da poda de árvore, a densidade bulk foi estimada em função da massa da biomassa coletada e do volume ocupado por ela no big bag de dimensões conhecidas.

Figura 15 - Resultados da densidade bulk e densidade energética das biomassas



Fonte: Moraes et al. (2016)

Conforme se observa na Figura 15, a serragem in natura é o material mais denso (119,83 kg/m³) dentre as biomassas estudadas, enquanto que o resíduo de poda de árvore in natura e o bagaço de cana-de-açúcar in natura apresentam densidades equivalentes, respectivamente, 59,14 kg/m³ e 60,54 kg/m³.

A serragem apresenta o maior valor de densidade energética (1,73 GJ/m³). Tal fato era esperado, em virtude do seu elevado poder calorífico superior e elevada densidade bulk. Embora a poda in natura apresente um poder calorífico superior semelhante ao da serragem, sua densidade energética é cerca de 50 % menor (0,91 GJ/m³), decorrente principalmente do menor valor de densidade bulk da poda.

A densidade energética do bagaço in natura é de apenas 0,24 GJ/m³, o que pode ser explicado por seu baixo poder calorífico superior, sua baixa densidade bulk e sua alta umidade (>50 % antes do ajuste de umidade).

3.1 Melhores condições de adensamento de biomassa

A Tabela 8 apresenta os melhores resultados dos ensaios de peletização e briquetagem como técnicas de adensamentos das três biomassas estudadas, de acordo com os parâmetros de durabilidade mecânica e densidade energética.

Tabela 8 - Melhores resultados obtidos pelo emprego da tecnologia de peletização e briquetagem para cada biomassa avaliada

Ensaio	Serragem		Bagaço de cana		Poda de árvore	
	Pellet	Briquete	Pellet	Briquete	Pellet	Briquete
Granulometria da biomassa (mm)	< 4,0	<12,5	<4,0	<12,5	<1,7	<4,0
Teor de Umidade ¹ da biomassa (%)	10,96	12,42	12,12	12,27	11,96	11,93
Teor de Umidade do adensado (%)	8,70	11,82	6,89	11,53	8,38	11,93
PCI do produto adensado (MJ/kg)	16,93	16,27	10,49	9,85	15,83	15,31
Densidade bulk (kg/m ³)	490,00	370,00	470,00	396,09	524,77	362,35
Densidade energética produto adensado (GJ/m ³)	8,30	6,02	4,93	3,90	8,31	5,55
Fator K	4,80	3,48	20,54	16,25	9,09	6,07
Durabilidade (%)	85,93	58,71	80,39	89,26	83,64	30,27

Fonte: Moraes et al. (2016)

¹umidade em base úmida

Conforme se observa na Tabela 8, nas condições estudadas, ambas as tecnologias de adensamento podem ser aplicadas as biomassas em questão. No entanto, o processo de peletização permitiu um maior aumento na densidade energética, bem como bons resultados de durabilidade mecânica para as três biomassas.

Os ensaios realizados com o bagaço de cana apresentaram produtos com alta durabilidade mecânica (> 80 %) e um aumento da densidade energética de aproximadamente 20 vezes em comparação com o material in natura, indicando um produto com qualidade suficiente para ser transportado e manuseado, além de ser um combustível mais homogêneo e mais eficiente energeticamente que a biomassa in natura.

A peletização da serragem de madeira e da poda de árvore apresentaram ótimos resultados de durabilidade mecânica (acima de 80 %) e um aumento energético de 4 a 9 vezes. No entanto, para atingir esse resultado a poda de árvore demandou uma redução granulométrica maior que as demais biomassas para permitir o adensamento (1,7 mm).

No processo de briquetagem de serragem de madeira e poda de árvore foram obtidos produtos com reduzida durabilidade mecânica, que pode ser explicado pela baixa pressão aplicada pela briquetadeira de pistão hidráulico, que não proporcionou o contato entre partículas e conseqüentemente a coesão adequada do material.

Apesar de não ter apresentado resultados satisfatórios para todas as biomassas, o uso da técnica de briquetagem possibilita utilizar a biomassa com uma maior faixa granulométrica, reduzindo ou eliminando a etapa de cominuição. Isso pôde ser evidenciado no caso do bagaço de cana que apresentou bons resultados de adensamento com o material abaixo de 12,5 mm, inclusive com valores de durabilidade mecânica maiores do que as obtidas com o pellet (material de alimentação abaixo de 4 mm).

É interessante notar que, nas condições avaliadas nesse estudo, os teores de umidade acima de 10 % favoreceram o processo de adensamento em ambas as técnicas, enquanto umidades abaixo de 8 % inviabilizaram a formação de produtos adensados. Uma possível explicação para esse resultado pode ser que 8 % de umidade sejam insuficientes para o processo, visto que parte da água presente no material é evaporada durante o adensamento, devido ao aumento de pressão, conforme se observa na diferença de umidades entre a biomassa in natura e a do produto adensado (Tabela 8).

Este estudo foi realizado com um dos objetivos de avaliar a importância da granulometria do material durante o processo de adensamento, e ficou evidente que existe uma influência importante da granulometria e do aspecto do material que será adensado. Conforme se observa na Tabela 8, os melhores resultados de briquetes para a serragem e para o bagaço de cana foram para o material na faixa granulométrica <12,5 mm, enquanto que para a poda de árvore foi para o material na faixa granulométrica <4,0 mm. Os presentes resultados são significativos para sugerir que existe uma faixa granulométrica ótima para cada tipo biomassa, por exemplo, as partículas de poda de árvore são mais rígidas dificultando a fluidização e coesão das partículas, então neste caso quanto menores as partículas, melhor a qualidade dos produtos de adensamento.

4 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, pode-se afirmar que é possível obter materiais adensados com características satisfatórias de resistência ao manuseio e de densidade energética a partir das três biomassas selecionadas para o estudo (serragem de madeira, bagaço de cana e poda de árvore).

Nesse estudo em especial, os produtos adensados de bagaço de cana apresentaram os melhores valores em relação à durabilidade mecânica; entretanto, isso não exclui a aplicabilidade das tecnologias de adensamento para as outras duas biomassas estudadas, visto que elas apresentaram bons valores de densidade energética e de durabilidade mecânica para os pellets.

No caso do processo de briquetagem de serragem e poda de árvore ainda são necessários estudos para melhorar a compactação da biomassa, podendo ser outros teores de umidade aplicados, outras faixas granulométricas ou até mesmo o uso de aditivos.

Os resultados apresentados evidenciam que fatores como granulometria e umidade têm impacto importante no tipo de tecnologia de adensamento a ser utilizado. Esses fatores afetam diretamente a qualidade do produto e definem a rota de processo a ser utilizada, ou seja, as etapas de pré-tratamento para adequação de granulometria e secagem, por exemplo. A escolha da melhor configuração de parâmetros de processo e das características necessárias na preparação da biomassa a ser adensada são fatores determinantes para a viabilização técnica e econômica do uso desse tipo de material como fonte energética.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Governo do Estado de São Paulo e à Fundação de Apoio do IPT pelo financiamento do Projeto de Capacitação "Viabilização do uso de biomassa como fonte energética: estudo do pré-tratamento físico de biomassa", registrado sob número 8811.01 no IPT.

6 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Sistema de Informações de Geração da Aneel – SIGA. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 01 ago. 2020.

ANUÁRIO DE INVESTIMENTOS NO RIO GRANDE DO SUL. Braspell Bioenergia investe R\$ 1,4 bi em nova fábrica. *Jornal do Comércio*, Porto Alegre, Brasil, 29 nov. 2019. Disponível em: https://www.jornal-docomercio.com/_conteudo/especiais/anuario_de_investimentos_2019/2019/11/714417-braspell-bioenergia-investe-r-1-4-bi-em-nova-fabrica.html. Acesso em: 01 ago. 2020.

BELLOTE, A. F. J.; ANDRADE, G. de C.; MOLINARI, H. B. C.; ROCHA, J. D.; SILVA, M. L. B. da; STEINMETZ, R. L. R.; FAVARO, S.P. Biomassa e sua participação na matriz energética brasileira..In: **ENERGIA limpa e acessível: contribuições da Embrapa**. Brasília,DF; Embrapa, 2018. p. 23 – 33.

BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESHTHA, R. M. State of art for biomass densification. *Energy Sources*, Bristol, v.11, n.3, p.161-182, 1989.

BOYLE, G. *Renewable energy: power for a sustainable future*. 2.ed. Oxford: Oxford University Press, 2004.

BRITO, J.P.O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. *Scientia Forestalis*. Piracicaba: IFPE, n. 16, p. 63-70, 1978.

BRASPELL BIONERGIA. Consulta geral a homepage oficial. Disponível em <http://braspell.com.br/>. Acesso em: 01 ago. 2020.

CARDOSO, B. M. *Uso da biomassa como alternativa energética*. 2012. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

COPERGAS. Tarifas Copergas. 2020. Disponível em: <https://www.copergas.com.br/atendimento-ao-cliente/tarifas/>. Acesso em: 10 abr. 2020.

CORTEZ, C. L. *Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: Estudo de caso: AES Eletropaulo*. 2011. 246 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

EDENHOFER, O.; PICHES-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; SEYBOTH, K.; MATSCHOSS, P.; KADNER, S.; ZWICKEL, T.; EICKEMEIER, P.; HANSEN, G.; SCHLOEMER, S.; VON STECHOW, C. (Ed.). *Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the intergovernmental panel on climate change*. Nova York: Cambridge University Press, 2012.

EN PLUS®. Consulta geral a homepage oficial. Disponível em: <https://www.enplus-pellets.eu/en-in/>. Acesso em: 01 ago. 2020.

FILIPPETTO, D. *Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado*. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. *FAOSTAT: Forestry Production and Trade*. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO/visualize>. Acesso em: 01 ago. 2020.

FREDERICCI, C.; LENZ e SILVA, G. F. B.; INDELICATO, R. L.; FERREIRA NETO, J. B.; RIBEIRO, T. R. LANDGRAF, F. J. G. In: *ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA*, 56, 2012, Curitiba. Anais[...] São Paulo: ABC. 2012.

GARCIA, D. P. et al. Mapa dos produtores brasileiros de biocombustíveis pellets. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 12, n. 4, p. 333-339, 2018.

GARCIA, D. P. et al. Mapa dos produtores brasileiros de biocombustíveis pellets. Disponível em: https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=14YzGlicywFgl9SC6CF579JX-J34&hl=en_US&ll=-29.21472722120234%2C-54.91353260732116&tz=6. Acesso em: 01 ago 2020.

GAVIRIA, J. C. Pelletizar madera, una forma económica y ecológica de producir combustible. 2007. Disponível em: <https://www.engormix.com/MA-balanceados/fabricacion/articulos/pelletizar-madera-forma-economica-t1778/801-p0.htm>. Acesso em: 01 dez. 2015.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Densification characteristics of corn stover and switchgrass. *Transactions of the ASABE*, v.52, p. 907-920, 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *Global energy review 2020*. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/renewables>. Acesso em: 01 ago. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 17225-2: Solid biofuels: fuel specifications and classes - Part 2: Graded wood pellets*. Alemanha, 2014.

KOSMAN, K. Global Heating Wood Pellet Demand: Current and Projection. *Madison's Report, Vancouver, Canada*, 2019. Disponível em: <https://madisonsreport.com/2019/11/08/global-heating-wood-pellet-demand-current-and-projection/>. Acesso em: 01 ago. 2020.

LETHIKANGAS, P. Quality properties of pelletized sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, Uppsala, v.19, n.20, p.351-360, Aug. 2001.

LOUÇÃO, I. J. G. Valorização da biomassa florestal, proveniente da doença de nematódeo de pinheiro, para produção de pellets. 2008. 187 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Faculdade de Ciências de Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

MACIEJEWSKA, A.; VERINGA, H.; SANDERS, J.; PETEVES, S. D. Co-firing of biomass with coal: constraints and role of biomass pre-treatment. 2006. Disponível em: <http://www.canadiancleanpower-coalition.com/files/7712/8330/1763/BM2%20-%20EUR22461EN.pdf>. Acesso em: dez. 2015.

MORAES, S.L.; FERREIRA NETO, J. B.; BOCCALINI, M.. Viabilização do uso de biomassa como fonte energética - estudo do pré-tratamento físico de biomassa. São Paulo: IPT, 28 abr. 2016. (Relatório Técnico n. 146 052-205).

NOGUEIRA, L. A.; LORA, H. *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

PALLEBRAS (São Paulo). Cotação de fornecimento. Disponível em: <https://pallebras.com.br/>. Acesso em: 19 nov. 2019.

PEREIRA, B. L. C. *Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico*. 2014. 74 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

PELLETBRAZ. Cotação de fornecimento. 2020. Disponível em: <http://pelletbraz.com.br/>. Acesso em: 29 jul. 2020.

PIETSCH, W. *Agglomeration processes – phenomena, technologies, equipment*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim. Germany, 2002.

QUIRINO, W. F. *Briquetagem de resíduos lignocelulósicos*. Brasília: LPF/IBAMA, 1991. (Circular Técnica, 2).

RUMPF H. *The strength of granules and agglomerates*. Knepper WA. *Agglomeration*. 1962.

SAMPAIO, J. A.; COSTA, L. S.; ANDRADE, M. C. de. *Ensaio contínuo de briquetagem em bancada e piloto - Aglomeração*. Part, IV. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. Cap. 22. p. 379.

SAMSON, R.; MANI, S.; BODDEY, R.; SOKHANSANJ, S.; QUESADA, D.; URQUIAGA, S.; REIS, V.; HO LEM, C. The potential of C4 perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. *Critical Reviews in Plant Sciences*. v.24, p.461- 495. 2005.

STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass e Bioenergy*, v. 35. p. 910-918, 2011.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; KENNY, K. L.; HESS, J. R. *A review on biomass densification technologies for energy application*. Idaho National Laboratory of U. S. Department of Energy. 2010.

VOENGELE, E. Report: EU demand for wood pellets continues to grow. *Biomass Magazine*, Grand Forks, ND, 05 ago. 2019. Disponível em: <http://biomassmagazine.com/articles/16371/report-eu-demand-for-wood-pellets-continues-to-grow>. Acesso em: 01 ago. 2020.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E.-U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 26. p.1-27. 2000.

DOI 10.34033/2526-5830-v5n16-1

