

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
“PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS RENOVÁVEIS”

ADRIANA APARECIDA AREIAS

Análise de viabilidade econômica do uso de diversas fontes de biomassa para queima

Sorocaba
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
“PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS RENOVÁVEIS”

ADRIANA APARECIDA AREIAS

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE DIVERSAS FONTES DE
BIOMASSA PARA QUEIMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em “Planejamento e uso de recursos renováveis”, para obtenção do título de mestre em “Planejamento e uso de recursos renováveis”.

Orientação: Prof. Dr. Fabio Minoru Yamaji
Co-Orientação: Prof. Dr. José César Cruz Júnior

Sorocaba
2020

Areias, Adriana Aparecida

Análise de viabilidade econômica do uso de diversas fontes de biomassa para queima / Adriana Aparecida Areias. -- 2020.

87 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Fábio Minoru Yamaji

Banca examinadora: João Lúcio de Barros, João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

Bibliografia

1. Bioenergia. 2. Custo. 3. Fornecedores. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

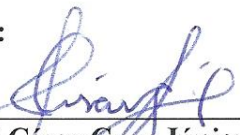
Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979

ADRIANA APARECIDA AREIAS

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE DIVERSAS
FONTES DE BIOMASSA PARA QUEIMA**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação para obtenção do título de
mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.
Universidade Federal de São Carlos.
Sorocaba, 17 de janeiro de 2020.**

Coorientador:




Prof. Dr. José César Cruz Júnior
Presidente da banca examinadora
UFSCar Sorocaba

Examinadores:



Dr. João Lúcio de Barros
Instituto Federal de São Paulo - IFSP



Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva
UFSCar Sorocaba

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por iluminar o meu caminho.

A mim mesma pela fé, por reconhecer as oportunidades e sempre ser determinada, mesmo em períodos difíceis.

À minha família, Ana Lúcia, Antônio e Isac, por todo o apoio concedido, pela confiança e paciência para que eu desse continuidade aos meus estudos, em especial à minha mãe que me deu suporte no período que fiquei sem bolsa de estudos.

Aos meus amigos que fiz no mestrado, em especial Luísa, Erick e Ellen.

Ao meu orientador Prof. Fábio Minoru Yamaji pela paciência, tempo, humildade e carisma nos momentos de conversa e orientação.

Ao meu coorientador Prof. José César Cruz Júnior e Prof. Luiz Carlos de Faria pela orientação, tempo e ideias que foram uma luz no meu trabalho.

Aos alunos do grupo de pesquisa Biomassa e Bioenergia que me ajudaram a esclarecer minhas dúvidas.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida.

À todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para minha evolução pessoal e acadêmica.

RESUMO

AREIAS, Adriana Aparecida. *Análise de viabilidade econômica do uso de diversas fontes de biomassa para queima*. 2020. 87 f. Dissertação (Mestrado em “Planejamento e Uso de Recursos Renováveis”) – Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2020.

A biomassa é um recurso renovável que está cada vez mais sendo utilizada como fonte de energia. Esta dissertação teve como objetivo geral estudar a viabilidade econômica do uso de biomassa para geração de energia. No capítulo 1 foi estudada as contribuições das energias renováveis para a produção de energia de forma sustentável. Além disso, foram abordados os tipos de biomassa sólida e quais são os principais parâmetros utilizados para fazer sua caracterização energética. No capítulo 2 foram estudados o mercado de biomassa no Estado de São Paulo e também as propriedades energéticas das biomassas analisadas: bagaço de cana, briquete, serragem, lenha e floresta de eucalipto, cavaco de pinus, carvão vegetal e casca de arroz. No capítulo 3 foi feita uma análise econômico-energética sobre as seguintes biomassas destinadas para queima na Região Metropolitana de Sorocaba (RMS): briquete, serragem, cavaco, lenha e floresta de eucalipto e casca de arroz. Neste capítulo, foram analisados o custo de energia, a logística, e o preço. Por fim, o capítulo 4 faz uma conclusão geral do trabalho e também aborda as limitações e recomendações para trabalhos futuros. A partir da análise realizada no capítulo 2, foi visto que existem mais fornecedores de lenha, cavaco e floresta de eucalipto e os maiores demandantes destas biomassas são os setores de alimentos e bebidas, moveleiro, de cerâmica vermelha e de papel e celulose no Estado de São Paulo. Em relação à oferta, os materiais que possuem maior produção neste estado são o bagaço de cana, a floresta e a lenha de eucalipto e a floresta de pinus. Na análise energética, constatou-se que o carvão vegetal, a madeira, o briquete, o cavaco e a lenha de eucalipto e o cavaco de pinus são mais apropriados para queima. No capítulo 3, verificou-se que as biomassas que apresentaram viabilidade técnico-econômica para serem utilizadas na RMS foram o cavaco e a tora de eucalipto para diversos raios de distância.

Palavras-chave: Bioenergia. Custo. Fornecedores. Energias renováveis.

ABSTRACT

AREIAS, Adriana Aparecida. *Economic viability analysis of the use of various sources of biomass for burning*. 2020. 87 f. Thesis (Master in “Planning and Use of Renewable Resources”) – Science and Technologies Center for Sustainability, Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2020.

Biomass is a renewable resource that is increasingly being used as an energy source. This dissertation aimed to study the economic viability of using biomass for power generation. In Chapter 1, the contributions of renewable energy to sustainable energy production were studied. In addition, the types of solid biomass were addressed and what are the main parameters used to make their energy characterization. In Chapter 2, was studied the biomass market in the State of São Paulo and also the energy properties of the biomass analyzed: sugarcane bagasse, briquette, sawdust, firewood and eucalyptus forest, pine chips, charcoal and rice husks. In Chapter 3, an economical-energetic analysis was made on the following biomass destined for burning in the Sorocaba Metropolitan Region (RMS): briquette, sawdust, chips, firewood and eucalyptus forest and rice husk. In this chapter, the cost of energy, logistics, and price were analyzed. Finally, Chapter 4 gives a general conclusion of the work and also discusses the limitations and recommendations for future work. From the analysis of the results obtained in chapter 2, it was seen that there are more suppliers of firewood, wood chips and eucalyptus forest and the biggest demand for these biomasses are the sectors of food and beverages, furniture, red ceramics and paper and cellulose in the State of São Paulo. In relation to supply, the materials that have the highest production in this state are sugarcane bagasse, the eucalyptus forest and firewood and the pine forest. In the energy analysis, it was found that charcoal, wood, briquette, wood chips and eucalyptus wood and wood chips are more suitable for burning. In chapter 3, it was found that the biomasses that showed technical and economic feasibility to be used in the RMS were the chip and the eucalyptus log for several distance radii.

Keywords: Bioenergy. Cost. Suppliers. Renewable energy.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
CAPÍTULO 1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: BIOMASSA COMO RECURSO SUSTENTÁVEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	13
1. INTRODUÇÃO	13
2. Sustentabilidade e Energias Renováveis	14
2.1 Contribuição ambiental do uso de energias renováveis	14
2.2 Contribuição social do uso de energias renováveis	16
2.3 Contribuição econômica do uso de energias renováveis	17
3. Utilização de Biomassa como fonte de energia renovável	19
3.1 Biomassa Florestal	22
3.1.1 Floresta de eucalipto	23
3.2 Biomassa de resíduos agroindustriais e florestais	27
4. Características energéticas dos materiais.....	29
4.1. Análise Imediata	29
4.1.1. Determinação do Teor de Umidade (TU)	29
4.1.2. Determinação do Teor de Materiais Voláteis (TMV).....	30
4.1.3. Determinação do Teor de Cinzas (TC)	31
4.1.4. Determinação do Teor de Carbono Fixo (TCF).....	31
4.2.Poder calorífico	32
4.3.Densidade Energética	33
5. CONCLUSÃO	34
6. REFERÊNCIAS	34
CAPÍTULO 2 – ESTUDO DE MERCADO SOBRE O USO DE BIOMASSA PARA QUEIMA NO ESTADO DE SÃO PAULO	42
1. INTRODUÇÃO	43
2. MATERIAL E MÉTODOS	44
2.1 Região de Estudo	44
2.2 Coleta de dados	44
2.3 Plotagem de pontos e elaboração dos mapas	44
2.4 Análise de oferta	45

2.5 Análise de demanda	45
2.6 Caracterização energética	46
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.1 Análise de oferta	46
3.2 Análise de demanda	50
3.3 Análise energética dos materiais	53
4. CONCLUSÃO	56
5. REFERÊNCIAS	57
CAPÍTULO 3 – ANÁLISE ECONÔMICO-ENERGÉTICA SOBRE O USO DE BIOMASSA PARA QUEIMA	64
1. INTRODUÇÃO	65
2. MATERIAIS E MÉTODOS	67
2.1 Empresa utilizada no estudo de caso	67
2.2 Região de estudo	67
2.3 Coleta de dados	68
2.4 Caracterização energética	69
2.5 Logística de entrega	70
2.6 Custo de colheita da floresta de eucalipto	70
2.7 Análise econômica	71
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4. CONCLUSÃO	80
5. REFERÊNCIAS	80
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86

INTRODUÇÃO GERAL

As principais fontes de energia utilizadas no mundo ainda são originadas de recursos não renováveis, como o petróleo. A utilização de fontes não renováveis por sua vez polui o meio ambiente, gera gases de efeito estufa e acaba com as reservas naturais.

O uso sustentável das fontes renováveis de energia reduz os impactos ambientais, por meio da diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE), promove o desenvolvimento econômico, eficiência no uso de recursos e inserção social (GAETE-MORALES *et al.*, 2019; OIT, 2018).

A matriz energética brasileira conta com 45% de recursos renováveis, muito acima da média global que é de 14,3% (MME, 2019). Entre as principais fontes de energias renováveis utilizadas, podem-se destacar as de origem eólica, solar, hidráulica e de bioeletricidade (como biomassa e biogás). No Brasil o setor primário é o mais atuante, sendo responsável por gerar biomassa principalmente nas atividades agrícola, pecuária e extrativismo vegetal.

Nos últimos anos existe uma forte demanda das empresas por biomassa, a fim de reduzirem seus custos de produção por meio da utilização de biomassa para cogeração de energia e também pela compra de biomassa para queima com a redução do uso de combustível fóssil.

Conforme Freitas e Filho (2013), a geração de energia a partir de biomassa teve um aumento de 227% entre os anos de 2005 e 2013, sendo a madeira responsável por 3,6% desse valor e os resíduos agrícolas por 96,4%. Neste mesmo período, a produção de madeira para abastecer as usinas para geração de energia aumentou 89%. Ainda conforme os autores, neste período houve uma queda do consumo de lenha para uso doméstico e houve um aumento de 97% do número de empresas que utilizam deste insumo, tendo destaque os segmentos de cerâmica, alimentos e bebidas e de papel e celulose. Dentre as biomassas que mais tiveram aumento na participação da matriz energética entre 2005 e 2013, destacam-se o licor negro (87%), a casca de arroz (467%), o bagaço de cana (279%) e o biogás 271%. Deve-se frisar que a casca de arroz e o bagaço de cana são utilizados, em sua maior parte, para geração de energia em suas próprias indústrias.

Conforme dados do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LSPA (IBGE, 2019), o Brasil foi responsável pela produção de mais de 169 milhões de toneladas de bagaço de cana entre os anos de 2018 e 2019. Outro resíduo que é bastante utilizado para geração de energia é a casca de arroz, que teve uma produção no Brasil de mais de 2 milhões de toneladas

neste mesmo período. Além da biomassa residual, também são utilizadas florestas para geração de energia, sendo o eucalipto a cultura mais empregada para esta finalidade. Em 2016, o plantio de eucalipto atingiu o valor de 5,7 milhões de hectares (IBÁ, 2017). A escolha da biomassa para ser utilizada como fonte de energia deve levar em conta uma série de fatores, como a sazonalidade da oferta, qualidade, preço e localização dos fornecedores.

Justifica-se a realização deste trabalho em razão do aumento da demanda pelas empresas por biomassa para serem utilizadas para queima, a fim de reduzirem seus custos produtivos. O trabalho teve como principais objetivos avaliar quais biomassas são mais utilizadas no Estado de São Paulo e quais biomassas são mais viáveis de serem utilizadas para queima na Região Metropolitana de Sorocaba (RMS), levando em consideração o preço, a logística de entrega e suas características energéticas.

Como organização metodológica o trabalho divide-se em quatro capítulos. O primeiro capítulo faz uma revisão bibliográfica dos temas pertinentes a este trabalho, como a discussão sobre energias renováveis, fontes de biomassa e caracterização energética. O capítulo 2 abrange um estudo de mercado sobre as principais fontes de biomassa ofertadas no estado de São Paulo, assim como suas propriedades energéticas. A partir da análise feita no capítulo 2 em relação ao Estado de São Paulo, no capítulo 3 foi estudada, especificamente, a viabilidade técnica e econômica do uso de biomassa na RMS, onde foi considerada a oferta de biomassa na região, a logística de entrega, custo de energia, entre outros indicadores. Por fim, no capítulo 4, foram feitas a conclusão geral do trabalho, as limitações e recomendações para trabalhos futuros.

**CAPÍTULO 1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:
BIOMASSA COMO RECURSO SUSTENTÁVEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

RESUMO

Existe uma tendência global na utilização de biomassa como fonte de energia, o que contribui para a redução da poluição ambiental, para a inserção social e redução de custos produtivos. O objetivo desta revisão foi apresentar uma visão geral sobre o conceito de energias renováveis, a utilização de biomassa como fonte de energia renovável e sustentável e suas aplicabilidades. Neste capítulo, foi realizado um estudo exploratório, por meio de uma pesquisa bibliográfica. Compreende-se que a utilização de biomassa tem um grande potencial no Brasil como fonte de energia, por conta da disponibilidade e diversidade de recursos.

Palavras-chave: Bioenergia; Fonte renovável; Sustentabilidade; Propriedades energéticas.

BIOMASS AS A SUSTAINABLE ENERGY GENERATION RESOURCE

ABSTRACT

There is a global trend in the use of biomass as a source of energy, which contributes to the reduction of environmental pollution, social inclusion and reduction of productive costs. The aim of this review was to provide an overview of the concept of renewable energy, the use of biomass as a renewable and sustainable energy source and its applicability. In this chapter, an exploratory study was accomplished, through a bibliographical research. It is understood that the use of biomass has great potential in Brazil as a source of energy, due to the availability and diversity of resources.

Keywords: Bioenergy; Renewable source; Sustainability; Energetic properties.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Vichi e Mello (2004), as fontes de energia são classificadas como primárias e secundárias, sendo as primárias fornecidas diretamente pela natureza e podem ser de uso comercial - como no caso do carvão mineral, do petróleo e do gás natural, em que são objetos de transação monetária; e não comerciais, que são consideradas gratuitas, como a energia solar.

A energia secundária é oriunda da energia primária, após sofrer transformações para que o homem utilize de suas funções. São exemplos: óleo diesel, gasolina, coque de carvão, eletricidade, etc. (GOLDEMBERG; LUCON, 2008; VICHI; MELLO, 2004).

Conforme Goldemberg e Lucon (2008), para que uma energia primária seja considerada renovável, ela deve ser reposta ao meio ambiente em um curto período de tempo, de modo que seu consumo pelo homem não a tenha esgotado. São exemplos de energias renováveis: energia solar, energia eólica, biomassa, energia maremotriz, energia geotermal e energia potencial hidráulica. No caso das energias não renováveis, não existe uma compatibilidade entre sua reposição ao meio ambiente e o seu consumo pelo homem. São exemplos: carvão mineral, petróleo, gás natural, energia nuclear e outras fontes de origem fóssil.

Para se obter desenvolvimento econômico é de suma importância a disponibilidade de energia para abastecer as indústrias e demais demandas que dependem deste insumo. Entretanto, é necessário entender que, para ocorrer o desenvolvimento, deve-se levar em consideração os impactos ambientais e sociais ao se optar pela fonte de energia que irá se utilizar. Desta forma, busca-se o desenvolvimento sustentável que é o desenvolvimento levando em consideração as esferas sociais e ambientais e não simplesmente a busca pelo crescimento econômico em si.

O Brasil, em comparação com outros países, se encontra em uma posição favorável quanto à disponibilidade de recursos para serem utilizados como fontes de energias renováveis. A fonte de energia elétrica mais utilizada sempre foi de origem hidráulica, mas deve-se frisar o potencial de geração por outras fontes de energia como a biomassa, a eólica e a solar.

O objetivo deste capítulo foi fazer uma discussão sobre o uso de biomassa como fonte de energia renovável. Primeiramente, abordou-se o tema da sustentabilidade das energias renováveis por meio da análise de três pilares: ambiental, social e econômico. Em seguida, foram apresentadas diferentes fontes de biomassa para geração de energia e, por fim, foram descritas algumas das formas mais utilizadas para fazer a caracterização energética de materiais.

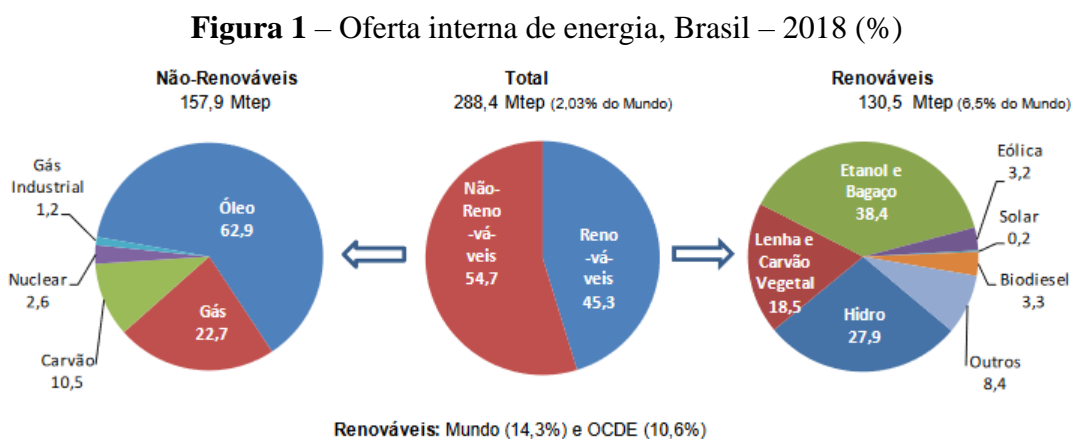
2. Sustentabilidade e Energias Renováveis

2.1 Contribuição ambiental do uso de energias renováveis

A dependência de combustíveis fósseis para compor a matriz energética além de não ser sustentável, ocasiona diversas limitações, tais como: exaustão dos combustíveis, já que suas

reservas são limitadas; coloca em risco a segurança energética em decorrência de disputas geopolíticas e conflitos militares; flutuações de preços e degradação da saúde e de condições ambientais, como poluição atmosférica, chuva ácida e aquecimento global (GOLDEMBERG, 2015; OWUSU; ASUMADU-SARKODIE, 2016). A utilização de fontes renováveis de energia tem um forte papel na diminuição das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) na geração de energia elétrica, que chega a ser responsável por aproximadamente 25% das emissões (GAETE-MORALES *et al.*, 2019).

Na Figura 1, percebe-se que o Brasil, em comparação com o resto do mundo (14,3%) e com os países da OCDE (10,6%), utiliza mais energias renováveis em sua matriz energética (45,3%), o que denota uma vantagem comparativa no que se refere à menor dependência de combustíveis fósseis para geração de energia.

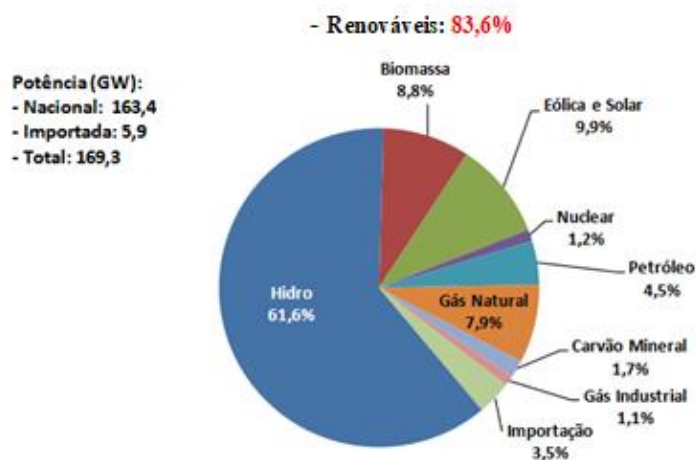


Onde: Mtep = Milhões de Tonelada Equivalente de Petróleo.

Fonte: MME (2019).

A Figura 2 ilustra o potencial de geração de energia elétrica nacional a partir de fontes renováveis, responsável por 83,6% da matriz de oferta de energia elétrica, sendo predominante o uso de hidrelétricas. Conforme o Ministério de Minas e Energia - MME (2019), esse percentual reduz drasticamente para 22% quando considerado a nível mundial.

Figura 2 – Oferta de potência de geração elétrica, Brasil – 2018 (%)



Fonte: Adaptado de MME (2019).

Em vista disso, em nível global, o Brasil emite menos GEE em decorrência da utilização de energias renováveis. Conforme o Balanço Energético Nacional - BEN (2019), em comparação com a China e EUA, o Brasil emite, em média, 7,5 vezes menos gás carbônico em relação a produção e consumo per capita de energia.

2.2 Contribuição social do uso de energias renováveis

A sustentabilidade ambiental, quando estimulada por meio de instrumentos institucionais e regulatórios, promove o crescimento sustentável, baixas emissões de carbono, uso eficiente de recursos e trabalho digno (OIT, 2018).

Conforme Hinrichs e Kleinbach (2004), as energias renováveis causam danos mínimos ao meio ambiente e podem ser utilizadas de diversas formas, desde que sejam utilizadas tecnologias apropriadas. Para os autores, são os países subdesenvolvidos e em desenvolvimento os que mais demandam desta fonte de energia, principalmente para aquecer os alimentos. Nestes países, a biomassa se torna uma alternativa para a diminuição das importações de combustíveis fósseis, além do aumento da oferta de emprego em decorrência do incremento das tecnologias ambientais.

Em 2016, o setor de energias renováveis empregou mais de 9,8 milhões de pessoas no mundo, conforme a Agência Internacional para as Energias Renováveis - IRENA (2017), sendo a biomassa sólida e o biogás responsáveis por 1,2 milhões de empregos. Nota-se na, Tabela 1,

que entre as fontes de energias renováveis analisadas, as que geraram mais emprego em 2016 foram a energia solar fotovoltaica, biocombustíveis líquidos e hidrelétrica.

Tabela 1 – Empregos em energia renovável por fonte/tecnologia, Mundo - 2016

Fonte/ Tecnologia	Empregos (em mil)
Solar Fotovoltaica	3.095
Biocombustíveis Líquidos	1.724
Hidrelétrica (Grande porte)	1.519
Energia Eólica	1.155
Aquecimento solar/resfriamento	828
Biomassa sólida	723
Biogás	333
Pequena Central Hidrelétrica (PCH)	211
Energia Geotérmica	182
Energia Solar Concentrada	23
Total	9.793

Fonte: Adaptado de IRENA (2017).

Conforme a IRENA (2017), a maior parte do emprego gerado no Brasil é oriundo da produção de biocombustíveis líquidos. Apesar do aumento da produção de etanol ter sido de 8% em 2015, houve uma retração no número de empregos em 10%, em decorrência da mecanização da colheita e do processamento.

2.3 Contribuição econômica do uso de energias renováveis

A expansão do consumo de energia tem uma forte correlação com o crescimento econômico, por isso o setor de energia é visto como um fator chave para a promoção do desenvolvimento econômico. Os instrumentos de política pública podem favorecer esse processo por meio do incentivo à inovação das tecnologias vinculadas às energias renováveis (OWUSU; ASUMADU-SARKODIE, 2016).

No setor de energias renováveis, são utilizados muitos instrumentos de regulação, como as tarifas especiais, as quotas, sistema de certificação e os leilões, o que também envolve os incentivos fiscais, como os impostos sobre combustíveis, os benefícios fiscais sobre importação/exportação e a taxa de carbono. Além disso, são aplicadas políticas

socioeconômicas a fim de trazer benefícios por meio do acesso rural às fontes de energias renováveis e para atender necessidades locais e sociais (IRENA, 2019).

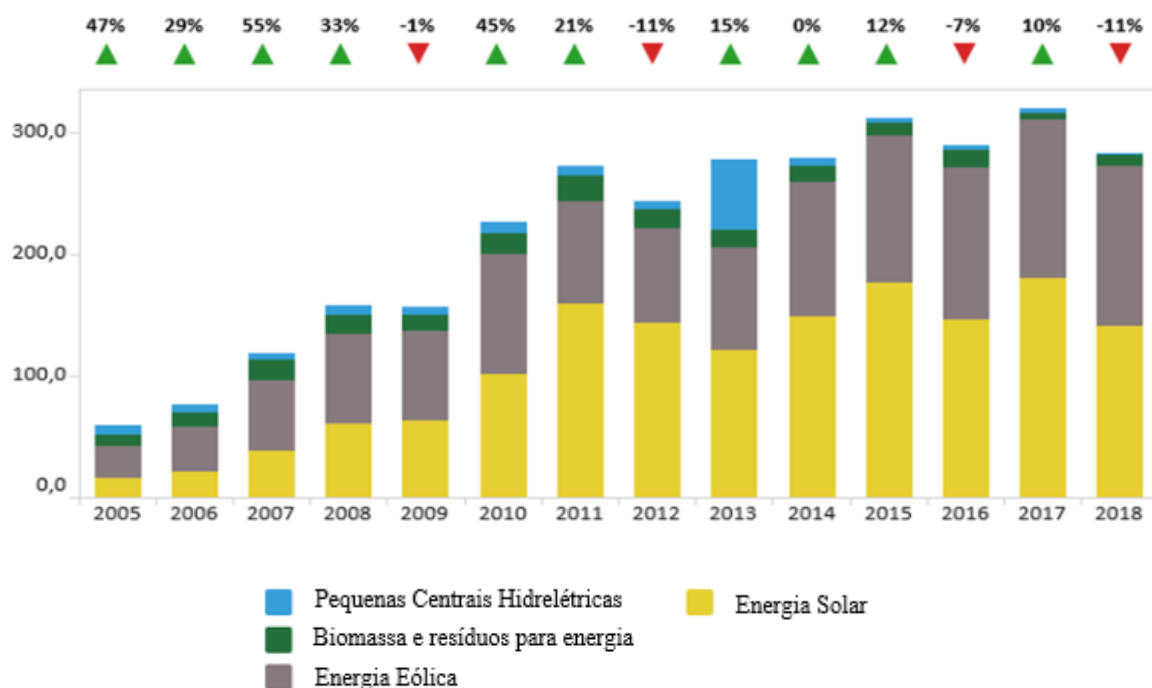
Entre as medidas que estão sendo implementadas no Brasil, para aumentar a eficiência energética, conforme o Plano Paulista de Energia – PPE 2020 (SEESP, 2012), podem-se destacar o aumento da segurança energética, a utilização do gás da Bacia de Santos e da biomassa de cana-de-açúcar, a substituição de derivados de petróleo nos sistemas de transportes de regiões metropolitanas, a produção de energia elétrica a partir da utilização de biomassa e a utilização do gás natural para produção termelétrica.

Como fatores limitantes do uso das energias renováveis, podem-se destacar o custo da geração de energia, incertezas técnicas e econômicas, a falta de estratégia governamental, a limitação da ampliação de sua utilização, armazenamento, tempo, clima, etc. (HINRICHS; KLEINBACH, 2004).

Segundo Gaete-Morales *et al.* (2019), as energias renováveis são principalmente intensivas em capital, se opondo às tecnologias aplicadas aos combustíveis fósseis, cujos custos operacionais e com combustíveis são mais elevados. Deste modo, sendo os custos variáveis das energias renováveis próximos a zero, elas possibilitam reduzir os custos marginais do sistema, porém com desincentivo ao investimento. A fim de estimular os investimentos, os autores citam como exemplo o caso de alguns países da América do Sul, que incentivaram contratos de longo prazo e mercados de curto prazo para o comércio de energia, de modo a garantir a estabilidade do preço ao longo do tempo.

Percebe-se na Figura 3 que existe uma tendência global no aumento do investimento para as quatro fontes de energia analisadas, com destaque para a energia solar e eólica.

Figura 3 - Tendências globais no investimento em energia renovável (bilhões de USD), 2005-2018.



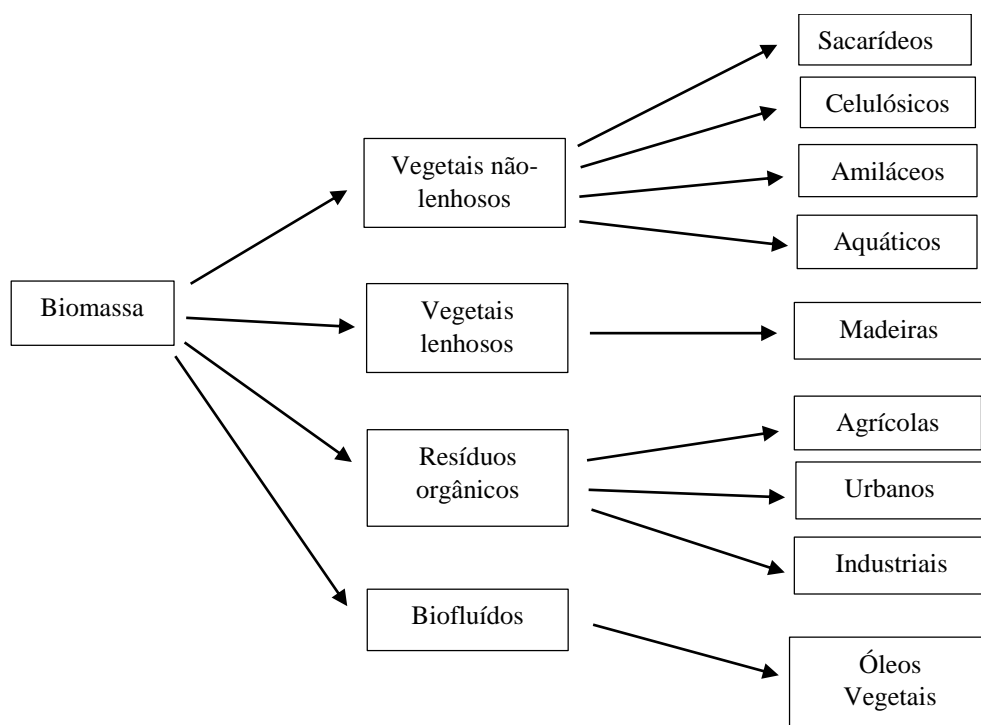
Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

3. Utilização de Biomassa como fonte de energia renovável

Uma das alternativas às fontes convencionais de energia, como o petróleo e o gás natural, é a utilização de biomassa que é considerada “uma fonte de energia que é tão antiga quanto a humanidade e tão nova quanto o jornal de hoje”. (HINRICHS; KLEINBACH, 2004).

A biomassa é um biocombustível composto por matérias orgânicas de origem florestal, agrícola e de rejeitos urbanos e industriais e pode ser transformada em energia mecânica, elétrica e térmica. Em relação a sua utilização, ela pode ser utilizada na forma líquida, sólida e gasosa. Entre os biocombustíveis mais utilizados, podem-se destacar: as oleaginosas, biomassa lignocelulósica, resíduos sólidos e algas (RUAN *et al.*, 2019). A Figura 4 mostra a origem das fontes de biomassa.

Figura 4 - Fontes de Biomassa



Fonte: Cortez; Lora; Ayarza (2008).

Em relação aos resíduos agroindustriais, estes são gerados na produção de produtos agrícolas e florestais. Os resíduos da indústria madeireira são, em sua maioria, a casca, o cavaco, a costaneira, o pó de serra, a maravalha e as aparas. Já na indústria de alimentos e bebidas, por exemplo, são produzidos resíduos na produção de sucos e aguardente, no processamento do amendoim, do coco, do café, do milho, etc. Estes resíduos são destinados à queima direta em fornos e caldeiras ou mesmo através da biodigestão anaeróbia (CORTEZ; LORA; AYARZA, 2008).

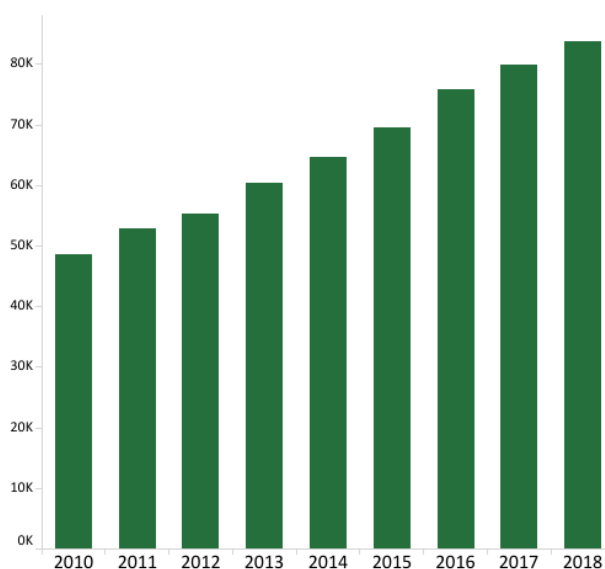
Conforme Graig *et al.* (1998), a biomassa pode ser convertida em energia utilizando-se três formas: combustão direta, pirólise e gaseificação. Por meio da combustão direta, a biomassa é queimada para produção de calor tanto para o aquecimento de ambientes como também para produção de energia elétrica, utilizando-se de uma turbina a vapor. No processo de pirólise, ocorre a decomposição térmica dos resíduos, utilizando-se gás ou líquido, sob altas temperaturas, em um ambiente com pouca ou nenhuma concentração de oxigênio. A conversão da biomassa por meio da gaseificação envolve sua devolatização e a transformação da biomassa em um gás de valor calorífico médio ou baixo.

Para a combustão da madeira, são necessários: combustível, oxigênio e calor. Este processo acontece em três etapas: primeiro, ocorre a evaporação da umidade contida na

madeira; na segunda etapa ocorre a combustão a cerca de 315°C, onde ocorre a queima de alguns compostos voláteis e por fim, na terceira etapa, a madeira vira carvão vegetal (a cerca de 540°C) e em seguida cinzas (a cerca de 600°C). Além disso, o processo será menos eficiente se forem utilizadas madeiras verdes ou recém cortadas, já que será necessário utilizar energia para evaporar a água (seja ela em toras ou em cavacos) (HINRICHS; KLEINBACH, 2004).

A biomassa destinada para geração de energia tem um grande potencial para atender a demanda crescente de países populosos, como o Brasil, Índia e China (IRENA, 2019). Nota-se na Figura 5 uma tendência de crescimento da capacidade instalada em relação ao uso de biocombustível sólido.

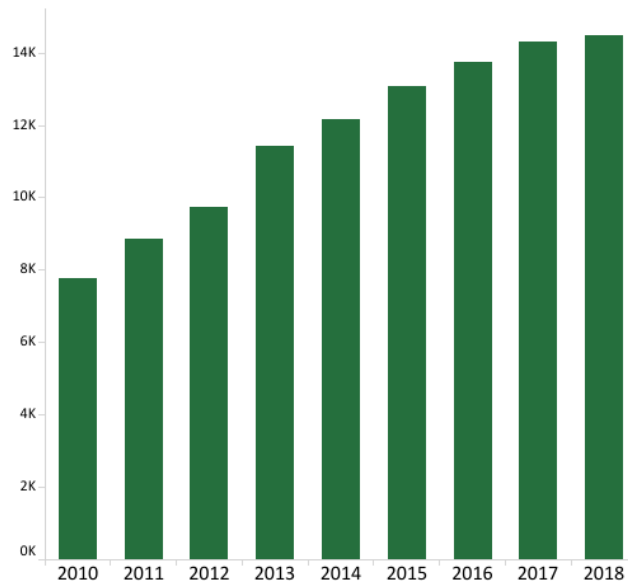
Figura 5 – Tendências para a capacidade instalada de energia renovável a partir de biomassa sólida (MW) – Mundo, 2010-2018.



Fonte: IRENA (2019)

O Brasil, assim como outros países (Figura 5), tem uma tendência crescente para aumentar sua capacidade instalada a partir do uso de biocombustível sólido, com um crescimento acelerado a partir de 2013, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Tendências para a capacidade instalada de energia renovável a partir de biomassa sólida (MW) – Brasil, 2010-2018.



Fonte: IRENA (2019)

3.1 Biomassa florestal

Segundo Carneiro *et al.* (2013), a biomassa florestal para uso energético se divide em produção de carvão vegetal e de lenha. Para a queima direta, no caso da lenha, é recomendável utilizar madeiras com maior poder calorífico, já que obterá maior rendimento energético e também madeiras com maior densidade, por estar correlacionada com a produção de massa seca.

Para Fisher *et al.* (2017), no sistema de plantio, as mudas devem estabelecer sistemas radiculares, competir com a vegetação e estresses ambientais locais, como calor, seca, praga de insetos, etc. Além disso, o cuidado inicial para acabar com as ervas daninhas é um fator determinante para o sucesso do plantio, para o crescimento rápido e alta produção de biomassa. Estes fatores determinam quais espécies são mais adequadas para implantação e comercialização em escala.

Conforme Teixeira *et al.* (2016), a biomassa florestal utilizada para produção de bioenergia e biocombustíveis é caracterizada por ser de rápido crescimento e de curta rotação. Para os autores, o potencial energético das florestas irá depender das propriedades físicas e químicas da madeira, como o teor de lignina, o teor de celulose, o teor de umidade e o poder calorífico. Tais propriedades são influenciadas principalmente pelo espaçamento utilizado no

plantio, já que a capacidade de absorção dos nutrientes pelas árvores pode estar comprometida em espaçamentos menores. Além disso, deve-se levar em consideração a fertilidade do solo e os custos de produção.

Todos estes fatores irão determinar a idade de corte, a taxa de crescimento, quais serão os métodos utilizados para o plantio, manejo e colheita, assim como a qualidade da madeira. Para Barrichelo e Müller (2005), o eucalipto é amplamente comercializado no mercado justamente por atender a estes fatores. Além disso, há diversas espécies de eucalipto que permitem atender demandas distintas, por se adaptarem a diversos climas, solos e por serem de fácil propagação.

O conceito de floresta de curta rotação está sendo amplamente utilizado para o cultivo do gênero eucalipto, por ter alta produtividade e ser muito adaptável. Mediante a produtividade do plantio, é feita a escolha da área que será reflorestada e a obtenção de créditos de carbono. Para isso, é levado em consideração o volume de madeira produzida, que também interfere na quantidade de carbono fixado (TEIXEIRA *et al.*, 2016).

Conforme Penteado, Pichelli e Soares (2018), as espécies de eucalipto mais plantadas no Brasil são: *E. grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, *E. dunnii* e *E. benthamii*, sendo estes dois últimos produzidos na região Sul do país.

Barrichelo e Müller (2005) recomendam, para a produção de lenha e carvão, as seguintes espécies de eucalipto: *E. brassiana*, *E. camaldulensis*, *E. citriodora*, *E. cloeziana*, *E. crebra*, *E. deglupta*, *E. exserta*, *E. globulus*, *E. grandis*, *E. maculata*, *E. paniculata*, *E. pellita*, *E. pilularis*, *E. saligna*, *E. tereticornis*, *E. tessellaris* e *E. urophylla*.

Em relação às diferenças entre as diversas espécies de eucalipto, Jesus *et al.* (2017) demonstra, a partir da caracterização energética das espécies *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus propinqua*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus botryoides* (todas com seis anos de idade) que, estatisticamente, não existe diferença significativa em relação ao poder calorífico.

3.1.1. Floresta de Eucalipto

Conforme o Plano Nacional de Energia – PNE 2030 (EPE, 2007), a produção florestal pode ser silvicultural ou extrativa vegetal. A silvicultura se baseia no plantio e colheita de espécies exóticas, como no caso do eucalipto, do pinus americano, da acácia-negra, etc., e

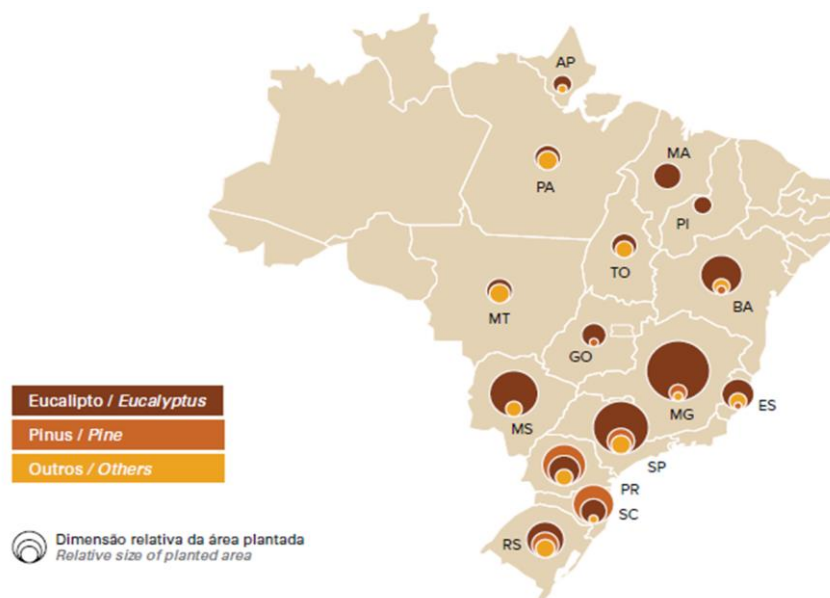
também do plantio de espécies nativas, como a araucária e o mogno. Já em relação ao extrativismo vegetal, são realizadas colheitas de espécies nativas espontâneas.

Conforme Teixeira (2014), o aumento da produtividade, da área plantada de florestas e da produção de madeira em tora permitiu que diversos setores se desenvolvessem no Brasil, sendo os principais consumidores os setores de papel e celulose, indústria madeireira, indústria de painéis industrializados e siderurgia, que consomem lenha e carvão vegetal para geração de energia.

A silvicultura e o extrativismo vegetal, somados, obtiveram o valor da produção de R\$ 19,1 bilhões em 2017, sendo a silvicultura responsável por 77,3% (R\$ 14,8 bilhões) deste valor. Em relação a 2016, a silvicultura teve um aumento de 5% no valor produzido, enquanto que o extrativismo vegetal enfrentou uma queda de 1,9% em relação a este mesmo período, o que revela uma troca entre estes modelos de produção (RODRIGUES, 2018).

Na Figura 7, nota-se que existem mais plantios de eucalipto no Brasil em comparação com as demais culturas. Percebe-se que as regiões sudeste e sul possuem mais áreas cultivadas de eucalipto e pinus em relação às demais regiões, havendo um predomínio do eucalipto na região sudeste e do pinus, na região sul.

Figura 7 - Áreas de árvores plantadas no Brasil por estado e por gênero, 2016.



Fonte: IBÁ (2017).

Na região sudeste existe uma alta demanda por eucalipto para produção de papel e celulose, como mostra a Tabela 2. Conforme Dossa *et al.* (2002a), a demanda pelo setor de papel e celulose, e também de serraria, pela madeira de eucalipto se deve em grande parte a sua

produtividade, já que tem crescimento rápido. Segundo Villas Bôas (2019), no setor de papel e celulose, o eucalipto é demandado para produção de fibra curta, enquanto que para produzir, neste mesmo setor, papéis de fibra longa (de melhor qualidade), é utilizado a madeira de pinus. De acordo com Rodrigues (2018), em 2017, as regiões sul e sudeste representaram 62,3% do valor da produção nacional de florestas plantadas.

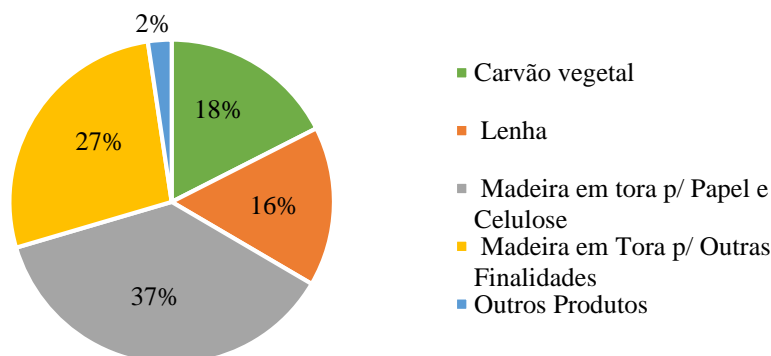
Tabela 2 – Produção da Silvicultura nas regiões Sul e Sudeste – 2016.

Unidades da Federação	Silvicultura			
	Madeira em tora para papel e celulose		Madeira em tora para outras finalidades	
	Quantidade produzida (m³)	Valor de produção (mil reais)	Quantidade produzida (m³)	Valor de produção (mil reais)
Sudeste	26.586.786	1.298.819	15.115.027	921.630
Minas Gerais	7.809.188	458.258	4.983.040	408.431
Espírito Santo	4.050.068	256.954	1.471.911	131.223
Rio de Janeiro	-	-	240.843	34.401
São Paulo	14.727.530	583.607	8.419.233	347.575
Sul	28.295.028	1.488.843	30.444.856	2.580.907
Paraná	15.902.730	966.555	17.057.198	1.432.800
Santa Catarina	6.189.909	290.898	7.289.152	689.234
Rio Grande do Sul	6.202.389	231.390	6.098.506	458.873

Fonte: Adaptado de CNAE (2016).

Na Figura 8, pode-se notar que além da madeira em tora para produção de papel e celulose, existe uma forte demanda por madeira em tora para outras finalidades (destinada a produção de móveis, construção naval e civil, etc.) e também para a produção de energia, no caso do carvão vegetal e da lenha.

Figura 8 – Participação de cada produto da silvicultura no valor total da produção da silvicultura, Brasil – 2016 (%)



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da CNAE – IBGE (2016).

Teixeira (2014) destaca a relevância do setor madeireiro no ponto de vista econômico, ambiental e social. Conforme o autor, o aumento da produção neste setor, em 2012, colocou esta atividade no mesmo nível de importância econômica que a soja, o etanol e a carne, com a geração de US\$ 19,5 bilhões no comércio internacional, neste mesmo ano. Do ponto de vista ambiental e social, conforme o autor, houve um aumento da geração de empregos e a geração de diversos serviços ambientais que contribuíram para a manutenção de ecossistemas e para a redução da emissão de GEE.

No Quadro 1, percebe-se que no Brasil existem vantagens comparativas principalmente no que se refere à disponibilidade de terras e baixo custo para realização do plantio. Para Juvenal e Mattos (2002), as vantagens comparativas estão associadas às condições edafoclimáticas (solo e clima) para a silvicultura. Este fator juntamente com os avanços tecnológicos para o plantio, geram vantagens competitivas.

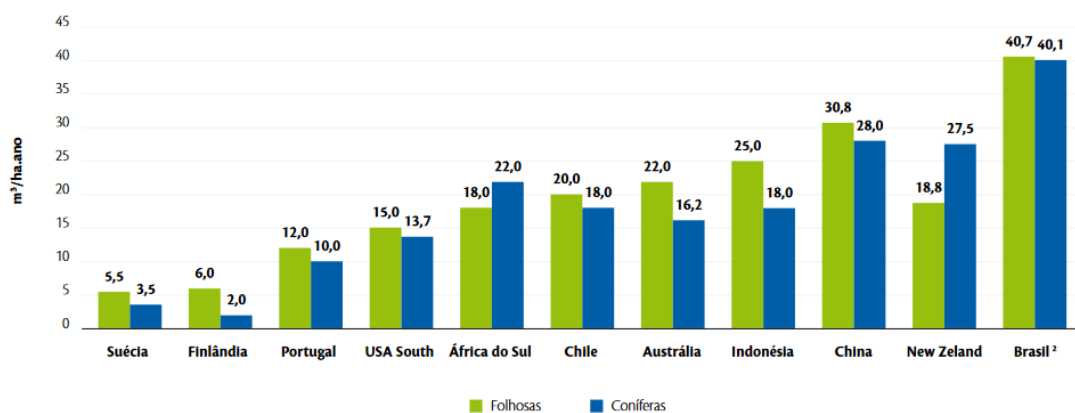
Quadro 1 - Vantagens comparativas e competitivas do setor florestal brasileiro

Vantagens Comparativas	Vantagens Competitivas
Baixo custo de produção florestal	Alta produtividade
Disponibilidade de áreas degradadas e com vocação florestal	Tecnologia de produção florestal
Área existente com florestas nativas (MFS)	Indústria de bens de capital
Florestas plantadas em diferentes estágios de desenvolvimento	Capacidade técnica (gestão)
Disponibilidade de mão-de-obra a custos relativamente reduzidos	Mercado doméstico amplo em crescimento

Fonte: Braunbeck, Magalhães e Garcia (2008).

Conforme Teixeira (2014), o Brasil tem a maior produtividade mundial no plantio de eucalipto e pinus (como se observa na Figura 9), porém esta vantagem competitiva está sendo colocada à risca frente o aumento dos custos de produção nesse setor. Entre as vantagens competitivas na produção de madeira no Brasil estão as condições edafoclimáticas, a disponibilidade de terras e os investimentos em pesquisa e desenvolvimento neste ramo.

Figura 9 - Comparação da produtividade florestal de coníferas e de folhosas no Brasil¹ com países selecionados, 2012



Fonte: Anuário ABRAF (2012).

Para Teixeira (2014), além do aumento do custo da produção de madeira, o custo médio de produção de celulose também contribuiu para a perda da competitividade no cenário mundial.

3.2. Biomassa de resíduos agroindustriais e florestais

Além do uso da madeira na forma de lenha e carvão, também são utilizados cavacos, serragem, pellets, briquetes, entre outros resíduos. No caso do briquete, a madeira passa por uma transformação industrial para que possa ser utilizada em estufas, caldeiras ou fornos, a uma temperatura controlada. A fabricação de briquetes permite o melhor aproveitamento das árvores, já que são utilizados também os resíduos de galhadas (PENTEADO, PICHELLI, SOARES, 2018).

De acordo com Quirino (1991), uma grande parte dos resíduos agroindustriais são pouco aproveitados e estão concentrados principalmente nos maiores centros urbanos, onde existe maior demanda por energia. Além disso, existe pouca produção de lenha nestas localidades. Deste modo, a briquetagem de resíduos lignocelulósicos (como a serragem, maravalha, casca de arroz, bagaço de cana, entre outros) surge como uma alternativa para seu aproveitamento, sendo a qualidade do briquete considerada superior à da lenha.

Conforme Solano, Vinyes e Arranz (2016), o briquete é fabricado, usualmente, com seu diâmetro entre 50 a 80 mm e 150 mm de comprimento, podendo ter o formato de um cilindro,

de um prisma ou ser retangular; e também possui um orifício para facilitar o processo de combustão.

Segundo Quirino (1991; 2003), o briquete tem densidade relativa aparente em torno de $1,1 \text{ g.cm}^{-3}$ e densidade a granel entre 500 a 600 kg.m^{-3} , o que permite reduzir seu volume de quatro a seis vezes quando comparado à lenha e também sua densidade energética é três vezes superior a deste material. Além disso, o briquete possui entre 10% a 12% de teor de umidade, enquanto que o da lenha fica entre 25% a 35%.

Apesar das vantagens da utilização do briquete, como sua densidade energética, menor volume para transporte e armazenamento, ele ainda não é produzido em escala no Brasil. Para Felfli (2011), o aumento da produção de briquetes depende ainda da disponibilidade para obtenção de resíduos, tecnologias para briquetagem e expansão do mercado consumidor.

Os resíduos que apresentam maior viabilidade para briquetagem, no Brasil, são os resíduos de madeira, como a serragem e o cavaco e também a casca de arroz e de café. O bagaço de cana, apesar de ser o resíduo mais abundante, não é recomendado, já que possui um alto teor de umidade (em torno de 50%), além de ser utilizado em sua maior parte para abastecer a própria usina para produção de etanol e açúcar (FELFLI *et al.*, 2011).

Em comparação com o uso do cavaco de eucalipto, Costa *et al.* (2010), relatam que o uso deste material se torna mais eficiente que o uso da lenha, por ter maior superfície de contato, o que pode aumentar a eficiência no uso da biomassa em diversos sistemas de queima em caldeira. Além disso, são aproveitados os galhos e outros resíduos florestais, o que contribui para aumentar o uso energético da floresta. Para a fabricação do cavaco, é necessária a utilização de uma máquina picadora de madeira, sendo necessários ainda o alimentador da caldeira e a mão-de-obra.

Em relação aos resíduos gerados nas indústrias madeireiras em decorrência da operação de serras, a chamada serragem ou pó de serra, quando utilizados para queima, se tornam uma alternativa para diminuir sua deposição no meio ambiente. Conforme Rezende, Leal e Neves (2014), entre as vantagens do uso da serragem estão sua biodegradabilidade e combustibilidade, sendo mais eficaz quando utilizado na forma de briquete.

Para Rezende, Leal e Neves (2014), a utilização do briquete de serragem se mostra mais eficiente quando comparado à serragem em pó, pois ocupa menos espaço (o que facilita o estoque e transporte), apresenta menor teor de umidade, produz menos fumaça, cinza e fuligem, além do processo de queima ser constante e uniforme. Conforme os autores, um metro cúbico de briquete equivale a cinco vezes mais energia que um metro cúbico de serragem.

Em relação à casca de arroz, ela corresponde a cerca de 23% do peso do arroz, é obtida no processo de beneficiamento e é comumente usada para geração de energia. A produção de arroz é a terceira maior *commodity* agrícola do mundo, sendo o Brasil um dos maiores produtores, estando atrás apenas dos países do continente asiático. Logo, percebe-se o grande potencial da casca de arroz para suprir a demanda por biomassa para queima (ABAIDE, 2019).

Conforme Lhamby, Senna e Canes (2010), o uso da casca de arroz para queima pode fornecer todo o calor e eletricidade necessária para o próprio setor arroseiro. Neste caso, ocorre uma redução dos custos com transporte, por não necessitar comprar biomassa de outros locais e também redução dos custos com energia.

Segundo Morais *et al.* (2006), a briquetagem da casca de arroz deixa este material mais viável de ser utilizado em caldeiras, pois facilita no seu processo de alimentação, devido à baixa densidade a granel da casca. Neste processo, ocorre a densificação do material, por meio do uso de uma prensa, a homogeneização, uso de aglomerante (caso necessário) e sua compactação. Todavia, os autores ressaltam que a fina granulometria e a presença de sílica na casca de arroz dificultam o processo de briquetagem, pois a sílica diminui a capacidade de adesão do ligante, o que eleva seu uso nesse processo.

4. Características energéticas dos materiais

4.1. Análise Imediata

Conforme Rendeiro e Nogueira (2008), a análise imediata permite auferir, por meio de uma amostra de biomassa, seus teores de umidade, de voláteis e de carbono fixo. De acordo com os autores, os resultados podem se diferir, dependendo da metodologia adotada.

A norma mais utilizada no Brasil para a realização de análise imediata quando se refere à biomassa vegetal é a da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), mais especificamente a NBR 8112 de 1986. A norma ASTM, que é internacional, é utilizada para análise imediata da madeira (RENDEIRO; NOGUEIRA, 2008; SILVA, 2019).

4.1.1. Determinação do Teor de Umidade (TU)

Segundo Rendeiro e Nogueira (2008), para calcular o teor de umidade (TU) é utilizada a NBR 6923 (Amostragem e Preparação da Amostra), em que são utilizadas 500 gramas de

amostra de biomassa, sendo sua granulometria inferior a 19 mm. De acordo com Silva Ignacio, Almeida Santos e Duarte (2019), para determinar a quantidade de água contida na madeira é utilizado o teor de umidade em base úmida (TUBu). Conforme os autores, o material deve ser seco a uma temperatura de 105°C, até que a massa permaneça constante. Por meio da Equação 1, é determinado o TUBu:

$$TUBu = \frac{m1-m2}{m1} \quad (\%) \quad (1)$$

Onde:

$m1$ = massa inicial da amostra (em g)

$m2$ = massa final da amostra (em g)

Para calcular o teor de umidade em base seca (TUBs), é utilizada a Equação 2 (BRUDER; REZENDE; COSTA, 2016):

$$TUBs = \frac{m1-m2}{m2} \quad (\%) \quad (2)$$

Segundo Quirino (2003), o TU elevado diminui a quantidade de energia disponível no processo de combustão, já que parte da energia produzida será gasta para evaporar esta umidade. Deste modo, a utilização da biomassa seca deixa o processo de carbonização mais rentável.

4.1.2. Determinação do Teor de Materiais Voláteis (TMV)

O teor de materiais voláteis (TMV) é determinado por meio da medição da massa de biomassa que é vaporizada durante o processo de aquecimento de uma amostra de material que foi seco na estufa. A partir deste processo é obtido o carbono fixo e as cinzas. São usados como norma a NBR 8112 e a E872 (RENDEIRO; NOGUEIRA, 2008). A seguinte equação possibilita sua determinação:

$$TMV = \frac{m2-m3}{m2} \times 100 \quad (\%bs) \quad (3)$$

Onde:

$m2$ = massa da amostra antes do experimento (em g);

m_3 = massa residual após o experimento (em g);

bs = expresso em base seca.

De acordo com Chaves *et al.* (2013), quando o TMV é elevado ele pode contribuir negativamente para o processo de combustão, pois irá acelerar o tempo de queima do material, fazendo com que não o torne rentável.

4.1.3. Determinação do Teor de Cinzas (TC)

Para a determinação do teor de cinzas (TC) são utilizadas a NBR 8112 e a D1102, em que o material é colocado em um forno mufla para ocorrer a combustão de seus componentes orgânicos e a oxidação dos inorgânicos, restando, no fim do processo, somente as cinzas do material (RENDEIRO; NOGUEIRA, 2008). É utilizada a Equação 4 para sua determinação:

$$TC = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100 (\%bs) \quad (4)$$

Onde:

m_3 = massa da amostra antes do experimento (em g);

m_4 = massa residual após o experimento (em g);

bs = expresso em base seca.

Conforme Fernandez *et al.* (2016), o TC não faz parte do processo de queima do material, o que resulta na perda do seu poder calorífico. Por esta razão, é importante avaliar este aspecto em cada biomassa, para definir se ela será viável de ser utilizada para queima.

4.1.4. Determinação do Teor de Carbono Fixo (TCF)

Para a determinação do teor de carbono fixo (TCF), é utilizada a NBR 8112. De acordo com Rendeiro e Nogueira (2008), para calcular o TCF, deve-se obter, previamente, o TMV e TC da amostra, como é demonstrado na equação a seguir:

$$TCF = 100 - (TMV + TC) (\%) \quad (5)$$

Conforme Chaves *et al.* (2013), o TCF influencia positivamente no processo de combustão, já que contribui para aumentar o tempo de queima. O TMV também pode interferir negativamente no TCF, pois irá reduzir sua obtenção.

4.2. Poder calorífico

Conforme Quirino (2003), o poder calorífico é obtido no processo de combustão da biomassa, em que é quantificado as calorias que foram liberadas. Sua determinação pode ser por meio da bomba calorimétrica ou por meio do conhecimento da composição química do material. A partir da sua determinação, podem ser obtidos o Poder Calorífico Superior (PCS), o Poder Calorífico Inferior (PCI) e o Poder Calorífico Útil (PCU).

A respeito do PCS, ele é determinado por meio da bomba calorimétrica, a partir do material seco. Segundo Rendeiro e Nogueira (2008), são utilizados como norma a NBR 8633 e a ASTM E711 para a realização dos procedimentos. Nos ensaios, ocorre a combustão da biomassa e a liberação de calor é absorvida pela água, em altas temperaturas. Após a estabilização da temperatura, a quantidade de calor que foi absorvida pela água é determinada pela Equação 6:

$$QR = m_{H_2O} \cdot C \cdot (T_{final} - T_{inicial}) \quad (6)$$

Onde:

QR = Quantidade de calor absorvida

m_{H_2O} = massa de água

C = calor específico da água

T = temperatura da água

O PCI é obtido a partir do valor calculado do PCS mas, desta vez, considerando o teor de umidade contido no material. É, portanto, a quantidade de calor necessária para vaporizar a água da biomassa (QUIRINO, 2003). Conforme Farra (2004), o PCI pode ser obtido pela Equação 7:

$$PCI = PCS (1 - U_{bu}) - L_v * U_{bu} \quad (7)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (kcal x kg⁻¹)

PCS = poder calorífico superior (kcal x kg⁻¹)

Ubu = Umidade base úmida (%)

Lv = Calor Latente de Vaporização da Água (kcal x kg⁻¹)

O Calor Latente é obtido a partir da mudança do estado líquido para o gasoso, em que ocorre a absorção de calor pela biomassa. Se o teor de umidade for elevado, menor será o PCI (FARRA, 2004; RENDEIRO; NOGUEIRA, 2008).

Em relação ao PCU, ele é obtido a partir do PCS e leva em consideração a energia gasta para evaporar a água contida na biomassa. Como essa energia não será utilizada no processo produtivo, ela deve ser descontada da quantidade de energia que será realmente útil para queima (MOREIRA; LIMA; GOULART, 2012). Conforme Lima (2010), o PCU é obtido da mesma forma que o PCI, porém desconsidera a energia gasta para evaporar a umidade do próprio material. O PCU pode ser obtido a partir da Equação 8:

$$PCU = PCI \times \frac{(100-U)}{100} - 6 \times U \quad (8)$$

Onde:

PCU = poder calorífico útil (kcal kg⁻¹)

U = teor de umidade da madeira (% - kg/kg base úmida)

4.3.Densidade Energética

A densidade energética (DE) é determinada pelo poder calorífico e pela densidade do material, conforme Equação 9 (JESUS *et al.*, 2017). Segundo Quirino (2003), ela expressa a quantidade de energia do material, por unidade de volume. De acordo com Moreira, Lima e Goulart (2012), ela expressa o potencial energético do combustível, podendo ser expressa, no caso da lenha, pelo PCU e pela densidade básica.

$$DE = Poder\ Calorífico \times Densidade \text{ (kcal m}^{-3}\text{)} \quad (9)$$

A densidade básica ou aparente é utilizada para madeira, lenha e briquete. A densidade básica é calculada por meio da massa seca da madeira ou da lenha, dividido pelo volume do material totalmente saturado (MOREIRA; LIMA; GOULART, 2012). Segundo Trugilho *et al.* (1990), a densidade básica é um indicador da qualidade da madeira e auxilia na análise

econômica da floresta, para definir o destino final da madeira. Ainda, conforme o autor, é possível obter, por meio da densidade básica, uma estimativa do peso da madeira por metro cúbico sólido, ou ainda, por metro cúbico empilhado, o que possibilita calcular a produtividade por área da floresta (matéria seca). Em relação à densidade aparente, diferentemente da densidade básica, é levado em consideração o volume total da amostra, o que inclui a porosidade interna do material (BRITO *et al.*, 1982).

No caso da biomassa que se encontra a granel no mercado, como no caso da serragem, da casca, do carvão, do cavaco (entre outros) é utilizada a densidade a granel para fazer o cálculo da DE. Para calcular a densidade a granel é necessário pesar o material que está armazenado em um local com volume de 1 m³, obtendo-se a relação entre a massa e o volume. Neste caso, diferentemente da densidade aparente e da densidade básica, a densidade a granel considera ainda os espaços vazios contidos entre os materiais (BRITO *et al.*, 1982).

5. CONCLUSÃO

A partir desta revisão, constatou-se que as energias renováveis contribuem para a geração de emprego, para a diminuição de GEE e diminuição de custos no setor elétrico. Além disso, existe uma tendência de aumento da capacidade instalada no setor elétrico para a geração de bioenergia oriunda de biomassa sólida.

O Brasil possui uma diversidade de recursos para serem utilizados como fonte de biomassa para geração de energia. Pode-se destacar o grande número de áreas com plantio de eucalipto, que é a principal cultura destinada a energia. Entre as vantagens que o Brasil possui no plantio de eucalipto são a alta produtividade, disponibilidade de terras e mercado. Além disso, os resíduos agrícolas e florestais gerados nas atividades industriais e de colheita podem ser aproveitados, como a casca de diversas culturas, o cavaco, o bagaço e a serragem. A fabricação e utilização de briquetes e pellets a partir destes resíduos ainda possibilita otimizá-los para a geração de energia.

6. REFERÊNCIAS

ABAIDE, E. R.; TRES, M. V.; ZABOTI, G. L.; MAZUTTI, M. A. Reasons for processing of rice coproducts: Reality and expectations. **Biomass and Bioenergy**, v. 10, p. 240-256, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. Anuário Estatístico 2012. Disponível em: <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF12/ABRAF12-BR.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2019.

BARRICHELO, L. E. G.; MÜLLER, P. H. **Indicações para escolha de espécies de Eucalyptus**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, 2005. Disponível em: <<https://www.ipef.br/identificacao/eucalyptus/indicacoes.asp>>. Acesso em: 20 mai. 2019.

BRAUNBECK, O. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; GARCIA, M. O. Biomassa no Brasil e no Mundo In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008, p. 74-89.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; COUTO, H. T. Z. do. Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal a partir de sua densidade aparente. Circular Técnico. Piracicaba: **IPEF**, n. 150, 1982.

BRUDER, E.; REZENDE, M. A. de; COSTA, V. E. Densidade de *Eucalyptus* sp. próxima a umidade de equilíbrio estimado pelo método de imersão. **Revista Energia na Agricultura**, v. 31, n. 1, p. 38-47, 2016.

CARNEIRO, A. de C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C. dos; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de eucalipto. **Revista da madeira**, Curitiba, n. 137, 2013.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T. do; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de Clones de *Eucalyptus* spp. **Revista Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 533, 2013.

Classificação Nacional de Atividades Econômicas - CNAE. **Banco de Dados Agregados de Extração de madeira em florestas plantadas**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2016. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/classificacoes/cnae2.0/default.shtm>>.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; AYARZA, J. A. C. Biomassa no Brasil e no Mundo In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008, p. 15-28.

COSTA, D. R. da; FILHO, A. F. de L.; FILHO, D. O.; COSTA, J. M.; TEIXEIRA, C. A. Consumo específico de energia no processamento de madeira em cavacos de um picador (estudo de caso). **REVENG: Revista de Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 18, n. 2, p. 171-177, 2010.

CRAIG, K. R.; BAIN, R. L.; OVEREND, R. P.; Biomass-fired power generation. **Fuel Processing Technology**, v. 54, p. 1-16, 1998.

DOSSA, D; SILVA, H. D; BELLOTE, A. F. J; RODIGHER, H. R. Produção e Rentabilidade do Eucaliptos em Empresas Florestais. Comunicado Técnico. Colombo: **Embrapa Florestas**, v. 83, 4 p., 2002.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balço Energético Nacional 2019**: Ano base 2018. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007.

FARRA, Fernanda Cristina Pierre Dal. **Análise econômico-energética de utilização de resíduo industrial florestal para geração de energia térmica: um estudo de caso**. 2004. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90587/dalfarra_fcp_me_botfca.pdf?sequence=1>. Acesso em: 3 fev. 2019.

FELFLI, F. F.; MESA, J. M.; ROCHA, J. D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C. A.; PIPPO, W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 236-242, 2011.

FERNANDEZ, B. O.; GONÇALVES, B. F.; PEREIRA, A. C. C.; HASNTED, A. L. S.; PÁDUA, F. A.; DA RÓZ, A. L.; YAMAJI, F. M. Características Mecânicas e Energéticas de Briquetes Produzidos a partir de Diferentes Tipos de Biomassa. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2016.

FISHER, M.; KELLEY, A. M.; WARD, E. J.; BOONE, J. D.; ASHLEY, E. M.; DOMEK, C.; WILLIAMSON, J. C; KING, J. S. A Critical analysis of species selection and high vs. low-input silviculture on establishment success and early productivity of model short-rotation wood-energy cropping systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 98, p. 214-227, 2017.

FREITAS, S. M. de; CASTANHO FILHO, E. P. Brasil Expande a Cogeração de Energia a Partir de Resíduos Agropecuários. **Revista Análises e Indicadores do Agronegócio**, v. 8, n. 6, 2013.

GAETE-MORALES, C.; GALLEGO-SCHMID, A.; STAMFORD, L.; AZAPAGIC, A. A novel framework for development and optimisation of future electricity scenarios with high penetration of renewables and storage. **Applied Energy**, v. 250, p. 1657-1672, 2019.

GOLDEMBERG, J. Energia e sustentabilidade. **Revista de Cultura e Extensão USP**, v. 14, p. 33-43, 2015.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Fontes de Energia. In: GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008, p. 67-82.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2004.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório 2017**. Disponível em: <https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2019.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. Disponível em:
<<https://www.irena.org/>>. Acesso em: 14 set. 2019.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Renewable energy and jobs** – Annual Review 2017.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 47, n. 1, p. 11-16, 2017.

JUVENAL, T.L.; MATTOS, R.L.G. O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento. **BNDES Setorial**, n.16, p.3-30, 2002.

LHAMBY, A. R; SENNA, A. J. T; CANES, S. E. A Prática da Gestão Ambiental Agroindustrial: Um Estudo de Caso em uma Agroindústria que Produz Energia Elétrica a Partir da Casca do Arroz. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 1., 2010, Bauru. **Anais...** Bauru, 2010. Disponível em:
<<http://www.ibeas.org.br/Congresso/Trabalhos2010/XI-001.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2019.
Acesso em: 20 de maio de 2019.

LIMA, E. A. Alternativa para estimar o preço da madeira para energia. Comunicado Técnico. Colombo: **Embrapa Florestas**, v. 260, 4 p., 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Resenha Energética Brasileira** – exercício 2018. Brasília, 2019.

MORAIS, M. R; SEYE, O; FREITAS, K. T. de; RODRIGUES, M.; SANTOS, E. C. S. dos; SOUZA, R. C. R. Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais...** Campinas, 2006. Disponível em:
<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200019&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 21 jun. 2019.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; LIMA, E. A. de; REIS GOULART, I. C. G. dos. Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha. Comunicado Técnico. Colombo: **Embrapa Florestas**, v. 293, 5 p., 2012.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO – OIT. Greening with jobs: World employment social outlook 2018. Disponível em: <https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_628654.pdf> Acesso em: 27 de dezembro de 2019.

OWUSU, P. A.; ASUMADU-SARKODIE, S. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. **Cogent Engineering**, v. 3, 2016.

PENTEADO, J.; PICHELLI, K.; SOARES, S. **Perguntas e Respostas: Eucalipto**. Embrapa Florestas, 2018.

QUIRINO, W. F. Briquetagem de resíduos ligno-celulósicos. Ed. IBAMA - **Circular Técnica do LPF**, v. 1, n. 2, 1991.

_____. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília, Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA, 2003.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. do; ANDRADE, A. P. A. de; ABREU, V. L. S.; SANTOS AZEVEDO, A. C. dos. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n.89, p.100-106, 2005.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M. Caracterização energética da biomassa florestal. In: **Combustão e Gasificação de biomassa sólida – Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, p. 52-63.

REZENDE, M. B; LEAL, L. de S; NEVEZ, L. A. Viabilidade da substituição da serragem por briquetes na queima de tijolos em empresa de Ulianópolis-Pa. In: Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 4., 2014, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves, 2014.

RODRIGUES, J. C. M. M. **Pevs 2017: produção da silvicultura e da extração vegetal chega a R\$ 19,1 bilhões e cresce 3,4% em relação a 2016.** Agência de Notícias IBGE, 2018. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/22620-pevs-2017-producao-da-silvicultura-e-da-extracao-vegetal-chega-a-r-19-1-bilhoes-e-cresce-3-4-em-relacao-a-2016>>. Acesso em: 10 mai. 2019.

RUAN, R.; ZHANG, Y.; CHEN, P.; LIU, S.; FAN, L.; ZHOU, N.; DING, K.; PENG, P.; ADDY, M.; CHENG, Y.; ANDERSON, E.; WANG, Y.; LIU, Y.; LEI, H.; LI, B. Chapter 1 - Biofuels: Introduction. *In*: Pandey, A.; LARROCHE, C.; DUSSAPI, C.; GNANSOUNOU, E.; KHANAL, S. K.; RICKE, S. (org.). *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*. 2 ed. **Biomass, Biofuels, Biochemicals**, p. 3-43, 2019.

SEESP. Secretaria de Energia do Estado de São Paulo. Plano Paulista de Energia / São Paulo (Estado). Secretaria de Energia, São Paulo, 2012.

SILVA, D. A. da; **A interdependência linear do poder calorífico superior em função da análise imediata em materiais lignocelulósicos.** 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2019. Disponível em:< <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11223>>. Acesso em: 15 de julho de 2019.

SILVA IGNACIO, L. H. da; ALMEIDA SANTOS, P. E. de; DUARTE, C. A. R. An experimental assessment of *Eucalyptus urosemte* energy potential for biomass production in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 361-369, 2019.

SOLANO, D.; VINYES, P.; ARRANZ, P. **Biomass briquetting process, a guideline report.** United Nations Development Programme, 2016. Disponível em: <http://www.cedro-undp.org/content/uploads/publication/161124125247966~Briquettingreportforweb.pdf>. Acesso em: 5 de maio de 2019.

TEIXEIRA, C. M. Caracterização Química de Resíduos de *Eucalyptus* sp. de Floresta de Curta Rotação para a Produção de Bioenergia. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 5, 1693-1701, 2016.

TEIXEIRA, S. **Florestas Brasileiras estão menos competitivas**. AGRIANUAL 2014: Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, p.287-290, 2014.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A.; FRAZÃO, F. J. L.; MATOS, J. L. M. Comparação de métodos de determinação da densidade básica em madeira. **Acta Amazônica**, v. 20, p. 307-319, 1990.

VICHI, F. M.; MELLO, L. F. de. A Questão Energética no Brasil. In: HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2004, p. 479-481.

VILLAS BÔAS, B. **Valor da produção florestal brasileira ultrapassa R\$ 19 bi. Valor Econômico**, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <
<https://www.valor.com.br/agro/5867337/valor-da-producao-florestal-brasileira-ultrapassa-r-19-bi>>. Acesso em: 5 abr. 2019.

CAPÍTULO 2 – ESTUDO DE MERCADO SOBRE O USO DE BIOMASSA PARA QUEIMA NO ESTADO DE SÃO PAULO

RESUMO

Nos últimos anos vem crescendo a demanda por biomassa pelas empresas. Atualmente, dificilmente os resíduos industriais que possuem valor energético e vantagens de logística são descartados, pois ganharam valorização no mercado. O objetivo deste trabalho foi analisar a oferta de biomassa no Estado de São Paulo a fim de definir quais materiais possuem mais fornecedores e quais possuem propriedades consideradas favoráveis para queima. Para isso, foram levantadas informações sobre a localização dos fornecedores e foi feita a caracterização energética das biomassas. Os resultados obtidos mostraram que existem mais fornecedores de lenha, cavaco e floresta de eucalipto no Estado de São Paulo. Em relação à oferta, os materiais que possuem maior produção no estado são o bagaço de cana, a floresta e a lenha de eucalipto e a floresta de pinus. Em relação à demanda das biomassas analisadas, foi observado que são mais utilizadas para produção de energia nas indústrias de papel e celulose, siderurgia, beneficiamento de arroz, cerâmica, moveleira, alimentos e bebidas. As biomassas que apresentaram propriedades energéticas favoráveis para queima foram: o carvão vegetal, a madeira, o briquete, o cavaco e a lenha de eucalipto e o cavaco de pinus.

Palavras-chave: Bioenergia; Fornecedores; Resíduos; Floresta.

MARKET STUDY ON THE USE OF BIOMASS FOR BURNING IN THE STATE OF SÃO PAULO

ABSTRACT

In recent years the demand for biomass by companies has been growing. Currently, industrial waste that has energy value and logistics advantages is discarded, as it has gained value in the market. The objective of this work was to analyze the biomass supply in the State of São Paulo in order to define which materials have more suppliers in the region and which have properties considered favorable for burning. For this, information on the location of suppliers was collected and the energetic characterization of the materials with the highest supply was made. The results showed that there are more suppliers of firewood, chips and eucalyptus forest in the state of São Paulo. Regarding the supply, the materials that have the highest production in the state are sugarcane bagasse, eucalyptus forest and firewood and pine forest. Regarding the

demand of the analyzed biomass, it was observed that they are most commonly used for energy production in the industries of: in the pulp and paper, steel, rice processing, ceramics, furniture, food and beverages. The biomasses that presented favorable energetic properties for burning were: charcoal, eucalyptus wood, firewood, briquette and chip and pine chip.

Keywords: Bioenergy; Suppliers; Residues; Forest.

1 - INTRODUÇÃO

A biomassa sólida é utilizada para produção de biocombustíveis, sendo composta por resíduos agrícolas e florestais, por culturas energéticas e por resíduos sólidos. São exemplos as oleaginosas, biomassa lignocelulósica e resíduos sólidos urbanos. Entre as principais biomassas lignocelulósicas de origem agrícola e florestal, podem-se incluir: a palha de arroz, a casca de arroz, palha de trigo, palha de sorgo, palha de milho, bagaço de cana-de-açúcar, aparas, galhos e serragem de madeira, capim, etc. Além disso, este tipo de biomassa é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina (RUAN *et al.*, 2019).

O Brasil é reconhecido mundialmente por ser um dos principais produtores de papel, celulose e painéis de madeira, que contribui significativamente para a balança comercial. A madeira produzida pela indústria de árvores atende os setores de papel e celulose, painéis de madeira, pisos laminados, carvão vegetal, biomassa e de árvores plantadas (IBÁ, 2017).

Segundo o Balanço Energético Nacional 2019 – BEN 2019 (EPE, 2018), as energias renováveis representam 45,3% da oferta interna de energia, sendo o etanol e o bagaço de cana responsáveis por 17,4%, a lenha e o carvão vegetal por 8,4%, lixo por 3,3% e biomassas de outras origens (casca de arroz, capim elefante e óleos vegetais) por 0,47% deste percentual.

O Estado de São Paulo é um dos maiores produtores florestais, principalmente do gênero eucalipto. Além disso, esta região tem grande representatividade na produção agrícola e industrial, nos setores siderúrgico, de papel e celulose, moveleiro, alimentício, entre outros, que geram e demandam biomassa para o aproveitamento energético.

Dessa forma, é importante analisar a oferta de biomassa no Estado de São Paulo, assim como a demanda pelos diversos setores da economia e quais materiais são favoráveis para queima. Neste sentido, o trabalho objetivou analisar a oferta de biomassa para venda no Estado de São Paulo, levando em consideração suas propriedades energéticas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta sessão são definidas a região de estudo, onde foram coletados os dados de oferta e demanda e os parâmetros utilizados para analisar a capacidade energética de alguns tipos de biomassa.

2.1.Região de Estudo

O Estado de São Paulo possui uma área territorial de aproximadamente 248 mil km², sendo a área destinada à agricultura correspondente a cerca de 800 mil hectares (IBGE, 2017). Em relação a silvicultura, são mais de 1 milhão de hectares destinados ao plantio no estado, sendo o eucalipto correspondente a 84% de hectares plantados e o pinus com 16% (CNAE, 2016).

2.2.Coleta de Dados

A partir de um levantamento da quantidade de fornecedores de cada tipo de material no Estado de São Paulo, seja de origem agrícola ou florestal, foi determinado quais biomassas seriam utilizadas neste trabalho. Os dados referentes à oferta foram obtidos entre os anos de 2017 e 2019 por meio de um levantamento da quantidade de fornecedores no *website* de compra e venda MF Rural, que faz anúncios classificados do agronegócio e intermediação de negócios rurais.

2.3. Plotagem de pontos e elaboração dos mapas

Para elaboração do mapa das mesorregiões do Estado de São Paulo foi utilizado o ArcGIS Pro com a base cartográfica do IBGE (2018).

A partir dos dados obtidos sobre a localização das cidades de cada fornecedor, foi feita a plotagem dos pontos utilizando o *website* BatchGeo LLC. Foi utilizado o *website* Gmapas para obter o polígono do Estado de São Paulo que foi utilizado no *Google Earth Pro*. Por fim, os pontos obtidos no BatchGeo LLC foram exportados para o *Google Earth Pro* para elaborar os mapas com imagens de satélite e com as descrições dos nomes das cidades.

2.4. Análise de oferta

Primeiramente, foi feito um mapeamento por tipo de material ofertado no estado de São Paulo para definir quais possuem mais vendedores na região. Foram encontrados os seguintes materiais: briquete de carvão, briquete de eucalipto, casca de arroz, casca de pinus, casca de eucalipto, cavaco de eucalipto, cavaco de pinus, cavaco de madeira reciclada, cavaco de laranjeira, lenha de eucalipto, lenha de pinus, lenha de árvore nativa, serragem de eucalipto, serragem de pinus, serragem de madeira mista, carvão vegetal, floresta de eucalipto e bagaço de cana. Como critério de análise, foram escolhidas biomassas com diferentes características físicas (granulometria, umidade e densidade) e de diferentes fontes, a fim de compreender qual tipo de material possui mais vendedores. Os materiais selecionados para análise energética foram:

- Briquete de eucalipto;
- Cavaco de eucalipto;
- Cavaco de pinus;
- Serragem de eucalipto;
- Lenha de eucalipto;
- Floresta de eucalipto;
- Casca de arroz;
- Carvão vegetal;
- Bagaço de cana.

2.5. Análise de demanda

Em decorrência de limitações em relação à informação da quantidade demandada pelos fornecedores, os dados sobre a demanda por biomassa foram obtidos nas seguintes bases de dados: Balanço Energético Nacional (BEN), Balanço Energético do Estado de São Paulo (BEESP), União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), relatórios setoriais da Conferência Nacional da Indústria (CNI) e artigos científicos.

2.6. Caracterização energética

Os dados referentes ao poder calorífico, densidade e à análise imediata foram obtidos por meio de um levantamento bibliográfico. Todos os resultados obtidos para a análise imediata, densidade e o poder calorífico superior foram obtidos a partir da média das amostras.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os itens desta sessão se referem às biomassas analisadas no Estado de São Paulo. A subseção 3.1 apresenta os dados quantitativos em relação à oferta, de modo a expor quais biomassas possuem maior produção, mais fornecedores e suas localizações. A subseção 3.2 expõe quais são os setores que possuem maior demanda e, por fim, a subseção 3.3 faz uma discussão sobre as propriedades energéticas e as vantagens e desvantagens no uso de cada biomassa.

3.1 - Análise de oferta

A produção nacional de eucalipto da silvicultura atingiu o valor de 5,7 milhões de hectares em 2016. O Sudeste foi responsável por 41% deste valor e o Estado de São Paulo por 31% nesta região. Em relação ao plantio de pinus da silvicultura, foram produzidos no Brasil, neste mesmo ano, mais de 1,6 milhões de hectares, sendo o Sudeste responsável por 11% e o Estado de São Paulo por 82% nesta região. Outras espécies da silvicultura representaram 2% do plantio no Sudeste (IBGE, 2016; IBÁ, 2017).

A partir da Tabela 1, verifica-se que existem mais disponibilidade de lenha de eucalipto, plantio de eucalipto e bagaço de cana no Estado de São Paulo.

Tabela 1 – Representatividade de algumas fontes de biomassa no Estado de São Paulo em relação ao Brasil (%) – 2016.

	São Paulo
Bagaço de cana*	52,78
Área plantada de eucalipto	17,00
Lenha (eucalipto)	13,48
Área plantada de pinus	8,00

(continua)

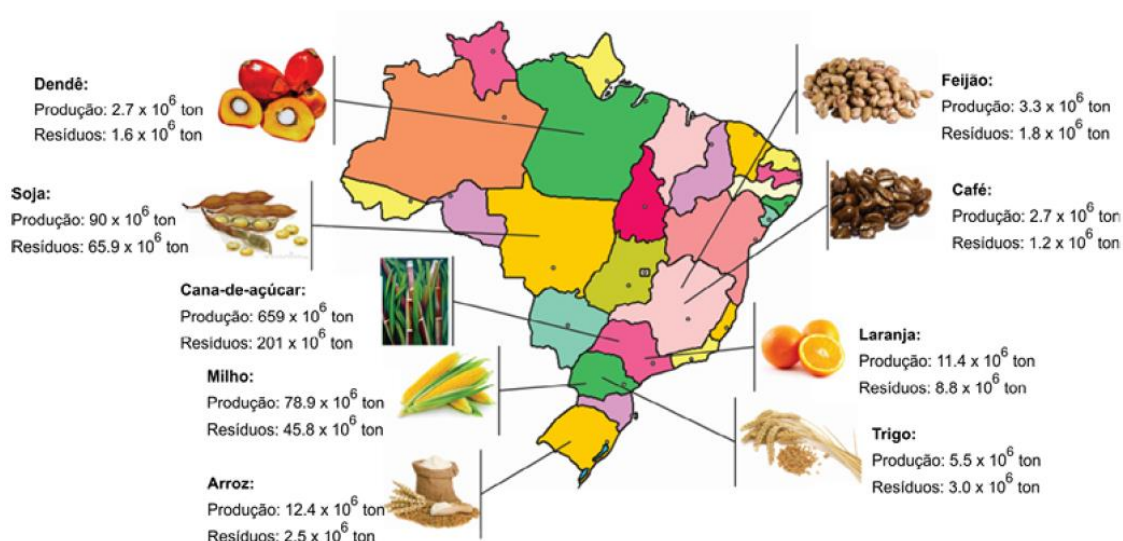
Carvão vegetal (eucalipto)	1,61	(continuação)
Lenha (pinus)	1,07	
Casca de arroz*	0,38	
Carvão vegetal (pinus)	0,01	

*Ano base 2018.

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do IBGE (2016; 2018) e IBÁ (2017).

Conforme a Figura 1, pode-se perceber que no Estado de São Paulo são gerados em maior proporção resíduos da produção de laranja e de cana-de-açúcar.

Figura 1 – Produção e resíduos gerados na agroindústria, Brasil – 2017.



Fonte: Bellote (2018).

Em relação à produção de cavaco, ele pode ser obtido a partir de estilhas geradas em serrarias, de cortes de árvores ou a partir da picagem direta da madeira ou lenha (LIPPEL, ND). O briquete de eucalipto, cotado nesta pesquisa, em sua maioria foi obtido a partir da serragem de eucalipto. Sousa Dias *et al.* (2012), ao analisar 14 empresas produtoras de briquete no Brasil, verificaram que elas produzem 7.430 toneladas por mês, sendo o Estado de São Paulo responsável por mais de 40% dessa produção.

Conforme Felfli *et al.* (2011), no Brasil os resíduos mais promissores para briquetagem no curto prazo são a casca de arroz e de café e resíduos de madeira. Todavia, apenas 12% destes resíduos são briquetados no Estado de São Paulo. A maioria das empresas neste estado são pequenas ou são microempresas de serraria e móveis, o que inviabiliza a briquetagem, já que a tecnologia mais utilizada no Brasil é o pistão mecânico, que demanda um volume de resíduos

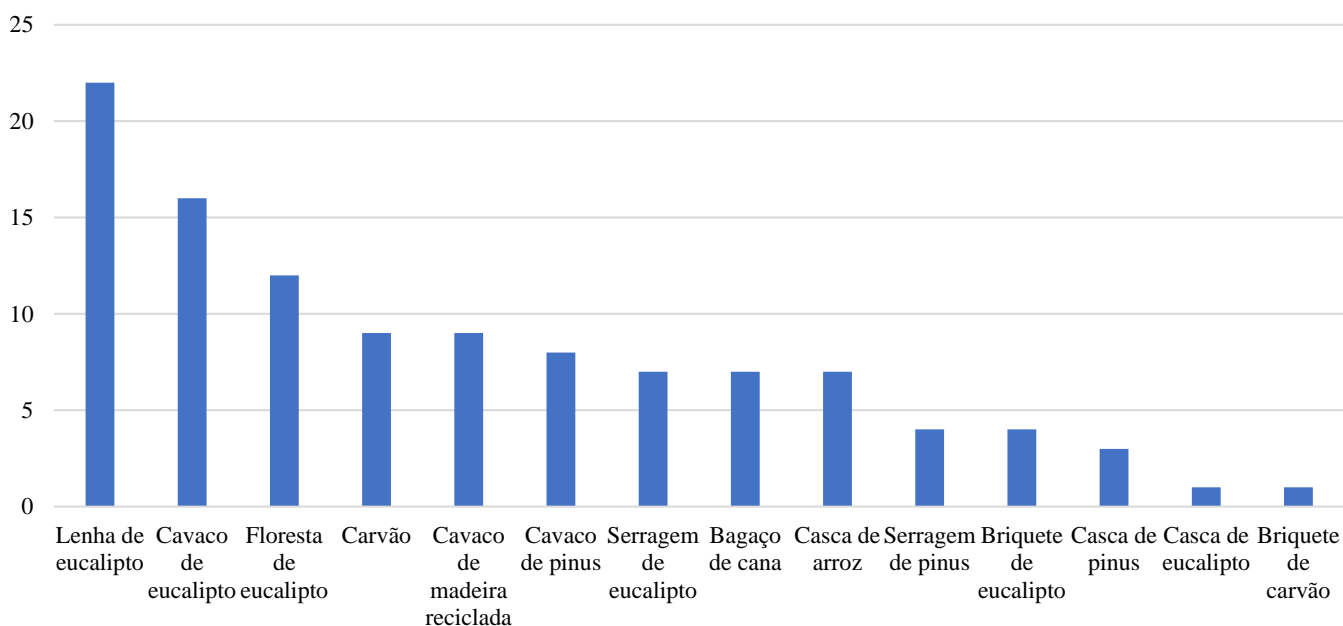
muito superior ao produzido. Além disso, estas empresas se encontram dispersas, o que inviabiliza realizar o transporte de seus resíduos para a indústria que produz os briquetes.

Em relação à produção da serragem, ela é o resíduo gerado na operação de serras e de máquinas de desbaste de madeira, podendo ser mais grossa ou mais fina (LIPPEL, ND). Na indústria, 66% dos resíduos gerados (como o cavaco, a serragem e o licor negro) são destinados para a geração de energia e 25,5% são reutilizados como matéria-prima (IBÁ, 2017).

Conforme Castro Pereira Brainer (2018), no Estado de São Paulo existem 3.344 estabelecimentos que fabricam móveis utilizando madeira. De acordo com Louzada Junior *et al.* (2017), na indústria de serraria e laminação, são gerados 50,71% de resíduos decorrentes de suas atividades, havendo um aproveitamento da matéria-prima utilizada de apenas 49,29%.

Analisado a Figura 2, percebe-se que a lenha, a floresta e o cavaco de eucalipto possuem mais fornecedores na região, enquanto que o briquete, a casca de eucalipto e de pinus e a serragem de pinus possuem poucos fornecedores. Em relação ao bagaço de cana, apesar do Estado de São Paulo ser o maior ofertante, nota-se na Figura 2 que possuem poucos fornecedores deste material. Isso ocorre, pois o maior consumidor de bagaço é o seu próprio produtor, já que as usinas produtoras de açúcar utilizam o bagaço na geração de energia elétrica e térmica para utilizar nas moendas, nas caldeiras, no tratamento do caldo e na centrifugação.

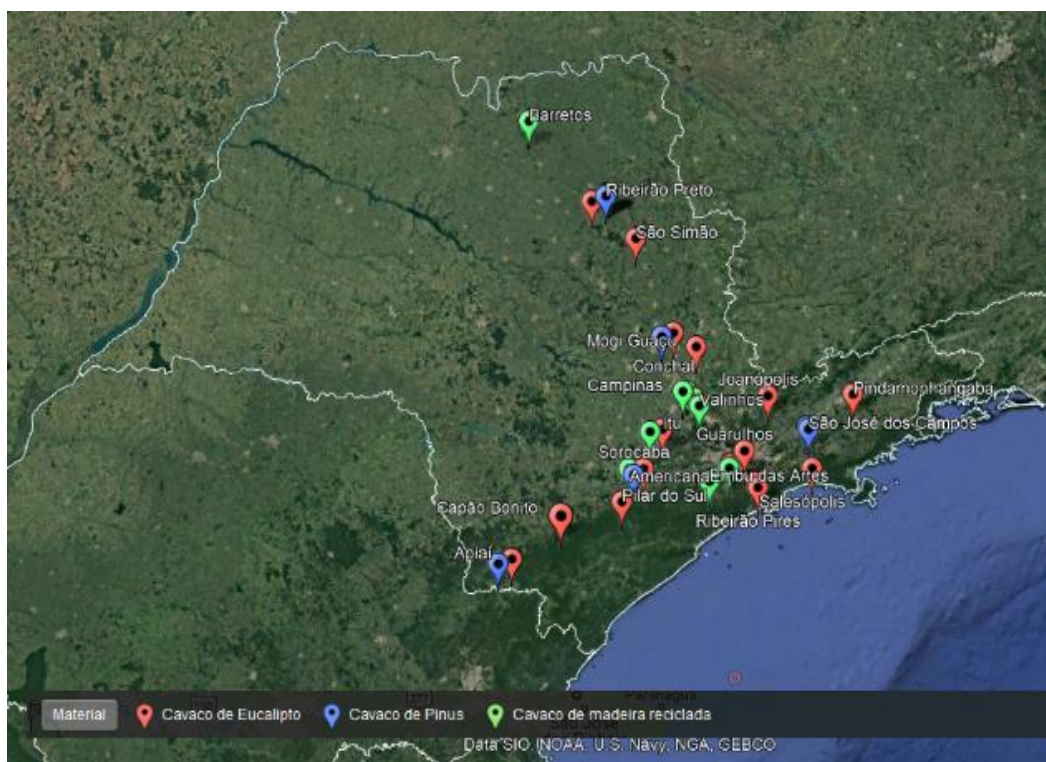
Figura 2 - Número de fornecedores de biomassa no Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do MF Rural.

Percebe-se na Figura 3 que existem mais vendedores de cavaco de eucalipto e ele se concentra nas mesmas regiões que o cavaco de pinus e do cavaco de madeira reciclada. O cavaco de pinus se concentra nas mesorregiões de Ribeirão Preto, do Vale do Paraíba Paulista, de Campinas e de Itapetininga, enquanto que o cavaco de madeira reciclada se concentra na mesorregião de Campinas.

Figura 3 – Mapa dos fornecedores de cavaco de eucalipto, de pinus e de madeira reciclada no Estado de São Paulo.



Fonte: Elaboração própria a partir do Google Earth Pro e dados do MF Rural.

A Figura 4 mostra todas as mesorregiões do Estado de São Paulo, o que permite visualizar de maneira mais clara a distribuição das biomassas no estado, conforme o Quadro 1.

Figura 4 – Mapa das mesorregiões do Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria a partir da base cartográfica do IBGE (2018) e ArcGIS Pro.

O Quadro 1 expõe, para todas as biomassas analisadas, a localização por mesorregiões. Percebe-se que a floresta de eucalipto, o cavaco e a serragem de eucalipto e o cavaco e a serragem de pinus possuem mais regiões de oferta no estado.

Quadro 1 – Fornecimento de biomassa por mesorregião do Estado de São Paulo.

Biomassa	Mesorregião
Floresta de eucalipto	Vale do Paraíba Paulista, Bauru, Itapetininga
Lenha de eucalipto	Metropolitana de São Paulo, Bauru
Cavaco de pinus e de eucalipto	Ribeirão Preto, Vale do Paraíba Paulista, Campinas, Itapetininga
Cavaco de madeira reciclada	Campinas
Serragem de pinus e de eucalipto	Ribeirão Preto, Itapetininga, Campinas, Metropolitana Paulista
Casca de arroz e de pinus	Piracicaba, Campinas
Bagaço de cana	Piracicaba
Carvão vegetal (eucalipto)	Bauru
Briquete de eucalipto	Vale do Paraíba Paulista, Itapetininga

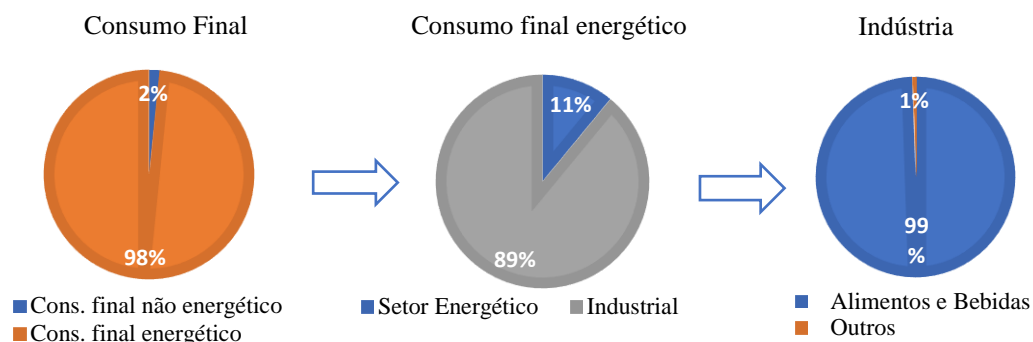
Fonte: Elaboração própria a partir de dados do MF Rural.

3.2 Análise de demanda

Nas figuras 5, 6 e 8 são apresentados os principais setores demandantes de bagaço de cana, de lenha e de carvão vegetal no Estado de São Paulo. Na Figura 5, percebe-se que a maior demanda por bagaço de cana é para uso industrial, principalmente pelo setor de alimentos e bebidas. Deste modo, além de grande parte das usinas serem autossuficientes na produção de

energia e vapor, ainda conseguem, em alguns casos, vender seus excedentes de energia para o Sistema Interligado Nacional – SIN (EPE, 2018).

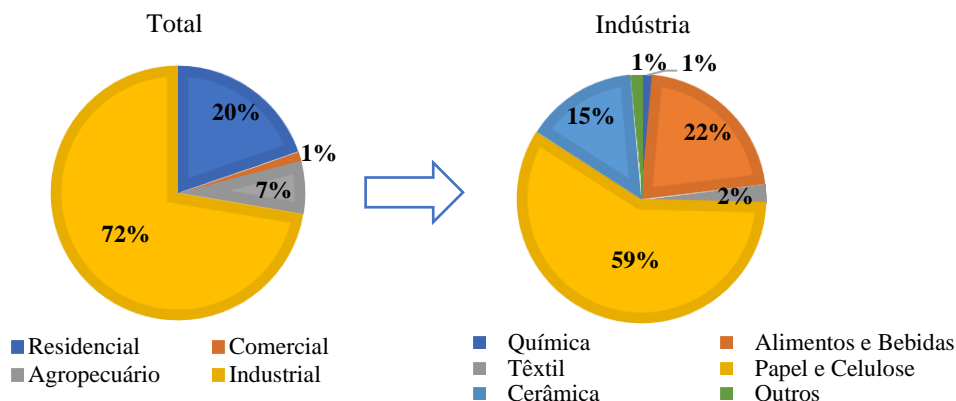
Figura 5 – Participação setorial do consumo final de bagaço de cana (%) – São Paulo, 2016.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de São Paulo (2017).

Na Figura 6 sobre o uso da lenha, a indústria corresponde a 72% do consumo total, sendo o setor industrial de papel e celulose o maior demandante, com 59% do consumo total da indústria. Conforme Berni (2010a), a lenha é o segundo combustível mais utilizado no Brasil no setor de papel e celulose, sendo o primeiro mais utilizado o licor negro. Segundo Rocha (2010), excluindo o bagaço, a lenha é a segunda matéria-prima mais utilizada para fins energéticos no setor de alimentos e bebidas. No setor de cerâmica, a lenha é a biomassa mais utilizada para aquecimento direto em fornos (BERNI, 2010b). Além da indústria, conforme a Figura 6, a segunda maior demanda por lenha é para uso doméstico.

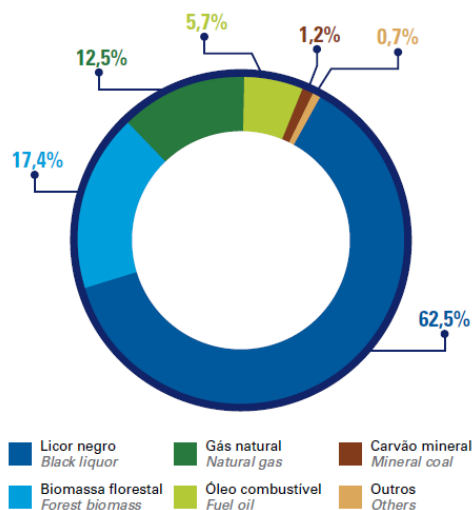
Figura 6 – Participação setorial do consumo final de lenha (%) – São Paulo, 2016.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de São Paulo (2017).

De acordo com o IBÁ (2017), as indústrias de árvores dependem, praticamente, apenas dos subprodutos de seus processos para geração de energia térmica e elétrica. Nota-se na Figura 7 que a maior parte da energia utilizada pelo setor vem do licor negro e da biomassa florestal.

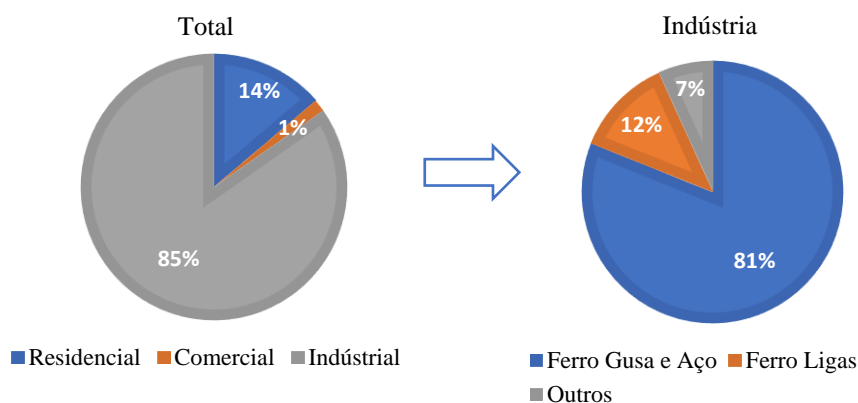
Figura 7 – Fontes de energia utilizadas pela indústria de árvores, Brasil – 2016.



Fonte: IBÁ (2017).

Em relação ao consumo de carvão vegetal, conforme a Figura 8, a indústria tem uma participação de 85%, sendo o maior demandante a indústria siderúrgica para produção de ferro gusa e aço, com 81%. Conforme a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2019), o Brasil é o maior demandante mundial de carvão vegetal para produção de aço, o que traz vantagens econômicas e ambientais ao nosso país quando comparado a outros países que dependem do carvão mineral para produção de aço. Além da indústria, o consumo residencial tem uma participação de 14%.

Figura 8 – Participação setorial do consumo final de carvão vegetal (%) – São Paulo, 2016.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de São Paulo (2017).

De acordo com Castanho Filho, Campos e Angelo (2015), a madeira de eucalipto produzida no Estado de São Paulo é consumida principalmente pela indústria de papel e celulose e pelo mercado de painéis e chapas de madeira, com uma representação da demanda em 60%. Ainda, conforme os autores, cerca de 30% a 35% da madeira é destinada para fins energéticos nas indústrias de construção civil, de cerâmica e de alimento e, em menor escala, para uso em pequenas empresas (padarias, pizzarias, docerias, etc.).

Em relação à demanda de briquete, ele é consumido principalmente para uso doméstico e comercial (como em padarias, pizzarias e restaurantes) e também fábricas com forno a lenha (como a indústria de cerâmica vermelha) (FELFLI *et al.*, 2011; SOUSA DIAS *et al.*, 2012). Nas grandes cidades, o briquete ganha competitividade com o uso da lenha e carvão vegetal. Nas indústrias, o briquete também vem sendo utilizado principalmente no setor alimentício em que existe uma demanda maior por vapor, como em frigoríficos, laticínios e alimentos em geral (SOUSA DIAS *et al.*, 2012).

Segundo Andrade Lopes, Brito e Moura (2016), um dos maiores demandantes de cavaco de madeira é no setor de cerâmica de porte médio no Estado de São Paulo, na qual o cavaco corresponde a 80% da biomassa sólida utilizada para geração de energia. Deve-se lembrar que o cavaco de eucalipto é contabilizado no uso energético da madeira de eucalipto, que, como citado anteriormente, corresponde de 30% a 35% da produção de eucalipto.

A casca de arroz possui baixo valor no mercado, em decorrência da sua natureza abrasiva. Assim, ela costuma ser utilizada para secar os grãos na própria produção do arroz e gerar eletricidade, em decorrência do seu poder calorífico, granulometria, baixo teor de umidade e elevado teor de voláteis e também para evitar o gasto com transporte na aquisição de outros tipos de biomassa. Além disso, após a queima da casca, as cinzas resultantes podem ser destinadas na fabricação de vidro, argamassa, para tratamento de efluentes, etc. (SCHIMITT *et al.*, 2016; ALVES *et al.*, 2018; FERNANDEZ *et al.*, 2016).

3.3. Análise energética dos materiais

Os resultados obtidos para a análise imediata estão expressos na Tabela 2, sendo os tipos de materiais expressos por T1 (briquete de eucalipto), T2 (cavaco de eucalipto), T3 (cavaco de pinus), T4 (serragem de eucalipto), T5 (lenha de eucalipto), T6 (madeira de eucalipto), T7 (casca de arroz), T8 (carvão) e T9 (bagaço de cana-de-açúcar).

Tabela 2 - Análise imediata dos materiais, em %.

Propriedades	T1 ¹	T2 ²	T3 ³	T4 ⁴	T5 ⁵	T6 ⁶	T7 ⁷	T8 ⁸	T9 ⁹
TCF	18,17	17,27	17,20	17,90	21,42	15,61	11,90	65,92	15,40
TMV	81,53	83,24	82,62	80,54	77,04	83,81	64,26	31,65	69,00
TC	0,30	0,57	2,00	1,57	1,54	0,58	23,84	2,43	15,40

Onde: TC = Teor de Cinzas; TMV = Teor de Matérias Voláteis; TCF = Teor de Carbono Fixo.

Fonte: ¹ QUIRINO *et al.* (2012); ² BORGES (2015); ³ CIESLINSKI (2014); ⁴ SILVA *et al.* (2015); ⁵ SILVA IGNACIO; ALMEIDA SANTOS; DUARTE (2019); ⁶ BRUN *et al.* (2017); ⁷ MORAIS *et al.* (2006); ⁸ BARROS (2014); ⁹ PONTE *et al.* (2019).

Nota-se na Tabela 2 que a serragem e o cavaco de eucalipto e de pinus possuem Teor de Carbono Fixo (TCF) semelhantes, sendo o carvão, a lenha e o briquete os materiais que contém um teor mais elevado. Conforme Lin *et al.* (2016), quanto maior o TCF, mais duradouro será o processo de combustão do material. Neste contexto, Figueiredo (2018) ao analisar o alto-forno de uma indústria siderúrgica, chegou à conclusão que o aumento do TCF melhora o rendimento da combustão.

Diferentemente do TCF, o Teor de Cinzas (TC) interfere de maneira negativa no funcionamento e faz o desgaste das paredes do alto-forno. Percebe-se que o que contribuiu para o bagaço de cana e a casca de arroz obterem um valor inferior aos demais materiais em relação ao TCF foi o alto TC.

O TMV elevado favorece a ignição, assim como a estabilidade da chama e a velocidade de combustão (SOUZA *et al.*, 2016). Todavia, conforme Chaves *et al.* (2013) a aceleração da combustão do material pode não ser vantajoso, já que torna o processo de queima menos rentável.

Em relação ao elevado TC presente na casca de arroz e no bagaço de cana, Fernandes *et al.* (2016) relatam que as cinzas interferem de maneira negativa na combustão dos materiais, já que não fazem parte do processo de queima, o que diminui o PCS.

Ademais, as cinzas atrapalham o processo de queima dos combustíveis sólidos, pois danifica e diminui a vida útil da caldeira. A cinza da casca de arroz possui 92% de sílica, sendo este material considerado corrosivo aos equipamentos, por ser uma substância abrasiva (FERREITA; FERREIRA; TEIXEIRA, 2014; FOLLETO *et al.*, 2005).

Os dados referentes à densidade em base seca (básica e a granel) e o Poder Calorífico Superior (PCS) estão na Tabela 3, sendo os tipos de materiais expressos por T1 (briquete de eucalipto), T2 (cavaco de eucalipto), T3 (cavaco de pinus), T4 (serragem de eucalipto), T5 (lenha de eucalipto), T6 (madeira de eucalipto), T7 (casca de arroz), T8 (carvão) e T9 (bagaço de cana-de-açúcar).

Tabela 3 - Poder calorífico Superior (PCS), Densidade Básica (Db), Densidade a granel (DG) e Teor de Umidade (TU) dos materiais.

Propriedades	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
PCS (MJ/Kg)	18,95 ¹	17,96 ³	17,58 ⁵	19,18 ⁶	17,30 ⁷	19,37 ⁹	12,92 ¹¹	31,18 ¹²	15,20 ¹³
DG (kg/m ³)	-	186,00 ⁴	210,62 ⁵	120 ⁶	-	-	114,10 ¹¹	321,00 ¹²	80,00 ¹³
Db (kg/m ³)	1182 ²	-	-	-	440 ⁸	490 ¹⁰	-	-	-

Fonte: ¹ QUIRINO *et al.* (2012); ² BARROS *et al.* (2012); ³ BORGES (2015); ⁴ PEDRAZZI *et al.* (2010); ⁵ GARCIA, CARASCHI, VENTORIM (2013); ⁶ SILVA *et al.* (2015); ⁷ OLIVEIRA (2010); ⁸ GATTO *et al.* (2003); ⁹ QUIRINO *et al.* (2005); ¹⁰ SILVA OLIVEIRA, HELLMMEISTER, FILHO (2005); ¹¹ MORAIS *et al.* (2006); ¹² BARROS (2014); ¹³ PONTE *et al.* (2019).

Em relação ao PCS, percebe-se na Tabela 3 que o material que possui maior valor é o carvão e os materiais que contém menor valor são a casca de arroz e o bagaço de cana. De acordo com Figueiredo (2018), como é característica da fabricação do carvão sua carbonização em altas temperaturas, conforme ocorre o aumento da temperatura de carbonização, ocorre um aumento do teor de carbono fixo e diminuição do teor de materiais voláteis, o que consequentemente aumenta seu poder calorífico.

Ademais, entre os materiais que possuem maior densidade são o briquete, a lenha e a madeira de eucalipto. Segundo Quirino (2012), a elevação da densidade da biomassa, juntamente com a diminuição do teor de umidade, leva a um aumento da densidade energética do material. A densidade energética deve ser levada em consideração como critério de escolha do material para ser utilizado para queima, já que aumenta o rendimento da combustão. O carvão, neste caso, apesar de ter baixa densidade a granel, possui uma densidade energética elevada por conta do seu poder calorífico ser elevado.

O Quadro 2 detalha as vantagens e desvantagens no uso das biomassas analisadas, em relação à oferta, número de fornecedores e propriedades energéticas.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens na utilização das biomassas analisadas no Estado de São Paulo.

	Vantagens	Desvantagens
Briquete	Densidade elevada TCF	Disponibilidade de fornecedores
Serragem	PCS	Baixa densidade Disponibilidade de fornecedores
Casca de arroz	Baixa produção	PCS TC Baixa densidade Disponibilidade de fornecedores

(continua)

(continuação)

Floresta de eucalipto	PCS Alta produção Disponibilidade de fornecedores	
Lenha de eucalipto	PCS TCF Alta produção Disponibilidade de fornecedores	
Bagaço de cana	Alta produção	TC Baixa densidade Disponibilidade de fornecedores
Carvão vegetal	PCS TCF	Disponibilidade de fornecedores
Cavaco de pinus	PCS	Disponibilidade de fornecedores
Cavaco de eucalipto	PCS Disponibilidade de fornecedores	

Fonte: Elaboração própria.

De maneira geral, os materiais que apresentaram vantagens em relação à disponibilidade de fornecedores foram a floresta, lenha e cavaco de eucalipto. Em relação às propriedades energéticas, conforme o Quadro 2, os materiais que apresentaram mais vantagens para queima foram: carvão vegetal, madeira, briquete, cavaco e lenha de eucalipto e cavaco de pinus. A casca de arroz e o bagaço de cana apresentam vantagens para serem utilizadas em suas próprias indústrias. Apesar de não possuírem propriedades energéticas favoráveis, quando comparados às demais biomassas, estes dois materiais reduzem os custos com logística e com a compra de materiais para queima.

4 CONCLUSÃO

As biomassas que possuem maior número de fornecedores no Estado de São Paulo são a floresta em pé, a lenha e o cavaco de eucalipto. Ao analisar a oferta, constatou-se que os materiais que possuem mais produção no estado são o bagaço de cana, a floresta e a lenha de eucalipto e a floresta de pinus. Em relação à demanda, a casca de arroz, o bagaço de cana, a serragem e o cavaco são mais utilizados para geração de energia nos setores sucroenergético, arrozeiro, moveleiro e de cerâmica vermelha. Assim como os demais materiais, a lenha e o carvão são mais utilizados no setor industrial, havendo uma maior demanda pelo setor de papel e celulose e pela siderurgia, respectivamente.

Os materiais que apresentaram, por meio da análise das propriedades energéticas, mais vantagens de serem utilizadas para produção de energia foram o carvão vegetal, a madeira, o briquete, o cavaco e a lenha de eucalipto e o cavaco de pinus.

5 REFERÊNCIAS

ALVES, A. C. A.; COLLARES, M. G. V.; ROSA E SILVA, G. O.; PEREIRA, M. C.; SILVA, A. N. C. L.; ALMEIDA SIMÕES NEVES, P. H. de. Extração de sílica residual proveniente da casca de arroz e aplicação na produção de argamassa. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 13, n. 2, p. 127-136, 2018.

ANDRADE LOPES, G. de; BRITO, J. O.; MOURA, L. F. de. Uso energético de resíduos madeireiros na produção de cerâmicas no Estado de São Paulo. **Revista Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 679-686, 2016.

BARROS, João Lúcio de. **Caracterização de blendas e briquetes de carvões vegetal e mineral**. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/8254?show=full>> Acesso em: 10 jul. 2019.

BARROS, V. C. C. de; CARNEIRO, A. De C. O.; VITAL, B. R.; JACOVINE, L. A. G.; TOLEDO, D. De P. Produção de briquetes a partir de resíduos de eucalipto e oleaginosas. **Revista da Madeira**, n. 133, 2012.

BatchGeo. Disponível em: <https://pt.batchgeo.com/>. Acesso em: 15 de agosto de 2019.

BELLOTE, A. F. J.; CASTRO ANDRADE, G. de; MOLINARI, H. B. C.; ROCHA, J. D.; SILVA, M. L. B. da; STEINMETIZ, R. L. R.; FAVARO, S. P. Biomassa e sua participação na matriz energética brasileira. In: KUNZ, A.; OTENIO, M. H.; LEITÃO, R. C.; GAMBETTA, R. **Energia limpa e acessível: Contribuições da Embrapa**. Brasília: Embrapa, 2018.

BERNI, M. D. (2010). **Caracterização Energética**. In: BERNI, M. D.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. Oportunidades de eficiência energética para a Indústria: Relatório setorial Papel e Celulose. Brasília: CNI, 2010a.

_____. _____. Oportunidades de eficiência energética para a Indústria: Relatório setorial Cerâmica. Brasília: CNI, 2010b.

BORGES, Ane Caroline Pereira. **Caracterização energética do cavaco de *Eucalyptus grandis* “in natura” e torrefeito**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/21702>>. Acesso em: 2 nov. 2018.

BRUN, E. J.; BERSCH, A. P.; PEREIRA, F. A.; SILVA, D. A.; BARBA, Y. R. de; DORINI JUNIOR, J. R. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. **Revista Floresta**, v. 48, n. 1, p. 87-92, 2018.

CASTANHO FILHO, E. P.; CAMPOS, A. D. C.; ANGELO, J. A. Mercado de produtos florestais. **Revista Análises e Indicadores do Agronegócio**, Instituto de Economia Agrícola (IEA), v. 10, n.8, p. 1-5, 2015.

CASTRO PEREIRA BRAINER, M. S. de. Setor moveleiro: Aspectos gerais e tendências no Brasil e na área de atuação do BNB. **Caderno Setorial ETENE**, v.3, n. 34, 2018.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T. do; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de Clones de *Eucalyptus* spp. **Revista Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, v. 9, n. 17, p. 533, 2013.

CIESLINSKI, Juliana Esteves Fernandes. **Estudo da emissão e do controle dos gases e particulados provenientes da queima de biomassa**. 2014. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/103729>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

Classificação Nacional de Atividades Econômicas - CNAE. **Banco de Dados Agregados de Extração de madeira em florestas plantadas**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2016. Disponível em:

<<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/classificacoes/cnae2.0/default.shtm>>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balço Energético Nacional 2018**: Ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018. 294p.

FELFLI, F. F.; MESA, J. M.; ROCHA, J. D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C. A.; PIPPO, W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 236-242, 2011.

FERNANDEZ, B. O.; GONÇALVES, B. F.; PEREIRA, A. C. C.; HASNTED, A. L. S.; PÁDUA, F. A.; DA RÓZ, A. L.; YAMAJI, F. M. Características Mecânicas e Energéticas de Briquetes Produzidos a partir de Diferentes Tipos de Biomassa. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2016.

FERREIRA, P. T.; FERREIRA, M. E.; TEIXEIRA, J. C. Analysis of Industrial Waste in Wood Pellets and Co-combustion Products. **Revista Waste Biomass Valor**, v. 5, n. 4, p. 637-650, 2013.

FIGUEIREDO, M. E. O.; LONGUE JR, D.; PEREIRA, A. K. S.; CARNEIRO, A. de C. O.; SILVA, C. M. S. da. Potencial da madeira de *Pterogyne nitens* Tul. (madeira-nova) para produção de carvão vegetal. **Revista Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 420-431, 2018.

FOLLETO, E. L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R. S.; PORTUGAL JR, U. L.; JAHN, S. L. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Revista Química Nova**, v. 28, n. 6, p. 1055-1060, 2005.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, v. 24, n. 135, p. 14-16, 2013.

GATTO, D. A.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; DURLO, M. A. Características da lenha produzida na região da quarta colônia de imigração italiana do rio grande do sul. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 7-16, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Produção Agrícola Municipal – PAM. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-epecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?t=resultados>> Acesso em: 1 de setembro de 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Disponível em:

<<https://www.iba.org/carvao-vegetal-2>>. Acesso em: 6 ago. 2019.

_____. **Relatório 2017**. Disponível em: <

https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malha Municipal Digital**, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/15774-malhas.html>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2019.

LIN, Y.; MA, X.; PENG, X.; YU, Z.; FANG, S.; LIN, Y.; FAN, Y. Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes. **Fuel**, v. 181, p. 905-915, 2016.

LIPPEL. **Cavacos de madeira**. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br/cavacos-de-madeira.html>>. Acesso em: 7 ago. 2019.

LIPPEL. **Tipos de resíduos**. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br/tipos-de-residuos.html>>. Acesso em: 7 ago. 2019.

LOUZADA JUNIOR, M. A.; SAMPAIO ALVES, M. C. de; DOMENICO VALARELLI, I. de; ANGELO SANCHEZ, L. E. de. O contexto brasileiro e as oportunidades de

aproveitamento de resíduos de madeira. **Revista Saúde e Meio Ambiente – RESMA**, v. 5, n.3, p. 24-40, 2017.

MF Rural. Disponível em: <<http://www.mfrural.com.br>>.

MORAIS, M. R.; SEYE, O.; FREITAS, K. T. de; RODRIGUES, M.; SANTOS, E. C. S. dos; SOUZA, R. C. R. Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais...** Campinas, 2006. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200019&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 21 jun. 2019.

OLIVEIRA, Jofran Luiz de. **Potencial energético da gaseificação de resíduos da produção de café e eucalipto**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3559>>. Acesso em: 2 nov. 2018.

PEDRAZZI, C.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. de; SANTOS MUGUET, M. C. dos; GOMIDE, J. L. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de polpas produzidas por novas sequências de branqueamento. **Revista Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 123-135, 2010.

PONTE, M. R.; GADELHA, A. M. T.; LUNA MACHADO, Y. de; LOPES, A. S.; MALVEIRA, J. Q.; MAZZETTO, S. E.; LOMONACO, D.; SOUSA RIOS, M. A. de. Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos. **Revista Matéria**, v.24, n.2, 2019.

QUIRINO, W. F.; OLIVEIRA PINHA, I. V. de; OLIVEIRA MOREIRA, A. C. de; SOUZA, F. de; FILHO, M. T. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Revista Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 525-536, 2012.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. do; ANDRADE, A. P. A. de; ABREU, V. L. S.; SANTOS AZEVEDO, A. C. dos. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n.89, p.100-106, 2005.

ROCHA, C. R. Caracterização energética. In: ROCHA, C. R.; BAJAY, S.; GORLA, F. D. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria: setor alimentos e bebidas.** Brasília: CNI, 2010.

RUAN, R.; ZHANG, Y.; CHEN, P.; LIU, S.; FAN, L.; ZHOU, N.; DING, K.; PENG, P.; ADDY, M.; CHENG, Y.; ANDERSON, E.; WANG, Y.; LIU, Y.; LEI, H.; LI, B. Chapter 1 - Biofuels: Introduction. In: Pandey, A.; LARROCHE, C.; DUSSAPI, C.; GNANSOUNOU, E.; KHANAL, S. K.; RICKE, S. (org.). *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels.* 2 ed. **Biomass, Biofuels, Biochemicals**, p. 3-43, 2019.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Energia e Mineração. **Balanco Energético do Estado de São Paulo 2017:** Ano Base 2016. São Paulo, 2017.

SCHIMITT, G. T.; MODOLO, E.; CÉLIA, R.; MORAES, M.; ALBERTO, C.; JOHANN, D.; DANIELA, A.; NUNES, T. Uso de cinza de casca de arroz como constituinte da camada de substrato em sistema wetland para tratamento de efluentes. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 12, n. 26, p. 209-221, 2016.

SILVA IGNACIO, L. H. da; ALMEIDA SANTOS, P. E. de; DUARTE, C. A. R. An experimental assessment of *Eucalyptus urosemante* energy potential for biomass production in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 361-369, 2019.

SILVA OLIVEIRA, J. T.; HELLMEISTER, J. C.; FILHO, M. T. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

SILVA, D. A. da; YAMAJI, F. M.; BARROS, J. L. de; DA RÓZ, A. L.; NAKASHIMA, G. T. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Revista Floresta**, v. 45, n. 4, p. 713 - 722, 2015.

SOUSA DIAS, J. M. C.; SOUZA, D. T. de; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Documentos. Brasília: **Embrapa Agroenergia**, v. 13, 132 p., 2012.

SOUZA, N. D. de; AMODEI, J. B.; XAVIER, C. N.; DIAS JR, A. F.; CARVALHO, A. M. de. Estudo de Caso de uma Planta de Carbonização: Avaliação de Características e Qualidade do Carvão Vegetal Visando Uso Siderúrgico. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 270-277, 2016.

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE ECONÔMICO-ENERGÉTICA SOBRE O USO DE BIOMASSA PARA QUEIMA

O aproveitamento energético da biomassa é cada vez mais difundido pelas indústrias a fim de reduzirem seus custos de produção, o que contribui para solucionar a diminuição do descarte de resíduos no meio ambiente. A biomassa é mais utilizada em indústrias para cogeração de energia, como no caso dos setores sucroenergético, papel e celulose e painéis de madeira. Ainda, existe uma demanda crescente por outros setores para compra de biomassa para geração de energia térmica e elétrica. Este trabalho teve como principal objetivo determinar o custo e viabilidade de compra de diversas fontes de biomassa para queima em indústrias na Região Metropolitana de Sorocaba (RMS). Foram considerados como fatores econômicos e técnicos da biomassa: a logística de entrega, o preço de compra e o custo energético. As biomassas escolhidas para análise foram: a serragem, o cavaco, o briquete, a lenha e a floresta em pé de eucalipto (tora) e a casca de arroz. Constatou-se que, em alguns casos, as biomassas que possuem preços menores e raios de distância maiores são viáveis de serem utilizadas. Além disso, verificou-se que nos raios entre 50 km e 250 km houve maior oferta de biomassa com menor custo. A partir das análises em relação ao custo de energia e também de quantidade ofertada para atender a demanda diária da empresa, concluiu-se que o cavaco e a tora apresentam vantagens para diferentes raios de distância.

Palavras-chave: biomassa; custo; logística; queima; Sorocaba.

ECONOMIC AND ENERGETIC ANALYSIS OF BIOMASS USE FOR BURNING

ABSTRACT

Biomass energetic utilization is more and more widespread by industries in order to reduce their production costs, which contributes to solving the reduction of waste disposal in the environment. Biomass is most used in industries for generation of energy, as in the case of sugarcane, paper and cellulose production sectors, among others. Still, there is a growing demand by other sectors for buying biomass for thermal and electrical energy generation. This paper had as its main objective to determine the cost and viability of purchasing various sources of biomass for burning in industries in the Metropolitan Region of Sorocaba (RMS). Economic and technical factors of biomass were considered: delivery logistics, price of purchase and

energetic cost. The biomasses chosen for analysis were: sawdust, wood chips, briquettes, firewood, eucalypt standing forests (log) and rice husk. It was found that, in some cases, biomass that have lower prices and greater distance radii are feasible to be used. In addition, it was found that in the rays between 50 km and 250 km there was a greater supply of biomass at lower cost. From the analysis in relation to the cost of energy and also the quantity offered to meet the daily demand of the company, it was concluded that the chip and the log have advantages for different distance radii.

Keywords: Bioenergy; Cost; Logistics; Residues; Forest; Sorocaba.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Proskurina *et al.* (2017), a utilização de biomassa para produção de energia em usinas já está bem estabelecida no mundo. Segundo os autores, grandes plantas industriais demandam biomassa para reduzirem custos com combustíveis fósseis, gerar energia de maneira sustentável e também reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a biomassa é atraente para muitos setores industriais, não apenas para as usinas.

De acordo com Silva *et al.* (2017), a aplicabilidade da biomassa para fins energéticos é diversa, possui uma variedade de fontes envolvendo resíduos agrícolas, industriais, urbanos e diversas tecnologias para conversão em energia, como pirólise, gaseificação e combustão.

A utilização de biomassa pelas indústrias depende de uma série de fatores, como a localização dos fornecedores, a sazonalidade da oferta, qualidade e preço. A localização dos fornecedores irá determinar o custo com transporte de biomassa, além da capacidade de oferta de uma quantidade que supra a demanda diária pela indústria (MALLADI; QUIRION-BLAIS; SOWLATI, 2018).

Conforme Nunes, Causer e Ciolkosz (2020), diversas variáveis estão relacionadas ao custo de aquisição da biomassa, são elas: a produção mensal de matéria-prima pelos fornecedores, o período de tempo necessário para produção, o período de armazenamento e a distância de cada fornecedor. Além disso, a utilização de diversas fontes de biomassa (de vários fornecedores) é uma solução viável para atender diferentes volumes de demanda.

Em relação à sazonalidade da oferta, muitas biomassas dependem do período de colheita, de condições climáticas e do replantio de árvores para serem disponibilizadas para venda (NUNES; CAUSER; CIOLKOSZ, 2020). Muitos resíduos, como os que são oriundos do plantio de cana-de-açúcar, de laranja e de arroz, são fornecidos apenas em alguns meses do ano

e são ofertados em maior quantidade em algumas regiões do Brasil, o que se torna um agravante para a indústria depender deles para geração de energia ao longo do ano.

A qualidade é um fator crucial para escolha de qual biomassa ser utilizada. Entretanto, ainda é considerada pelas indústrias, um fator secundário quando comparado ao preço da biomassa. A qualidade da biomassa abrange suas propriedades energéticas e também o fator de adequação para uso em equipamentos. Por exemplo, apesar de algumas biomassas terem um poder calorífico adequado, elas podem ser abrasivas, o que diminui a vida útil das grelhas (SHABANI; SOWLATI, 2015; NIU; TAN; HUI, 2016).

Conforme Figueiró *et al.* (2019), o Brasil tem um grande potencial na produção de biomassa florestal, em decorrência da sua alta produtividade, que é conhecida mundialmente. Segundo os autores, a biomassa lenhosa pode ser constituída de árvores inteiras, raízes, galhos e resíduos de manejo de florestas.

Em relação aos resíduos florestais, eles são basicamente os materiais que são deixados para trás no processo de coleta de madeira nas florestas, as serras e estacas que são produzidas no processamento da madeira. São produzidos no Brasil, anualmente, grandes quantidades destes resíduos, sendo cerca de 41 milhões de toneladas de resíduos de madeira oriundas da indústria de processamento e colheita florestal, com uma capacidade equivalente de 1,7 GW/ano (FERREIRA *et al.*, 2018).

Conforme Swithenbank *et al.* (2011), utilizar a madeira bruta para produção de energia pode não ser uma forma eficiente, já que ela pode conter mais de 50% de umidade, o que diminui o poder calorífico e encarece seu transporte. Uma redução de 50% para 30% no teor de umidade contribuiria, segundo os autores, para um aumento de 50% no poder calorífico do material.

De acordo com Fisher *et al.* (2017), a utilização de madeira de maneira sustentável para a produção de energia depende de métodos que maximizem a eficiência operacional, considere os custos e seja resistente aos estresses ambientais bióticos e abióticos.

Além da geração de bioenergia a partir do uso direto da madeira para queima, também são utilizadas biomassa oriundas de resíduos agrícolas e florestais, como no caso da casca de arroz, de café, de eucalipto, da serragem, bagaço de cana, etc. Segundo Nakashima *et al.* (2014), a utilização da biomassa na forma de briquetes ou pellets é uma forma de aumentar sua eficiência energética, por meio da compactação dos resíduos. Conforme os autores, em condições apropriadas de umidade e granulometria, basicamente todo tipo de resíduo vegetal pode ser compactado.

Segundo Han, Gao e Qi (2019), existem várias desvantagens na combustão direta de biomassa. Entre elas, podem-se destacar os problemas operacionais causados pelo alto teor de metais alcalinos que causam incrustação, sinterização, aglomeração e corrosão por superaquecimento. De acordo com os autores, a queima e o transporte de biomassa não compactada geram baixa eficiência e poluição. Deste modo, a briquetagem da biomassa surge como solução para estes problemas.

A casca de arroz, obtida a partir do beneficiamento do arroz, é usualmente utilizada para a geração de energia. Conforme Abaide (2019), ela corresponde a cerca de 23% do peso do arroz e sua produção anual, em todo o mundo, gira em torno de 149 milhões de toneladas, sendo aproximadamente 70% dessa quantidade utilizada para a produção de energia.

Deste modo, devem ser considerados os fatores já levantados, pois alguns materiais, apesar de apresentarem menores preços, podem ter custos elevados para utilização, como no caso do custo com transporte. O objetivo deste trabalho foi analisar a viabilidade técnica e econômica para queima de diferentes tipos de biomassa na Região Metropolitana de Sorocaba (RMS).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Empresa utilizada no estudo de caso

A empresa está localizada na RMS, possui demanda por biomassa para queima e utiliza um sistema de caldeira para consumo direto de vapor. Utilizou-se como referência para estimar o consumo diário de biomassa uma indústria de grande porte do setor moveleiro, localizada na RMS, que demanda uma quantidade diária de 200 toneladas de cavacos de madeira para gerar energia. Portanto, a demanda por outros tipos de biomassa foi calculada com base na quantidade de cavaco.

2.2. Região de Estudo

A RMS é composta por 27 municípios e contém mais de 2,1 milhões de habitantes, o que representa 4,65% do total de habitantes no Estado de São Paulo (EMPLASA, 2019). Além disso, essa região está situada no eixo das regiões metropolitanas de São Paulo e de Curitiba e

se mantém próxima da região metropolitana de Campinas, o que significa uma vantagem para as relações comerciais e de logística.

Em relação à atividade industrial, essa região se destaca pela produção de minérios, como o cimento, o calcário, entre outros e também na produção agrícola. Conforme dados da Produção Agrícola Municipal (PAM), a área destinada à colheita agrícola na RMS atingiu um total de 4.758 hectares em 2017, gerando mais de R\$ 100 milhões neste mesmo ano (IBGE, 2017). Em relação à produção de silvicultura, são destinados 27.573 hectares para o plantio na região, sendo o eucalipto responsável por 99% deste valor, o que representa 3% do plantio de eucalipto no Estado de São Paulo (CNAE, 2016).

2.3. Coleta de Dados

A escolha das biomassas para serem utilizadas neste trabalho foi feita com base em uma pesquisa de mercado, em que foram consideradas a quantidade de vendedores na região e a sazonalidade de cada uma delas. Para isso, foram utilizados *websites* para a obtenção dos dados primários referentes às cotações de preços das biomassas entre o período de 2018 e 2019 e também obtenção direta das cotações com os fornecedores. Nas ofertas anteriores a 2018, foram considerados apenas os preços cotados diretamente com os fornecedores.

A madeira da espécie *Eucalyptus* sp. foi a principal biomassa, dada sua importância no cenário florestal da região e também pelas várias formas utilizadas para fins energéticos (FERNÁNDES *et al.* 2018; FERREIRA *et al.* 2017; PIGHINELLI; SCHAFFER; BOATENG, 2018). Deste modo, foram cotados preços da serragem, do briquete, da lenha, do cavaco e da floresta em pé, oriundos da madeira de eucalipto e a casca de arroz (oferta na região).

Em relação a floresta em pé de eucalipto, foram considerados plantios entre 6 a 13 anos, dado que não houve grande diferença de preço nas cotações para os plantios de até 13 anos. Simões *et al.* (1980), ao analisar plantios de eucalipto entre 5 e 11 anos, com espaçamento de 3 x 2,0m, constataram que a produção de madeira foi inferior aos 5 anos de idade e não houve diferença significativa entre os cortes aos 7,9 anos e 11 anos, o que leva a concluir que não é vantajoso utilizar um corte de 11 anos. Todavia, nas cotações, foram considerados plantios de até 13 anos pela semelhança no preço de venda com os plantios de 7 anos. Para o cálculo da produtividade anual do plantio, foi considerado o Incremento Médio Anual (IMA) de 35 m³/ha/ano (CORDEIRO *et al.*, 2018).

No caso da lenha, da casca de arroz, da serragem e do cavaco, foram consideradas nas cotações a venda dos materiais a granel, ensacados apenas em big-bags, sem nenhum processo de tratamento (como carbonização, esterilização, processo de secagem). Foram utilizados estes critérios a fim de encontrar produtos direcionados para geração de energia em indústrias, já que muitos destes processos são direcionados a produtos que serão utilizados em empresas de pequeno porte (como em pizzarias e padarias).

Para delinear a região de compra dos materiais, foi considerado um raio de 500 quilômetros, no qual foram levados em consideração para sua determinação a logística de entrega até o pátio da empresa, o custo de transporte e disponibilidade de fornecedores. Deste modo, foram encontrados fornecedores nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina.

2.4. Caracterização energética

Os dados referentes ao poder calorífico, à densidade em base seca e à análise imediata foram obtidos por meio de um levantamento bibliográfico e estão informados na Tabela 1. Todos os dados referentes à densidade, análise imediata e poder calorífico foram obtidos com base na média dos valores das amostras.

Tabela 1- Poder calorífico Superior (PCS), Densidade Básica (Db), Densidade a granel (DG) e Teor de Umidade em base úmida (TUbu) dos materiais.

Propriedades	Briquete	Cavaco	Serragem	Lenha	Madeira	Casca de arroz
TUbu (%)	12 ¹	35*	44 ⁵	30 ¹	40*	15*
PCS (MJ/Kg)	18,95 ²	17,96 ³	19,49 ⁶	17,30 ⁷	19,37 ⁹	12,92 ¹¹
DG (kg/m ³)	780 ¹	186 ⁴	167 ⁵	-	-	114 ¹¹
Db (kg/m ³)	-	-	-	440 ⁸	490 ¹⁰	-

Fonte: ¹ BIOMAX (ND); ² QUIRINO *et al.* (2012); ³ BORGES (2015); ⁴ PEDRAZZI *et al.* (2010); ⁵ CALEGARI *et al.* (2005); ⁶ COSTA *et al.* (2017); ⁷ OLIVEIRA (2010); ⁸ GATTO *et al.* (2003); ⁹ QUIRINO *et al.* (2005); ¹⁰ SILVA OLIVEIRA, HELLMEISTER, FILHO (2005); ¹¹ MORAIS *et al.* (2006).

*Informações obtidas pelos vendedores.

Para os cálculos referentes ao transporte e custo de energia, foi necessário recalcular os valores do PCS, da densidade a granel e básica e da densidade energética considerando o teor de umidade expresso em base úmida (TUbu), conforme a seção 2.7 e os dados da Tabela 1.

Para fazer a conversão de energia em tonelada equivalente de petróleo (tep), foram utilizados os dados do Balanço Energético Nacional (BEN). Deste modo, para calcular o tep,

foi utilizada a razão entre o poder calorífico de cada biomassa pelo poder calorífico do petróleo, que é de 10.800 kcal/kg (EPE, 2018), conforme a Equação 1.

$$tep = \frac{PCS}{10.800} \quad (1)$$

Onde:

PCS: Poder Calorífico Superior (kcal.kg⁻¹)

2.5 Logística de entrega

Para a realização do transporte das biomassas, foi considerada a possibilidade de entrega pelos fornecedores e também a retirada do material pela própria empresa. No caso da retirada, o custo do frete foi simulado no site da Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT (2019), onde foi levado em conta para o cálculo de custo os raios de distância entre 50 km e 500 km. Os valores cotados para o frete não incluem o Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação (ICMS), custos com carregamento e descarregamento das mercadorias, taxas como pedágio e cubagem e o custo com retorno vazio do caminhão. Estão inclusos nos valores do frete: o encargo com *Programa de Integração Social (PIS)* e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), margem de lucro de 8% e custos com insumos na região de São Paulo.

Em relação ao frete, foi considerado a terceirização pela empresa. Foram considerados para o transporte de lenha e de madeira de eucalipto o caminhão plataforma com um reboque acoplado (Romeu e Julieta) com volume de 90 m³ da caixa de carga e com 7 eixos, com capacidade de carga de 51 toneladas. Para o transporte dos materiais a granel, como a casca de arroz, o cavaco, o briquete e a serragem, foi considerado o caminhão com semi-reboque (fundo móvel) de 5 eixos, com capacidade de carga de 32 toneladas e volume de 110 m³ da caixa de carga.

2.6 Custo de colheita da floresta de eucalipto

O custo de colheita foi baseado em Bendlin *et al.* (2014). Foi considerado o sistema mecanizado, onde foi utilizado o *Feller Buncher*. Bendlin *et al.* (2014) chegou ao valor de R\$18 por estéreo (st) para toras de eucalipto, em que levou em consideração os custos na operação com a derrubada pelo *Feller Buncher*, o arraste pelo trator florestal, o baldeio e a

descarga/empilhamento das toras. O custo de colheita, que totalizou o valor de R\$ 18 por st para o ano de 2014, foi convertido em m³ para então ser corrigido pelo IGP-M (Índice Geral de Preços do Mercado), no valor de R\$ 32,10 por m³ para o ano de 2019.

Este sistema é o mais utilizado atualmente no caso do plantio destinado a energia, já que o diâmetro a altura do peito (DAP) é menor que em outros plantios destinados a papel e celulose. A partir disso, é possível aumentar a produtividade da colheita, já que o *Feller Buncher* consegue pegar várias toras para depois fazer o descarregamento.

O *Feller Buncher*, conforme Nascimento *et al.* (2010), realiza o corte das toras, primeiramente, fixando-se na árvore por meio dos seus dois braços mecânicos na altura do DAP e, em seguida, realiza o corte da árvore quase rente ao solo, por meio de um disco de corte rotativo. Neste procedimento, está máquina consegue acumular outras toras, pois ele prende a árvore cortada em seu cabeçote e então reabre seus braços para uma nova operação até que complete sua capacidade de armazenamento, de acordo com a carga do equipamento. Quando chega na sua capacidade máxima, ela realiza o descarregamento/tombamento.

No trabalho realizado por Bendlin *et al.* (2014), foi considerado um processo de colheita totalmente mecanizado. A derrubada pelos *Feller bunchers* levou aproximadamente 8 horas por hectare de eucalipto. A operação realizada pelos equipamentos que fazem o arraste realizaram o recolhimento da madeira derrubada; e as garras traçadoras realizaram o seccionamento, carga e descarga da madeira, sendo utilizados tratores florestais.

2.7 Análise econômica

Foram analisados os preços de oferta para cada raio de distância, assim como o custo com o frete. Somente a floresta em pé teve custos com a colheita de eucalipto, que já está embutido no preço descrito nas tabelas para a tora (R\$ 32,10 por m³).

Para o cálculo do custo de energia de cada biomassa, com e sem o frete oferecido pelo fornecedor, foram utilizados o preço por m³, custo do serviço de frete por m³, o preço do material por m³ com a entrega pelo fornecedor e a densidade energética (DE), conforme as equações 2 e 3.

$$\text{Custo de energia} = (\text{Preço} + \text{frete}) \div DE \quad (2)$$

$$\text{Custo de energia com entrega pelo fornecedor} = \text{Preço} \div DE \quad (3)$$

Para obter a densidade energética foi utilizada a Equação 4:

$$DE = PCS \times Dbu \quad (4)$$

Onde:

PCS: Poder Calorífico Superior (MJ.kg^{-1})

Dbu: Densidade com Teor de Umidade em base úmida (kg.m^{-3})

O PCS utilizado para calcular a densidade energética e a quantidade diária de cada biomassa foi calculado com o teor de umidade em base úmida (TUBu). Os novos valores do PCS com o TUBu foram obtidos a partir da Equação 5:

$$PCS(TUBu) = PCS \times (100\% - TUBu) \quad (5)$$

Em relação à quantidade diária de biomassa, ela foi obtida com base na quantidade diária de 200 toneladas de cavaco, já que foi considerado, assim como no caso do cavaco, que cada biomassa atenderia a demanda diária de energia da indústria de forma isolada. Deste modo, para a determinação da quantidade de cada biomassa, foram utilizados a densidade energética do cavaco, a quantidade diária de cavaco e o PCS (TUBu) de cada biomassa.

Para deixar os preços padronizados, foi utilizada uma única unidade de medida, o metro cúbico, para todos os materiais. Para isto, foram convertidas as cotações de preço que foram obtidas em toneladas (no caso do briquete e em alguns casos para o cavaco, a casca de arroz e a serragem), em metro cúbico (cavaco, serragem e casca de arroz) e em metro estéreo (lenha e tora).

Em relação ao custo de transporte, foi realizado o cálculo da quantidade de caminhões necessária para cada material, levando em consideração a densidade do material com teor de umidade em base úmida. Para obter o custo do transporte por m^3 , foi utilizada a razão entre o custo do transporte do caminhão para cada raio de distância pela quantidade diária de material em m^3 .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 descreve os novos valores do PCS, DG e Db tendo como base de cálculo o TUBu. Percebe-se que os novos valores do PCS são menores que os valores da Tabela 1, já que o PCS tem correlação negativa com o teor de umidade, além de diminuir a eficiência para uso em caldeiras (CAVALCANTI; CARVALHO; AZEVEDO, 2019; FERREIRA *et al.* 2016).

Tabela 2 – PCS, DG, Db e DE, utilizando o TUBu.

Propriedades	Briquete	Cavaco	Serragem	Lenha	Tora	Casca de arroz
PCS (MJ/Kg)	16,68	11,67	10,77	12,11	11,62	10,98
DG (kg/m ³)	900	536	298	-	-	264
Db (kg/m ³)	-	-	-	700	890	-
DE (MJ/m ³)	15.008,40	6.257,26	3.205,33	8.477,00	10.343,58	2.900,35

Nas tabelas 3, 4, 5, 6 e 7 estão detalhadas as informações sobre o custo com o frete para cada tipo de caminhão, preço, impacto do custo com transporte e o tipo de caminhão para cada tipo de material, levando em conta todos os raios de distância analisados. Para todos os gráficos, quadros e tabelas desta seção, foi considerada a floresta em pé (tora) com o custo do corte já embutido.

Tabela 3 – Preço por m³ das biomassas (R\$).

	Briquete	Cavaco	Casca de arroz	Serragem	Lenha	Tora
50 km	-	56,74	-	-	78,00	93,60
100 km	-	29,05	29,05	61,69	-	-
150 km	-	16,00	41,50	53,00	130,00	78,10
200 km	-	54,25	51,50	35,00	76,00	70,67
250 km	306,00	32,50	32,00	35,31	135,50	61,10
300 km	378,00	-	21,13	-	64,00	69,10
350 km	355,50	-	58,10	27,50	58,50	75,10
400 km	-	39,50	20,00	75,00	-	87,60
450 km	-	73,47	-	15,00	-	73,43
500 km	540,00	95,28	-	-	65,00	71,85
Preço médio	394,88	49,60	36,18	43,21	86,71	75,62

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4 – Custo do frete para cada raio de distância (R\$).

	Custo por caminhão - Fundo Móvel com 5 eixos	Custo por caminhão - Romeu e Julieta 7 eixos
50 km	566,61	766,50
100 km	770,60	945,00
150 km	974,60	1.417,50
200 km	1.178,60	1.890,00
250 km	1.382,59	2.065,00
300 km	1.586,59	2.478,00
350 km	1.790,59	2.719,50
400 km	1.994,58	3.108,00
450 km	2.402,58	3.370,50
500 km	2.810,57	3.775,00

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANTT (2019).

Para calcular o custo diário do transporte por km (Tabela 5), foi multiplicado o custo por viagem por tipo de caminhão pelo número de caminhões necessários para transportar diariamente cada tipo de biomassa, obtendo-se o custo total do transporte por dia. Em seguida, este custo foi dividido por cada raio de distância. Nota-se que os custos por km são mais elevados para distâncias menores. Isso ocorre, pois os custos fixos são elevados e não são compensados como em distâncias maiores.

Tabela 5 - Custo diário do transporte por km (R\$).

	Briquete	Cavaco	Casca de arroz	Serragem	Lenha	Tora
50 km	56,66	79,33	90,66	79,33	61,32	61,32
100 km	38,53	53,94	61,65	53,94	37,80	37,80
150 km	32,49	45,48	51,98	45,48	37,80	37,80
200 km	29,47	41,25	47,14	41,25	37,80	37,80
250 km	27,65	38,71	44,24	38,71	33,04	33,04
300 km	26,44	37,02	42,31	37,02	33,04	33,04
350 km	25,58	35,81	40,93	35,81	31,08	31,08
400 km	24,93	34,91	39,89	34,91	31,08	31,08
450 km	26,70	37,37	42,71	37,37	29,96	29,96
500 km	28,11	39,35	44,97	39,35	30,20	30,20

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANTT (2019).

Para fazer o cálculo do frete por m³ (Tabela 6), foi dividido o custo total do transporte por dia pela quantidade diária de material em m³.

Tabela 6 – Custo do frete por m³ (R\$).

	Briquete	Cavaco	Casca de arroz	Serragem	Lenha	Tora
50 km	18,21	10,63	5,63	5,45	11,13	13,58
100 km	24,77	14,46	7,66	7,41	13,72	16,75
150 km	31,32	18,28	9,69	9,37	20,59	25,12
200 km	37,88	22,11	11,71	11,33	27,45	33,49
250 km	44,44	25,94	13,74	13,29	29,99	36,59
300 km	50,99	29,76	15,77	15,25	35,99	43,91
350 km	57,55	33,59	17,79	17,21	39,49	48,19
400 km	64,11	37,42	19,82	19,17	45,14	55,08
450 km	77,22	45,07	23,88	23,09	48,95	59,73
500 km	90,33	52,73	27,93	27,01	54,82	66,90

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 7, o impacto do custo com transporte foi obtido a partir do custo com transporte por m³ dividido pela média de preços das biomassas. Desta forma, obteve-se o impacto do custo do transporte sem levar em consideração as variações de preços das biomassas para os diferentes raios de distância.

Tabela 7 – Impacto do custo com transporte (%).

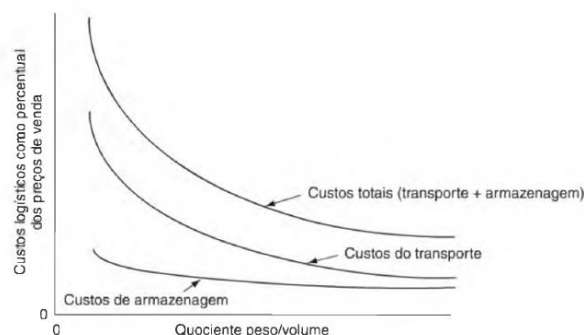
	Briquete	Cavaco	Casca de arroz	Serragem	Lenha	Tora
50 km	5	20	16	13	13	18
100 km	6	28	21	17	16	22
150 km	8	35	27	22	24	33
200 km	10	43	32	26	32	44
250 km	11	50	38	31	35	48
300 km	13	57	44	35	42	58
350 km	15	65	49	40	46	64
400 km	16	72	55	44	52	73
450 km	20	87	66	53	56	79
500 km	23	102	77	63	63	88

Fonte: Elaboração própria.

Com base na Tabela 7, percebe-se o impacto do custo de transporte no custo final de alguns materiais, conforme aumenta o raio de distância da indústria. Dentre os materiais que tiveram maior impacto, considerando um raio de até 300 km, pode-se destacar o cavaco, a lenha e a tora. A partir de 400 km, para todos os materiais, o custo de transporte se aproxima ou ultrapassa o custo do produto (com exceção do briquete). Pode-se afirmar que o custo do transporte teve baixo impacto no custo do briquete, por conta da sua alta densidade. Diferentemente dos demais materiais em que o fator limitante para aproveitar a capacidade de carga do caminhão foi o volume, no caso do briquete, foi o seu peso.

Segundo Ballou (2006), conforme aumenta a densidade do material, seu custo com transporte e armazenamento em relação ao seu preço diminuem. A redução destes custos logísticos é demonstrada na Figura 1.

Figura 1– Efeito Geral da densidade do produto sobre os custos logísticos



Fonte: Ballou (2006).

A Tabela 8 traz informações a respeito da densidade e da quantidade de biomassa a ser utilizada diariamente e por caminhão, das quais foram utilizadas para obter o número de

caminhões. No caso da tora, seriam necessários 1,6 hectares de floresta de eucalipto por dia, considerando uma densidade de 500 kg/m³ e uma produtividade de 245 m³ por hectare, para atender a demanda de 200,89 toneladas diárias.

Tabela 8 - Quantidades de biomassa e de caminhões.

	Dbu	Quantidade de biomassa por caminhão (t)	Volume de transporte do caminhão (t)	Quantidade diária de biomassa (t)	Número de caminhões por dia
Caminhão trator com semi-reboque (fundo móvel)					
Serragem	0,30	32,75	32	216,88	7
Cavaco	0,54	58,96	32	200,00	7
Casca de arroz	0,26	29,05	29,05	212,60	8
Briquete	0,90	45,00	32	140,01	5
Caminhão plataforma com um reboque acoplado (Romeu e Julieta)					
Lenha	0,70	63,00	51	192,80	4
Tora	0,89	80,10	51	200,89	4

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 9, observa-se que os materiais que possuem mais oferta são o cavaco e a tora. Deve-se salientar que o briquete ainda é produzido, de maneira geral, em baixa escala no Brasil, sendo mais demandado para uso comercial do que industrial. Conforme relato dos fornecedores, a casca e a serragem possuem pouca oferta para venda no mercado e são difíceis de serem transportados. Em relação a lenha, muitos vendedores não deram informações a respeito da quantidade disponível para venda, mas se pressupõe que tem oferta semelhante à floresta em pé. Entre as biomassas analisadas, apenas a casca de arroz possui uma produção sazonal, sendo colhida entre os meses de março e junho.

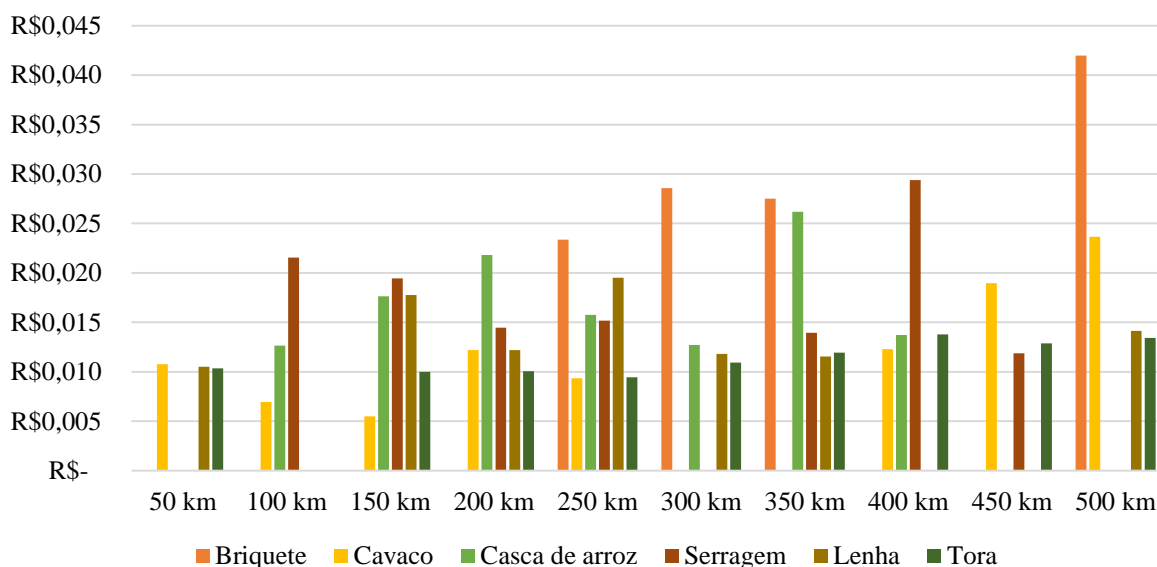
Tabela 9 - Quantidade Diária Ofertada de cada material (ton.).

	Briquete	Cavaco	Casca de arroz	Serragem	Lenha	Tora*
50 km	-	264	12	-	-	60.615
100 km	-	467	-	96	-	-
150 km	-	200	19	-	-	4.806
200 km	10	211	-	73	6.860	26.704
250 km	-	348	-	-	-	17.222
300 km	14	-	-	-	-	13.408
350 km	-	-	-	-	-	10.814
400 km	-	96	-	-	-	4.575
450 km	-	2.087	-	-	-	39.534
500 km	-	601	-	-	-	13.279

Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se na Figura 2 que a biomassa que possui menor custo de energia é o cavaco, em um raio de 150 km. Além disso, para essa distância, o cavaco consegue atender a uma demanda diária de 200 toneladas, conforme a Tabela 9. Como segunda opção, averigua-se que o cavaco a um raio de 100 km possui menor custo e tem disponibilidade de oferta e, como terceira opção, a tora a 250 km.

Figura 2– Custo de Energia (R\$/MJ).



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 10 faz um ranking dos cinco materiais com menor custo de energia, com base na Figura 2.

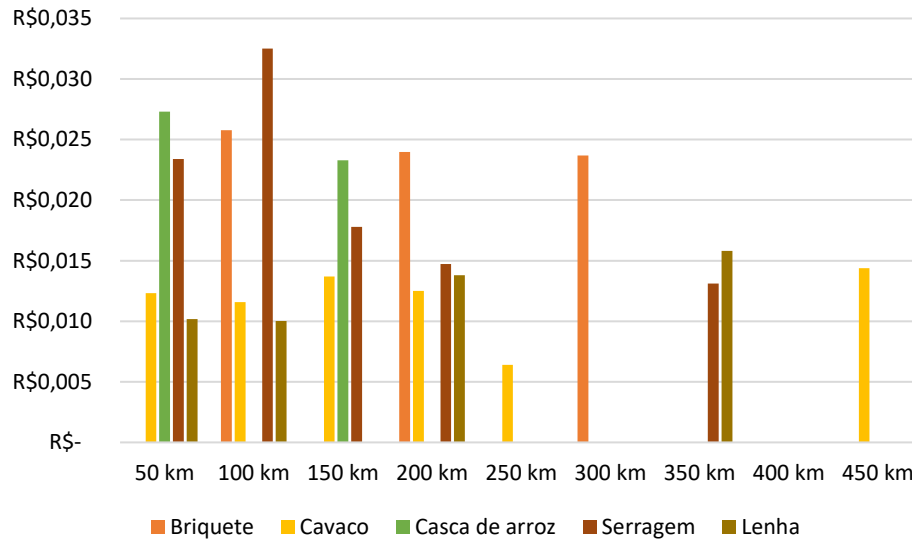
Tabela 10 – Ranking de preços para o custo de energia.

Posição	Biomassa	Custo de energia (R\$/MJ)	Raio de distância (km)	Oferta (ton)
1	Cavaco	0,005	150	200
2	Cavaco	0,007	100	467
3	Tora	0,008	250	17.222
4	Tora	0,009	150	4.806
5	Tora	0,009	300	13.408

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 3 traz informações sobre o custo de energia com o serviço de frete fornecido pelos vendedores. Percebe-se que o cavaco e a lenha possuem menores custos de energia para diferentes raios de distância.

Figura 3 – Custo de energia com entrega pelo fornecedor (R\$/MJ).



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 11 faz um ranking dos cinco materiais com os menores custos de energia, considerando o serviço de frete realizado pelo fornecedor. Como descrito anteriormente a respeito da Tabela 9, a lenha não dispõe de informações sobre a oferta para a maioria dos raios de distância. Todavia, pressupõe-se que sua produção seja na mesma proporção que a da floresta em pé.

Tabela 11 - Ranking com frete fornecido pelo vendedor

Posição	Biomassa	Custo de energia (R\$/MJ)	Raio de distância (km)	Oferta (ton)
1	Cavaco	0,006	250	348
2	Lenha	0,010	50	
3	Lenha	0,010	100	
4	Cavaco	0,012	100	467
5	Cavaco	0,012	50	264

Fonte: Elaboração própria.

Com base nas Tabelas 10 e 11, percebe-se que é viável comprar as biomassas sem o serviço de frete do fornecedor, com exceção do cavaco que é vendido a um raio de 250 km. Desta forma, mantém-se o ranking da Tabela 10, com a substituição do cavaco que é vendido a um raio de 100 km pelo cavaco que é vendido com o frete pelo vendedor a um raio de 250 km (Tabela 11), na segunda colocação.

Conforme a Tabela 12, entre as biomassas que mais produzem energia são o briquete, o cavaco, a lenha e a tora de eucalipto. Como analisado nas figuras 2 e 3 e, a partir de uma análise

das tabelas 3, 7 e 12, o briquete, mesmo sendo a biomassa que mais produz energia e que tem o menor custo com transporte em relação ao seu preço, por ser um material que tem preço elevado e possuir pouca oferta, resulta no maior custo final, dificultando sua utilização para produção de energia em indústrias.

Tabela 12 - Produção de energia

Materiais	TEP
Briquete	0,369
Lenha	0,268
Cavaco	0,258
Madeira em pé	0,257
Casca de arroz	0,243
Serragem	0,238

Fonte: Elaboração própria.

Apresentaram-se, conforme análise das figuras 2 e 3 e tabelas 10 e 11, viáveis de serem utilizados em escala para produção de energia em indústrias na RMS, o cavaco e a tora de eucalipto. Além disso, segundo Silva Miranda *et al.* (2017), a utilização do cavaco reduz o custo de energia, quando comparado ao uso da lenha, já que o cavaco permite a mecanização do processo de alimentação das caldeiras, o que diminui o custo com mão-de-obra. Ainda, conforme os autores, a redução no custo de energia com a utilização do cavaco tem levado indústrias de diversos setores, como de laticínios, de refrigeração, de papel, de fertilizantes e a agroindústria a reduzirem o uso de combustíveis fósseis.

De acordo com Silva Miranda *et al.* (2017), os combustíveis derivados do petróleo ainda são amplamente utilizados pela indústria por possuírem vantagens de logística, facilidade para uso operacional e burocráticas em relação à biomassa florestal. Todavia, tais limitações quanto ao uso da biomassa florestal podem ser reduzidas por meio de estímulos realizados por políticas públicas.

Deve-se frisar que o uso de biomassa de origem florestal no Brasil possui vantagens quando comparado ao uso de combustíveis fósseis, como custo competitivo, ser renovável, alta produtividade, geração de empregos e disponibilidade de terras para o plantio (SILVA MIRANDA *et al.*, 2017).

4. CONCLUSÃO

A partir das análises, conclui-se que o cavaco e a tora de eucalipto apresentam vantagens que dependem da aplicação e da distância que são ofertados. Os raios de distância que apresentaram biomassas com maior oferta e menor custo foram os de 50 km até 250 km. Além disso, o custo com o frete para raios de distância maiores, não foi um fator que encareceu a biomassa em alguns casos, já que o preço ofertado estava menor que para raios de distância menores, como no caso do cavaco, em que teve seu custo de energia menor para os raios de 100 km e de 150 km, do que para 50 km.

Deve-se salientar, a partir destas conclusões, que a depender do uso, é mais viável o cavaco, quando comparado à tora, pois é um material a granel que possui granulometria favorável para ser utilizado em um processo automatizado de alimentação de caldeiras.

5. REFERÊNCIAS

ABAIDE, E. R.; TRES, M. V.; ZABOTI, G. L.; MAZUTTI, M. A. Reasons for processing of rice coproducts: Reality and expectations. **Biomass and Bioenergy**, v. 10, p. 240-256, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **Tabelas de Frete**, 2019. Disponível em: <https://www.tabelasdefrete.com.br/planilha/carga-lotacao/70>.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimento/logística empresarial**. 5 ed. São Paulo: Bookman, 2004.

BENDLIN, L.; SENFF, C. O.; PEDRO, J. J.; STAFIN, O. O. Custos de produção, expectativas de retorno e riscos associados ao plantio de eucalipto na região do Planalto Norte – Catarinense/Brasil. In: Congresso Brasileiro de Custos, 21., 2014, Natal. **Anais...** Natal, 2014. Disponível em: <<https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/3677>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.

BIOMAX. Indústria de Máquinas Ltda. **Briquetes**. Disponível em: <<https://www.biomaxind.com.br/briquetes/>>. Acesso em: 10 nov. 2019.

BORGES, Ane Caroline Pereira. **Caracterização energética do cavaco de Eucalyptus grandis “in natura” e torrefeito**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/21702>>. Acesso em: 2 de novembro de 2018.

CALEGARI, L.; FOELKEL, C. E. B.; HASELEINA, C. R.; ANDRADE, J. L. S. de; SILVEIRA, P.; SANTINI, E. J. Características de algumas biomassas usadas na geração de energia no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Biomassa e Energia**, v. 2, n. 1, p. 37-46, 2005.

CAVALCANTI, E. J. C.; CARVALHO, M.; AZEVEDO, J. L. B. Exergoenvironmental results of a eucalyptus biomass-fired power plant. **Energy**, v. 189, 2019.

Classificação Nacional de Atividades Econômicas - CNAE. **Banco de Dados Agregados de Extração de madeira em florestas plantadas**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2016. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/classificacoes/cnae2.0/default.shtm>>. Acesso em: 20 out. 2018.

CORDEIRO, S. A.; SILVA, M. L. da; OLIVEIRA NETO, S. N.; OLIVEIRA, T. M. Simulação da Variação do Espaçamento na Viabilidade Econômica de um Sistema Agroflorestal. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, 2018.

COSTA, E. V. S.; CASTRO FREITAS PEREIRA, M. P. de; SILVA, C. M. S. da; PEREIRA, B. L. C.; ROCHA, M. F. V.; CÁSSIA OLIVEIRA CARNEIRO, A. de. Torrefied briquettes of sugar cane bagasse and Eucalyptus. **Revista Árvore**, v. 43, n.1, 2017.

DEBONI, T. L., SIMIONI, F. J., BRAND, M. A., LOPES, G. P. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable energy**, v. 145, p. 1291-1302, 2019.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO - EMPLASA. **Região Metropolitana de Sorocaba**. Disponível em:<<https://www.emplasa.sp.gov.br/RMS>>. Acesso em: 1 de julho de 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2018**: Ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018. 294p.

FERNÁNDES, M.; ALAEJOS, J.; ANDIVIA, E.; VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.; RUIZ, F.; LÓPEZ, F.; TAPIAS, R. *Eucalyptus x urograndis* biomass production for energy purposes exposed to a Mediterranean climate under different irrigation and fertilisation regime. **Biomass and Bioenergy**, v. 111, p.22-30, 2018.

FERREIRA, J. C.; STÄHELIN, T. S. F.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. de. Qualificação da biomassa em povoamentos florestais de *Pinus taeda*. **Revista Floresta**, v. 46, n. 2, p. 269-276, 2016.

FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, S. S. de; ANDO JUNIOR, O. H. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 94, p. 440-455, 2018.

FERREIRA, M. C.; SANTOS, R. C. dos; CASTRO, R. V. O.; CÁSSIA OLIVEIRA CARNEIRO, A. de; SILVA, G. G. C. da; CASTRO, A. F. N. M.; LIMA COSTA, S. H. de; PIMENTA, A. S. Biomass and energy production at short rotation *Eucalyptus* clonal plantations deployed in rio grande do norte. **Revista Árvore**, v. 41, n. 5, 2017.

FIGUEIRÓ, C. G.; VITAL, B. R.; CÁSSIA OLIVEIRA CARNEIRO, A. de; SILVA, C. M. S. da; MAGALHÃES, M. A.; FREITAS FIALHO, L. de. Energy valorization of woody biomass by torrefaction treatment: a brazilian experimental study. **Maderas**, v. 21, n. 3, p. 297-304, 2018.

FISHER, M.; KELLEY, A. M.; WARD, E. J.; BOONE, J. D.; ASHLEY, E. M.; DOMEK, C.; WILLIAMSON, J. C; KING, J. S. A Critical analysis of species selection and high vs. low-

input silviculture on establishment success and early productivity of model short-rotation wood-energy cropping systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 98, p. 214-227, 2017.

GATTO, D. A.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; DURLO, M. A. Características da lenha produzida na região da quarta colônia de imigração italiana do rio grande do sul. **Revista Ciência Florestal**, v. 13, n. 2, p. 7-16, 2003.

HAN, K.; GAO, J.; QI, J. The study of sulphur retention characteristics of biomass briquettes during combustion. **Energy**, v. 186, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção Agrícola Municipal – PAM**. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-epecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?t=resultados>> Acesso em: 1 set. 2019.

MALLADI, K. T.; QUIRION-BLAIS, O.; SOWLATI, T. Development of a decision support tool for optimizing the short-term logistics of forest-based biomass. **Applied Energy**, v. 216, p. 662-677, 2018.

MF Rural. Disponível em: <<http://www.mfrural.com.br>>.

MORAIS, M. R.; SEYE, O.; FREITAS, K. T. de; RODRIGUES, M.; SANTOS, E. C. S. dos; SOUZA, R. C. R. Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 6., 2006, Campinas. **Anais...** Campinas, 2006. Disponível em:

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200019&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 12 de julho de 2019.

NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; SILVA, D. A. da; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F. M. Aproveitamento de resíduos vegetais para produção de briquetes. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 34, p. 22-30, 2014.

NIU, Y.; TAN, H.; HUI, S. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 52, p. 1-61, 2016.

NUNES, L. J. R.; CAUSER, T. P.; CIOLKOSZ, D. Biomass for energy: A review on supply chain management models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, 2020.

OLIVEIRA, Jofran Luiz de. **Potencial energético da gaseificação de resíduos da produção de café e eucalipto**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3559>>. Acesso em: 2 de novembro de 2018.

FIGUINELLI, A. L. M. T.; SCHAFFER, M. A.; BOATENG, A. A. Utilization of eucalyptus for electricity production in Brazil via fast pyrolysis: A techno-economic analysis. **Renewable Energy**, v. 119, p. 590-597, 2018.

PEDRAZZI, C.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. de; SANTOS MUGUET, M. C. dos; GOMIDE, J. L. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de polpas produzidas por novas sequências de branqueamento. **Revista Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 123-135, 2010.

PROSKURINA, S.; HEINIMÖ, J.; SCHIPFER, F.; VAKKILAINEN, E. Biomass for industrial applications: The role of torrefaction. **Renewable Energy**, n. 111, p. 265-274, 2017.

QUIRINO, W. F.; OLIVEIRA PINHA, I. V. de; OLIVEIRA MOREIRA, A. C. de; SOUZA, F. de; FILHO, M. T. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Revista Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 525-536, 2012.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. do; ANDRADE, A. P. A. de; ABREU, V. L. S.; SANTOS AZEVEDO, A. C. dos. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n.89, p.100-106, 2005.

SHABANI, N.; SOWLATI, T. A hybrid multi-stage stochastic programming-robust optimization model for maximizing the supply chain of a forest-based biomass power plant considering uncertainties. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3285-3293, 2016.

SILVA, A. G.; SANTOS, T. A. dos; FERREIRA BANDEIRA, M. L. S. de; OLIVEIRA, P. F. de. Estudo do processo de torrefação de resíduos de biomassas para fins energéticos. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 45, p. 86-99, 2017.

SILVA MIRANDA, M. A. da; DEUS RIBEIRO, G. B. de; VALVERDE, S. R.; ISBAEX, C. Eucalyptus sp. woodchip potential for industrial thermal energy production. **Revista Árvore**, v. 41, n.6, 2017.

SILVA OLIVEIRA, J. T.; HELLMEISTER, J. C.; FILHO, M. T. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

SIMÕES, J. W.; COELHO, A. S. R.; AMARAL MELLO, H. do; COUTO, H. T. Z. do. Crescimento e produção de madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 20, p. 77-97, 1980.

SWITENBANK, J.; CHEN, Q.; ZHANG, X.; SHARIFI, V.; POURKASHANIAN, M. Wood would burn. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 999-1007, 2011.

CAPÍTULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A biomassa é uma alternativa sustentável e renovável de energia que está sendo cada vez mais reconhecida no mercado brasileiro. No capítulo 1 foi mostrado que a produção de biomassa sólida é oriunda de atividades agrícolas e florestais, onde são gerados resíduos, e também do plantio de árvores destinadas à geração de energia, como no caso da cultura de eucalipto. Ademais, as propriedades energéticas devem ser consideradas, como teor de umidade, densidade, poder calorífico e teores de carbono fixo, de cinzas e de materiais voláteis, já que servem como indicadores de qualidade para combustão.

A partir da análise do mercado de biomassa, no capítulo 2, observou-se que existe maior produção de biomassa de bagaço de cana, de lenha e de floresta de eucalipto e a floresta de pinus. Todavia, existem poucos fornecedores de bagaço de cana, já que este resíduo é utilizado em sua maior parte na própria usina produtora de etanol e de açúcar para geração de energia. Entre os materiais analisados, os que possuem maior número de fornecedores no estado foram a lenha, o cavaco e a floresta de eucalipto. Além disso, observou-se que os maiores demandantes das biomassas analisadas, como o cavaco, lenha, floresta, carvão vegetal, bagaço de cana, casca de arroz e serragem são utilizados para produção de energia nas indústrias de papel e celulose, siderurgia, beneficiamento de arroz, cerâmica, moveleira, alimentos e bebidas. O briquete, por ser produzido em baixa escala, ainda tem maior demanda pelo comércio. Em relação à análise energética, os materiais que apresentaram mais vantagens para serem utilizados para queima foram: o carvão vegetal, a madeira, o briquete, o cavaco e a lenha de eucalipto e o cavaco de pinus.

O capítulo 3 analisou o custo de biomassa para oferta na Região Metropolitana de Sorocaba (RMS). A partir da análise do impacto do custo de transporte, verificou-se que, para um raio de até 300 km de distância, o frete teve maior impacto no custo do cavaco, da lenha e da tora de eucalipto. Analisando-se o custo de energia, onde foi considerado o custo do frete realizado pelo fornecedor e também pelo contrato de serviço de uma transportadora, concluiu-se que é viável de serem utilizados o cavaco ofertado a um raio de 200 km e de 250 km (neste caso com o serviço de frete realizado pelo fornecedor) e a tora a um raio de 250 km.

Um dos fatores que foram limitantes neste trabalho foi a utilização de dados bibliográficos em relação à caracterização energética das biomassas. Foi dado como prioridade a realização do estudo de mercado e viabilidade econômica, que é o foco desta dissertação.

Outro fator que foi limitante para obtenção de resultados mais precisos se refere à falta de informações em relação aos dados de demanda no capítulo 2 e também em relação à quantidade ofertada de todas as biomassas no capítulo 3. Isto ocorreu, pois muitos fornecedores não sabiam dar estas informações ou as consideraram confidenciais.

Como propostas para trabalhos futuros, podem-se elencar:

- a) Viabilidade econômica de implementação de uma briquetadeira e/ou um picador de resíduos em indústrias;
- b) Viabilidade econômica de implementação de uma caldeira de biomassa em indústrias para geração de energia elétrica a fim de reduzir o consumo e o custo com a energia fornecida pela concessionária;
- c) Estudo da quantidade de biomassa para realização de estoque em indústrias.