



**ANÁLISE DO MERCADO BRASILEIRO DE CARVÃO  
VEGETAL**

**JULIANA BALDAN COSTA NEVES ARAÚJO**

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ANÁLISE DO MERCADO BRASILEIRO DE CARVÃO  
VEGETAL**

**JULIANA BALDAN COSTA NEVES ARAÚJO**

**ORIENTADOR: Dr. Álvaro Nogueira de Souza**

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**BRASÍLIA – DF, 16 DE DEZEMBRO DE 2021.**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

## **ANÁLISE DO MERCADO BRASILEIRO DE CARVÃO VEGETAL**

**JULIANA BALDAN COSTA NEVES ARAÚJO**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM CIÊNCIAS FLORESTAIS.

APROVADA POR:

---

Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB;  
Orientador)

---

Prof. Dr. Éder Pereira Miguel (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB)

---

Prof. Dr. Alexandre Nascimento de Almeida (Faculdade UnB – Planaltina FUP/UnB)

---

Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior (Departamento de Engenharia de Energias Renováveis - DEER, Universidade Federal da Paraíba - UFPB)

BRASÍLIA – DF, 16 DE DEZEMBRO DE 2021.

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

BA663a Baldan Costa Neves Araújo, Juliana  
ANÁLISE DO MERCADO BRASILEIRO DE CARVÃO VEGETAL /  
Juliana Baldan Costa Neves Araújo; orientador Álvaro  
Nogueira de Souza. -- Brasília, 2021.  
176 p.

Tese (Doutorado - Doutorado em Ciências Florestais) --  
Universidade de Brasília, 2021.

1. Energia Renovável. 2. Biomassa Florestal. 3. Carvão  
Vegetal. 4. Mercado. I. Nogueira de Souza, Álvaro, orient.  
II. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, J. B. C. N. (2021). Análise do Mercado Brasileiro de Carvão Vegetal. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.TD-. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 176 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Juliana Baldan Costa Neves Araújo

TÍTULO: Análise do Mercado Brasileiro de Carvão Vegetal

GRAU: Doutorado

ANO: 2021

É concedido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

## AGRADECIMENTOS

À Deus toda honra e toda Glória.

À minha família, meu esposo Bira e filhos PA e Theo, obrigada pelos momentos juntos, por compreenderem meus momentos de afastamento e sempre me motivarem a continuar seguindo meu sonho. Aos meus pais e meu irmão, obrigada por apoiarem minhas escolhas e por nunca duvidarem de mim. Aos meus sogros, cunhados e sobrinhos, obrigado pelos momentos em família. Amo vocês.

Aos meus avós, Pedro (*in memoriam*), Zezé, Renato (*in memoriam*) e Nena (*in memoriam*), obrigada por serem meus maiores exemplos e apoio.

Ao meu orientador Álvaro e professora Máisa, grandes incentivadores e apoiadores. Obrigada pelo suporte nos momentos de fraqueza e dúvida, pelas palavras de ânimo e incentivo, pelo aprendizado (pessoal e profissional) e pela inspiração profissional que vocês são para mim.

Aos meus amigos “FRIENDS”, “Tá Puxado!”, Mari, Paixão e Fabiane, “Sem limites”, “Os sobreviventes” e à todos que de certa forma me acompanharam nessa trajetória, muito obrigada pelos empurrões, pelas palavras de incentivo, pelas risadas e pelos bons momentos juntos.

Aos amigos Ilvan e Máisa que são parte de mim, parte da minha carreira e parte dessa pesquisa, a minha admiração e gratidão eterna. Aos amigos, Fernanda, Lucas, Fabi, Jonas e todos os colegas de departamento, obrigada pelo companheirismo, desabafos, cafés e momentos de aprendizado juntos.

Aos professores do departamento de Engenharia Florestal da UnB, dedico essa conquista. Obrigada por tudo que me ensinaram em todos esses anos juntos, tenho muito orgulho em ser fruto dessa Universidade.

Ao pesquisador Felipe Ribeiro - EMBRAPA, pelos ensinamentos e oportunidades.

À Capes pelo apoio financeiro.

*“Porque para Deus nada é impossível”*

Lc 1:37

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE SIGLAS .....	xiv
RESUMO GERAL.....	17
GENERAL ABSTRACT .....	18
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	19
2. PROBLEMA DE PESQUISA.....	21
3. QUESTÕES DE PESQUISA.....	21
4. OBJETIVO.....	21
4.1 Objetivo Geral.....	21
4.2 Objetivos Específicos.....	21
<b>Capítulo 1 . CONTEXTUALIZAÇÃO DO CENÁRIO ENERGÉTICO E A BIOMASSA FLORESTAL .....</b>	<b>23</b>
1. Introdução .....	23
2. Meio ambiente e a economia.....	24
3. Conferência das Partes e a energia.....	31
4. Energia .....	38
4.1 Energia Renovável .....	40
4.1.1 Biomassa .....	45
4.1.1.1 Biomassa Florestal .....	51
4.2 Contextualizando o cenário energético do Brasil.....	54
4.3 Políticas e incentivos para o setor de energia renovável.....	56
4.3.1 Principais políticas em vigor para o setor de energia renovável proveniente de biomassa no Brasil .....	56
4.3.2 Principais políticas e programas internacionais relacionados à energia renovável proveniente de biomassa.....	68

5. Considerações finais.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
<b>Capítulo 2 . MERCADO DE BIOMASSA FLORESTAL NO BRASIL.....</b>	<b>83</b>
1. Introdução .....	83
2. Material e métodos.....	84
3. Resultados e Discussão .....	85
3.1 What? – Qual produto será analisado? O que é biomassa florestal?.....	85
3.2 Where? – Onde ocorre a produção de biomassa florestal no Brasil?.....	89
3.3 Why? – Por que investir em biomassa florestal? Por que o Brasil deve atuar neste mercado?.....	92
3.4 When? – Quando foi o início da produção de biomassa florestal no Brasil?..	98
3.5 Who? – Principais players na produção de biomassa florestal no mundo? ..	101
3.6 How? – Quais os processos produtivos de biomassa florestal utilizados no Brasil? 108	
3.7 How much? – Quais custos envolvidos nos processos produtivos de biomassa florestal?.....	127
4. Considerações Finais.....	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
ANEXO I .....	140
<b>Capítulo 3 . ANÁLISE ECONOMETRICA DO MERCADO DE BIOMASSA FLORESTAL NO BRASIL – o caso do carvão vegetal no mercado brasileiro de energia .....</b>	<b>145</b>
1. Introdução .....	145
2. Material e Métodos .....	147
2.1 Fundamentação teórica - metodologia básica econométrica.....	147
2.2 Fundamentação analítica.....	150
2.2.1 Variáveis escolhidas.....	151
2.2.2 Modelos propostos .....	152

2.3 Banco de dados .....	153
3. Resultados e discussão .....	154
4. Conclusão .....	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	162
ANEXO II .....	165
<b>Capítulo 4 . MERCADO BRASILEIRO DA BIOMASSA FLORESTAL, CARVÃO VEGETAL E LENHA PARA ENERGIA ENTRE 1995 E 2019 .....</b>	<b>166</b>
1. Introdução .....	166
2. Material e Métodos .....	168
3. Resultados e discussão .....	170
4. Conclusão .....	174
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	174

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Curvas de Kuznets (Sterner; Coria, 2012).....	29
<b>Figura 2.</b> Linha do tempo dos locais e anos de realização da Conferência das Partes (Fonte: MMA, 2019).....	32
<b>Figura 3.</b> Oferta interna de energia no Brasil entre 1970 e 2018 (EPE, 2019). ....	43
<b>Figura 4.</b> Consumo final por fonte no Brasil, entre 1970 e 2018 (EPE, 2019). ....	44
<b>Figura 5.</b> Série histórica de produção de lenha, 1970 a 2018, em seus diversos usos (EPE, 2019). ....	44
<b>Figura 6.</b> Evolução da oferta de bioeletricidade e evolução na geração total, entre 1970 e 2014, no Brasil (EPE, 2016). ....	47
<b>Figura 7.</b> Oferta interna de energia elétrica no Brasil, por fonte (EPE, 2019).....	48
<b>Figura 8.</b> Crescimento do consumo de eletricidade no setor industrial (EPE, 2019).....	49
<b>Figura 9.</b> Participação das fontes na capacidade instalada (EPE, 2019).....	49
<b>Figura 10.</b> Processos de conversão energética da biomassa de madeira (VIDAL; HORA, 2011, modificado pela autora).....	52
<b>Figura 11.</b> Usinas termelétricas (biomassa florestal) existentes e planejadas no território brasileiro. Fonte: Webmap EPE, 2020. ....	91
<b>Figura 12.</b> Sistema Interligado Nacional (SIN), com linhas de transmissão existentes (linha contínua) e planejadas (linha tracejada) e diferentes tensões (representadas pelas cores). Fonte: Webmap EPE, 2020. ....	95
<b>Figura 13.</b> Valor de produção na silvicultura, em 2019, por tipo de produto (Elaborado pela autora. Fonte: IBGE, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, 2019).....	97
<b>Figura 14.</b> Oferta interna de energia elétrica por fonte (EPE, 2021). ....	101
<b>Figura 15.</b> Oferta total de energia (em ktep), entre 1990 e 2018, no mundo, Brasil, países integrantes da OECD nas Américas, Europa, Oceania e Ásia, e o continente Africano (elaborado pela autora; dados IEA, 2020).....	102
<b>Figura 16.</b> Expansão anual, entre 2001 e 2020, na participação das fontes renováveis na capacidade de geração elétrica mundial (adaptado de IRENA, 2021).....	103
<b>Figura 17.</b> Geração de energia utilizando fontes renováveis (hidrelétrica, eólica, solar, bioenergia e geotérmica), entre 2010 e 2018 (elaborado pela autora, dados: IRENA, 2020a).....	104
<b>Figura 18.</b> Geração de energias renováveis, em 2018 (adaptado de IRENA, 2020b)..	105

<b>Figura 19.</b> Processos de conversão energética da biomassa florestal (VIDAL; HORA, 2011). .....	110
<b>Figura 20.</b> Cadeia produtiva da biomassa florestal para produção de energia (elaborado pela autora, adaptado de Shabani et al., 2013; Lopes et al., 2018). .....	124
<b>Figura 21.</b> Estimativas dos coeficientes das variáveis $\ln P_{\text{Carv } n-1}$ , $\ln \text{GUSA}$ e $\ln \text{PIB}$ do modelo de demanda de carvão vegetal nos modelos antes (Model 1) e depois do stepwise (Model 2). .....	156
<b>Figura 22.</b> Representação gráfica do modelo estimado (Qd Carv em toneladas, $\ln \text{PIB}$ em reais e $\ln \text{GUSA}$ em toneladas). .....	157
<b>Figura 23.</b> Dispersão dos resíduos do modelo proposto de demanda de carvão vegetal. ....	158
<b>Figura 24.</b> Estimativas dos coeficientes das variáveis do modelo de oferta de carvão vegetal nos modelos antes (Model 1) e depois do stepwise (Model 2). .....	160
<b>Figura 25.</b> Dispersão dos resíduos do modelo proposto de oferta de carvão vegetal ..	161
<b>Figura 26.</b> Evolução do preço e quantidade produzida de carvão vegetal e lenha, e suas respectivas tendências lineares, entre 1995 e 2019. ....	171

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Diferenças entre os paradigmas na relação sociedade e meio ambiente. ....	27
<b>Tabela 2.</b> Classificação das fontes de biomassa no Brasil. ....	47
<b>Tabela 3.</b> Produção de energia primária. ....	50
<b>Tabela 4.</b> Finalidades dos subprogramas do Fundo do Clima. ....	57
<b>Tabela 5.</b> Principais programas de financiamento no Brasil relacionados com energia renovável. ....	64
<b>Tabela 6.</b> Metodologia 5W2H e questões utilizadas para análise do mercado de biomassa florestal. ....	85
<b>Tabela 7.</b> Classificação dos combustíveis obtidos via biomassa. ....	86
<b>Tabela 8.</b> Empreendimentos por tipo de combustível e potencial outorgado dos empreendimentos que compõem a matriz energética do Brasil por fonte de combustível. ....	90
<b>Tabela 9.</b> Produção (quantidade e valor) de lenha e carvão vegetal nas regiões brasileiras, em 2019. ....	98
<b>Tabela 10.</b> Perfil energético dos países destaques na geração de energia renovável no mundo, Brasil, Estados Unidos, Canadá e China. ....	105
<b>Tabela 11.</b> Últimas políticas, programas e legislação pertinentes ao setor energético na China, Estados Unidos, Brasil e Canadá, em 2019 e 2020. ....	106
<b>Tabela 12.</b> Principais características dos processos de conversão da biomassa florestal em produtos energéticos. ....	110
<b>Tabela 13.</b> Resumo dos principais sistemas de conversão de biomassa para energia. ....	113
<b>Tabela 14.</b> Exemplos de materiais energéticos provenientes de biomassa florestal, classificados de acordo com os processos termoquímicos. ....	123
<b>Tabela 15.</b> Fatores capazes de influenciar a disponibilidade de biomassa florestal para energia no mercado. ....	126
<b>Tabela 16.</b> Comparação dos custos de geração de eletricidade no Brasil. ....	127
<b>Tabela 17.</b> Custos de investimento, por Watt, para um projeto padrão de termelétrica abastecida com biomassa florestal (eucalipto) no Mato Grosso do Sul. ....	129
<b>Tabela 18.</b> Empreendimentos que utilizam combustíveis de origem florestal para geração de energia elétrica no Brasil. ....	140
<b>Tabela 19.</b> Estimativas da equação de demanda do carvão vegetal, no Brasil, entre 1995 e 2019. ....	154

<b>Tabela 20.</b> Estimativas dos parâmetros da equações de demanda de carvão vegetal no Brasil, entre 1995 e 2019, após regressão stepwise. ....	155
<b>Tabela 21.</b> Indicadores de inflação do modelo de oferta de carvão vegetal para energia no Brasil. ....	158
<b>Tabela 22.</b> Estimativas da equação de oferta de carvão vegetal no Brasil, entre 1995 e 2019.....	158
<b>Tabela 23.</b> Estimativas dos parâmetros da equações de oferta de carvão vegetal no Brasil, entre 1995 e 2019, após regressão stepwise. ....	159
<b>Tabela 24.</b> Dados utilizados para análise, referente a quantidades e aos preços do carvão vegetal e da lenha no Brasil entre 1995 e 2019.....	168
<b>Tabela 25.</b> Deslocamento das curvas de demanda e oferta relacionado com os possíveis sinais (+ sendo positivo e – representando o negativo) das taxas de crescimento do preço e da quantidade dos produtos analisados.....	170
<b>Tabela 26.</b> Taxas de crescimento da quantidade e preço do carvão vegetal e lenha no Brasil, entre 1995 e 2019. ....	172

## LISTA DE SIGLAS

- ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANP** – Agência do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- BEN** – Balanço Energético Nacional
- BfP** – Plataforma do Biofuturo
- BNDES** – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- CDE** – Contas de Desenvolvimento Energético
- COFINS** – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
- Conama** – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- COP** – Conferência das Partes
- CRS** – *Congressional Research Service*
- d** – Teste de Durbin- Watson
- EPA** – *United States Environmental Protection Agency*
- EPE** – Empresa de Pesquisas Energéticas
- FIV** – Indicador de Fator de Inflação de Variâncias
- FNMC** – Fundo Nacional sobre Mudança do Clima
- GEE** – Gases do Efeito Estufa
- GW** – Gigawatt
- GWh** – Gigawatt-hora
- IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICMS** – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
- IEA** – *International Energy Agency*
- IEMA** – Instituto de Energia e Meio Ambiente
- INOVAGRO** – Programa de Incentivo a Inovação Tecnológica na Agricultura
- IPCA** – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
- IRENA** – *International Renewable Energy Agency*
- Ktep** – Kilotoneladas equivalentes de petróleo
- kW** – Kilowatt
- LCFS** - *Low Carbon Fuel Standard*
- LULUCF** – *Reforestation and Aforestation* – modalidade de *Land Use, Land-Use Change and Forestry*
- MDL** – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
- MMA** – Ministério do Meio Ambiente

**MME** – Ministério de Minas e Energia

**MQO** – Método dos Mínimos Quadrados Ordinários

**MW** – Megawatt

**MWh** – Megawatt-hora

**NAMA** – Ações de Mitigação Nacionalmente Aprimoradas

**NDC** – Contribuições Nacionalmente Determinadas

**ODS** – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

**OECD** – *Organization for Economic Co-operation and Development*

**ONU** – Organização das Nações Unidas

**PAISS** – Plano Conjunto de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico

**PASS** – Programa de Apoio ao Setor Sucroalcooleiro

**PEVS** – Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura

**PIB** – Produto Interno Bruto

**PIS** – Programa de Integração Social

**PNE** – Plano Nacional de Energia

**PNMC** – Política Nacional sobre Mudança do Clima

**PROCONVE** – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

**Proinfra** – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

**PRORENOVA** – Programa de Apoio à Renovação e Implantação de Novos Canaviais

**RCE** – Reduções Certificadas em Emissões

**RED** – Diretiva de Energias Renováveis

**REIDI** – Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura

**REN21** – *Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century*

**RenovaBio** – Política Nacional de Biocombustíveis

**RES** – *Renewable Energy System*

**RFF** – *Resources for the Future*

**RFS** – *Renewable Fuel Standard*

**SIN** – Sistema Interligado Nacional

**SUDAM** – Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia

**SUDENE** – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

**Tep** – Tonelada equivalente de petróleo

**Ton** – Tonelada

**TUSD** – Tarifa de Utilização de Serviços de Distribuição

**TUST** – Tarifa de Utilização de Serviços de Transmissão

**TWh** – Terawatt-hora

**UNFCCC** – Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

**W** – Watt

## RESUMO GERAL

Os combustíveis fósseis ainda são a principal fonte para produção de energia elétrica na matriz energética mundial, mas surgem novas tendências quanto ao uso de fontes alternativas e sustentáveis ao longo prazo. Nesse contexto, as fontes de energia renováveis passam a ser promovidas como possibilidade na construção de estratégias desenvolvimentistas e na mitigação da independência e segurança energética das nações. Diante do exposto, a tese tem como objetivo principal analisar o mercado de carvão vegetal como fonte de energia renovável no Brasil, assim como estudar as relações econométricas existentes entre as variáveis capazes de descrever a demanda e oferta do carvão, e analisar as tendências no mercado de lenha e carvão vegetal no setor energético. Constatou-se que as fontes de energia limpas, além de alavancar ações ambientais, são capazes de alinhar aspectos sociais, econômicos e acadêmicos, na busca pelo desenvolvimento sustentável. Diante da vocação florestal brasileira e da liderança mundial na utilização de recursos renováveis como insumo energético, destaca-se a importância de estudos capazes de analisar e fomentar o segmento florestal energético no Brasil. Ao analisar os processos produtivos da biomassa florestal foi possível verificar o quanto os processos e tecnologias evoluíram, de forma a atender as demandas do mercado, os gargalos produtivos e os aspectos ambientais. O modelo de demanda estruturado nesse estudo, apesar da quantidade limitada de variáveis, foi capaz de descrever parte do mercado do carvão vegetal no Brasil. Parte essa, referente ao ferro-gusa, seu principal consumidor e responsável por dinamizar o setor. A equação de oferta, mostrou contribuição do preço e salário para explicar o comportamento do insumo energético florestal. Por fim, as taxas de crescimento analisadas para carvão e lenha foram crescentes. Corroborando com a atual estruturação da matriz energética brasileira, que tem procurado adotar estratégias que busquem a maior segurança energética e diversificação da matriz, utilizando insumos sustentáveis e renováveis.

**Palavras-chave:** energia renovável, mercado de energia, biomassa florestal, carvão vegetal.

## GENERAL ABSTRACT

Fossil fuels are still the primary source for electricity production in the world energy matrix. Still, new trends are emerging regarding using alternative and sustainable sources in the long term. In this context, renewable energy sources are being promoted as a possibility in constructing development strategies and mitigating the energy independence and security of nations. Given the above, the main objective of the thesis is to analyze the charcoal market as a renewable energy source in Brazil, as well as to study the econometric relationships that exist between the variables capable of describing the demand and supply and of analyzing the trends in the energy market - firewood and charcoal. It was found that clean energy sources and leveraging environmental actions can align social, economic, and academic aspects in the search for sustainable development. Because of the Brazilian forestry vocation and the world leadership in using renewable resources as an energy input, the importance of studies capable of analyzing and promoting the energy forestry segment in Brazil is highlighted. By analyzing the productive processes of forest biomass, it was possible to verify how much the methods and technologies have evolved to meet market demands, production bottlenecks, and environmental aspects. Despite the limited number of variables, the demand model structured in this study was able to describe part of the charcoal market in Brazil. This part refers to pig iron, it's leading consumer and responsible for boosting the sector. The supply equation showed the contribution of price and salary to explain the behavior of forest energy input. Finally, the growth rates analyzed for charcoal and firewood were increasing. Corroborating the current structuring of the Brazilian energy matrix, which has sought to adopt strategies that seek greater energy security and diversification of the matrix, using sustainable and renewable inputs.

**Keywords:** renewable energy, energy market, forest biomass, charcoal.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O ar, a água e a energia, nos últimos anos, passaram a ser elementos cada vez mais essenciais para a evolução e a sobrevivência humana, como também o centro de assuntos polêmicos quando tratados na esfera conservacionista ambiental. Diante da mudança industrial e tecnológica, fomentada por disputas econômicas, a energia passou a ser um fator chave. Ao passo que a sociedade avança e suas demandas aumentam, aumenta também o montante de energia necessário para suprir essas demandas (TRAPP; RODRIGUES, 2016).

Com o aumento da consciência ambiental e socioeconômica, os governos e autoridades mundiais passaram a dar mais atenção a aspectos relacionados à poluição e a parâmetros que possam influenciar o fornecimento de energia. Dessa forma, a busca por fontes renováveis para geração de energia foi acelerada, a fim de reduzir as preocupações com os combustíveis fósseis tradicionais (NAZIR *et al.*, 2019). Por isso, políticas devem ser desenvolvidas para facilitar, estimular e desenvolver o setor de energia renovável mundial (ABOAGYE *et al.*, 2021).

Nessa direção, as fontes de energia renovável, ou energia limpa, surgem como uma alternativa por serem capazes de se regenerar em um determinado tempo, tornando-se, assim, inesgotáveis. Biomassa, energia solar, energia eólica, energia hidráulica, entre outras, são alguns exemplos (LIMA; SOUZA, 2015).

Atualmente, os combustíveis fósseis são a principal fonte para produção de energia elétrica no mundo (ABOAGYE *et al.*, 2021). Entretanto, existe uma tendência mundial, seja em países desenvolvidos ou em desenvolvimento, de promoção do uso de fontes de energias alternativas renováveis de modo que tenham maior participação nas matrizes energéticas. Dessa forma, reduz-se o uso de derivados do petróleo, assim como a dependência energética de países exportadores de petróleo. Além disso, contribui-se para questões socioambientais (CORTEZ *et al.*, 2014).

O Brasil apresenta um histórico energético vantajoso às fontes de energia renovável, ao possuir uma matriz energética pautada em fontes renováveis. Entretanto, apesar de existirem programas de incentivo a expansão de uso dessas fontes de energia, o futuro ainda parece ser incerto. O fortalecimento das cadeias econômicas de petróleo e gás

natural, podem ser aspectos capazes de influenciar o potencial de crescimentos das fontes de energia renováveis (PORTO *et al.*, 2013). Ademais, o Brasil está em uma posição de supremacia no cenário de fontes de energia limpa, em que 39,4% da matriz energética brasileira é composta por fontes de energia renováveis contra a média mundial de 13,8% (PEREIRA *et al.*, 2012; MME, 2015).

A biomassa é considerada um recurso energético renovável e que pode ser utilizado para a produção de energia térmica e elétrica, assim como na produção de biocombustíveis através de processos de conversão energética. Nesse contexto, tem-se a biomassa florestal que engloba a madeira, carvão vegetal, folhas, ramos, serapilheira, raízes, frutos, extrativos e resíduos (como o licor negro proveniente das empresas florestais do setor de papel e celulose). O uso desses recursos na geração de energia tem sido impulsionado e beneficiado pelo incentivo em políticas públicas e devido ao aumento do preço dos combustíveis fósseis (PENA-VERGARA *et al.*, 2022).

A utilização de matéria prima florestal como fonte de energia é uma alternativa que faz parte da vocação produtiva do país, uma vez que contribui expressivamente para o PIB brasileiro (LAZARETTI, 2015). Brandão *et al.* (2021) afirmam que a biomassa florestal é uma oportunidade para o desenvolvimento de uma matriz energética ambientalmente correta no Brasil, além de colaborar para melhoria da qualidade de vida de comunidades locais. Ademais, os autores destacam a importância de estudos na Amazônia, onde, ao se utilizar sistemas energéticos movidos por biomassa florestal, podem ser promovidos impactos mundiais positivos, contribuindo especialmente para o Acordo de Paris, de modo a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e evitar o avanço do desmatamento.

Apesar de ainda ser reduzida a utilização da biomassa florestal como fonte de energia, esse recurso, assim como seus resíduos, pode representar um potencial a ser explorado no Brasil e no mundo. Conhecer a dinâmica desse mercado, como funciona a demanda por matéria-prima e seus fatores determinantes, torna-se importante para o fomento de fontes alternativas de energia. E, conforme Silva (2015), compreender a matriz energética por meio de dados econômicos, possibilita que o planejamento do setor possa ser adequado aos interesses da sociedade e seja base para políticas e estratégias setoriais. De modo que custos e impactos ambientais sejam minimizados.

Portanto, torna-se primordial o estudo de fontes alternativas de energia, além das tradicionais não renováveis e da energia hidrelétrica, para que diante de eventualidades ou em resposta ao aumento rápido da demanda por energia, o setor seja capaz de responder a tais alertas e tenha soluções economicamente viáveis.

## 2. PROBLEMA DE PESQUISA

*Estruturação do mercado e relações econométricas existentes entre oferta e demanda de biomassa florestal, especificamente do carvão vegetal, no mercado de energia.*

## 3. QUESTÕES DE PESQUISA

- a. Como está estruturado o mercado de biomassa florestal para energia no Brasil?
- b. Quais as potencialidades e os gargalos do mercado de biomassa florestal para energia no Brasil?
- c. Quais variáveis econômicas influenciam o mercado de carvão vegetal para geração de energia?
- d. Quais modelos econométricos são capazes de explicar o comportamento do carvão vegetal no mercado de energia?
- e. Como se comporta a tendência nos preços e nas quantidades produzidas do carvão vegetal e lenha para energia?

## 4. OBJETIVO

### 4.1 Objetivo Geral

Analisar o mercado de biomassa florestal como fonte de energia renovável no Brasil, assim como estudar as relações econométricas existentes entre as variáveis capazes de descrever a demanda e oferta de carvão vegetal e analisar as tendências no mercado de lenha e carvão vegetal no setor energético.

### 4.2 Objetivos Específicos

Com a tese, especificamente, busca-se:

- coletar dados econômicos sobre as fontes de energia renováveis disponíveis no Brasil;
- coletar dados econômicos, tecnológicos e mercadológicos sobre a biomassa florestal para finalidade energética;
- estimar modelo capaz de estimar a demanda e a oferta do carvão vegetal e seus determinantes;
- analisar o comportamento do preço e da quantidade produzida de carvão vegetal e da lenha para energia no Brasil.

## **Capítulo 1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO CENÁRIO ENERGÉTICO E A BIOMASSA FLORESTAL**

### **1. Introdução**

As mudanças nas interações entre seres humanos e o meio ambiente, aliadas às externalidades negativas desse relacionamento, bem como o aumento dos estudos sobre o aquecimento global e a mudanças climáticas, são foco de análises e discussões desde 1990. Sabendo-se que as emissões de gases do efeito estufa (GEE) são resultados primário da combustão de combustíveis fósseis, a temática consumo e produção energética se tornou centro dos debates climáticos (BÖLÜK; MERT, 2014).

As discussões acerca das mudanças climáticas e as questões ambientais que acarretam, ao serem somadas a temáticas energéticas como, independência e segurança energética, fomentaram a necessidade do desenvolvimento de tecnologias limpas com o intuito de fornecer energia elétrica – as fontes alternativas. Essas tecnologias apresentam uma característica em comum, pois utilizam a energia primária (forma de energia disponível na natureza antes de ser transformada ou convertida) renovável como fonte, fruto dos ciclos contínuos em tempo relativamente curto e, estão, de certa forma, presentes na natureza de maneira ilimitada. Nesse contexto, a capacidade de renovação destas fontes de energia tornou-se destaque (FGV Energia, 2015).

De acordo com a *U.S. Energy Information Administration* (2019), as fontes de energia renováveis, ou seja, fontes que são naturalmente reestabelecidas e conceitualmente inesgotáveis, incluem os recursos provenientes da biomassa, da hidrografia, do sol, do vento e dos oceanos. Segundo Cihat *et al.* (2021), as energias renováveis possuem um importante papel na busca por um desenvolvimento global mais sustentável, pelo fato de se conectarem não somente com o ao aspecto ambiental, mas também com o social e o econômico. Os autores defendem que, ao investir em sistemas de geração energética renovável, é esperada uma redução no uso de energias convencionais, como óleo, carvão, gás natural e petróleo. Isso, conseqüentemente aumenta a independência energética do país em relação à importação de energia, além de contribuir para um maior acesso da população a demais fontes de energia, uma vez que existem regiões sem acesso à eletricidade, o que coopera para o desenvolvimento e o fomento das atividades

econômicas. Dessa forma, utilizar fontes renováveis, assim como financiá-las e estimular seu uso, torna-se importante para incentivar a economia e o desenvolvimento do regional e nacional.

As fontes de energia renováveis, são capazes de integrar diversos aspectos relevantes para a construção de um futuro sustentável, como melhoria no acesso à energia, qualidade do ar e metas climáticas ao utilizar técnicas de baixa emissão de carbono - incluindo captura, utilização e armazenamento do carbono atmosférico. Nessa importante construção, a participação das energias renováveis na matriz energética mundial deve aumentar significativamente até 2040 (IEA, 2018). Dessa forma, as fontes renováveis tornam-se oportunas, pois possibilitam que as metas previstas em acordos internacionais, como o Acordo de Paris, sejam atingidas ao utilizar insumos e estratégias descarbonizantes no setor energético (REN21, 2017).

O Brasil, possui matriz energética majoritariamente renovável, tendo sido construída principalmente com foco em geração hidráulica, com o passar dos foram incluídas as fontes térmicas fósseis e a nuclear. Diante de maior engajamento acerca de processos e desenvolvimento sustentável - pauta da agenda política de vários países -, aliado a entraves no abastecimento hídrico nos últimos anos, a matriz brasileira passa por um período de necessidade de renovação e diversificação. Dessa forma, a diversificação e transformação do *mix* energético no país, se torna ainda mais relevante (FGV Energia, 2015).

Percebe-se, portanto, que a temática energética está presente em diversas esferas da sociedade - política, economia e ciência. Nesse sentido, torna-se importante analisar estratégias, cenários e novas possibilidades desse universo. Diante do exposto, este capítulo da tese visa apresentar uma contextualização sobre o cenário energético e o uso da biomassa florestal para energia.

## 2. Meio ambiente e a economia

A relação entre seres humanos e o meio ambiente desperta o interesse de estudiosos há certo tempo. O modo como as esferas ambientais, sociais, políticas se integram afeta, de certa forma, o desenvolvimento e a organização social. A origem dessa discussão pode ter surgido nos anos 1950, nos Estados Unidos, com o estabelecimento da organização

“*Resources for the Future*” - RFF. Esta organização independente de pesquisa buscava estudar e aplicar a análise econômica em diversos problemas ambientais (PEARCE, 2002).

As políticas ambientais e os conceitos de custos e benefício ambientais, bem como as ideias de preferências, disposição a pagar e o conceito moderno de bem-estar econômico, foram contextualizados, em meados do século XIX e entre 1930 e 1940, por meio dos trabalhos de Dupuit, Hiccks, Kaldor e outros autores. Apesar dos diversos estudos sobre oferta de minerais, energia e recursos agrícolas durante a Segunda Guerra Mundial, foi o ano de 1962 que se sobressaiu nos estudos relacionados à economia ambiental. O trabalho de Rachel Carson – Primavera Silenciosa – marcou a história. Nesse trabalho, a autora alertou sobre os efeitos do agroquímicos no meio ambiente (PEARCE, 2002).

Outro estudo que se destacou na trajetória da ciência relativa ao meio ambiente e economia, foi a Tragédia dos Comuns, escrito pelo ecologista Hardim, em 1968. Apesar das diversas críticas e teorias contrárias aos conceitos apresentados, Malthus foi um dos precursores nos estudos que relacionam aspectos ecológicos e seus limites econômicos. Em meio a suas teorias, Malthus foi capaz de interligar a noção de escassez com aumento dos custos marginais de extração e uso de algum recurso natural (PEARCE, 2002).

Em 1966, Boulding publicou seu artigo intitulado “*The Economics of the Coming Spaceship Earth*”, em que traz conceitos de capacidade de uso, sistemas, externalidades e sustentabilidade. O trabalho de Boulding é utilizado por muitos pesquisadores como base para estudos modernos sobre sustentabilidade. Segundo Boulding (1966), seria possível analisar o contexto econômico e de uso de recursos por meio de dois cenários: a economia *cowboy* e a economia astronauta. Para o autor, essas duas ideias se diferenciam basicamente pelo modo de consumo de recursos.

Na economia *cowboy*, por exemplo, o consumo de recursos e de produção é considerado boa atividade, e o sucesso da economia estaria relacionado ao modo como esses recursos são transformados em fatores de produção. Seria possível, desta forma, distinguir parte da produção derivada de recursos finitos e infinitos. Enquanto na economia do astronauta, o rendimento deve ser analisado de forma diferente. Nesse cenário, o sucesso da economia não seria mensurado em função da produção e do

consumo, mas sim com base na qualidade da natureza, na complexidade dos estoques de recursos, incluindo a qualidade de vida dos humanos inseridos nesse sistema (BOULDING, 1966).

Nos anos 1970, o meio ambiente, que antes era visto como entrave para desenvolvimento, passa a ser encarado como necessário para garantir e preservar a sustentabilidade futura (RIBEIRO, 2016). Colby, em seu artigo publicado em 1991, aborda os diferentes paradigmas envolvidos nessa relação entre sociedade e meio ambiente, bem como essa relação altera o modo em que a gestão do meio ambiente é entendida. Segundo o autor, o manejo e a gestão dos recursos ambientais não mais estavam presos à dicotomia entre economistas de fronteira e ecologismo radical. Além disso, existem, agora, a proteção ambiental, a gestão de recursos e o eco desenvolvimento, conforme Tabela 1. Cada um desses paradigmas, observa as evidências, os problemas e as interações, prescrevendo diferentes soluções, estratégias, tecnologias e valores.

**Tabela 1.** Diferenças entre os paradigmas na relação sociedade e meio ambiente.

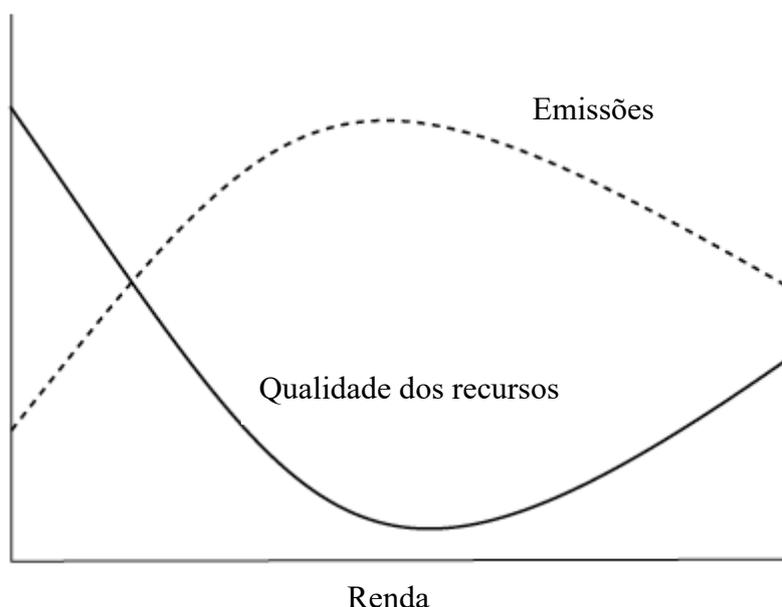
<b>Paradigma</b>	<b>Economia de fronteira</b>	<b>Proteção ambiental</b>	<b>Gestão de recursos</b>	<b>Eco-desenvolvimento</b>	<b>Ecologismo radical</b>
<b>dimensão</b>					
Princípio central	Progresso – infinito crescimento e prosperidade econômica	“tradeoffs” - ecologia x crescimento	Sustentabilidade – importante para crescimento verde	Co-desenvolvimento entre humanos e meio ambiente	“Eco-topia” – anti-crescimento, harmonia restrita com a natureza
Relação entre homem-natureza	Antropocentrismo muito forte	Antropocentrismo forte	Antropocentrismo modificado	Ecocêntrico	Biocêntrico
Ameaças principais	Fome, pobreza, doenças, desastres naturais	Impactos na saúde devido a poluição, espécies ameaçadas	Degradação de recursos, pobreza, crescimento populacional	Incerteza ecológica, mudanças globais	Colapso de ecossistemas, desastres “não naturais”
Temas principais	Acesso direto e exploração infinita de recursos naturais	Ecologia vista como externalidade econômica	Interdependência entre economia e ecologia	Simbiose entre economia, ecologia e social	Volta a natureza
Estratégias e tecnologias para gestão	Agricultura industrial; monoculturas; energia fóssil	Políticas de comando e controle; regulação	Manejo de risco, eficiência energética; práticas	Gestão de risco; eco-tecnologias; energia renovável; agroflorestas;	Redução populacional; redução de escola do

<b>Paradigma dimensão</b>	<b>Economia de fronteira</b>	<b>Proteção ambiental</b>	<b>Gestão de recursos</b>	<b>Eco-desenvolvimento</b>	<b>Ecologismo radical</b>
		do mercado; proteção da saúde humana	conservacionistas; restauração ecológica; estabilização populacional	agricultura de baixo impacto; reservas florestais extrativistas	mercado; baixa tecnologia
Modelagem e estratégias de planejamento	Neoclássica ou marxista; sistemas econômicos fechados; maximização do valor presente líquido; análises de custo e benefício	Neoclássica modificada; impactos ambientais; equação de disposição a pagar; princípios de compensação	Neoclássica modificada; inclusão do capital natural; monitoramento do ecossistema e saúde social; ligação entre população, pobreza e meio ambiente	Economia ecológica; integração entre social, econômico e meio ambiente; igualdade na distribuição de terras	Planejamento bio-regional; sistemas multiculturais; conservação da cultura e diversidade biológica; autonomia

Fonte: Adaptado de Colby, 1991.

Colby (1991) destaca que os paradigmas não devem ser analisados como cenários diferentes de gestão. No entanto, segundo Colby, existe uma fluidez entre os conceitos e, conforme as realidades em questão, esses modos de gestão serão utilizados. Percebe-se, portanto, que o modo como o meio ambiente é observado influencia diretamente as alternativas de gestão e as possíveis relações entre seres humanos e o ambiente em que estão inseridos. Assim, geram-se diversos modos de administração, consumo e demanda por insumos oriundos do meio.

Os tomadores de decisão de uma sociedade podem influenciar o modo como a economia e meio ambiente se desenvolvem ao utilizar instrumentos políticos. Para tanto, é importante compreender as variáveis e processos fundamentais do desenvolvimento econômico (STERNER; CORIA, 2012). Nesse cenário, as curvas de Kuznets (EKC) podem ser utilizadas para auxiliar na compreensão do desenvolvimento e da composição econômica ao longo dos anos associados às alterações e modificações ambientais (BÖLÜK; MERT, 2014; STERNER; CORIA, 2012). As curvas ambientais de Kuznets traduzem a ideia de que o crescimento econômico teria um impacto no comportamento das emissões (e, conseqüentemente, na poluição), como também na qualidade dos recursos disponíveis, conforme Figura 1 a seguir.



**Figura 1.** Curvas de Kuznets (Sternier; Coria, 2012).

De acordo com essa teoria, nas fases iniciais de crescimento econômico inevitavelmente existe um aumento da poluição. Entretanto, com o aumento da renda, as

emissões atingem o pico e, posteriormente, começam a declinar. Enquanto a curva de qualidade dos recursos ecossistêmicos comporta-se de forma inversa, significando inicialmente deterioração para, em seguida, ocorrerem melhorias graduais (STERNER; CORIA, 2012).

Existem diversos fatores capazes de explicar esse comportamento das curvas de Kuznets, dentre eles os autores Sterner e Coria (2012), destacam o desenvolvimento de tecnologias, preços relativos. O autor Marrero (2010), por exemplo, destaca que as curvas de Kuznets são muito utilizadas em estudos que relacionam emissões de gases e atividades econômicas, mas estes acabam omitindo aspectos energéticos na análise.

Entretanto, a relação entre crescimento econômico e meio ambiente não necessariamente obedece à hipótese de Kuznets. Diversas funções podem ser capazes de explicar essa relação. A utilização de políticas, por exemplo, pode ser um fator capaz de alterar o comportamento dessas curvas.

Todavia, novas técnicas econométricas vêm sendo utilizadas para aprofundar os estudos entre crescimento econômico e meio ambiente, de modo a evidenciar que a hipótese de Kuznets seria improvável. Nesse cenário, surgiram outras teorias, como curso dos recursos, em que a abundância de recursos estaria relacionada a crescimento lento, risco de guerras e regimes políticos autocráticos (STERNER; CORIA, 2012).

No paradoxo entre crescimento e recursos, existe uma relação negativa entre essas variáveis. Os autores, Sterner e Coria (2012), argumentam que este paradoxo pode estar ainda mais presente em situações em que os recursos são controlados ou defendidos por somente uma fração da sociedade ou grupo.

A economia, portanto, como ciência que procura gerir a escassez de recursos, torna-se importante nesse cenário para administrar os recursos escassos, com o objetivo de produzir bens e serviços para a sociedade. Adicionalmente, enquanto economia busca o equilíbrio entre escassez de recursos produzidos e geridos pelo homem, a economia do meio ambiente preocupa-se com a gestão e administração de recursos (renováveis ou não) que eventualmente possam se tornar escassos (RIBEIRO, 2016).

Percebe-se, dessa forma, que a discussão sobre a relação entre economia e meio ambiente torna-se complexa e, ao longo dos anos, surgem novas teorias e modos de compreensão alternativos sobre esse tema.

### 3. Conferência das Partes e a energia

As atividades humanas, sendo políticas, sociais ou econômicas, causam impactos no meio ambiente. Das atividades mais primitivas do ser humano no período Paleolítico, seguidas da revolução agrícola e da revolução industrial até os dias atuais, esses impactos, que antes eram menores e mais locais, passaram a atingir uma escala global. Alterando, portanto, processos e ciclos ambientais. Algumas dessas atividades, tais como o aumento do número de automotores, de termelétricas, de indústrias e da queima de florestas, agravaram e aceleraram o processo do efeito estufa, por exemplo. Diante desse contexto, as Nações Unidas passaram a realizar conferências internacionais visando elaborar fundamentos teóricos, metodologias e instrumentos políticos e mercadológicos acerca do meio ambiente (ARAÚJO; CARVALHO, 2012).

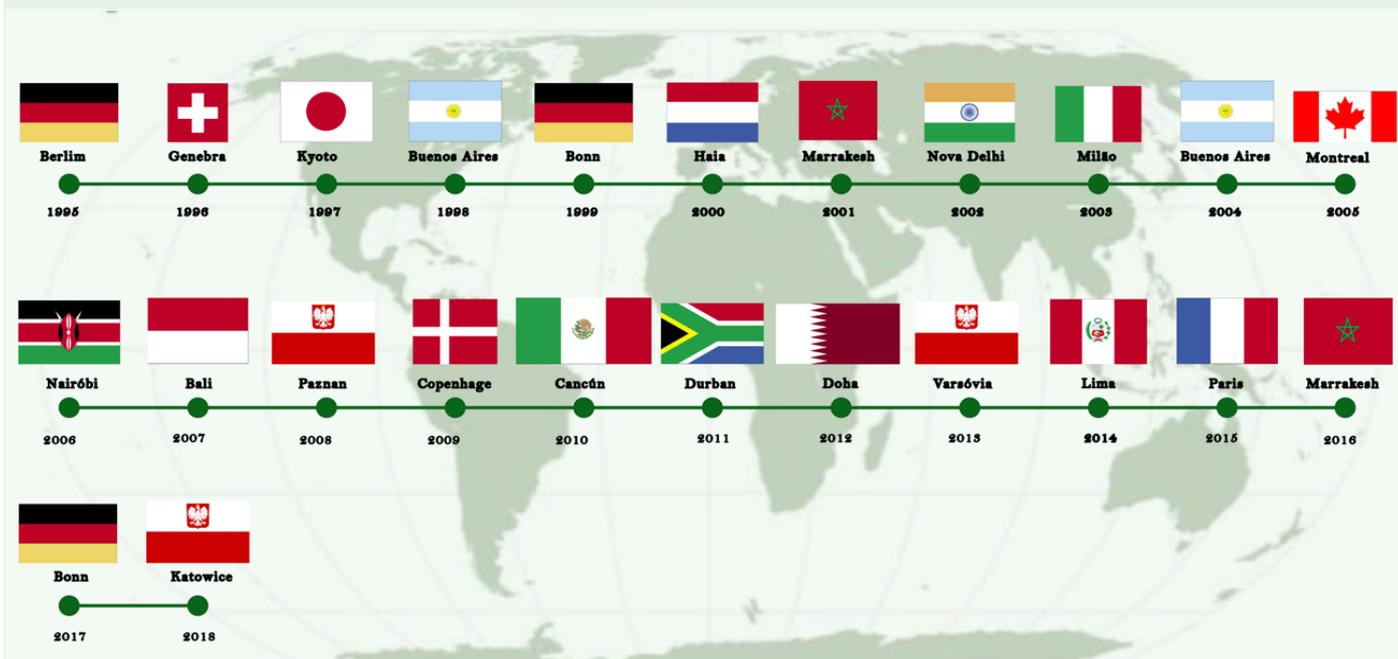
A Conferência das Partes (COP) é considerada instância suprema na Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), na qual os países integrantes reúnem-se anualmente em diferentes sedes (Figura 2), com os objetivos de: examinar periodicamente as obrigações e mecanismos estabelecidos pelas partes; promover e facilitar troca de informações sobre mudanças climáticas entre as partes integrantes; aperfeiçoar, promover e orientar métodos e inventários relacionados à emissões de gases do efeito estufa; examinar e elaborar relatórios periódicos sobre as ações da convenção (MMA, 2019). Conceitualmente, conforme o art. 2, do Decreto n° 7.030 de 2009 que trata da Convenção de Viena, o termo “Parte” refere-se ao Estado que aceitou<sup>1</sup> os termos do tratado<sup>2</sup> que está em vigor.

---

<sup>1</sup> Segundo o Decreto n° 7.030 de dezembro de 2009, aceitação refere-se ao ato internacional pelo qual o Estado estabelece um plano internacional o seu consentimento de participação e atuação.

<sup>2</sup> Segundo o Decreto n° 7.030 de dezembro de 2009, tratado refere-se ao acordo internacional redigido entre as Partes e regido pelo direito internacional.

## Linha do Tempo das Realizações das COPS



**Figura 2.** Linha do tempo dos locais e anos de realização da Conferência das Partes (Fonte: MMA, 2019).

A trajetória das negociações internacionais sobre mudanças climáticas, é longa, complexa e ainda em construção. Seu marco inicial pode ser considerado em 1992, quando a UNFCC estabeleceu metas para proteção climática e desenvolvimento sustentável, bem como criou o meio de negociações internacionais para estabelecimentos de metas e medidas sobre o tema. Marcando essa nova maneira de negociar e desenvolver metodologias focadas no clima, em 1997, as Partes concordaram com os termos do Protocolo de Kyoto, em que foram estabelecidas metas de emissões a países industrializados para o período de 2008-2012. As negociações sobre o Protocolo duraram anos, na COP de 2001, em Marrakesh, diversos países iniciariam o processo de ratificação do Protocolo, e, em 2005, este passou a entrar em vigor, com 55 países de acordo com os requerimentos. Esse longo processo de negociações e desistências na ratificação do acordo, demonstra a incerteza na conjuntura da mudança climática e suas complicações (tanto ecológicas, quanto tecnológicas e econômicas, uma vez que a distribuição desses custos entre as Partes é alvo de discussões) (STERNER; CORIA, 2012).

Realizada em Paris, em novembro de 2015, a COP 21 foi importante em decorrência da formulação do Acordo de Paris. O acordo tornou-se um marco responsável por firmar

uma nova dinâmica no combate às mudanças climáticas ao adotar um regime de cooperação entre as partes em busca de economias de baixo carbono e resilientes às mudanças climáticas (GHEZLOUN *et al.*, 2017).

Os objetivos do Acordo de Paris englobam três elementos: mitigação, adaptação e financiamento. Dessa forma, o acordo estabelece metas para adaptação mundial diante de um cenário de mudanças climáticas, de modo a procurar diminuir vulnerabilidades e otimizar a implementação de medidas mitigadoras. Ademais, o acordo prevê esforços para reduzir as emissões de gases do efeito estufa, possibilitando, em longo prazo, limitar o aumento da temperatura global e contribuir, assim, para o desenvolvimento sustentável e socioeconômico das partes envolvidas. No contexto de financiamento, o acordo estabelece que as responsabilidades financeiras se diferem entre os países participantes; podem, ainda, existir ações voluntárias de financiamento e apoio às partes que necessitem (IFDD, 2015).

Especificamente, o Acordo visa alcançar um importante objetivo no que se refere às políticas climáticas mundiais, visto que 195 países firmaram a responsabilidade em conter o aumento da temperatura global em 2°C, potencializando esforços para isso. Outrossim, cada país estabeleceu sua meta nacional de redução das emissões de gases do efeito estufa até 2030, respeitando as individualidades e situações socioeconômicas de cada país (BEL; TEIXIDÓ, 2020).

Os cenários referentes à relação entre energia e emissões de CO<sub>2</sub> demonstram uma tendência de pequeno aumento até 2040, diferente do que a comunidade científica acredita ser ideal para mitigar as questões sobre mudanças climáticas. Essa tendência oriunda das emissões projetadas apontando que ainda existem falhas coletivas ao lidar com as consequências ambientais do uso de energia para cumprir as metas ratificadas pelos países no Acordo de Paris e que, portanto, devem ser mais bem estudadas e aplicadas (IEA, 2018).

O Acordo de Paris foi ratificado pelo governo brasileiro em setembro de 2016, o qual firmou seu compromisso com as metas e, aprofundou os esforços e empenhos das estratégias brasileiras no combate às mudanças globais do clima. O país, de acordo com a NDC (Contribuições Nacionalmente Determinadas) entregue à UNFCC, apresentou como propostas a mitigação na emissão dos GEEs (com a meta de redução de 37%, em

relação aos níveis de 2005, até 2025; de 43% até 2030); zerar o desmatamento ilegal na Amazônia brasileira, até 2030; restaurar 12 milhões de hectares de floresta; atingir uma participação de 45% de energias renováveis na matriz energética do país; e aumentar a participação da bioenergia na matriz energética para aproximadamente 18% (OLIVEIRA; SILVA, 2019).

Em 2021, em Glasgow (Escócia) ocorreu a 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP26), com foco em discussões sobre as mudanças climáticas e medidas mitigatórias e adaptativas dos efeitos da ação humana sobre o clima. Neste contexto, a energia e a necessidade de acelerar a transição global para o uso de fontes limpas de energia, são pontos focais para as discussões e encaminhamentos sobre a temática.

Nesse contexto, foi anunciado durante a COP 26 a Declaração Global de Transição para Energia Limpa, onde 77 países se comprometem com o fim da utilização e de investimentos no carvão mineral, expansão do uso da energia limpa e, por fim, eliminar o uso do combustível fóssil até 2030 nas maiores economias e até 2040 nos demais países. Os países signatários da declaração visam contribuir para a transição acessível e sustentável economicamente, de forma a acelerar a transição energética mundial e atingir os objetivos do Acordo de Paris (GLOBAL COAL TO CLEAN POWER TRANSITION STATEMENT, 2021).

De forma relacionada ao setor energético, na COP 26 reconhece-se mais uma vez a necessidade de reforçar as responsabilidades dos países em ações sustentáveis do uso do solo, conservação, preservação, proteção, gestão sustentável e restauração das florestas. Afirmando que, tanto na esfera nacional quanto mundial, são necessárias intervenções transformadoras aliando os aspectos produtivos e de consumo, desenvolvimento de infraestrutura, financiamento e suporte aos pequenos proprietários e comunidades tradicionais que dependem da floresta e do meio ambiente para sua subsistência. Dessa forma, espera-se que através de programas e políticas públicas, promoção de capacidades de comunidades, desenvolvimento tecnológico sustentável da agricultura e das atividades florestais e engajamento de atores em financiamento e investimento (público e privado), seja possível acelerar a transição econômica para uma realidade em que aspectos ambientais, de uso da terra, da biodiversidade e as metas climáticas sejam conciliados (DECLARATION ON FORESTS AND LAND USE, 2021).

Além das Conferências das Partes, a ONU e seus Estados-membros tratam de agendas paralelas. Em 2015, os Estados reuniram-se para formular uma nova agenda – a Agenda 2030 – que traça 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, construídos de forma participativa. Por meio dos ODS e suas metas, busca-se oferecer um plano de ação estratégico global de desenvolvimento sustentável, para o período de 15 anos (BRASIL, 2017a).

Os ODS são meios de contribuir para o melhoramento de políticas públicas aplicadas à erradicação da pobreza e à melhoria de qualidade de vida (LEÃO, 2019). Os 17 objetivos são: erradicação da pobreza; fome zero e agricultura sustentável; saúde e bem-estar; educação de qualidade; igualdade de gênero; água potável e saneamento; energia limpa e acessível; trabalho decente e crescimento econômico; indústria, inovação e infraestrutura; redução das desigualdades; cidades e comunidades sustentáveis; consumo e produção responsáveis; ação contra a mudança global do clima; vida na água; vida terrestre; paz, justiça e instituições eficazes; parcerias e meios de implementação (IPEA, 2018).

Especificamente para a ODS 7, referente à energia limpa e acessível, a ONU formulou cinco metas até 2030, sendo estas:

- assegurar acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia;
- aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global (para o Brasil a meta foi alterada para que os níveis de participação das energias renováveis se mantenham alto);
- dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética (especificamente para o Brasil, aumentar a taxa de melhoria de eficiência);
- até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso à pesquisa e a tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, bem como promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa;
- expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis a todos nos países em

desenvolvimento, particularmente nos países de menor desenvolvimento relativo, nos pequenos Estados insulares em desenvolvimento e nos países em desenvolvimento sem litoral, de acordo com seus respectivos programas de apoio (para o Brasil, a meta foi modificada para a expansão da infraestrutura e aprimorar a tecnologia para fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos) (LEÃO, 2019; IPEA, 2019).

Aditivamente ao histórico e aos encaminhamentos das COPs, passaram a ser construídas estratégias para atingir as metas traçadas com menor custo possível, tais como comércio de emissões (*Emissions Trading*, permite que um país, ou empresa, adquira cotas de reduções), implementação conjunta (*Joint Emissions*, implementação conjunta de projetos de redução de emissões) e os mecanismos de desenvolvimento limpo (*Clean Development Mechanism*, implementação de projetos que contribuam para redução na emissão de GEE em países em desenvolvimento) (TEIXEIRA *et al.*, 2014).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é um mecanismo financeiro que procura contribuir para o modelo de crescimento econômico dos países em desenvolvimento focando em alternativas menos intensivas energeticamente e mais integrada ao meio ambiente. Para tanto, o mecanismo apresenta regras rígidas, o que adiciona, portanto, um grau de complexidade ao empreendimento e à gestão de riscos (TEIXEIRA *et al.*, 2014).

Os projetos de MDL podem ter como escopo a substituição de energia com origem fóssil por fontes renováveis, a racionalização do uso de energia, ou ainda, estarem relacionados a serviços ou atividades que reduzam as emissões de GEE (GOÉS *et al.*, 2018). Ou seja, um projeto que envolva esse mecanismo refere-se a uma atividade responsável diretamente pela redução na emissão de um ou mais gases acordados pelo protocolo da ONU, possibilitando assistência, investimento e transferência de tecnologia de países desenvolvidos para países em desenvolvimento (TEIXEIRA *et al.*, 2014; KIM; PARK, 2018). Dessa forma, contribui-se para que países possam comprar créditos de carbono gerados por projetos de MDL implementados em países em desenvolvimento, tendo tais créditos abatidos de suas metas de redução (TORRES *et al.*, 2016).

Os mecanismos limpos, portanto, criam mercado regulado de carbono, no qual os participantes estão sujeitos a critérios e regras para concepção de projetos e

comercialização dos créditos de carbono (TORRES *et al.*, 2016). Dentro desse processo, portanto, estão inseridas as seguintes etapas: elaboração do documento de concepção do projeto (*Project Design Document* – quem contém a descrição das atividades e dos participantes, descrição da metodologia para o cálculo da redução de emissões de gases, descrição dos limites das atividades, cálculo das fugas, período de referência dos créditos, plano de monitoramento, relatório de impactos ambientais e informações sobre fontes de financiamento); validação/aprovação pela entidade operacional designada; registro (aceite formal do projeto pelo conselho executivo, via validação das entidades operacionais designadas); monitoramento das atividades; verificação/certificação (verificação e certificação de que o projeto de MDL levou, de fato, à redução nas emissões esperadas); e emissão das Reduções Certificadas de Emissões – RCEs (TEIXEIRA *et al.*, 2014).

Os autores, Teixeira *et al.* (2014), destacam que existem algumas categorias de projetos de MDL especificadas pela COP e relacionadas a temática deste capítulo, quais sejam:

- projetos de Pequena Escala: foram desenvolvidos visando diminuir a burocracia em projetos de pequena escala que apresentam potencial para contribuir com melhoria no desenvolvimento sustentável em comunidades de países em desenvolvimento. Os projetos podem ser de energias renováveis (*Renewable Energy System* – RES; com capacidade máxima de produção até 15 MW), projetos de melhoria de eficiência energética (que possibilitem a redução no consumo de energia em até 5 GWh/ano), e outras atividades capazes de auxiliar na redução de emissões antrópicas em até 15.000 t de CO<sub>2</sub>/ano;
- projetos de Reflorestamento e Florestamento (*Reforestation and Aforestation* – modalidade de *Land Use, Land-Use Change and Forestry* – LULUCF).

A maioria dos projetos de MDL está localizada em uma pequena parcela de países, tais como China, Índia e Brasil (KIM; PARK 2018). Entre os países Latino-Americanos, o Brasil é o líder com maior número de projetos MDL, seguido pelo México (192) e Chile (102). Em 2019, dentre os 342 projetos de MDL no Brasil, o setor de energia apresentou a maior quantidade de projetos (214), sendo predominantemente hidrelétricos, eólicos e plantas de cogeração com uso de biomassa (BENITES-LAZARO; MELLO-THÉRY,

2019). Segundo Torres *et al.* (2016), tal situação pode ser explicada pelo fato de a matriz energética brasileira ser predominantemente renovável.

De forma geral, em países em desenvolvimento, projetos relacionados a energia renovável tendem a ter dificuldades na captação de capital e acesso à financiamento, em razão dos altos custos iniciais na implementação e de riscos do empreendimento. A intermediação financeira provida pelos projetos de MDL, portanto, pode auxiliar na mitigação desses problemas em decorrência da falta de incentivo financeiro (KIM; PARK, 2018).

#### 4. Energia

Energia pode ser definida como a capacidade de gerar transformações em um sistema, as quais podem ser mecânicas, físicas, químicas ou biológicas. Essa transformação pode se manifestar de diversas formas, dentre elas: radiação, química, nuclear, térmica, mecânica, elétrica, magnética ou elástica (GOLDEMBERG, 2010).

A energia é primordial para os processos de produção e, portanto, deve ser segura para garantir o crescimento das nações (GÖKGOZ; GÜVERCIN, 2018). Dessa forma, a segurança energética torna-se importante para definir garantias de mercado. Segundo IEA (2010), segurança energética pode ser definida como a garantia ininterrupta de fontes energéticas a um preço viável, de modo a garantir desenvolvimento econômico e sustentabilidade ao meio ambiente.

Com o crescimento populacional, maior industrialização e modernização, bem como o aumento da renda mundial, espera-se que o consumo de energia elétrica continue crescendo significativamente nos próximos anos (PAZHERI *et al.*, 2014). Mostrando, portanto, que com o avanço da sociedade, cresce o montante de energia necessário para suas atividades (TRAPP; RODRIGUES, 2016). Nessa perspectiva, parâmetros como segurança e viabilidade econômica, são importantes para garantir o desenvolvimento estável do setor energético (IEA, 2010).

A redução da dependência energética de combustíveis fósseis é uma realidade das políticas energéticas de muitos países. A segurança energética está intimamente relacionada a questões ambientais, em que a mitigação da emissão de gases do efeito estufa (GEE) torna-se urgente, incluindo aquelas referentes à produção e ao consumo de

energia. Em 2010, cerca de 84% das emissões de CO<sub>2</sub> estavam relacionadas à energia e 65% da emissão de todos os gases do efeito estufa pode ser atribuída ao suprimento e utilização de energia (IEA, 2010).

Entretanto, dados do relatório do IEA (2016) mostram que potencialmente a conexão entre aquecimento das atividades econômicas, demanda por energia e emissão de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia, pode ter sido enfraquecida. A implementação de novas políticas energéticas pode ter contribuído para esse comportamento. Os dados médios anuais até 2040, indicam que as emissões de CO<sub>2</sub> crescem 0,5% ao ano, enquanto a demanda por energia crescerá 1% e a economia mundial crescerá a uma taxa de 3,4%. A utilização de fontes alternativas de energia, mudanças nos mercados e demanda por maior eficiência energética são alguns dos fatores que podem influenciar esse cenário (IEA, 2016).

A queima de combustíveis no setor energético é a principal fonte de poluentes que são preocupantes para a saúde pública. Apesar das medidas capazes de controlar essa questão sejam conhecidas, a questão está longe de ser resolvida. Reconciliar os requisitos energéticos mundiais com estratégias baseadas em energias limpas e avançados controles de poluição são importantes para sustentabilidade dessas práticas (IEA, 2016).

Segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas – EPE (2018), o setor energético é capaz de gerar informações importantes para o mercado, tornando-se uma ferramenta estratégica. Isso porque são capazes de auxiliar no processo de desenvolvimento de políticas, decisões de investimento, estratégias de negócios e influenciar a articulação intersetorial de empresas. No âmbito global, é importante que exista uma integração entre governos para que o desenvolvimento do setor energético seja capaz de enfrentar os desafios concernentes à segurança energética, demandas ambientais e necessidades energéticas das sociedades em crescimento (IEA, 2010).

As matrizes energéticas mundiais não são capazes de serem alteradas rapidamente, apesar da forte influência de políticas governamentais, preço, custos e dos consumidores. Entretanto, quanto mais focadas forem as políticas energéticas na mitigação de impactos ambientais, mais eficientemente ocorrerão alterações em favor de fontes renováveis para produção de energia, nas próximas décadas (IEA, 2016). Assim, compreender a matriz energética por meio de dados econômicos como demanda e oferta, permite que o planejamento do setor possa ser adequado aos interesses da sociedade e seja base para

políticas e estratégias setoriais. Possibilitando, portanto, que custos e impactos ambientais sejam minimizados (SILVA; CÂNDIDO, 2015).

As fontes primárias, que podem ser utilizadas direta ou indiretamente para geração de energia, podem ser classificadas como fontes renováveis e não renováveis de energia. As fontes não renováveis são aquelas que eventualmente podem ser esgotadas pois são utilizadas em maior velocidade do que os milhares de anos necessários para a sua formação. Em contrapartida, as fontes renováveis de energia são aquelas em que a sua utilização energética é menos veloz do que a sua capacidade de reposição pela natureza, como as águas dos rios e mares, o sol, ou ventos. Ou, ainda, aquelas que o manejo feito pelo ser humano pode ser realizado de forma compatível com as suas necessidades de utilização energética, como a biomassa (BRAND, 2010).

#### 4.1 Energia Renovável

A energia renovável engloba diversas fontes de energia e tecnologias que apresentam diferentes atributos e aplicações, incluindo energia solar, eólica, bioenergética, hidroelétrica, geotérmica e marinha. De forma geral, as fontes de energia renováveis são abundantes e mundialmente distribuídas, mas nem sempre são facilmente aproveitadas para as mesmas funções. Por exemplo, usualmente as fontes hidroelétricas e eólicas são utilizadas para geração de energia elétrica; fontes de bioenergia para combustíveis e energia térmica; fontes de energia solar e geotérmica, para produção de eletricidade e/ou térmica. Percebe-se, portanto, que nem todos os tipos de fontes são adequados e viáveis para todos os serviços energéticos (IEA, 2016).

Conceitualmente, as fontes de energia renováveis apresentam uma característica em comum, todas têm certa variabilidade na sua disponibilidade. Esta variabilidade, está relacionada a variação na entrega de potência ou energia que a fonte apresenta, em função da disponibilidade do recurso energético (podendo ser afetada pelo clima, localização, período do ano). Além disso, são consideradas não despacháveis e sem grau de flexibilidade. Não despacháveis porque são utilizadas na operação somente quando existe disponibilidade do recurso que aciona a planta de geração, e não flexíveis, pois tecnicamente não podem atingir um ponto ótimo operacional rapidamente ou serem desligadas/reduzidas diversas vezes (FGV Energia, 2015).

Podem ser consideradas como fontes despacháveis, as hidrelétricas controláveis, as térmicas fósseis e a nuclear. Sobre a variabilidade e despachabilidade das fontes alternativas, as usinas térmicas que utilizam biomassa florestal, a depender do projeto, podem prover uma energia firme e constante ao sistema, assim como podem ser acionadas quando o operador do sistema demandar – apresentando certa despachabilidade (FGV Energia, 2015).

Segundo Gökgoz e Güvercin (2018), a energia renovável é produzida pela fonte natural local, e, assim, é continuamente restabelecida e ambientalmente correta. E, portanto, torna-se uma fonte disponível, acessível e aceita mundialmente. Além disso, o aumento da sua utilização contribui para que os custos de produção sejam reduzidos. Ademais, ao aumentar as preocupações relacionadas ao meio ambiente e ao fornecimento de energia, conseqüentemente tem-se maior demanda por utilização de fontes renováveis para geração de energia.

O desenvolvimento e a expansão da utilização de tecnologias associadas a menores emissões de carbono são fatores que também contribuem para expansão da utilização de fontes renováveis de energia que são capazes de satisfazer as demandas humanas com emissões de carbono ambientalmente satisfatórias (UMMADISINGU; SONI, 2011). As energias renováveis, portanto, relacionam-se não somente com aspectos políticos, fomentados pela necessidade de segurança energética, mas também com a crescente sensibilidade pública a assuntos ambientais (GÖKGOZ; GÜVERCIN, 2018).

As fontes renováveis de energia geralmente estão relacionadas ao setor energia elétrica, entretanto, essas fontes também podem ser usadas em setores “*end-use*” para suprir a demanda por fontes de calor e como combustível para transporte. Nesse contexto, as fontes renováveis de energia encontram-se em um cenário positivo quando analisado o seu potencial de crescimento. Entretanto, as atuais políticas energéticas não são capazes de aproveitar o potencial dessa alternativa energética. A IEA projeta que, se novas políticas energéticas forem implementadas, em 2040, as fontes renováveis de energia sejam responsáveis por 60% da geração de energia (IEA, 2016).

Percebe-se, dessa forma, que as energias renováveis são capazes de atrelar benefícios ambientais, econômicos e energéticos. No entanto, os desafios a serem enfrentados por esse setor ainda são grandes. Apesar de algumas fontes energéticas já serem competitivas

nos mercados, outras necessitam de algum tipo de suporte financeiro para se manterem competitivas, ou não conseguem sobreviver no mercado sem apoio financeiro (IEA, 2016).

O crescimento mundial no tocante à utilização de fontes renováveis nas matrizes energéticas teve início nos anos 1990, com forte intensificação a partir de 2000. Em 2011, por exemplo, o setor recebeu investimentos de US\$ 260 bilhões. No relatório sobre o futuro das energias renováveis, e elaborado pela organização *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, esse fato pode estar relacionado ao aumento de políticas de incentivo governamentais, ao aumento dos custos da energia convencional, à redução dos custos das tecnologias relacionadas as energias renováveis e à economia de escala nos processos produtivos (REN21, 2013).

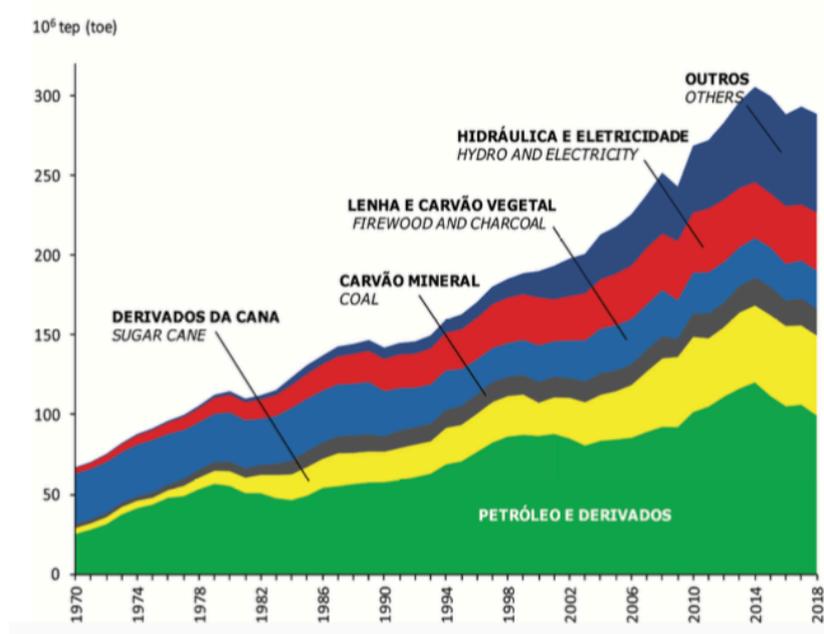
O Brasil tem sua matriz energética diversificada e com participação significativa de energias sustentáveis, sendo a energia hidrelétrica a principal fonte renovável no país (PEDROSO *et al.*, 2018). O uso alternativo de fontes limpas de energia pode atuar como matriz complementar às matrizes tradicionais de energia, uma vez que somente as fontes tradicionais não são capazes de serem totalmente sustentáveis (SILVA; CÂNDIDO, 2015).

Existem algumas externalidades - ambientais, políticas, econômicas e sociais - a serem analisadas: emissão de gases poluentes, eventuais vazamentos de óleo, resíduos do processo de refinamento do petróleo e carvão, contaminação da água, impactos na fauna, flora, beleza cênica, áreas indígenas e locais arqueológicos gerados pelos reservatórios das hidrelétricas, desapropriação de terras, aumento da temperatura da água do mar causado por usinas nucleares, riscos de acidentes nucleares, conflitos armados para controle do petróleo, subsídios econômicos (impactando custos diretos e preço final) (SHAYANI; OLIVEIRA, 2008).

É interessante pontuar que as hidrelétricas, uma das principais fontes de energia no Brasil, em longo prazo, têm uma vida útil que muitas vezes é desconsiderada. Aliado ao fato da mudança na dinâmica original do rio para construção física da usina tem-se a depreciação operacional do conjunto de máquinas responsáveis pelo processo da conversão de energia cinética em elétrica. Somando, ainda, o acúmulo de sedimentos que

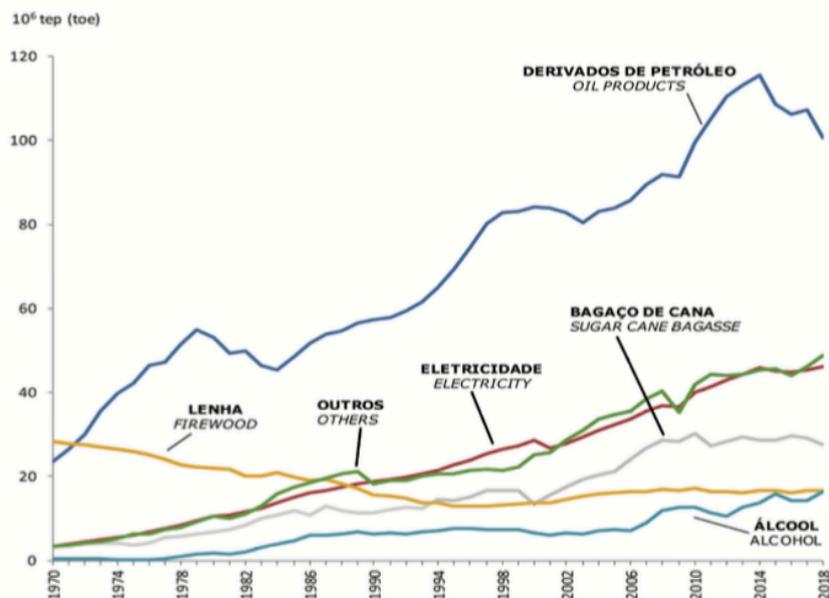
ocorrem nos reservatórios que ocasionalmente podem gerar prejuízo estrutural às hidrelétricas (HERNANDEZ, 2012) e grandes acidentes.

Em 2018, a oferta interna de energia renovável foi de  $130.533 \times 10^3$  tep, com pequeno aumento em relação ao ano anterior ( $126.240 \times 10^3$  tep). Do total dessa produção, podemos destacar a lenha e o carvão vegetal que, em 2018, foram responsáveis por ofertar  $24.146 \times 10^3$  tep, o que representa 8,4% da oferta de energia renovável no país. Também com pequeno aumento em relação ao ano anterior –  $23.992 \times 10^3$  tep (EPE, 2019), conforme mostra a Figura 3.



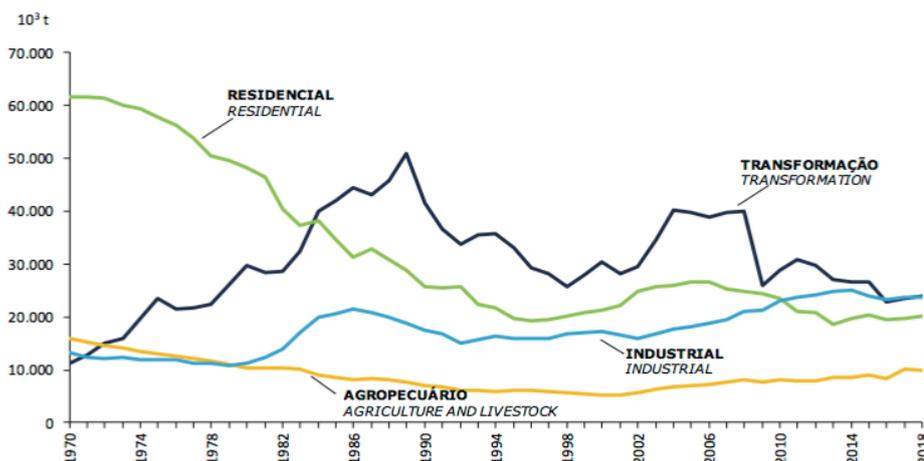
**Figura 3.** Oferta interna de energia no Brasil entre 1970 e 2018 (EPE, 2019).

O consumo final de lenha, em 2018, foi de  $16.758 \times 10^3$  tep, o que representa 6,5% do consumo total. O consumo dessa fonte de energia teve uma ligeira queda nos anos 90, mas o setor mostra evidências de aquecimento no setor nos últimos anos, conforme Figura 4 (EPE, 2019).



**Figura 4.**Consumo final por fonte no Brasil, entre 1970 e 2018 (EPE, 2019).

A lenha ainda é um produto muito utilizado em residências para geração de energia, apesar da diminuição de seu uso nos últimos anos. O uso industrial, entretanto, vem aumentando e contribuindo para fomentar a utilização desse recurso energético. A transformação (ou seja, a produção de carvão vegetal para geração de energia elétrica), apesar da volatilidade, mostra o potencial do uso da lenha para o setor. O uso na agropecuária, permanece estável (EPE, 2019), como mostra a série histórica na Figura 5.



**Figura 5.** Série histórica de produção de lenha, 1970 a 2018, em seus diversos usos (EPE, 2019).

Percebe-se, portanto, que a biomassa, em especial a biomassa florestal, possui relevante potencial energético para a matriz brasileira. O Brasil é um país com setor florestal economicamente ativo, com competitividade no comércio exterior, tecnologicamente desenvolvido e com vantagens geográficas. Tais fatores podem ser importantes para alavancar ainda mais o setor. Políticas de incentivo ao uso da biomassa, assim como fomento científico nesse campo, podem ser alternativas para auxiliar no maior desenvolvimento e difusão de informações sobre a biomassa como fonte energética.

#### 4.1.1 Biomassa

Os combustíveis provenientes de biomassa, comumente chamados de biocombustíveis, podem ser classificados em biomassa: florestal, agrícola e agroindustrial e resíduos urbanos. Sendo especificamente a biomassa florestal conceituada como aquela proveniente de materiais produzidos a partir das árvores. Não se restringindo apenas à madeira, mas incluindo também folhas, galhos, serapilheira, raízes, frutos, extrativos e resíduos (BRAND, 2010).

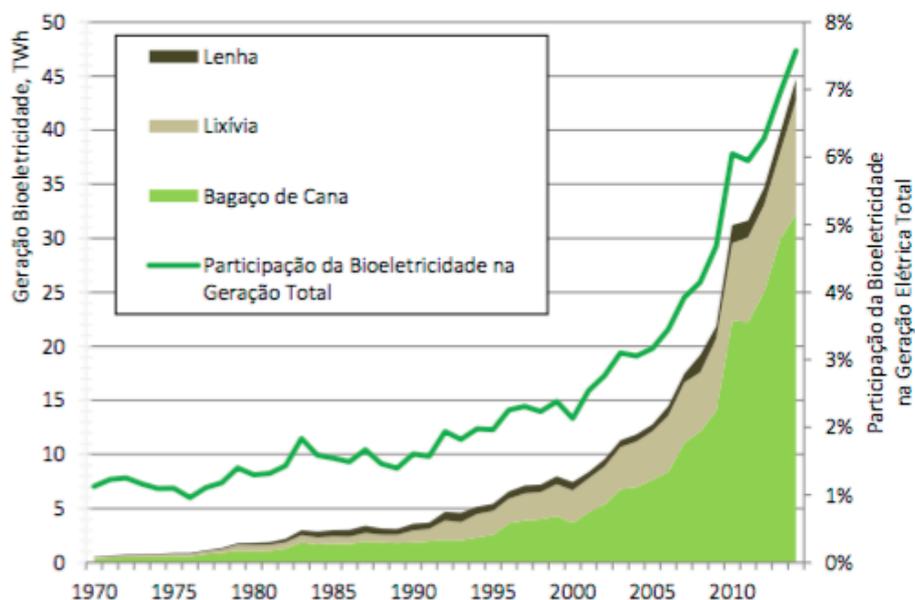
Os biocombustíveis agrícolas, em contrapartida, são aqueles produzidos a partir de plantações energéticas e resíduos, como: o álcool e os resíduos de cana-de-açúcar, casca de arroz, palha de milho, esterco de animais, e o biodiesel proveniente de oleaginosas (soja, milho, mamona, girassol, babaçu, dendê etc.). Além disso, a biomassa agrícola pode ser classificada baseado na substância energética que esta reserva como, sacaríceas, amiláceas e oleaginosa. Diferentemente da biomassa florestal, que é lignocelulósica (BRAND, 2010).

O aproveitamento energético da biomassa foi essencial para o desenvolvimento e o crescimento da sociedade, desde a lenha, como material para cocção, proteção e aquecimento, até as práticas modernas agropecuárias e industriais de transformação e uso de biocombustíveis (EPE, 2016). E, até o momento de maior disponibilidade de petróleo em larga escala, no século XX, a biomassa florestal era a fonte de energia de maior importância, a qual, nesse cenário, era a fonte de energia responsável por suprir 90% da energia e do combustível dos Estados Unidos (VIDAL; HORA, 2011).

Segundo Cupertino (2017), a biomassa é uma fonte de energia química, que possui hidratos de carbono oriundos da fotossíntese das plantas, podendo ser utilizado de forma direta ou via seus derivados, por exemplo, o pellet de madeira. Adicionalmente, a biomassa é uma fonte de energia renovável sustentável, quando utilizada de forma correta por intermédio de manejo florestal adequado ou quando oriunda de resíduos florestais, industriais ou urbanos (VIDAL; HORA, 2011).

Portanto, a biomassa é um material orgânico, não fóssil e deve conter energia química no seu interior, como: vegetações aquáticas ou terrestres, árvores, biomassa virgem, lixo orgânico, resíduos de agricultura, esterco de animais e outros tipos de restos industriais (VIDAL; HORA, 2011). A Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel, em 2008, conceituou biomassa como sendo matéria orgânica passível de transformação em energia mecânica, térmica ou elétrica, cuja origem pode florestal, agrícola e de rejeitos urbanos e industriais.

No Brasil, a principal biomassa utilizada para fins energéticos é a cana-de-açúcar. No país, a bioeletricidade é obtida principalmente por meio da cogeração (geração combinada de energia elétrica e térmica). O setor de celulose e papel, com o licor negro, também contribui para o setor. E, nos últimos anos, os setores sucroenergético e de papel e celulose se modernizaram e, conseqüentemente, as unidades tornaram-se mais eficientes na cogeração e no uso energético. Contribuindo, portanto, para diversificação na oferta de energia elétrica no país (EPE, 2016), conforme a Figura 6.



**Figura 6.** Evolução da oferta de bioeletricidade e evolução na geração total, entre 1970 e 2014, no Brasil (EPE, 2016).

Diversos são os empreendimentos termelétricos relacionados à biomassa no Brasil (EPE, 2016), a Tabela 2 lista essa classificação.

**Tabela 2.** Classificação das fontes de biomassa no Brasil.

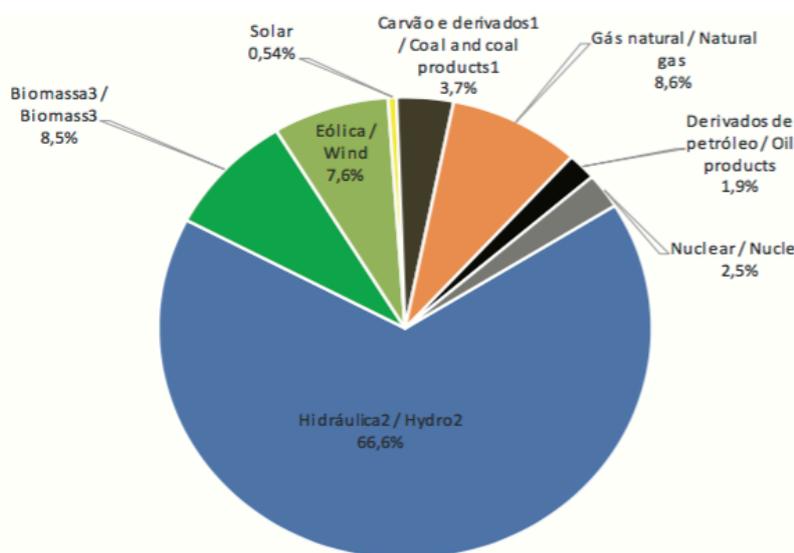
Origem	Fonte	Recurso
Biomassa	Agroindústria	Bagaço de cana de açúcar
		Biogás
		Capim elefante
		Casca de arroz
	Floresta	Lixívia
		Lenha
		Gás de alto forno
		Resíduos florestais
		Carvão vegetal
	Resíduos urbanos	Biogás
Resíduos animais	Biogás	
Biocombustíveis	Etanol	
Biocombustíveis	Óleos vegetais	

Fonte: EPE, 2016.

Existem, no Brasil 517 empreendimentos termelétricos em operação, alimentados por biomassa com potência instalada de aproximadamente 14 GW. Desse total de

empreendimentos, 394 funcionam com cana-de-açúcar (11 GW), 17 funcionam com lixívia (2,2 GW), e 49 com resíduos florestais - incluindo a lenha (EPE, 2016).

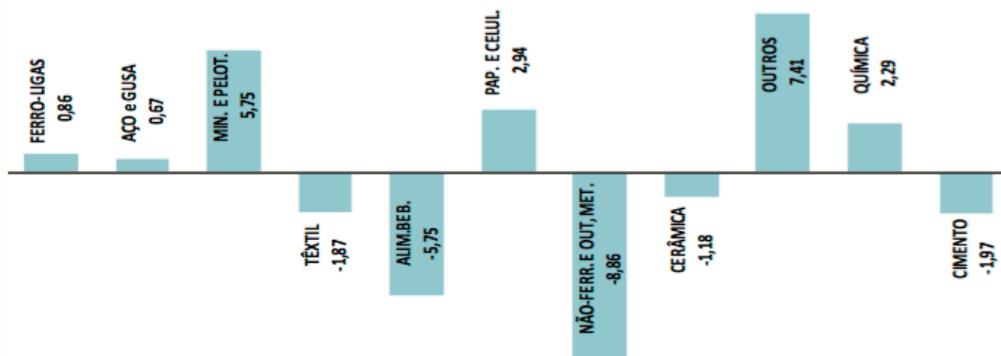
O Balanço de energia da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), com referência ao ano 2020, confirma mais uma vez a supremacia da matriz energética renovável do Brasil. Segundo o relatório, as fontes renováveis representam quase 84% da oferta interna (referindo-se à soma da produção interna e importações) de energia elétrica, conforme a Figura 7.



**Figura 7.** Oferta interna de energia elétrica no Brasil, por fonte (EPE, 2019).

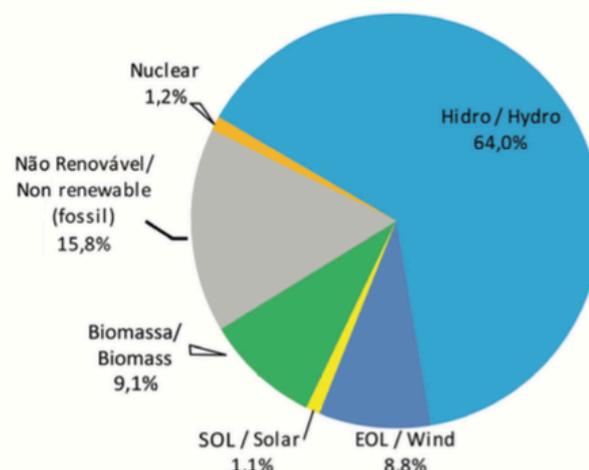
Conforme é possível observar na figura anterior, a biomassa (incluindo lenha, bagaço de cana, lixívia e outros tipos), em 2018, participou em 8,5% da oferta interna de energia elétrica no país. Quanto ao consumo de energia nas suas diversas fontes, houve um aumento de 1,4% (correspondente a 535,4 TWh). Os setores de transporte, energético e agropecuário foram os maiores consumidores (EPE, 2019).

O setor industrial, importante na demanda por energia elétrica, registrou um aumento de 0,6% na demanda por energia. A Figura 8 traz o comportamento dos principais consumidores do setor industrial. Com destaque ao setor de siderurgia, que teve um bom crescimento de produção e, portanto, aumento no consumo. O setor de papel e celulose também passou por aquecimento de produção e, por conseguinte, aumento no consumo de energia (EPE, 2019).



**Figura 8.** Crescimento do consumo de eletricidade no setor industrial (EPE, 2019).

A capacidade instalada de geração de energia (centrais de serviço público e autoprodutoras) aumentou 5.728 MW. Neste cenário, a biomassa contribuiu com 9,1%, (EPE, 2019) conforme a Figura 9.



**Figura 9.** Participação das fontes na capacidade instalada (EPE, 2019).

A lenha é uma fonte primária e renovável, de considerável representatividade no setor energético brasileiro. Em 2019, foram produzidos  $24.146 \times 10^3$  tep a partir da lenha, sendo a terceira fonte renovável mais produtiva, conforme a

Tabela 3. O que equivale a 7,9% da produção.

**Tabela 3.**Produção de energia primária.

10<sup>3</sup> tep

Fontes	Ano									
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Não renovável</b>	<b>129.340</b>	<b>134.277</b>	<b>140.533</b>	<b>140.573</b>	<b>139.997</b>	<b>153.920</b>	<b>165.795</b>	<b>172.540</b>	<b>179.478</b>	<b>178.460</b>
Petróleo	100.918	106.559	108.976	107.258	104.762	116.705	126.127	130.373	135.907	134.067
Gás natural	20.983	22.771	23.888	25.574	27.969	31.661	34.871	37.610	39.810	40.560
Carvão (vapor)	1.913	2.104	2.134	2.517	3.298	3.059	2.459	2.636	1.931	2.005
Carvão metalúrgico	167	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Urânio	4.117	1.767	4.209	3.681	2.375	681	512	0	0	0
Outras não renováveis	1.242	1.075	1.326	1.343	1.592	1.814	1.826	1.921	1.831	1.828
<b>Renovável</b>	<b>111.079</b>	<b>118.831</b>	<b>115.901</b>	<b>116.462</b>	<b>118.215</b>	<b>118.788</b>	<b>120.579</b>	<b>122.256</b>	<b>123.115</b>	<b>128.304</b>
Energia hidráulica	33.625	34.683	36.837	25.683	24.580	24.936	24.900	23.095	23.992	24.146
Lenha	24.609	25.997	25.997	25.683	24.580	24.936	24.900	23.095	23.992	24.192
Produtos da cana de açúcar	44.775	48.852	43.270	45.117	49.304	49.273	50.424	50.658	49.725	50.895
Eólica	106	187	233	434	566	1.050	1.860	2.880	3.644	4.169
Solar	0	0	0	0	0	1	5	7	72	298
Outras renováveis	7.963	9.112	9.566	9.508	10.139	11.412	12.453	12.857	13.784	15.764
<b>TOTAL</b>	<b>240.419</b>	<b>253.108</b>	<b>256.434</b>	<b>257.035</b>	<b>258.211</b>	<b>272.707</b>	<b>286.375</b>	<b>294.769</b>	<b>302.592</b>	<b>306+764</b>

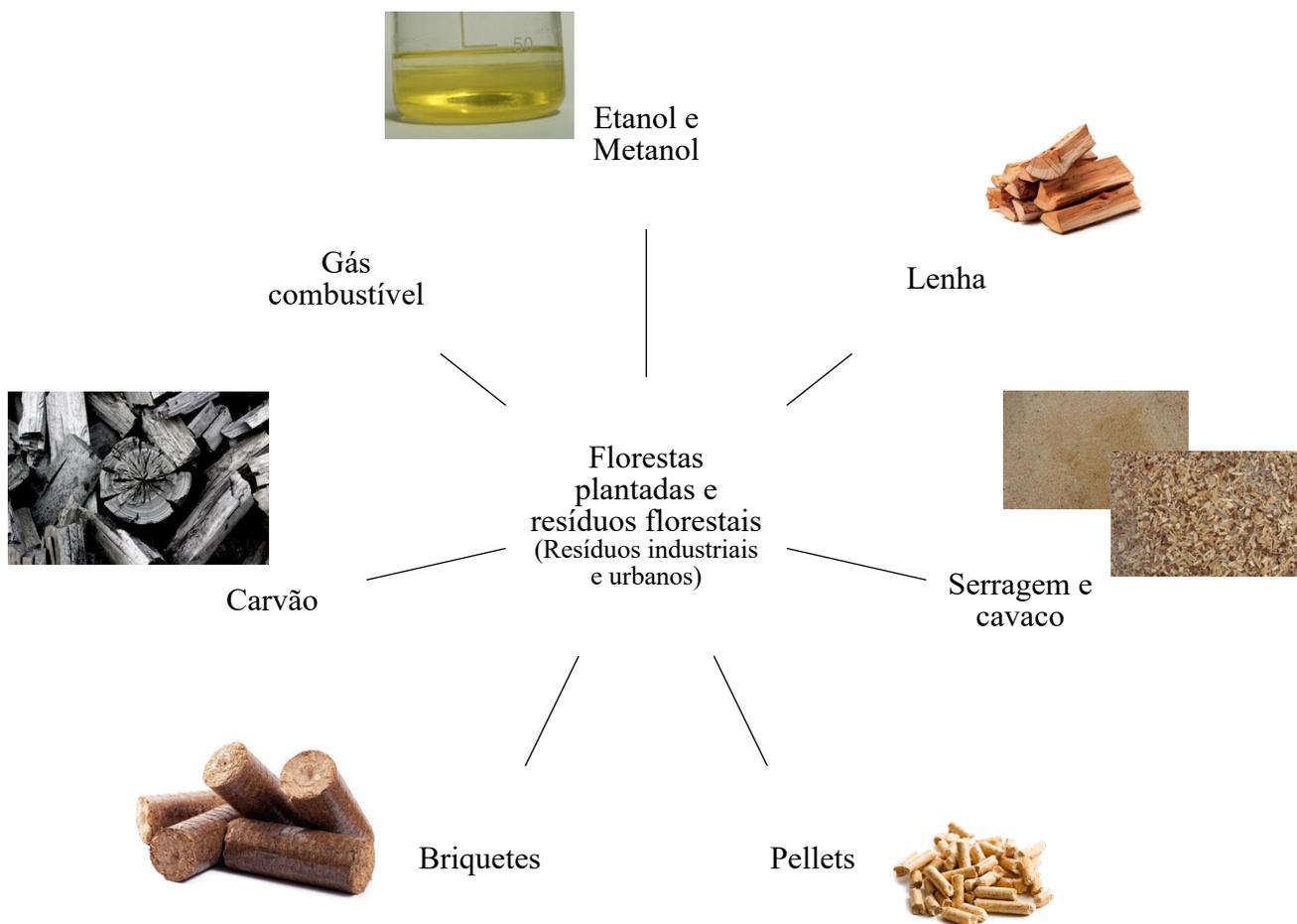
Fonte: EPE, 2019.

Conhecer as especificidades de cada material é extremamente importante para que estes estejam aptos à geração de energia. O poder calorífico do material, por exemplo, pode ser considerado como uma das características mais importantes para analisar a viabilidade de um potencial material. Ademais, as propriedades químicas e físicas também devem ser analisadas, pois, dependendo da amplitude dessas características, a eficiência energética do material pode ser comprometida (BRAND, 2010).

Portanto, para analisar a qualidade de um combustível com origem florestal, agrícola, ou urbana é importante analisar e identificar sua composição química (elementar e imediata), teor de umidade, poder calorífico (superior e inferior), granulometria, teor de cinzas e nível de biodegradação (BRAND, 2010).

#### 4.1.1.1 Biomassa Florestal

No contexto florestal, a biomassa inclui todo o material proveniente da árvore: troncos, ramos, folhas, casca, raízes e resíduos (VIDAL; HORA, 2011), que podem ser sólidos (cavacos, serragem, pó) ou líquidos (como o licor negro). A biomassa florestal é considerada como todo material orgânico produzido por sistemas florestais nativos ou implantados, material oriundo da manufatura de produtos florestais na indústria de base florestal, ou ainda, proveniente de resíduos urbanos efluentes da produção florestal (BRAND, 2010). Apesar de menor eficiência energética quando comparada a outros materiais, por intermédio de diversos processos de conversão, é possível obter diversidade de produtos, conforme mostra a Figura 10.



**Figura 10.** Processos de conversão energética da biomassa de madeira (VIDAL; HORA, 2011, modificado pela autora<sup>3</sup>).

O Brasil possui uma matriz energética pautada em fontes renováveis. Nesse contexto, a madeira pode ser considerada como uma alternativa. Portanto, processos que otimizem a utilização desse material para fins energéticos são extremamente importantes. Existem processos físicos e químicos que podem ser utilizados nas madeiras, ou nos resíduos florestais, capazes de agregar valor ao material e melhorar as características do combustível.

Basicamente, o carvão vegetal apresenta carbono fixo, cinzas e materiais voláteis. Para sua produção, a madeira é submetida ao processo de carbonização, em que o material é submetido a temperaturas elevadas (superiores a 180°C) em ambiente controlado que

<sup>3</sup> Imagens disponíveis em: <https://www.zonasul.com.br/lenha-de-eucalipto-5kg-5186056/p>; <http://engmadeira.yolasite.com/resources/Energia%20da%20madeira.pdf>; <https://www.sudare.com.br/produtos/pellet-de-madeira/piomade/pellet-de-madeira>; <http://www.epaletes.com/produto/briquetes-de-madeira/briquetes-de-madeira-2/>; <https://aperambioenergia.com.br/institucional/produto-2/produto/>; <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/metanol.htm>

possibilite a saída de gases, vapores e líquidos (SOUZA *et al.*, 2016). A torrefação é um processo térmico em que a madeira é submetida a temperaturas entre 270 e 285 °C, procurando degradar a hemicelulose da madeira e, assim, alterar a capacidade de absorção da madeira. A madeira torrificada apresenta algumas vantagens, tais como: características atrativas como combustível, melhoria no poder calorífico, menor teor de umidade e redução volumétrica. Além disso, o material torrificado pode produzir menos fumaça ao ser queimado como combustível do que o material não tratado (PRINS *et al.*, 2006).

A biomassa florestal, porém, possui algumas dificuldades em seu manuseio, transporte e estoque que podem dificultar sua aplicação no setor energético, tais como: alto teor de umidade, formas e tamanhos irregulares. A densificação desse material pode ser uma solução (KALIYAN; MOREY, 2009). Nesse contexto, surgiu a briquetagem que consiste na compressão do material em blocos com forma definida, com volume menor e melhor densidade, podendo ou não ser adicionado algum aglutinador. A combinação entre o processo de briquetagem e processos térmicos, como torrefação, pode ser interessante para produzir biomassa com melhores condições energéticas e mais competitivas no mercado quando comparada a outras fontes (COSTA *et al.*, 2019).

De forma geral, os produtos madeireiros utilizados com fins energéticos são pouco quantificados e qualificados. E, portanto, estudos que procurem conhecer o potencial energética da madeira têm uma grande relevância. Podendo, portanto, destinar a madeira nativa ou plantada de melhor forma ao mercado (SILVA *et al.*, 2018). Vidal e Hora (2011) destacam que a volatilidade do mercado do petróleo, o aumento dos preços dessa *commodity* e preocupações acerca das emissões de gases do efeito estufa, têm colocado novamente a biomassa florestal como fonte de energia importante.

A energia proveniente da biomassa representa 10% do total da energia consumida mundialmente, com aproximadamente 890 milhões de tep. No cenário nacional, a bioenergia corresponde a aproximadamente 70 milhões de tep. O uso da biomassa em larga escala, entretanto, está crescendo e movimentando os mercados nacionais e internacionais. Logo, entender o mercado desse recurso contribui para desenvolver o mercado internacional de bioenergia e bioprodutos (EPE, 2018).

O setor florestal pode se beneficiar desse quadro, uma vez que a biomassa apresenta uma boa notabilidade entre as fontes renováveis. Em matéria publicada pelo Serviço

Florestal Brasileiro (2016), a biomassa florestal surge como alternativa de investimento em longo prazo. E um produto que se destaca e que contribui para este mercado são os pellets.

Os custos da biomassa podem ser influenciados por diversos fatores, dentre eles: custos de oportunidade da terra e da biomassa, custo de produção e custo logístico, os quais, variam de acordo com origem, propriedade e forma de alocação do produto. A biomassa florestal, por exemplo, apresenta custos adicionais por serem culturas energéticas e necessitarem de novos investimentos (EPE, 2018).

A biomassa florestal é usualmente utilizada, no Brasil, em regiões menos desenvolvidas. Além disso, os processos de obtenção de energia via biomassa florestal são, usualmente, de baixa eficiência, com exceção os processos de cogeração industrial, como a produção de celulose e papel, do qual é possível obter o licor negro (que pode ser utilizado como combustível (ANEEL, 2008)). Os autores Simangunson *et al.* (2017) afirmam que, apesar da maior utilização da biomassa florestal ser doméstica, esta fonte não ser considerada como fonte de baixo valor econômico, pois pode ser convertida em bioenergia moderna por intermédio de várias tecnologias.

Na Europa, nota-se um aumento na utilização da biomassa florestal como fonte de energia pois os cenários futuros para reservas de gás e petróleo não são positivos. Desse modo, diversas estratégias foram adotadas pela União Europeia para estimular a utilização dessa fonte de energia, estabelecendo condições favoráveis no mercado para estimular oferta e demanda (HALAJ; BRODRECHTOVA, 2018).

#### 4.2 Contextualizando o cenário energético do Brasil

No Brasil, as primeiras experiências brasileiras no setor energético, segundo Gomes *et al.* (2014), foram em 1879 e 1883. Em um primeiro momento, foi instalado, no Rio de Janeiro, o serviço de iluminação elétrica na estação ferroviária Dom Pedro II, com o dínamo como fonte de energia. O segundo marco, refere-se ao início das operações da primeira central geradora de energia elétrica, em Campos (RJ), movida a vapor gerado por caldeira alimentado por lenha. Em 1883, também foi construída a primeira hidrelétrica brasileira em Diamantina (MG). Neste período, a capacidade instalada do Brasil era de 10.850 kW, sendo 53% de origem hidráulica.

A matriz energética brasileira é diversificada e a atual estrutura energética define o país como líder mundial na geração de energia proveniente de fontes renováveis e sustentáveis (PEDROSO *et al.*, 2018). Em decorrência do forte potencial hídrico brasileiro, em 2019, por exemplo, as fontes renováveis de energia contribuíram com 83% da produção de eletricidade (EPE, 2020). Confirmando esse interesse brasileiro em investir em uma matriz energética renovável, o Brasil assinou o Acordo de Paris, em 2015, comprometendo-se em atingir a meta de 33% de sua matriz elétrica oriunda de energias renováveis até 2030, excluindo a fonte hidrelétrica (CUPERTINO, 2017).

A oferta interna de fontes de energia limpa, no Brasil, em 2014, representou 39,4% da oferta total no país. Nessa estatística, a energia hidráulica foi responsável por 11,5% do montante total ofertado, sendo a fonte renovável mais expressiva (MME, 2015). Em 2016 a energia hidráulica contribuiu com 68,1% da oferta interna de energia, seguido por 9,1% do gás natural, 8,2% da biomassa, 5,3% referentes à energia eólica, 4,2% de carvão e derivados, 2,6% nuclear, 2,4% derivados de petróleo e 0,01% referente à energia solar (EPE, 2016).

A boa representatividade da energia hidrelétrica (e da biomassa) na matriz energética contribuiu para que os indicadores de emissões de CO<sub>2</sub> nacionais fossem menores do que a média mundial e de países desenvolvidos. O indicador brasileiro foi igual a 1,59 tCO<sub>2</sub>/tep (toneladas equivalentes de petróleo) de energia consumida e do restante dos países foi de 2,37 (MME, 2015).

A bioenergia, nesse contexto, pode ser considerada como importante ferramenta na manutenção da baixa intensidade de carbono da economia brasileira, como também no desenvolvimento rural. Em decorrência da grande representatividade brasileira nos setores agrícola, pecuário e florestal, nesse contexto, o Brasil apresenta-se entre os principais países no âmbito internacional (EPE, 2018).

A Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), em 2018, no relatório sobre o Plano Nacional de Energia – 2050, ainda destaca que existem cinco fatores importantes para o desenvolvimento e aquecimento do mercado de bioenergia no Brasil: favorável localização geográfica e condições climáticas; estágio de desenvolvimento do mercado de bioenergia brasileiro; capacidade de pesquisa e otimização de produtividade de

biomassa no país; presença de indústria de serviços para projetos estruturada; políticas públicas nacionais que abordem o tratamento e a destinação adequada de resíduos.

#### 4.3 Políticas e incentivos para o setor de energia renovável

Nos últimos anos, houve um significativo crescimento quando à criação de políticas para o fomento do setor de energia mundial. Aproximadamente 126 países possuem algum tipo de ferramenta ativa para incentivar o uso e desenvolvimento de tecnologias relacionadas às energias renováveis, as quais variam entre incentivos financeiros, instrumentos regulatórios, planos estratégicos, códigos, garantias ou investimentos financeiros diretos, sendo implementadas predominantemente em níveis nacionais e estaduais (LEVENDA *et al.*, 2021).

A seguir, serão apresentadas as principais políticas e incentivos no Brasil e no mundo, no que se referem à energia renovável e à biomassa.

##### 4.3.1 Principais políticas em vigor para o setor de energia renovável proveniente de biomassa no Brasil

Em dezembro de 2009, foi sancionada a lei brasileira relativa à Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), a Lei nº 12.187/09. Esse dispositivo legal tem como objetivos:

- I - compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a proteção do sistema climático;
- II - redução das emissões antrópicas de gases de efeito estufa em relação às suas diferentes fontes;
- III – (VETADO);
- IV - fortalecimento das remoções antrópicas por sumidouros de gases de efeito estufa no território nacional;
- V - implementação de medidas para promover a adaptação à mudança do clima pelas 3 (três) esferas da Federação, com a participação e a colaboração dos agentes econômicos e sociais interessados ou beneficiários, em particular aqueles especialmente vulneráveis aos seus efeitos adversos;
- VI - preservação, à conservação e à recuperação dos recursos ambientais, com particular atenção aos grandes biomas naturais tidos como Patrimônio Nacional;
- VII - consolidação e à expansão das áreas legalmente protegidas e ao incentivo aos reflorestamentos e à recomposição da cobertura vegetal em áreas degradadas;
- VIII - estímulo ao desenvolvimento do Mercado Brasileiro de Redução de Emissões – MBRE (BRASIL, 2009, Art. 4).

Os objetivos previstos na Lei nº 12.187/09, conforme estabelecido pela política citada, devem estar de acordo com desenvolvimento sustentável da nação, buscando desenvolvimento econômico, erradicação da pobreza e a redução das desigualdades sociais. Ademais, a PNMC prevê mecanismos financeiros, econômicos e científicos, de fomento para ações capazes de mitigar efeitos da mudança do clima, assim como atividades capazes de reduzir as emissões de GEE ou promovam a remoção desses gases por sumidouros. Visando, dessa forma, consolidar uma economia de baixo carbono em diversos setores (como, energia, sistema de transporte, indústria de bens de consumo, indústrias químicas, indústria de papel e celulose, mineração, construção civil, serviços de saúde e agropecuária), incluindo ações como Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) e de Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas (NAMAs) (BRASIL, 2009).

Relacionado à Política Nacional sobre Mudança do Clima, o Decreto nº 10.143, de 28 de novembro de 2019, dispõe sobre o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (FNMC). Os recursos destinados a esse fundo devem ser prioritariamente utilizados em projetos que visem cumprir atividades relacionadas com a mitigação das mudanças climáticas e a adaptação aos seus efeitos. Segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o fundo tem como objetivo apoiar a implementação de empreendimentos, compra de maquinário e equipamentos e o desenvolvimento tecnológico de atividades de atividades e projetos ligados à redução de emissão de GEE e à adaptação às mudanças do clima.

O BNDES cita que o Programa Fundo Clima, possui nove subprogramas (Tabela 4), sendo eles: mobilidade urbana; cidades sustentáveis e mudança do clima; máquinas e equipamentos eficientes; energias renováveis; resíduos sólidos; carvão vegetal; florestas nativas; gestão e serviços de carbono; projetos inovadores (BNDES, 2021).

**Tabela 4.** Finalidades dos subprogramas do Fundo do Clima.

<b>Subprograma</b>	<b>Finalidade</b>
Mobilidade urbana	Projetos que contribuam para redução na emissão de GEE e de poluentes no transporte coletivo urbano de passageiros e para melhoria da mobilidade urbana.
Cidades sustentáveis e mudança do clima	Projetos que busquem sustentabilidade nas cidades, melhorando sua eficiência e reduzindo o consumo de energia e de recursos naturais.

<b>Subprograma</b>	<b>Finalidade</b>
Máquinas e equipamentos eficientes	Aquisição e produção de máquinas ou equipamentos com maior eficiência energética ou capazes de reduzir a emissão de GEE.
Energias renováveis	Apoiar investimentos e distribuição de <b>energia renovável</b> , proveniente da <b>biomassa</b> (com exceção da cana-de-açúcar), solar e eólica; desenvolvimento tecnológico do setor de energia solar, dos oceanos, eólica e <b>biomassa</b> , assim como o desenvolvimento das cadeias produtivas do setor.
Resíduos sólidos	Projetos relacionados à racionalização da limpeza urbana e disposição de <b>resíduos</b> a serem aproveitados, preferencialmente, <b>para geração de energia</b> localizados em municípios prioritários identificados pelo Ministério do Meio Ambiente.
Carvão vegetal	Investimentos que visem melhoria da eficiência e sustentabilidade da produção de <b>carvão vegetal</b> .
Florestas nativas	Projetos associados ao manejo florestal sustentável; plantio de espécies nativas, incluindo a cadeia de produção; ao beneficiamento e consumo de produtos florestais, assim como o desenvolvimento tecnológico.
Gestão e serviços de carbono	Projetos capazes de aprimorar a gestão de emissão de carbono ou reduzir as emissões de GEE.
Projetos inovadores	Projetos inovadores capazes de apoiar nos demais subprogramas do Programa Fundo Clima.

Elaborado pela autora (BNDES, 2021).

No Brasil, tem-se a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, que dispõe sobre a Política Energética Nacional e as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo (ANP), entre outras providências. A Lei – e suas posteriores alterações - é responsável por definir as estratégias, princípios, objetivos e ações do setor energético brasileiro.

Segundo a Lei nº 9.478, no art. 1º, a Política Energética Nacional visando aproveitamento racional das fontes de energia deve atender aos seguintes objetivos:

- I - preservar o interesse nacional;
- II - promover o desenvolvimento, ampliar o mercado de trabalho e valorizar os recursos energéticos;
- III - proteger os interesses do consumidor quanto a preço, qualidade e oferta dos produtos;
- IV - proteger o meio ambiente e promover a conservação de energia;
- V - garantir o fornecimento de derivados de petróleo em todo o território nacional, nos termos do [§ 2º do art. 177 da Constituição Federal](#);
- VI - incrementar, em bases econômicas, a utilização do gás natural;
- VII - identificar as soluções mais adequadas para o suprimento de energia elétrica nas diversas regiões do País;

VIII - utilizar fontes alternativas de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis;  
IX - promover a livre concorrência;  
X - atrair investimentos na produção de energia;  
XI - ampliar a competitividade do País no mercado internacional;  
XII - incrementar, em bases econômicas, sociais e ambientais, a participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional;  
XIII - garantir o fornecimento de biocombustíveis em todo o território nacional;  
XIV - incentivar a geração de energia elétrica a partir da biomassa e de subprodutos da produção de biocombustíveis, em razão do seu caráter limpo, renovável e complementar à fonte hidráulica;  
XV - promover a competitividade do País no mercado internacional de biocombustíveis;  
XVI - atrair investimentos em infraestrutura para transporte e estocagem de biocombustíveis;  
XVII - fomentar a pesquisa e o desenvolvimento relacionados à energia renovável;  
XVIII - mitigar as emissões de gases causadores de efeito estufa e de poluentes nos setores de energia e de transportes, inclusive com o uso de biocombustíveis (BRASIL, 1997, Art. 1).

A Lei nº 10.438, de 26 de janeiro de 2002, criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), além de dar outras providências. Segundo o art. 3º dessa lei, o programa tem como objetivo contribuir com o aumento da participação da produção de energia elétrica por empreendimento de produtores independentes autônomos, seja de origem eólica, de pequenas hidrelétricas e de biomassa. Além disso, a lei cria a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), que dentre diversos objetivos apresentados no dispositivo, visa promover a expansão do serviço de energia elétrica a todo o país, garantir recursos para o atendimento de subvenção econômica, promover competitividade da energia produzida a partir do carvão mineral e promover competitividade da energia produzida por meio do gás natural e fontes renováveis, como eólica, termossolar, fotovoltaica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa.

A Lei nº 11.097, de 13 janeiro de 2005, ao alterar leis anteriores, foi responsável por introduzir o biodiesel na matriz energética do Brasil. Além disso, a lei traz aspectos interessantes para a energia proveniente de fontes renováveis. Como por exemplo, o art. 3º, onde são previstas diretrizes específicas para energia proveniente de fontes alternativas (biocombustíveis, energia solar, energia eólica). Essa Lei, altera também o art. 6º da Lei nº 9.478/97, acrescentando o conceito de biocombustível e biodiesel.

XXIV - Biocombustível: combustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna ou, conforme regulamento, para outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil;

XXV - Biodiesel: biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (BRASIL, 2005, Art. 4).

Na Lei nº 11.097/05, no capítulo IV, foi instituída a Agência do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), cuja responsabilidade é de promover a regulação, contratação, fiscalização, promoção de boas práticas de conservação e uso racional das atividades econômicas integrantes da indústria do petróleo, do gás natural e de biocombustíveis. Ademais, a lei acrescenta orientações quanto ao fomento de projetos voltados à produção de biocombustíveis, com foco na redução dos poluentes associados à indústria de petróleo, gás natural e seus derivados.

Adicionalmente a Política Energética Nacional, foi instituída em dezembro de 2017, a Lei nº 13.576 que dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). A lei objetiva atender os compromissos firmados pelo Brasil no Acordo de Paris na Convenção das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, contribuir para eficiência energética nacional e promover o uso, a produção e a comercialização dos biocombustíveis (BRASIL, 2017b).

Segundo art. 2º da lei, a Política Nacional dos Biocombustíveis tem como principais fundamentos:

- I - a contribuição dos biocombustíveis para a segurança do abastecimento nacional de combustíveis, da preservação ambiental e para a promoção do desenvolvimento e da inclusão econômica e social;
- II - a promoção da livre concorrência no mercado de biocombustíveis;
- III - a importância da agregação de valor à biomassa brasileira; e
- IV - o papel estratégico dos biocombustíveis na matriz energética nacional (BRASIL, 2017b, Art. 2).

A RenovaBio, por meio de ações estratégicas, atividades e programas busca viabilizar a oferta de energia de forma sustentável, competitiva e segura, atuando também como ferramenta mitigadora de emissão de GEE e de poluentes locais. Além de contribuir para o desenvolvimento regional, com geração de empregos e renda ao promover cadeias de valor ligadas à bioeconomia sustentável. Dessa forma, a Política Nacional de Biocombustíveis procura impulsionar o desenvolvimento tecnológico e aumentar a competitividade dos biocombustíveis na matriz energética nacional, contribuindo para o desenvolvimento e inserção comercial desses produtos (BRASIL, 2017b).

Em 2021, foi instituído o Programa Nacional de Crescimento Verde (Decreto nº 10.846, de 25 de outubro de 2021) que apresenta a ampliação do uso de energias limpas e renováveis e de energias limpas e renováveis e renováveis e do ganho de eficiência energética nas atividades econômicas brasileiras, como uma das diretrizes do programa. Demonstrando o interesse nacional em aliar crescimento econômico ao desenvolvimento sustentável e aprimorar a gestão dos recursos naturais como forma de incentivo a produtividade, inovação e competitividade.

Adicionalmente, existem conjuntos de políticas, programas, iniciativas e ações relacionadas ao setor energético, como o Programa de Apoio à Renovação e Implantação de Novos Canaviais – PRORENOVA, o Programa de Apoio ao Setor Sucroalcooleiro – PASS, o Plano Conjunto de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucoenergético e Sucoquímico – PAISS, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE (Resolução CONAMA nº 18/1986; Lei nº 8.723/1993) e a Rota 2030 (Lei nº 13.755/2018) (EPE, 2020).

No Distrito Federal, em 27 de fevereiro 2019, foi publicada a Lei nº 6.274, responsável por instituir diretrizes para a Política Distrital de Incentivo à Geração e ao Aproveitamento de Energia solar, eólica, de biomassa e à cogeração. A política distrital tem como objetivos: promover estudos, normas, programas e procedimentos que visem aumentar a participação da energia solar, eólica, biomassa e de cogeração; estimular o consumo, o investimento e a implantação de sistemas de energia renovável e ecologicamente corretos; contribuir para melhoria das condições de vida de famílias de baixa renda; estimular o uso de energia renovável nas zonas urbanas e rurais; estimular o uso de energia termossolar em residências; reduzir a demanda de energia elétrica; estimular a implantação de indústrias de equipamentos e materiais de sistemas de energia solar; estimular a adoção de medidas de eficiência energética no DF (DISTRITO FEDERAL, 2019).

A Assembleia Legislativa do Mato Grosso, instituiu, em 24 de setembro de 2020, a Lei ordinária nº 11.194, em que formaliza a Política Estadual do Incentivo ao Uso da Biomassa para Geração de Energia, com o propósito de diversificar a matriz energética do estado e estimular a produção e utilização de energias renováveis. São princípios da Política Estadual de Incentivo ao Uso de Biomassa para geração de energia, apresentados no art. 4º da Lei: proteção do meio ambiente; por meio da exploração da biomassa,

espera-se reduzir o volume de rejeitos; reconhecimento econômico e social da biomassa; eco eficiência por intermédio da geração efetiva e economicamente viável de energia por biomassa; diversificação na matriz energética; cooperação entre diversos setores do estado, como o empresarial e demais segmentos da sociedade para efetivo uso da biomassa.

Em Minas Gerais existem as leis nº 14.309 de 2002 e a 20.922 de 2013 que dispõem sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade do Estado. Adicionalmente, trazem aspectos relacionados à produção de carvão vegetal, como: licenciamento ambiental para instalação. produção e comercialização de carvão vegetal, alvará de funcionamento da unidade produtora de carvão, documentação necessária para corte e comercialização, dentre outros (MMA, 2019).

O Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura – REIDI – é um incentivo fiscal previstos para projetos aprovados na implantação de obras de infraestrutura nos setores de transportes, portos, energia (incluindo projetos de geração e cogeração de energia utilizando fontes renováveis), saneamento básico e irrigação. O incentivo foi instituído pela Lei nº 11.488/07, Decreto nº 6.144/07, Instrução normativa nº RFB 758/07 e a portaria do MME nº319/08. Por intermédio desse incentivo, tem-se suspensão integral da contribuição para o Programa de Integração Social (PIS) e o programa de Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) nas aquisições de bens, como: máquinas, aparelhos, instrumentos e equipamentos novos e materiais de construção (RUIZ, 2015).

Existe, também, um benefício fiscal vinculado a investimentos que contribuam para o desenvolvimento da região da SUDENE<sup>4</sup> e da SUDAM<sup>5</sup>, que, baseado no Medida Provisória nº 2.199-14, que prevê a redução na alíquota do imposto de renda por até 10 anos. Assim como para projetos que utilizam biomassa ou cogeração qualificada com potência injetada na rede menor ou igual a 30 MW. Conforme estabelecido pela Resolução normativa nº 77/04 da Aneel, podem reduzir 50% na TUST e TUSD, tarifa de Utilização de Serviços de Transmissão e de Distribuição, respectivamente. A redução

---

<sup>4</sup> Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, estabelecida pela Lei nº 3.692/1959 com objetivo de promover e coordenar o desenvolvimento da região.

<sup>5</sup> Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia, criada pela Lei nº 5.173/1966 visando a transformação econômica, estabelecimento de fronteiras e integração do espaço amazônico ao território nacional.

pode atingir a 100% caso o empreendimento utilize pelo menos 50% de biomassa (resíduos sólidos urbanos, biogás de aterro sanitário, resíduos vegetais ou animais e/ou lodo de estações de tratamento de esgoto) como insumo energético. Ademais, existem benefícios estatais que podem ser concedidos sobre o ICMS sobre a aquisição de bens destinados ao ativo fixo ou, redução ou financiamento das alíquotas de ICMS sobre a receita do projeto (RUIZ, 2015).

Percebe-se, portanto, que diversas políticas atuam nesse contexto de energia renovável no Brasil. Leão (2019) adiciona, ainda, que existem políticas de apoio aos investimentos no setor, como por exemplo, os programas de financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social voltados aos parques eólicos e as linhas de crédito do programa Fundo Clima (direcionado à geração de energia limpa e ao desenvolvimento da cadeia produtiva de fontes de energia renováveis), conforme citado anteriormente nesse documento. Outrossim, o autor salienta a importância dos leilões de contratação de energia da Aneel responsáveis por estimular os investimentos no setor e proporcionar maior diversificação na oferta de energia.

Alguns programas de financiamento abrangem as atividades relacionadas ao setor energético renovável. A seguir, serão apresentados alguns desses programas brasileiros que atuam como ferramenta de fomento às atividades (Tabela 5).

**Tabela 5.** Principais programas de financiamento no Brasil relacionados com energia renovável.

Programa	Finalidade
Pronaf Agroindústria	<p>Prover recursos para atividades que agreguem renda à produção e aos serviços desenvolvidos pelos beneficiários. Investimentos, inclusive em infraestrutura, que visem o beneficiamento, armazenagem, o processamento e a comercialização da produção agropecuária, de produtos florestais, do extrativismo, de produtos artesanais e da exploração de turismo rural, incluindo: implantação de pequenas e médias agroindústrias, implantação de unidades centrais de apoio gerencial, ampliação, recuperação ou modernização de unidades agroindustriais, aquisição de equipamentos e de programas de informática, capital de giro, integralização de cotas-partes vinculadas ao projeto a ser financiado e tecnologias de <b>energia renovável</b>.</p>
Pronaf Bioeconomia	<p>Implantar, utilizar e/ou recuperar: pequenos aproveitamentos hidro energéticos e tecnologias de <b>energia renovável</b>, como o uso da <b>energia solar, da biomassa, eólica, mini usinas de biocombustíveis e a substituição de tecnologia de combustível fóssil por renovável</b> nos equipamentos e máquinas agrícolas; sistemas produtivos de exploração extrativista e de produtos da sociobiodiversidade ecologicamente sustentável; tecnologias ambientais, como estação de tratamentos de água, de dejetos e efluentes, compostagem e reciclagem; projetos de adequação ambiental como implantação, conservação e expansão de sistemas de tratamento de efluentes, compostagem; adequação ou regularização das unidades familiares de produção à legislação ambiental, inclusive recuperação da reserva legal, áreas de preservação permanente,</p>

Programa	Finalidade
	recuperação de áreas degradadas e implantação e melhoramento de planos de manejo florestal sustentável.
Programa Inovagro	Apoiar investimentos necessários à incorporação de inovação tecnológica nas propriedades rurais, visando ao Aumento da produtividade, à adoção de boas práticas agropecuárias e de gestão da propriedade rural, e à inserção competitiva dos produtores rurais nos diferentes mercados consumidores. Dentre os diversos itens financiados pelo programa, podem ser financiados a implantação de sistemas para geração e distribuição de <b>energia alternativa</b> à eletricidade convencional, para consumo próprio, como a <b>energia eólica, solar e de biomassa</b> , observado que o projeto deve ser compatível com a necessidade de demanda energética da atividade produtiva instalada na propriedade rural.
ABC Florestas	Implantação, manutenção e melhoramento do manejo de florestas comerciais, inclusive aquelas destinadas ao uso industrial ou à <b>produção de carvão vegetal</b> .
ABC Tratamento de dejetos	Implantação, melhoramento e manutenção de sistemas de tratamento de dejetos e resíduos oriundos da produção animal para a <b>geração de energia</b> e compostagem.
Programa Amazônia Rural do Fundo Nacional do Norte – Rural Verde	Apoiar as atividades do segmento agropecuário desenvolvidas em bases sustentáveis; Fortalecer as atividades de segmento de transformação de produtos florestais madeireiros e não madeireiros oriundos de áreas de manejo florestal sustentável, reflorestamento e recuperação de áreas desflorestadas e/ou alteradas; Apoiar a aquisição de veículos, movidos a eletricidade, híbridos ou com <b>energia renovável</b> ; Apoiar projetos voltados para o aumento da

Programa	Finalidade
<p>Fundo Constitucional do Centro Oeste – Desenvolvimento Rural, FCO Verde</p>	<p><b>eficiência energética, incluindo fontes alternativas e renováveis;</b> Induzir os produtores/empresas a considerar o meio ambiente como negócio; Incentivar projetos destinados à redução, reutilização e reciclagem de materiais e resíduos sólidos, buscando minimizar os potenciais impactos ambientais negativos; Apoiar a viabilização de projetos que contemplem sequestro de carbono e redução de emissão de gases de efeito estufa e de desmatamento; Incentivar a implantação de empreendimentos florestais, com foco na geração de empregos e renda; Priorizar sistemas de produção que incorporem tecnologias mitigadoras de impactos ambientais.</p> <hr/> <p>Incentivar projetos que visem à conservação e à proteção do meio ambiente, à recuperação de áreas degradadas ou alteradas e ao desenvolvimento de atividades sustentáveis; apoiar a adaptação dos processos produtivos a tecnologias apropriadas às condições ambientais da região; incentivar a recuperação da área de reserva legal, matas ciliares e de preservação permanente; propiciar condições para expansão da atividade orgânica; incentivar a implantação de empreendimentos florestais, com foco na geração de empregos e renda; apoiar a viabilização de projetos que contemplem sequestro de carbono e redução de emissão de gases de efeito estufa; apoiar projetos que utilizem fontes <b>alternativas de energia</b>; intensificar o uso da terra em áreas já desmatadas, por meio da disseminação de sistemas de produção sustentáveis e que integrem agricultura, pecuária e floresta; disponibilizar recursos para investimentos necessários à implantação de sistemas de integração de lavoura-pecuária,</p>

---

<b>Programa</b>	<b>Finalidade</b>
	lavoura-floresta, pecuária-floresta ou lavoura-pecuária-floresta; aumentar a produção agropecuária em áreas já desmatadas, a oferta interna e a exportação de carnes, produtos lácteos, grãos, produtos florestais, fibras e oleaginosas; estimular a adoção do plantio direto; diversificar a renda do produtor rural; estimular a adoção de sistemas de produção; assegurar condições para o uso racional e sustentável das áreas agrícolas, de florestas e de pastagens, reduzindo problemas ambientais causados pela utilização da prática de queimadas, pela erosão, pela monocultura, pela redução do teor da matéria orgânica do solo e outros; e diminuir a pressão por desmatamento de novas áreas.

---

Elaboração e grifos da autora. Fonte: Banco da Amazônia, 2020; Banco do Nordeste, 2020; Banco Central do Brasil, 2018

#### 4.3.2 Principais políticas e programas internacionais relacionados à energia renovável proveniente de biomassa

Nos Estados Unidos, foi criado, em 2005, o programa federal *Renewable Fuel Standard* (RFS). O programa estabelece metas gradativas de volumes de combustíveis de origem renovável a serem adicionados aos derivados de petróleo (ROITMAN, 2019). De acordo com o *Congressional Research Service - CRS* (2019), o programa RFS foi instituído pela Política Energética estadunidense de 2005 e expandida em 2007 pela Lei de Segurança e Independência Energética de 2007. Para que o biocombustível possa ser enquadrado e utilizado na política, devem ser seguidos alguns critérios, como o uso (combustível para transporte, combustível para avião ou óleo para aquecimento) e os critérios técnicos.

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA (s.d.<sup>6</sup>), o programa estadunidense para uso de biocombustíveis, classifica os produtos em quatro grupos, são eles: biocombustível convencional (geralmente refere-se ao etanol derivado de milho), biocombustível avançado (proveniente de outras fontes de biomassa, exceto o milho, como cana de açúcar), biocombustível celulósico (produzido a partir da celulose, hemicelulose ou lignina) e diesel de biomassa. Cada grupo recebe uma meta diferenciada em relação à redução na emissão de GEE comparados as emissões do petróleo em 2005. As metas para os produtos, portanto, são:

- biocombustível convencional: redução de 20%;
- biocombustível avançado: redução de 50%;
- biocombustível celulósico: redução de 60%;
- diesel de biomassa: redução de 50%.

Na Califórnia, além do programa federal, existe o programa de incentivo ao uso de combustíveis com menor intensidade de carbono (*Low Carbon Fuel Standard – LCFS*). Criado em 2009, o programa contribuiu para o desenvolvimento de diferentes

---

<sup>6</sup> Disponível em: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/overview-renewable-fuel-standard>

biocombustíveis e o aumento do consumo de combustíveis renováveis (ROITMAN, 2019).

Nos Estados Unidos, existem também diversos programas estaduais ativos de incentivo ao uso de biomassa, como o Programa de Incentivo de Energia Renovável (Arizona), o Fundo de Energia Avançada (Ohio), o Crédito em Imposto de Renda sob Biomassa Agrícola (Novo México), o Programa de Empréstimo para Energia Agrícola (Vermont), o Programa de Empréstimo para Melhorias na Agricultura (Minessota), o Incentivo Fiscal para Melhoria na Qualidade do Ar (Ohio), o Programa de Empréstimo SAVES (Alabama), o Programa de Empréstimo para Energias Alternativas (Iowa), o Fundo de Empréstimo para Conservação de Energias Alternativas (Alasca), o Incentivo para Desenvolvimento de Energias Alternativas (Utah), o Crédito para Investimentos em Energia Alternativa (Montana), o Programa de Energia Alternativa e Limpa (Pensilvânia), dentre outros (OpenEI, 2020).

Na União Europeia, a política responsável por estabelecer metas quanto ao uso de energia renovável e biocombustíveis na matriz energética é chamada de Diretivas. A primeira Diretiva de Energias Renováveis (RED) foi lançada em 2009 (ROITMAN, 2019). O parlamento europeu e o conselho deliberativo, a fim de atender a objetivos relativos à redução de GEE e compromissos da agenda ambiental assumidos em nível comunitário e internacional, formulou metas para a promoção da segurança energética, o desenvolvimento tecnológico e a produção de energia por meio de fontes renováveis. O RED tem como meta fundamental a melhoria da eficiência energética do bloco econômico, instituindo objetivo de 20% do consumo final de energia proveniente de fontes renováveis e 10% de biocombustíveis no consumo de gasolina e gásóleo nos transportes (UNIÃO EUROPEIA, 2009).

Visando adequar medidas para atender às ações de redução de emissões de GEE e honrar os compromissos firmados no Acordo de Paris, de 2015, sobre Mudanças Climáticas e na Conferência das Nações Unidas – COP 21, foi formulada o RED II. A fim de promover a utilização de fontes renováveis para energia, a diretiva estabeleceu uma meta atualizada de 32% de participação da energia renovável na matriz energética da União. Além disso, o RED II traz especificações e garantias para o funcionamento e estabelecimento do mercado proveniente de energia renovável, capazes de amparar o processo de mudança de matriz energética (UNIÃO EUROPEIA, 2018).

Especificamente em Portugal, o Decreto-Lei n° 64/2017, com alterações previstas pelo Decreto 120/2019, trata especificamente da biomassa florestal e de aspectos para instalação e exploração de novas centrais de valorização de biomassa florestal no país. Os Decretos-Lei n° 64/2017 e 120/2019 promovem o aproveitamento energético da biomassa, em consonância com a relevância da temática no Plano Nacional de Energia-Clima ao desenvolver o setor de produção de energia por meio de fontes renováveis e diminuir a dependência energética do país.

O Decreto-Lei n° 64/2017 visando a defesa, o ordenamento e a preservação das florestas, bem como combater incêndios florestais, estabeleceu critérios para instalação e exploração de centrais de valorização da biomassa. E, define a potência de injeção desta energia no sistema de rede elétrica (60 MW).

A Plataforma do Biofuturo (BfP), criada em 2016, parte do entendimento de que uma bioeconomia sustentável com baixa emissão de carbono pode se desenvolver de forma rápida por intermédio de trabalhos colaborativos entre países, setor privado, academia e organizações internacionais. Os países participantes desta rede colaborativa são: Argentina, Brasil, Canadá, China, Dinamarca, Egito, Finlândia, França, Índia, Indonésia, Itália, Moçambique, Holanda, Paraguai, Filipinas, Suécia, Reino Unido, Estados Unidos e Uruguai. Esses países firmaram o compromisso de aumentar o uso de recursos com baixa emissão de carbono (como a biomassa) como insumo na produção de energia, de produtos químicos e de materiais (BIOFUTURE PLATFORM, 2018a).

A Plataforma do Biofuturo visa promover a colaboração internacional e o diálogo entre formuladores de políticas, indústria, academia e acionistas; construir um ambiente favorável ao desenvolvimento de investimentos relacionados à bioeconomia e combustíveis com baixa emissão de carbono; conscientizar e publicar análises relacionadas ao atual *status*, potenciais e desenvolvimento do setor de bioeconomia e biocombustíveis; fomentar pesquisa relacionada ao setor; facilitar discussões sobre como avaliar e promover cadeias de valor baseadas em práticas sustentáveis (BIOFUTURE PLATFORM, 2018b).

Os países participantes da BfP, firmaram como objetivos coletivos até 2030: aumentar significativamente a contribuição da bioenergia na demanda final por energia; aumentar significativamente a participação de combustíveis sustentáveis e com baixa

emissão de carbono nos combustíveis para transporte; estimular a inovação na bioeconomia e no avanço comercial na produção de biocombustíveis em grande escala, tornando o produto mais competitivo quando comparado aos combustíveis fósseis; aumentar os investimentos no setor de bioeconomia, incluindo biorrefinarias capazes de produzir energia e bioprodutos; multiplicar os gastos governamentais e das indústrias em pesquisa e inovação da bioeconomia (BIOFUTURE PLATFORM, 2017).

De acordo com a Internacional Energy Agency (IEA, 2021), em 2020 entraram em vigor 24 políticas relacionadas a energia oriunda de recursos renováveis mundialmente, especificamente nos países: Áustria, Austrália, Coreia, Eslováquia, Holanda, Irlanda, Itália Portugal e Turquia. Até maio de 2021, foram iniciadas três políticas públicas relacionadas ao tema na Holanda, Irlanda e Polônia. De forma geral, são políticas relacionadas ao planejamento estratégico e incentivo a utilização de recursos renováveis para energia, políticas de descarbonização e práticas mitigadoras, incentivo a ações inovadoras no setor energético renovável, ações relacionadas a economia verde e biocombustíveis, transição energética sustentável, incentivos financeiros e políticas nacionais do meio ambiente.

## 5. Considerações finais

No mundo em constante alteração, com inovações tecnológicas e mudanças no comportamento humano, fez-se necessário readequar o caminho em que a sociedade consumia recursos e, por consequência, o modo em que interagia com o meio ambiente. Diante desse cenário, medidas vêm sendo tomadas pelos governos como forma de mitigar essas alterações, na tentativa de alcançar o desenvolvimento sustentável.

Os recursos energéticos, nesse contexto, são reflexo dessas mudanças de comportamento. Por muitos anos, as matrizes energéticas foram pautadas em recursos não renováveis, com foco puramente em produção e formação de divisas. Entretanto, o ser humano e a economia, ao estudar a escassez de recursos começou a se atentar a possibilidades de insuficiência de recursos e desenvolvimento insustentável, sob o ponto de vista ambiental. E, no decorrer da história, a economia e a sociedade foram construindo esse conhecimento.

As convenções, as organizações internacionais, as políticas públicas e os programas são resultados dessa movimentação pela procura por alternativas para garantir a produção e o desenvolvimento econômico de nações, atrelando aspectos sociais e ambientais. E, a energia como faísca inicial para todos os processos produtivos faz parte dessa busca por alternativas.

Nos últimos anos, o uso das fontes renováveis de energia ultrapassou as fontes não renováveis. Nesse contexto de mudanças, na tentativa de reduzir a dependência e monopólio dos recursos fósseis, a biomassa surge como alternativa energética renovável, devido ao seu bom desempenho energético e disponibilidade em diversos países. E, dessa forma, ao diversificar a matriz energética dos países, contribuir para minimização de riscos e aumento da segurança energética.

O Brasil é exemplo ao se tratar de matriz energética renovável, ao possuir a as hidrelétricas como fonte principal de geração de energia. Ademais, possui características fortes para desenvolvimento de outras tecnologias para fomento do setor energético renovável, como o setor florestal - já responsável por contribuir significativamente para o PIB brasileiro, com alta produtividade e diversidade de produtos. Estudos, análises e o fomento do setor florestal para energia fazem-se essenciais para alavancar e desenvolver o setor.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOAGYE, B.; GYAMFI, S.; OFOSU, E. A.; DJORDJEVIC, S. Status of renewable energy resources for electricity supply on Ghana. **Scientific African**, 11, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Terceira Edição, Brasília. 2008.

ARAÚJO, G. J.F.; CARVALHO, C. M. Os avanços e fracassos da 15ª Conferência das Partes de Copanague: Um estudo exploratório. **Revista Iuminart**. Ano IV, n 9, 2012.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Manual do Crédito Rural**, Brasília: BCB, 2018.

BANCO DA AMAZÔNIA. **Plano de Aplicação – FNO 2021**. Disponível em <<https://www.bancoamazonia.com.br/index.php/component/edocman/cartilha-plano-fno-2021/viewdocument/3704?Itemid=0>> Acesso em: março de 2021.

BANCO DO NORDESTE. **Programação Regional – FNE 2021**. Disponível em < [https://www.bnb.gov.br/documents/1026178/8520703/Programacao\\_FNE2021.pdf/e6d9886c-4848-3e3d-48d0-a229395f7526](https://www.bnb.gov.br/documents/1026178/8520703/Programacao_FNE2021.pdf/e6d9886c-4848-3e3d-48d0-a229395f7526) > Acesso em: março de 2021.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Fundo Clima**. Disponível em < <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima/fundo-clima> > Acesso em: 3 de junho de 2021.

BEL, G.; TEIXIDÓ. The political economy of the Paris Agreement: income inequality and climate policy. **Journal of Cleaner Production**. v. 258, 2020.

BENITES-LAZARO, L. L.; MELLO-THÉRY, N. A. Empowering communities? Local stakeholders' participation in the Clean Development Mechanism in Latin America. **World Development**, 114, 254-266, 2019.

BIOFUTURE PLATFORM, **Scaling up the low carbon bioeconomy: an urgent and vital challenge**. 2017. Disponível em < <http://www.biofutureplatform.org/post/2017/11/16/scaling-up-the-low-carbon-bioeconomy-an-urgent-and-vital-challenge> > Acesso em: 20 de novembro de 2019.

\_\_\_\_\_. **Governance framework document**. 2018a. Disponível em < [https://c4c70c1f-2927-42e5-9e36-d0ba89574795.filesusr.com/ugd/dac106\\_0f3348e3a8ae43248e2861c8cc61b3bc.pdf?index=true](https://c4c70c1f-2927-42e5-9e36-d0ba89574795.filesusr.com/ugd/dac106_0f3348e3a8ae43248e2861c8cc61b3bc.pdf?index=true) > Acesso em: 20 de novembro de 2019.

\_\_\_\_\_. **Creating the Biofuture: a report on the State of the Low Carbon Bioeconomy**. 2018b. Disponível em < [https://c4c70c1f-2927-42e5-9e36-d0ba89574795.filesusr.com/ugd/dac106\\_f28f692c4e9242d9b4552da29e612a74.pdf?index=true](https://c4c70c1f-2927-42e5-9e36-d0ba89574795.filesusr.com/ugd/dac106_f28f692c4e9242d9b4552da29e612a74.pdf?index=true) > Acesso em: 20 de novembro de 2019.

BÖLK, G.; MERT, M. Fossil & renewable energy consumption, GHGs (greenhouse gases) and economic growth: evidence from a panel of EU (European Union) countries. **Energy**, 74, 439-446, 2014.

BOULDING, K. E. **The economics of the coming spaceship earth**. 1966.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRANDÃO, P. C.; SOUZA, A. L.; ROUSSET, P.; SIMAS, F. N. B.; MENDONÇA, B. A. F. Forest biomass as a viable pathway for sustainable energy supply in isolated villages of Amazonia. **Environmental Development**, online version, 2021.

BRASIL. Decreto nº 10.143, de 28 de novembro de 2019. Altera o Decreto nº 9.578, de 22 de novembro de 2018, que dispõe sobre o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima e a Política Nacional sobre Mudança do Clima. Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2019/decreto/D10143.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/D10143.htm) > Acesso em: 10 de fevereiro de 2020.

\_\_\_\_\_. Decreto nº 10.846, de 25 de outubro de 2021. Institui o Programa Nacional de Crescimento Verde. Disponível em < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.846-de-25-de-outubro-de-2021-354622848> > Acesso em 10 de janeiro de 2022.

\_\_\_\_\_. Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19478.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19478.htm) > Acesso em: 15 de agosto de 2019.

\_\_\_\_\_. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm) > Acesso em: 15 de agosto de 2019.

\_\_\_\_\_. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm) > Acesso em: 15 de agosto de 2019.

\_\_\_\_\_. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm) > Acesso em: 1 de setembro de 2019.

\_\_\_\_\_. **Relatório Nacional Voluntário sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** 2017a. Disponível em < [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/15801Brazil\\_Portuguese.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/15801Brazil_Portuguese.pdf) > Acesso em: 25 de novembro de 2019.

\_\_\_\_\_. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017b. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/L13576.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13576.htm) > Acesso em: 15 de outubro de 2019.

COLBY, M. E. Environmental management in development: the evolution of paradigms. **Ecological Economics**. v. 3, 1991.

CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE. **The Renewable Fuel Standard (RFS): an overview**. Version 42. 2020.

CORTEZ, L. A. B.; SILVA LORA, E. E.; AYARZA, J. A. C. Biomassa no Brasil e no mundo. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (org.). **Biomassa para energia**. 3 ed. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2014.

COSTA, S. E. L.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; CASTRO, F. N. M.; MAGALHÃES, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, C. P.; S.; GOMES, I. R. F.; ROCHA, S. M. G. Briquettes quality produced with the macaúba epicarp (*Acrocomia aculeata*) and *Pinus* sp. Wood. **Revista Árvore**. 43(5). 2019.

CIHAT, K.; SETAREH, K.; SALIH, K. The role of financial efficiency in renewable energy demand: evidence from OECD countries. **Journal of Environmental Management**, v 285, 2021.

CUPERTINO, S. A. **Pellets de madeira como uma alternativa para a geração térmica no Brasil**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas da Consultoria Legislativa. Senado Federal. Textos para discussão 235. 2017.

DECLARATION ON FORESTS AND LAND USE. 2021. Disponível em < <https://ukcop26.org/glasgow-leaders-declaration-on-forests-and-land-use/> > Acesso em: 5 de novembro de 2021.

DISTRITO FEDERAL. Lei nº 6.274, de janeiro de 2019. Institui diretrizes para a Política Distrital de Incentivo à Geração e ao Aproveitamento de Energia Solar, Eólica e de Biomassa e à Cogeração. Disponível em < [http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/94ea3900f6534f5eb2388977c782dda9/Lei\\_6274\\_27\\_02\\_2019.html](http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/94ea3900f6534f5eb2388977c782dda9/Lei_6274_27_02_2019.html) > Acesso em: 16 de outubro de 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Nacional de Energia – PNE 2050. 2020.

\_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional – ano base 2019.** 2020.

\_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional – ano base 2018.** 2019.

\_\_\_\_\_. **Potencial de Recursos Energéticos no Horizonte 2050.** Nota técnica PR 04/18. 2018.

\_\_\_\_\_. **O Valor da informação para o funcionamento dos mercados de energia. Série “O papel da EPE”, volume I.** 2018.

\_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional – ano base 2016.** 2017.

\_\_\_\_\_. **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica.** EPE: Rio de Janeiro, 2016.

FGV Energia. Energias renováveis complementares. **Cadernos.** Ano 2, n 4, 2015.

GLOBAL COAL TO CLEAN POWER TRANSITION STATEMENT. 2021. Disponível em < <https://ukcop26.org/global-coal-to-clean-power-transition-statement/> > Acesso em: 05 de novembro de 2021.

GHEZLOUN, A.; SAIDANE, A.; MERABET, H. The COP 22 - New commitments in support of the Paris Agreement. **Energy Procedia**, 119, 10-16, 2017.

GOÉS, M. F. B.; ANDRADE, J. C. S.; SILVA, M. S.; SANTANA, A. C. Projetos de MDL ne energia eólica no Nordeste do Brasil: perfil e cobenefícios declarados. **Revista de Gestão social e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 71-89, 2018.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável.** Série sustentabilidade, v. 4. São Paulo: Blucher, 2010.

GOMES, A. C. S.; ABARCA, C. D. G.; FARIA, E. A. S. T.; FERNANDES, H. H. O. **O setor elétrico.** Disponível em <  
[https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/livro\\_setorial/setorial14.pdf](https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/livro_setorial/setorial14.pdf)> Acesso em: 13 de novembro de 2018.

GÖKGÖZ, F.; GÜVERCİN, M. T. Energy security and renewable energy efficiency in EU. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 96, 2018.

HALAJ, D.; BRODRECHTOVA, Y. Marketing decision making in the forest biomass market: The case of Austria, Finland and Slovakia. **Forest Policy and Economics,** v. 97, 2018.

HERNANDEZ, F. D. M. Hidrelétricas na Amazônia: renovabilidade da política energética. Se é desejável a renovabilidade das formas de conversão de energia, porque não é desejável renovar a política energética. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas,** v. 7, n. 3, Belém, set./dez. 2012.

INSTITUTE DE LA FRANCOPHONIE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE – IFDD. **Bulletin Francophone des Négociations sur les Changements Climatiques – Conclusions de la Conférence de Paris.** Bulletin 07, 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy Technology Perspectives. Scenarios & Strategies to 2050.** 2010.

\_\_\_\_\_. **World energy outlook.** 2016.

\_\_\_\_\_. **World energy balances: overview.** 2018.

\_\_\_\_\_. **Policies database.** 2021. Disponível em <  
<https://www.iea.org/policies/about>> Acesso em: 5 de maio de 2021.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Agenda 2030. ODS – Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** 2018. Disponível em <  
[https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/180801\\_ods\\_metas\\_na\\_c\\_dos\\_obj\\_de\\_desenv\\_susten\\_propos\\_de\\_adequa.pdf](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/180801_ods_metas_na_c_dos_obj_de_desenv_susten_propos_de_adequa.pdf)> Acesso em: 10 de novembro de 2020.

\_\_\_\_\_. **ODS 7 – Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos. O que mostra o retrato do Brasil?** Cadernos ODS. Disponível em <

[https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/190502\\_cadernos\\_OD\\_S\\_objetivo\\_7.pdf](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/190502_cadernos_OD_S_objetivo_7.pdf) > Acesso em: 10 de novembro de 2020.

KALIUAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**. 33(3), 2009.

KIM, J.; PARK, K. Effect of the Clean Development Mechanism on the deployment of renewable energy: less developed vs. well-developed financial markets. **Energy Economics**, 75, 1-13, 2018.

LAZARETTI, D. S. A energia da floresta. **Revista Opiniões**. 38: 5 p. 2015.

LEÃO, R. A agenda 2030 das Nações Unidas e as energias renováveis no Brasil. **Radar**, 60, 2019.

LEVENDA, A. M.; BEHRIN, I.; DISANO, F. Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy technologies. **Energy Research & Social Science**. v. 71, 2021.

LIMA, M. T. D. S. L.; SOUZA, M. C. D. Discorrendo sobre o uso das termelétricas no Brasil. **Ciência e Natura**, v. 37, 2015. ISSN 2179-460X 0100-8307.

MARRERO, G. A. Greenhouse gases emissions, growth and the energy mix in Europe. **Energy Economics**, 32, 1356-1363, 2010.

MATO GROSSO, Lei Nº 11.194, de 24 de Setembro de 2020. Institui a Política Estadual de Incentivo ao Uso de Biomassa para a Geração de Energia. Disponível em <<https://leisestaduais.com.br/mt/lei-ordinaria-n-11194-2020-mato-grosso-institui-a-politica-estadual-de-incentivo-ao-uso-de-biomassa-para-a-geracao-de-energia> > Acesso em: 1 de outubro de 2020.

MMA. **Conferência das Partes**. Disponível em <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/conferencia-das-partes.html>> Acesso em: 20 de novembro de 2019.

\_\_\_\_\_. **Produção sustentável de carvão vegetal: manual de construção de sistemas fornos - fornalha**. Brasília, DF: MMA, 114 p., 2019.

MME. **Resenha energética brasileira - exercício de 2014**. 2015.

NAZIR, M. S.; MAHDI, A. J.; BILAL, M.; SOHAIL, H. M.; ALI, N.; IQBAL, H. M. N. Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm - A review. **Science of the Total Environment**, 683, 436-444, 2019.

OLIVEIRA, V. R.; SILVA, E. R. A. ODS 13: **Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos**. In: Cadernos ODS. IPEA, 2019.

OPENEI. **List of biomass incentives**. Disponível em <[https://openei.org/wiki/List\\_of\\_Biomass\\_Incentives](https://openei.org/wiki/List_of_Biomass_Incentives) > Acesso em: 20 de março de 2020.

PAZHERI, F. R.; OTHMAN, M. F.; MALIK, N. H. A review on global renewable electricity scenario. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, 2014.

PEARCE, D. An intellectual history of environmental economics. **Annual Review of Energy and the Environment**. v. 27, 2002.

PEDROSO, L. L. A.; SILVA, F. F.; SILVA, A. M.; ERTHAL JUNIOR, M.; SHIMOYA, A. Current and future demands for biomass and renewable energy in Brazil and worldwide. **Brazilian Journal of Development**. v. 5, n. 5, edição especial, 2018.

PEREIRA, M. G. *et al.* The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3786-3802, 2012. ISSN 13640321.

PORTO, M. F. D. S.; FINAMORE, R.; FERREIRA, H. Injustiças da sustentabilidade: Conflitos ambientais relacionados à produção de energia “limpa” no Brasil. **Revista Crítica de Ciências Sociais**, n. 100, p. 37-64, 2013. ISSN 0254-1106  
2182-7435.

PORTUGAL. Decreto- Lei nº 64/2017 de 12 de junho. Diário da República, 1. a série - nº 113 - 12 de junho de 2017. Disponível em <<https://dre.pt/application/conteudo/107507169> > Acesso em: 20 de novembro de 2019.

\_\_\_\_\_. Decreto- Lei nº 120/2019 de 22 de agosto de 2019. Diário da República, 1. a série - nº 160 - 22 de agosto de 2019. Disponível em <<https://dre.pt/application/conteudo/124134339> > Acesso em: 20 de novembro de 2019.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. More efficient biomass gasifications via torrefaction. **Energy**. v. 31, n. 15, 2006.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY.  
**Renewables global future report.** 2013.

\_\_\_\_\_. **Renewables 2017 - Global status report.** 2017.

RIBEIRO, J. A. **Recursos naturais como insumo energético: um estudo de caso da biomassa florestal.** 1 ed. Curitiba: Appris, 2016.

ROITMAN, T. Programas internacionais de incentivo aos biocombustíveis e o Renovabio. **FGV Energia**, Boletim Energético - Caderno Opinião, março, 2019.

RUIZ, E. T. N. F. **análise de investimento em projetos Greenfield de bioenergia.** Campinas, SP: Editora Alínea, 2019.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Biomassa florestal para geração de energia renovável.** Disponível em < <http://www.florestal.gov.br/snif/noticias-do-sfb/biomassa-florestal-para-geracao-de-energia-renovavel> > Acesso em: 28/09/2018.

SHAYANI, R. A.; OLIVEIRA, M. A. Externalidades da geração de energia com fontes convencionadas e renováveis. **Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (VI CBPE).** 2008.

SILVA, S.; CÂNDIDO, G. A. Matriz energética limpa e renovável: um desafio para o Planejamento Energético Nacional e uma oportunidade para a Região Nordeste do Brasil. **Espacios**, v. 36, n. 15, 2015.

SILVA, S. S. F. D. C., GESINALDO ATAÍDE. Matriz energética limpa e renovável: um desafio para o Planejamento Energético Nacional e uma oportunidade para a região Nordeste do Brasil. **Revista Espacios**, v. 36, n. 15, 2015.

SIMANGUNSONG, B. C. H., SITANGGANG, V. J., MANURUNG, E.G.T., RAHMADI, A., MOORE, G.A., AYE, L., TAMBUNAN, A.H. Potencial forest biomass resource as feedstock for bioenergy and its economic value in Indonesia. **Forest Policy and Economics**, v. 81, 2017.

SOUZA, N. D.; AMODEU, J. B.; XAVIER, C. N.; DIAS JÚNIOR, A. F.; CARVALHO, A. M. Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. **Floresta e Ambiente**. 23 (2), 2016.

STERNER, T.; CORIA, J. **Policy Instruments for Environmental and Natural Resource Management.** Second Edition. RFF Press: New York, 2012.

TEIXEIRA, M. A.; ALVES, L. M.; SANTOS, S. T. Biomassa e o mecanismo de desenvolvimento limpo. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (org.). **Biomassa para energia**. 3 ed. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2014.

TORRES, C.; FERMAM, R. K. S.; SBRAGIA, I. Projetos de MDL no Brasil: oportunidade de mercado para empresas e para novas entidades operacionais designadas. **Ambiente & Sociedade**. v. XIX, n. 3, p. 199-214, 2016.

TRAPP, G. S.; RODRIGUES, L. H. Avaliação do custo sistêmico total da geração de energia eólica em face da substituição das fontes hidrelétrica e termoeletrica considerando as externalidades socioeconômicas e ambientais. **Gestão & Produção**, v. 23, n. 3, p. 556-569, 2016. ISSN 1806-9649 0104-530X.

UMMADISINGU, A.; SONI, M. S. Concentrating solar power - technology, potencial and policy in India, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, issue 9, 2011.

UNIÃO EUROPÉIA. DIRETIVA 2009/28/CE. **Relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as diretivas 2001/77/CE e 2003/30/CE**. Disponível em <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN> > Acesso em: 2 de novembro de 2019.

\_\_\_\_\_. DIRETIVA 2018/2001. **Relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis (reformulação)**. Disponível em < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=LV> > Acesso em: 2 de novembro de 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Renewable Fuel Standard Program - Overview for renewable fuel standard**. Disponível em < <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/overview-renewable-fuel-standard> > Acesso em: 20 de novembro de 2019.

U.S. Energy Information Administration. **Glossary**. Disponível em < <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=R> > Acesso em: 21 de novembro de 2019.

PENA-VERGARA, G.; CASTRO, L. R.; GASPARETTO, C. A.; BIZZO, W. A. Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. **Energy**, v. 239, part C, 2022.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. **Perspectivas do setor de biomassa de energia e madeira para a geração de energia.** Papel e Celulose, BNDS Setorial 33, 2011.

## Capítulo 2 . MERCADO DE BIOMASSA FLORESTAL NO BRASIL

### 1. Introdução

A dependência dos combustíveis fósseis, aliada aos seus aspectos ambientais negativos – como a emissão de gases do efeito estufa (GEE) – faz com que aspectos econômicos, sociais e ambientais fiquem em evidência. A bioenergia, nesse contexto, pode atuar como alternativa ao uso dos combustíveis fósseis, diversificando as matrizes energéticas dos países, contribuindo para a redução na emissão de GEE e provendo benefícios socioeconômicos, como diversificação de renda e criação de novas oportunidades de emprego (ALAVALAPATI *et al.*, 2013). Assim, a bioenergia, ou seja, a energia contida na biomassa, atua como componente chave na manutenção energética mundial, sendo importante para atingir os objetivos estabelecidos pela ONU, especialmente no tocante à mitigação climática e segurança energética (YAN *et al.*, 2020).

O Brasil apresenta um grande potencial no domínio de fontes de energia renováveis, colaborado pela sua localização geográfica, condições edafoclimáticas e recursos naturais no seu território. Dessa forma, o aproveitamento desses recursos energéticos renováveis, como a biomassa, passa a ser um desafio prioritário na política energética nacional e um possível vetor para o desenvolvimento, ao contribuir para a construção de maior segurança e diversificação energética. Além de ir ao encontro das tendências mundiais de proteção e conservação ambiental e da coesão social e econômica com novos empregos (ABIB; IBP, 2019).

Frente a essa demanda por recursos bioenergéticos, a biomassa florestal fica em voga, uma vez que é um recurso energético que está presente ou pode ser produzido em grande parte dos países. Também apresenta a vantagem de poder ser armazenada, transportada e utilizada longe do seu local de produção (SIMON *et al.*, 2021), como é o caso dos pellets e briquetes.

No cenário energético, a biomassa florestal é um insumo importante para a humanidade há muito tempo, para desenvolvimento das atividades mais básicas do ser humano, como cocção e aquecimento. E, atualmente, vem sendo estimulada e priorizada como fonte energética alternativa às fontes convencionais de energia, em função de suas qualidades ambientais e, principalmente, pelo fato de ser renovável. Como matéria-prima

para energia, a biomassa florestal pode se apresentar como lenha, carvão vegetal, pellets, briquetes, cavacos e até mesmo como resíduo (FOELKEL, 2016). Compreender e analisar o mercado energético da biomassa florestal, assim como sua cadeia produtiva, produtos e estrutura de mercado é importante para assegurar a oferta desses produtos e reduzir custos (WBA, 2018) e riscos inerentes do processo de transformação da biomassa florestal em energia.

Portanto, frente ao grande potencial de sustentabilidade da biomassa para energia, conhecer suas características, potencialidades e processo produtivo é importante. Para tanto, são necessários estudos, desenvolvimento e transferência de tecnologias, investimento no setor e suporte governamental. No mundo, atualmente, a academia, o setor industrial e o setor público começam a colaborar e trabalhar em conjunto para desenvolver o setor de biomassa e fomentar seu uso (RÖDER *et al.*, 2020).

Nesse contexto, as ferramentas de qualidade são utilizadas como meio para facilitar a implementação e a padronização de atividades, a elaboração de projetos e a sistematização de informações, de forma a contribuir com o melhor gerenciamento da atividade produtiva (TRINDADE *et al.*, 2007). E auxiliar o desenvolvimento de políticas públicas para o setor energético renovável pautado em energias renováveis como a biomassa, ou auxiliar no engajamento e na formação de conhecimento sobre o tema. Diante o exposto, este capítulo tem como objetivo analisar o mercado de biomassa no Brasil para geração de energia.

## 2. Material e métodos

Este capítulo da tese faz parte de uma pesquisa de carácter básico estratégica, ou seja, a partir deste estudo busca-se levantar dados a fim de somar informações e conhecimentos (GIL, 2021) sobre o setor e o mercado de biomassa florestal como fonte de energia renovável no Brasil. Desta forma, por meio de uma pesquisa exploratória (que visa fornecer maior familiaridade sobre a questão de pesquisa e coletar informações e dados importantes relacionados ao fenômeno estudado) e descritiva (que busca descrever características de um determinado fenômeno ou população) (GIL, 2021), adicionalmente com pesquisa bibliográfica e coleta de dados secundários do setor energético de biomassa florestal, analisa-se o mercado deste insumo energético.

Para o desenvolvimento da pesquisa e coleta de dados relativos ao setor de biomassa florestal, a ferramenta de gestão estratégica de empreendimentos *5W2H* foi utilizada como metodologia auxiliar de pesquisa. Por meio dessa ferramenta foi possível nortear a questão de pesquisa, permitindo melhor caracterização do problema, elaboração e detalhamento de linhas de ação do mercado de biomassa (TRINDADE, 2007) a partir de perguntas simples com as iniciais *W* e *H*: “*What?*”, “*Where?*”, “*Why?*”, “*When?*”, “*Who?*”, “*How?*” e “*How much?*”. Dessa forma, a metodologia foi utilizada para análise do mercado de biomassa no Brasil a partir de sete perguntas críticas, conforme a Tabela 6, sobre aspectos mercadológicos da biomassa florestal.

**Tabela 6.** Metodologia 5W2H e questões utilizadas para análise do mercado de biomassa florestal.

Etapa metodológica		Questão
5W	What?	Qual produto será analisado? O que é biomassa florestal?
	Where?	Onde ocorre a produção de biomassa florestal no Brasil?
	Why?	Por que investir em biomassa florestal? Por que o Brasil deve atuar neste mercado?
	When?	Quando foi o início da produção de biomassa florestal no Brasil?
	Who?	Principais players na produção de biomassa florestal no mundo?
2H	How?	Quais os processos produtivos de biomassa florestal para energia utilizados no Brasil?
	How much?	Quais custos envolvidos nos processos produtivos de biomassa florestal para energia?

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 What? – Qual produto será analisado? O que é biomassa florestal?

Biomassa envolve toda matéria orgânica, de origem vegetal, gerada via fotossíntese e seus derivados, como: material florestal ou agrícola, resíduos florestais ou agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida em resíduos industriais, domésticos, municipais etc. A energia química, presente nesses materiais, pode ser disponibilizada para uso através da transformação energética da radiação solar via combustão ou convertida por meio de processos mais adequados dependente do produto final desejado (NOGUEIRA; SILVA LORA, 2003). Dentre os diversos conceitos de biomassa, Coelho (2012) define biomassa como recurso renovável proveniente de matéria orgânica animal ou vegetal que pode ser utilizada para produção de energia.

Existem várias classificações da biomassa na literatura. Nogueira e Silva Lora (2003), trazem uma classificação quanto à origem da matéria que constitui a biomassa (Tabela 7). Os autores classificam combustíveis provenientes da biomassa como: biocombustíveis da madeira (dendrocombustíveis), combustíveis de plantação não florestal (agrocombustíveis) e os resíduos urbanos.

**Tabela 7.** Classificação dos combustíveis obtidos via biomassa.

<b>1º nível</b>	<b>2º nível</b>	<b>Definição</b>
	Combustíveis diretos da madeira (plantações energéticas)	Madeira proveniente de florestas energéticas, usadas direta ou indiretamente.
Biocombustíveis da madeira	Combustíveis indiretos da madeira	Combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, incluindo subprodutos da indústria florestal de fins não energéticos.
	Combustíveis da madeira recuperada	Madeira utilizada de forma direta ou indireta como combustível, resultante de atividades socioeconômicas que utilizam produtos de origem florestal.
Biocombustíveis agrícolas	Combustíveis de plantações energéticas	Comumente produtos sólidos e líquidos produzidos a partir de plantações anuais (como álcool da cana de açúcar).
	Subprodutos agrícolas	Resíduos de colheita e outros tipos de subprodutos de culturas (como palhas e folhas).
	Subprodutos animais	Esterco de aves, bovinos e suínos.

1° nível	2° nível	Definição
	Subprodutos agroindustriais	Subprodutos de agroindústrias (bagaço da cana de açúcar e casca de arroz).
	Resíduos urbanos	Resíduos sólidos e líquidos oriundos de centros urbanos, cidades ou vilas.

Fonte: Nogueira; Silva Lora, 2003.

O conceito de biomassa florestal não se restringe apenas ao uso direto da madeira (comumente conhecido como lenha e carvão vegetal). Os materiais que constituem a biomassa florestal incluem folhas, galhos, serapilheira, raízes, frutos, extrativos e resíduos da indústria florestal (casca, cavacos, serragem, pó e licor negro, por exemplo), conforme Brand (2010).

Brand (2010) classifica a biomassa florestal quanto ao sistema de produção do combustível. Podendo ser, portanto, um material oriundo de um sistema florestal nativo, implantado ou oriunda da indústria de base florestal, conforme o autor caracteriza a seguir:

a) Biomassa de florestas nativas

Neste contexto, a biomassa florestal pode ser proveniente da transformação total do uso do solo. Essa origem não é considerada uma alternativa sustentável, pois existe substituição da floresta nativa, impossibilitando futuros usos.

A floresta nativa pode ser utilizada para fins energéticos através de planos de manejo sustentável, prevendo usos múltiplos da floresta. O autor destaca que para construção de um plano de manejo para fins energéticos, depende da: tipologia florestal, mercado consumidor de produtos florestais, nível de tecnologia demandada pelas atividades silviculturais, políticas de incentivo e legislação vigente.

Brand (2010) destaca o potencial da Caatinga para ser utilizada em planos de manejo com fins energéticos. Essa tipologia florestal possui características interessantes para este fim, tais como: árvores medianas, alta densidade de indivíduos por área, alta massa

específica por unidade de área, espécies com madeira de alta massa específica e baixo teor de umidade, e alta taxa de rebrota nos tocos ou raízes.

Por outro lado, na Floresta Ombrófila Densa (Floresta Amazônica ou Mata Atlântica) não é interessante o uso exclusivo para geração de energia. Neste cenário, os indivíduos florestais possuem maior porte, alta longevidade e muita variação de massa específica. Neste caso, os resíduos da exploração florestal podem ser utilizados para fins energéticos, podendo até atuar como uma ação de manejo auxiliando a remoção de material no campo que possa prejudicar a regeneração natural da área. De forma geral, qualquer plano de manejo ou intervenção deve ser feito de acordo com as características da área, respeitando o potencial da região.

#### b) Biomassa de florestas plantadas

A biomassa florestal, neste cenário, pode ser obtida via florestas plantadas para fins exclusivos energéticos e por florestas de uso múltiplo. No Brasil, o plantio de florestas energéticas é uma prática estabelecida, principalmente em Minas Gerais, onde existe demanda por madeira pela indústria siderúrgica para produção do ferro gusa. A escolha da espécie para utilização em florestas energéticas deve atender alguns requisitos básicos, como: rápido crescimento, tolerância à alta densidade populacional, alta massa específica da madeira e possibilidade de uso da talhadia.

#### c) Biomassa da indústria de base florestal

No processo industrial do setor florestal, todas as etapas produzem resíduos. Dependendo da qualidade e das características físico-químicas (como granulometria, teor de umidade, contaminação com agentes químicos ou físicos), estes resíduos podem ser reaproveitados e utilizados para geração de energia.

Dentro deste aspecto produtivo, um cenário muito interessante para o Brasil são as concessões florestais. Na região Norte, por exemplo, existe um grande potencial de geração de biomassa residual. Entretanto, na região ainda existem entraves para desenvolvimento e estabelecimento maduro do manejo florestal sustentável, assim como para os processos de industrialização das toras (EPE, 2018). O Governo Federal, no último ano, vem investindo em projetos e estudos na região para gerar novos produtos nas atividades de concessão florestal, de forma a melhorar a produtividade e gerar empregos.

Existe a demanda por atividades ligadas ao manejo florestal sustentável para otimizar e viabilizar o aproveitamento de resíduos, valorizando os subprodutos da atividade. E, dessa forma, possibilitar a agregação de valor aos subprodutos, contribuindo para que os investimentos financeiros realizados nas atividades sejam revertidos em lucros, alternativas de renda para os investidores das atividades de manejo, desenvolvimento tecnológico e conservação do meio (BRAZ *et al.*, 2014).

Os autores Ribeiro *et al.* (2017), destacam a importância e possibilidade de utilizar sistemas agroflorestais na cadeia de bioenergia, uma vez que esses sistemas são capazes de aliar sustentabilidade e produtividade sem marginalizar os pequenos e médios produtores. Além disso, o sistema representa uma interessante alternativa para uso do solo, ao conciliar produção de alimentos e produção de biomassa.

Em sistemas agroflorestais, é interessante que o produtor planeje sua produção para além da bioenergia, a fim de proteger-se de eventuais mudanças no mercado. E, desta forma, o produtor deve procurar estabelecer uma composição de multiprodutos florestais com potencial de comercialização regional (RIBEIRO *et al.*, 2017).

### 3.2 Where? – Onde ocorre a produção de biomassa florestal no Brasil?

No Brasil, a indústria alimentícia é a maior consumidora de resíduos de madeira e lenha, para uso em caldeiras em pizzarias, churrascarias e padarias. Outro setor que utiliza a biomassa florestal como insumo energético é o de indústrias de papel e celulose, que utilizam o licor negro e resíduos da colheita florestal para processos de cogeração de energia na planta industrial e, em alguns casos, vendem o excedente produzido. As fábricas de painéis também utilizam os resíduos gerados em serrarias para cogeração de energia. E a indústria siderúrgica utiliza a biomassa florestal (carvão vegetal) como matéria-prima para produção de produtos com maior valor agregado, ferro-gusa e aço (AGROICONE, 2015).

Segundo a Aneel (2020), atualmente existem 9.022 empreendimentos que compõem a matriz energética brasileira, conforme a Tabela 8. Desse total, os empreendimentos com combustíveis provenientes de biomassa equivalem a aproximadamente 8,8% da potência outorgada pela Aneel e, 62,3% são de origem hídrica.

**Tabela 8.** Empreendimentos por tipo de combustível e potencial outorgado dos empreendimentos que compõem a matriz energética do Brasil por fonte de combustível.

<b>Origem do combustível</b>	<b>Número de empreendimentos</b>	<b>Potência outorgada (kW)</b>
Hídrica	1377	109.270.534,41
Fóssil	2488	28.743.924,44
Eólica	669	16.776.618,86
Biomassa	576	15.434.347,45
Solar	3909	3.183.488,25
Nuclear	2	1.990.000,00
Undi-elétrica	1	50,00
<b>Total</b>	<b>9022</b>	<b>175.398.963,41</b>

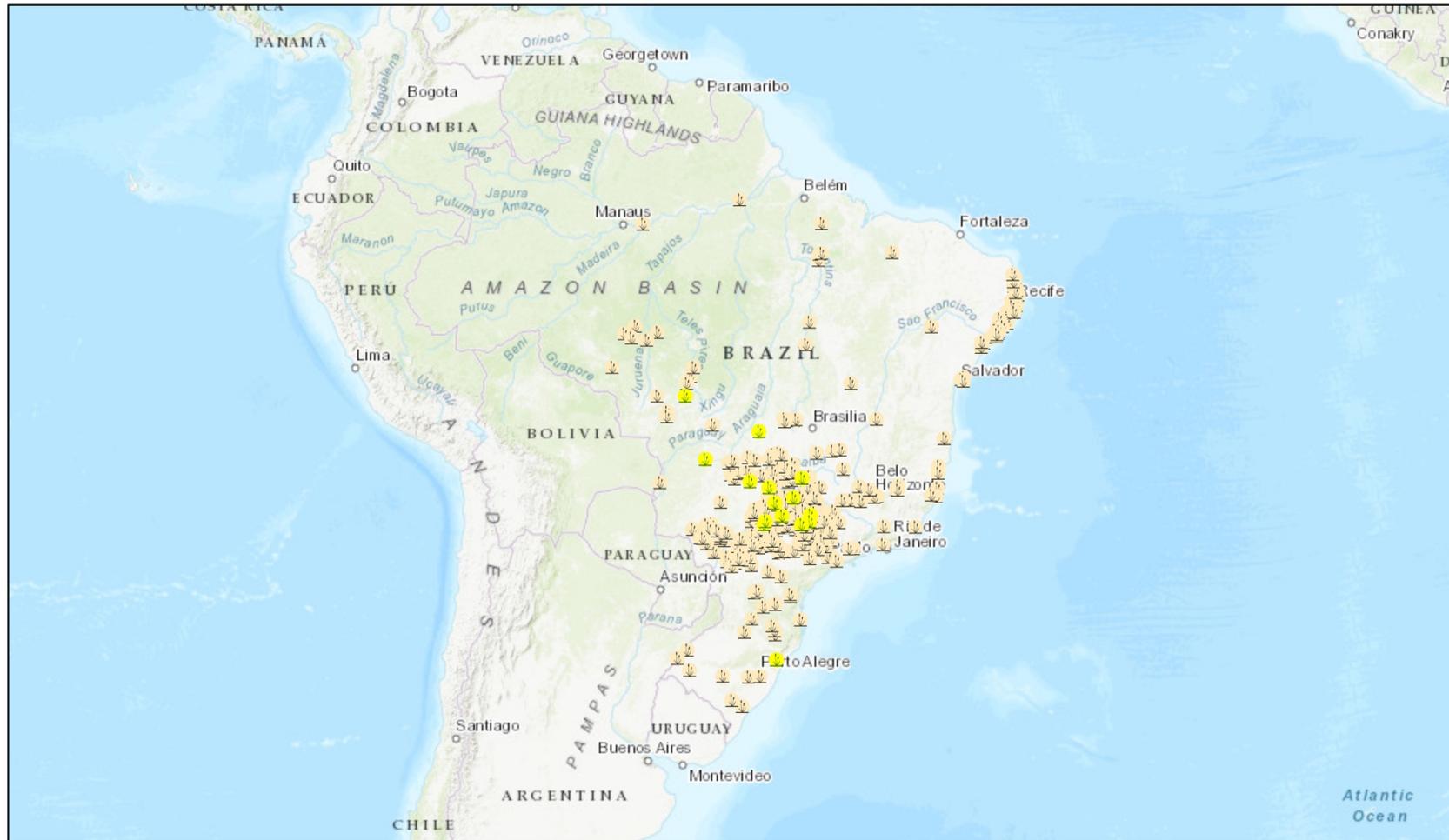
Fonte: Elaborado pela autora, a partir de dados do SIGA – Aneel, 2020.

Dos empreendimentos que utilizam a biomassa como combustível, 107 são relacionados à biomassa florestal em operação (ANEXO I), utilizando como combustível final o biogás, carvão vegetal, gás de alto forno, lenha, licor negro e resíduos florestais (ANEEL, 2020). Nesse cenário, dentre os empreendimentos em operação no Brasil, 60 fazem uso de resíduos florestais, 18 de licor negro, 12 de gás de alto forno, oito de carvão vegetal, oito de lenha e um de biogás. A produção de energia proveniente de recursos florestais está presente nos estados do Acre, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Roraima, Rondônia, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Tocantins.

Atualmente, existem 11 empreendimentos em construção no Brasil, em Roraima, Acre, São Paulo, Rio Grande do Sul, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Norte. Desses, nove estão autorizados a utilizar resíduos florestais e dois a utilizar o licor negro como combustível, totalizando 825.777,00 kW de potência outorgada. Além disso, seis empreendimentos estão autorizados a realizar atividades de geração de energia, mas ainda não iniciaram a construção (nos Estados: Amazonas, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul), com previsão de utilizar resíduos florestais (3), lenha (2) e licor negro (1) (ANEEL, 2020).

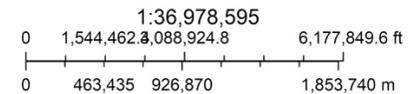
A Figura 11 traz a localização dos empreendimentos, existentes e planejados, que utilizam biomassa florestal (lenha, carvão vegetal, licor negro e resíduos florestais) para geração de energia e que estão cadastrados no Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro.

# Impressão Webmap EPE



06/09/2021 21:20:21

-  UTE Biomassa - Expansão Planejada
-  UTE Biomassa - Base Existente



Sources: Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Webmap EPE  
Esse mapa foi gerado no Webmap EPE.

**Figura 11.** Usinas termelétricas (biomassa florestal) existentes e planejadas no território brasileiro. Fonte: Webmap EPE, 2020.

No que se refere ao consumo de carvão vegetal, o principal polo é a região Sudeste (com destaque para o estado de Minas Gerais, com mais de 40% das empresas brasileiras que utilizam o carvão vegetal), onde encontram-se a maioria das empresas que utilizam esse insumo em suas cadeias produtivas. A região é responsável por 76,1% do consumo de carvão vegetal nacional, seguido pelo Nordeste (12,2%), Centro-Oeste (6,1%), Sul (4,4%) e Norte (1,1%), segundo Ibá (2020).

As florestas plantadas são importantes no cenário produtivo do carvão vegetal no Brasil, sendo responsável 91% da produção consumida em 2018. Quanto ao perfil dessa produção, dos 7,83 milhões de hectares destinados às florestas plantadas, 36% pertencem às empresas de papel de celulose, 29% são de proprietários independentes que investem no setor florestal (principalmente para comercialização de madeira em tora), 12% é destinado exclusivamente para siderurgia à carvão vegetal, 10% são detidos por investidores financeiros atraídos pelo potencial produtivo do país, 6% são das empresas de painéis de madeira e pisos laminados, 4% destinado à produtos sólidos e outros usos 3% que completam os perfis dos proprietários de áreas com florestas plantadas (IBÁ, 2019).

3.3 Why? – Por que investir em biomassa florestal? Por que o Brasil deve atuar neste mercado?

O aumento mundial por energia e a busca por otimização dos custos de produção têm aquecido a procura por fontes alternativas sustentáveis e renováveis de energia. E, neste cenário, a biomassa vem conquistando espaço como alternativa para reduzir dependência de combustíveis fósseis e contribuir para redução na emissão de CO<sub>2</sub>, aliando aspectos ecológicos e ambientais positivos (FOURNEL *et al.*, 2015).

Existe uma tendência de que os países e seus governantes procurem tecnologias para garantir uma transição de um modelo de puramente desenvolvimentista para um modelo com alicerces ambientais, econômicos e sociais. E, portanto, a energia faz parte deste cenário. Para garantir segurança energética e o fornecimento de energia as nações apostam cada vez mais em fontes renováveis e menos dependência dos combustíveis fósseis (RIBEIRO, 2016).

Se produzida de forma sustentável e eficiente, a utilização de biomassa como fonte de energia pode gerar vários benefícios ambientais, econômicos e sociais se comparados

aos combustíveis de origem fóssil. Dentre os benefícios, tem-se o melhor manejo da terra, reciclagem de nutrientes, criação de empregos, uso de áreas agrícolas excedentes nos países industrializados, fornecimento de vetores energéticos mais modernos a propriedades no meio rural, redução de emissões de CO<sub>2</sub> e controle de resíduos (COELHO, 2012; GOLDEMBERG, 2010).

As fontes renováveis de energia, como a biomassa, são importantes para contribuir no plano de energia nacional brasileiro. No âmbito econômico, principalmente em países em desenvolvimento, por serem muitas vezes produzidas de forma regional, o uso da biomassa contribui para independência energética e receita. Além disso, por geralmente serem produzidas na zona rural, existe uma importante fixação e geração de empregos nessas regiões (COELHO, 2012; GOLDEMBERG, 2010). Percebe-se, portanto, que o planejamento energético sustentável e renovável também está atrelado ao desenvolvimento social, uma vez que o acesso à energia pode contribuir para o acesso aos meios de comunicação, educação e saúde (RIBEIRO, 2016).

Segundo o EPE (2020), no Plano Nacional de Energia – PNE 2050, o posicionamento favorável do Brasil em relação às características edafoclimáticas permite que diversas fontes de biomassa prosperem positivamente no território. Diante deste cenário positivo quanto à oferta, a energia proveniente de biomassa está inserida em um ambiente promissor, se seu cultivo continuar ocorrendo de forma sustentável ambientalmente e de acordo com aspectos legais.

Assim como outras energias renováveis, nos últimos anos, o uso alternativo da biomassa florestal para produção de energia vem sendo motivado. Visando diminuir a dependência de combustíveis fósseis, aumentar a segurança energética, reduzir a emissão de gases estufa e otimizar o desenvolvimento econômico, agrônômico e florestal do país (HONORATO-SALAZAR; SADHUKHAN, 2020). Adicionalmente, segundo Coelho (2012), no Brasil, existem iniciativas do governo e projetos associados ao mecanismo de Desenvolvimento Limpo, que podem refletir para outros mercados mundiais. E, desta forma, contribuir para ampliação do uso da biomassa, com desenvolvimento de tecnologias e possibilitando maior viabilidade econômica frente aos combustíveis não renováveis. Além dos programas de crédito desenvolvidos pelo Banco Nacional do Desenvolvimento, Banco Amazônia e Banco do Centro-Oeste, conforme descrito no Capítulo 1 dessa tese.

A biomassa florestal destaca-se, portanto, devido aos seus aspectos relacionados a: sustentabilidade (são capazes de diminuir a pressão sobre a vegetação nativa, promover a recuperação de solos degradados e contribuir para o fluxo, manutenção e qualidade dos recursos hídricos); sequestro de CO<sub>2</sub> (maciços florestais podem sequestrar e estocar, cerca de 130 toneladas de CO<sub>2</sub> por hectare); criação de vagas de emprego (capacidade de gerar empregos e renda em toda a cadeia produtiva da madeira, sendo capaz de promover o desenvolvimento de comunidades rurais e municípios; de forma direta, são empregados, aproximadamente, nove trabalhadores por MW de energia gerada); dispersão geográfica (os plantios comerciais estão localizados em diferentes regiões do país, permitindo que as plantas geradoras de energia transmitam energia para diferentes regiões, de acordo com a demanda e proximidade com as linhas de transmissão); menores riscos no fornecimento e garantia do combustível (menos suscetíveis a oscilações climáticas e produção não sazonal), segundo a Câmara Setorial da Cadeia Produtiva de Florestal Plantadas (2017).

Adicionalmente, ao ser comparada com outras fontes de energia (especialmente às usinas a carvão mineral), as usinas termelétricas movidas a biomassa florestal apresentam baixa pegada de carbono. E, ao contrário de outras fontes renováveis em expansão no Brasil, como a eólica e fotovoltaica, as termelétricas possuem as vantagens de controle e flexibilidade na geração. Possibilitando, desta forma, contribuição para o sistema elétrico com a regularização sazonal da oferta de energia e com flexibilidade de geração a curto prazo (BEZERRA JÚNIOR *et al.*, 2019).

O Sistema Interligado Nacional (SIN), conforme a Figura 12, através do seu sistema de transmissão, conecta o Norte e Sul do país, permitindo a transferência de energia entre os subsistemas com maior segurança e aproveitamentos dos recursos. Este sistema é majoritariamente abastecido por fontes renováveis (hidrelétricas com 64% da capacidade instalada; usinas termelétricas a biomassa com 9% de representatividade e empreendimentos eólicos com 8%), ao contrário dos Sistemas Isolados, que são abastecidos basicamente por diesel (EPE, 2018).

## Impressão Webmap EPE



06/09/2021 21:26:33

Linhas de Transmissão - Base Existente

800 kV

765 kV

600 kV

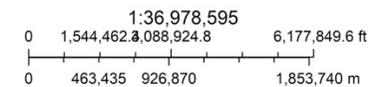
500 kV; 525 kV

440 kV

345 kV

230 kV

132 kV



Sources: Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Webmap EPE

Esse mapa foi gerado no Webmap EPE.

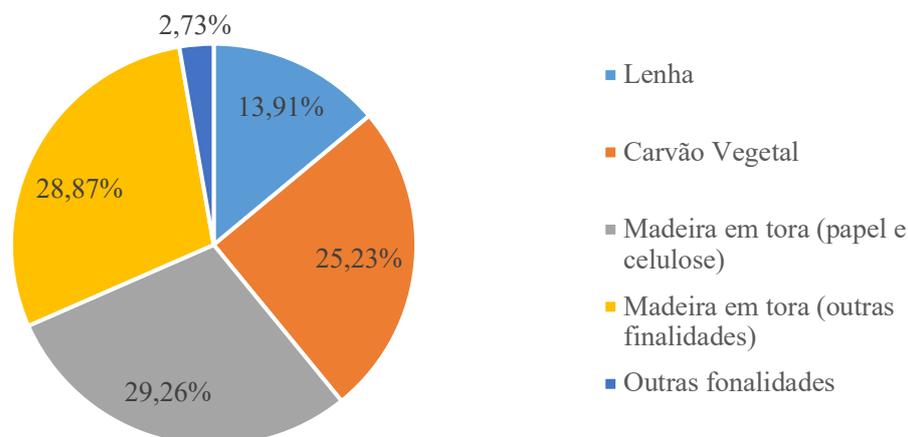
**Figura 12.** Sistema Interligado Nacional (SIN), com linhas de transmissão existentes (linha contínua) e planejadas (linha tracejada) e diferentes tensões (representadas pelas cores). Fonte: Webmap EPE, 2020.

Neste contexto, a biomassa residual da industrialização de pinus e eucalipto, referente a dados de 2016, possui um potencial de aproveitamento energético que permite o desenvolvimento de uma capacidade instalada de 633 MW, tendo capacidade de suprir o combustível para geração de 4.438 GWh de energia elétrica ao ano, via usinas termelétricas do SIN. Os Estados do Paraná, São Paulo, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Minas Gerais são responsáveis por produzir 90% da produção dessa biomassa (EPE, 2018).

Outro fator interessante relacionado à biomassa florestal como insumo energético refere-se ao fato que esta fonte possui os preços atrelados à moeda nacional e sofre reajustes de acordo com a taxa de inflação brasileira, ao contrário de outras fontes termelétricas, como as fósseis. Esta situação possibilita que exista uma estabilidade nos preços muito influenciada pelos custos dos combustíveis, e que impacta na previsibilidade dos preços da energia ao consumidor. Isso não ocorre com as usinas de gás natural, por exemplo, em que os custos dos combustíveis podem ser reajustados de acordo com os preços internacionais, agregando ao valor da geração a volatilidade dos preços do combustível e as oscilações cambiais (BEZERRA JÚNIOR *et al.*, 2019).

Em 2019, a produção florestal atingiu o valor de R\$ 20 bilhões, 77,7% de participação da silvicultura e 22,3% da extração florestal. Esta produção é proveniente de 4.867 municípios brasileiros, com destaque para as regiões Sul e Sudeste com maior parte da produção florestal do país. As florestas plantadas, nesse ano, atingiram 10 milhões de hectares, com plantações de eucalipto representando 76,3% desse total, 19,8% de pinus e 3,9% de outras espécies (IBGE, 2020).

Entre os produtos madeireiros da silvicultura, a lenha, em 2019, foi o único que apresentou crescimento (1,1%) com relação ao ano anterior. O carvão vegetal, que até 2018 ganhava destaque na produção, em 2019 apresentou ligeira queda tanto na quantidade produzida (1,5%) quanto no valor (4,0%). Quanto à representatividade dos produtos da silvicultura, nesse período, a madeira em tora para celulose representou 29,3% do valor de produção, seguido pela madeira em tora para outras finalidades, carvão vegetal, lenha e produtos não madeireiros (Figura 13) (IBGE, 2020).



**Figura 13.** Valor de produção na silvicultura, em 2019, por tipo de produto (Elaborado pela autora. Fonte: IBGE, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, 2019).

Segundo dados disponíveis de comércio exterior do Brasil (ComexVis) do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, em 2020, foram exportados US\$ 7,07 milhões referentes a 15.821,84 toneladas de carvão vegetal e lenha. Esses produtos foram destinados principalmente aos Estados Unidos, Alemanha, Noruega, Porto Rico, Espanha, Emirados Árabes, Países Baixos e Reino Unido, com respectivamente 52%, 34%, 5,2%, 1,1% 0,97%, 0,87% 0,74% e 0,63% das exportações. Com menor representatividade tem-se Itália, Portugal, Grécia, Bélgica, França, Malta, Chipre, Suíça, Dinamarca, Irlanda, Coreia do Sul, Uruguai, dentre outros.

Especificamente para os produtos lenha, no período entre 1998 e 2017, houve uma mudança na utilização de matéria-prima nas microrregiões produtoras desses insumos energéticos. As microrregiões especializadas em lenha de madeira nativa, foram substituídas por regiões especializadas em lenha proveniente da silvicultura. Neste contexto, as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, além de serem os maiores produtores, possuem o maior número de microrregiões especializadas em lenha com origem em plantios. Enquanto que a região Norte, neste período, ainda apresentava uma produção de lenha pautada no extrativismo (BICHEL; TELLES, 2021).

No que se refere ao carvão, no período entre 1998 a 2017, Minas Gerais permanece como o principal produtor. O estado, é um importante exemplo de como a aplicação de leis efetivas pode contribuir para mudanças no padrão de produção e de consumo, promovendo uma mudança na produção de carvão de madeira nativa e expansão das

atividades de silvicultura. Nesse mesmo período, o Maranhão surgiu como importante produtor de carvão, entretanto ainda com a presença de muitas microrregiões dependentes da produção de carvão vegetal de madeira nativa (BICHEL; TELLES, 2021).

Em 2019, a região que produziu maior quantidade de lenha foram as regiões Sul e Sudeste, respectivamente (Tabela 9). Essas regiões, de acordo com o IBGE (2019), são as que têm maior participação no valor de produção da silvicultura no Brasil. Enquanto que as regiões Sudeste e Nordeste, foram as maiores produtoras de carvão vegetal.

**Tabela 9.** Produção (quantidade e valor) de lenha e carvão vegetal nas regiões brasileiras, em 2019.

Região	Lenha		Carvão Vegetal	
	Quantidade (toneladas)	Valor (Mil reais)	Quantidade (toneladas)	Valor (Mil reais)
Norte	299.923	12.956	37.868	38.592
Nordeste	583.324	22.346	297.807	162.845
Sudeste	11.482.795	416.172	5.352.329	3.489.153
Sul	33.324.505	1.425.030	141.151	130.134
Centro-Oeste	5.489.204	282.979	172.375	94.983

Elaborado pela autora (IBGE, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, 2019).

No Brasil, as florestas energéticas possuem grande importância para a produção de carvão vegetal, tanto para utilização doméstica quanto para uso na siderurgia. E são responsáveis por colocar o país como um dos principais produtores de carvão vegetal, assim como desenvolvedor de processos tecnológicos de conversão da madeira em carvão e aproveitamento dos subprodutos da carbonização (FOELKEL, 2016).

Os pellets são produtos importantes no cenário energético. Entre 2010 e 2016, o seu consumo aumentou 60%, com os Estados Unidos, União Europeia, Canadá e Brasil, como os principais produtores. E com forte mercado consumidor na Europa, Japão, Coreia e América do Norte. As características e dimensões dos pellets permitem que sejam transportados a longas distâncias. E, em 2015, a maior parte da transação econômica desse produto foi realizada internacionalmente, possibilitando que países com recursos florestais escassos tenham acesso ao produto para suprir sua demanda interna (IEA Bioenergy, 2017).

### 3.4 When? – Quando foi o início da produção de biomassa florestal no Brasil?

No Brasil a produção de lenha ocorre há mais de 400 anos e atingiu a maturidade na década de 60 (COELHO, 2012). A biomassa florestal como fonte de energia (lenha) teve importância histórica para o desenvolvimento da humanidade, sendo a primeira fonte de energia utilizada para aquecimento e cocção de alimentos (BRITO, 2007).

Apesar do seu início de produção ser marcado por um processo insustentável, principalmente no que tange ao desmatamento e às condições de trabalho (COELHO, 2012), Brito (1990), salienta que no Brasil, especificamente, até 1972 a madeira era a principal fonte energética. Perdendo, em 1973, essa supremacia para a energia derivada do petróleo.

A crise do petróleo, nos anos 70, todavia, contribuiu para mudanças nesse cenário, quando a biomassa passa a ser uma opção na substituição aos derivados do petróleo. No Brasil, por exemplo, o uso moderno da biomassa foi marcado pelo programa pioneiro Proálcool e programas de reflorestamento e otimização florestal (COELHO, 2012). A biomassa passa, portanto, a ser considerada uma alternativa para atender as demandas por energia térmica, de centrais de pequeno e médio porte e do mercado (COUTO; MÜLLER, 2008).

A madeira, especificamente o carvão vegetal, era um produto de grande importância econômica no Brasil na década de 80. Em 1988, por exemplo, o setor produziu 11 milhões de toneladas de carvão vegetal, valor que colocou o Brasil como maior produtor mundial de carvão vegetal (BRITO, 1990).

Entretanto, 78% da matéria prima usada para carvão vegetal, em 1990, possuía origem nativa. O período foi marcado por aumento da demanda de produtos agrícolas e, conseqüentemente, com a criação de novas fronteiras de produção, o desmatamento foi intenso. O aumento do desmatamento, seja feito pelo produtor seja via incentivos do governo, gerou, principalmente em Minas Gerais, Goiás, Sul da Bahia e Mata Grosso, um mercado fornecedor de madeira. O que antes era queimado, passou a abastecer o setor energético e siderurgia (BRITO, 1990).

A década de 80 foi marcada pela produção e consumo de carvão ascendente e, na década de 90, a situação foi declinante. Essa volatilidade foi decorrência da constante desvalorização da moeda nacional e, por conseguinte, da redução das exportações. Nesse cenário, a produção de ferro-gusa, também foi desacelerada. E, para a indústria siderúrgica, nesse contexto, passou a ser melhor utilizar o coque (produto substituto ao

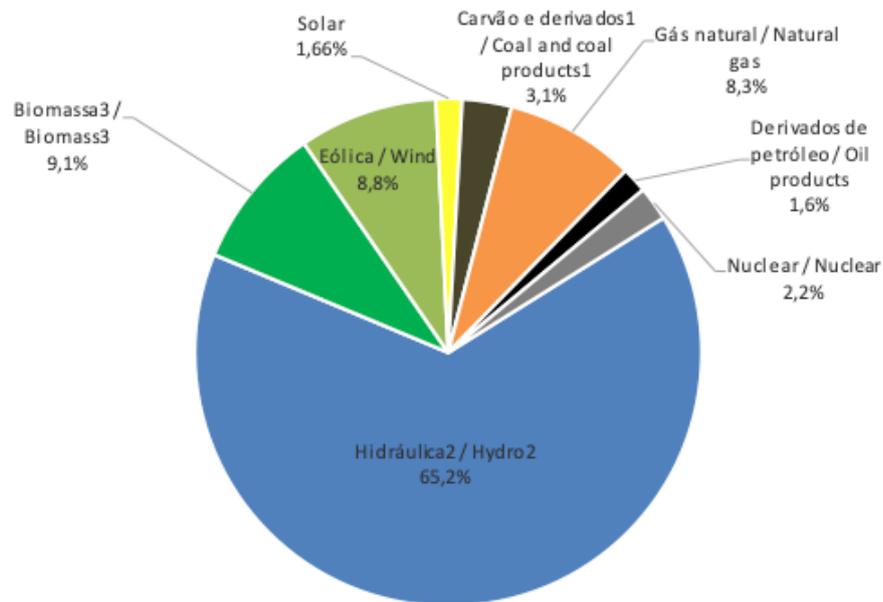
carvão vegetal) para suprir as demandas industriais, uma vez que esse insumo estava relativamente mais barato do que o carvão vegetal. Causando, portanto, redução da produção e consumo do carvão vegetal nesse período (SOARES *et al.*, 2004).

Foi na mesma época, entretanto, que se iniciam as atividades de reflorestamento no Brasil. Os reflorestamentos, portanto, surgem como alternativa para atender a demanda de madeira, uma vez que a madeira nativa estava cada vez mais distante fisicamente do mercado consumidor. Além disso, os plantios de reflorestamento utilizavam espécies de rápido crescimento, sendo capazes de atender a demanda de madeira. Entre 1979 e 1988, por exemplo, a taxa de consumo de carvão vegetal proveniente da mata nativa teve um crescimento de 189%, enquanto o carvão oriundo de reflorestamento cresceu 369% (BRITO, 1990).

A crise do petróleo, nos anos 1970, também representou uma nova oportunidade de negócios para o setor de resíduos florestais ao possibilitar a busca por novas soluções para substituir o óleo. A tecnologia de densificação de resíduos florestais, primeiro na forma de briquetes e, posteriormente, os pellets, surge como produto alternativo (VINTERBÄCK, 2000).

Em 1980, o empreendedor no setor de energias renováveis, Dr. e engenheiro Jerry Whitfield, inventou o forno para fabricação de pellets, levando a empresa a crescer e tornar-se pioneira no setor industrial de pellet nos Estados Unidos (OPCALCO, 2019). Nesse período, portanto, o pellet surgiu no mercado norte americano para aquecimento residencial. E, em meados dos anos 90, o seu uso foi expandido para Europa, que hoje representa um forte mercado consumidor desse produto energético (VINTERBÄCK, 2000). O setor de biomassa florestal, assim como o de energia renovável, cresceu, portanto, a partir de oportunidades de mercado e como forma de concorrência às fontes convencionais de para geração de energia.

Atualmente, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, a matriz energética brasileira é majoritariamente renovável, representando 84,8% da oferta interna (resultante da soma da produção nacional e importações) de eletricidade no país. A principal fonte renovável na matriz energética interna (Figura 14) corresponde a fonte hídrica, 65,2%, e a biomassa representa 9,1% desse montante (EPE, 2021).

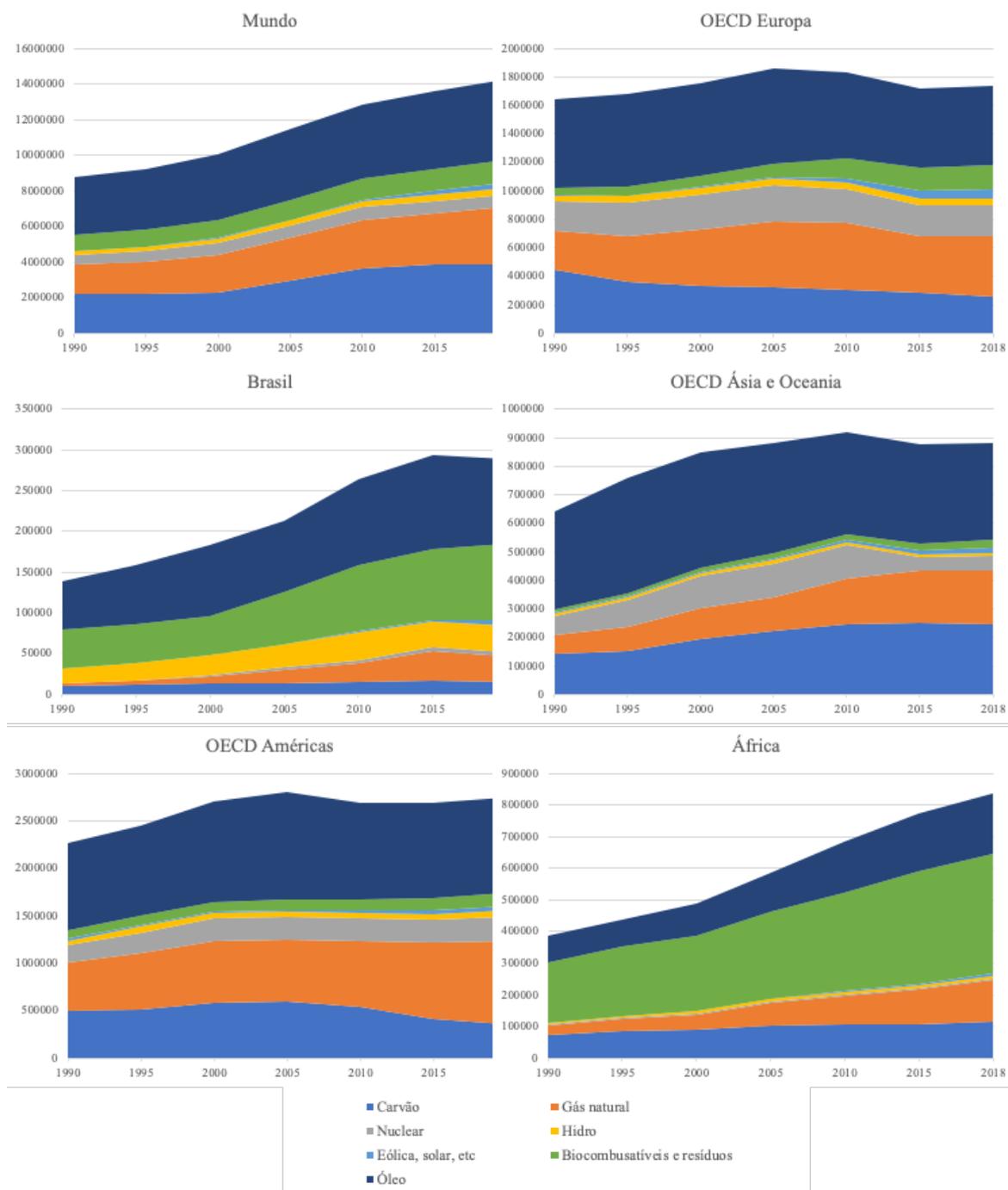


**Figura 14.** Oferta interna de energia elétrica por fonte (EPE, 2021).

Percebe-se, portanto, a importância de investimentos para otimização do setor energético brasileiro, sendo capaz de atrelar aspectos políticos, sociais, ambientais, desenvolvimentistas e acadêmicos, a fim de contribuir para o desenvolvimento do setor que hoje faz com que o Brasil seja destaque mundial no aspecto climático e energético, com um dos setores energéticos menos intensivo em carbono no mundo. Ademais, espera-se que o consumo de madeira continue a crescer, uma vez que a população continua em crescimento, assim como aumenta a demanda por biomassa e recursos energéticos capazes de auxiliar no cumprimento das metas de políticas climáticas (WBA, 2016).

### 3.5 Who? – Principais players na produção de biomassa florestal no mundo?

Ao analisarmos os dados da *Internacional Energy Agency* – IEA, entre 1990 e 2018, percebermos um aumento na oferta de energia no mundo, conforme a Figura 15. Em 2018, o petróleo ainda foi o recurso energético com maior oferta no mercado. Apesar das pressões ambientais e maiores investimentos em novas alternativas energéticas, a indústria petrolífera possui grande importância econômica e política no setor, sendo, portanto, ainda dominante no mercado. Em seguida tem-se o carvão, gás natural, biocombustíveis, nuclear, hidrelétrica, eólica, solar e outras.



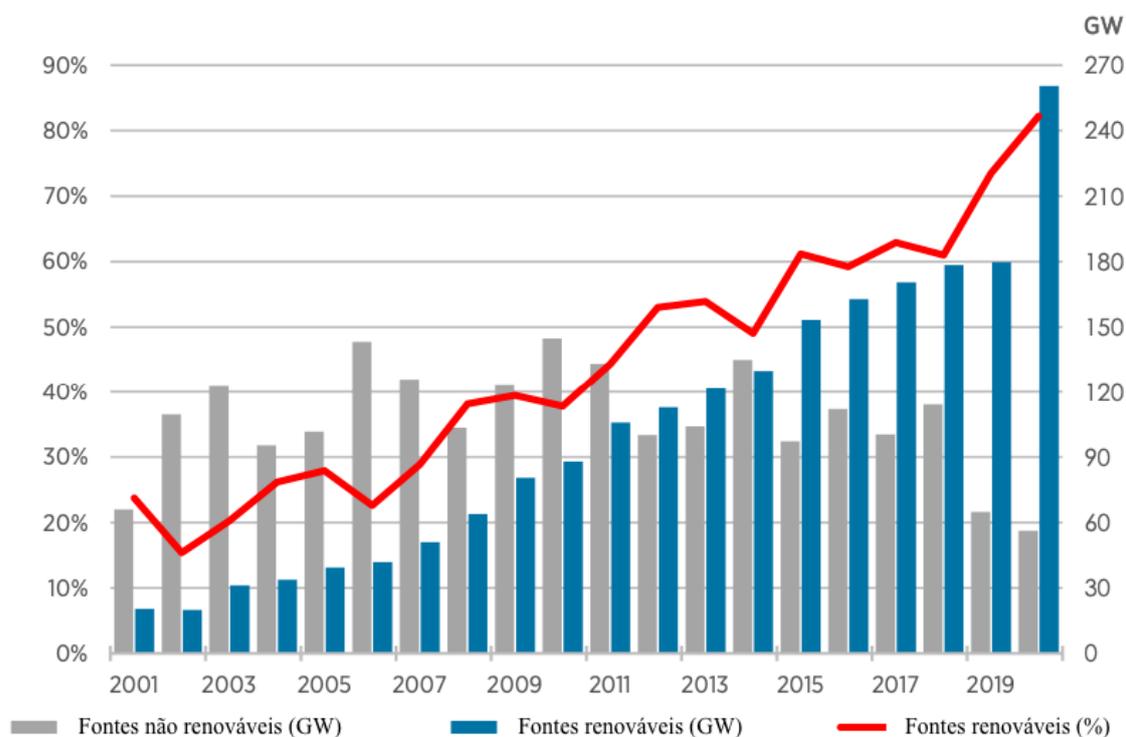
**Figura 15.** Oferta total de energia (em ktep), entre 1990 e 2018, no mundo, Brasil, países integrantes da OECD nas Américas, Europa, Oceania e Ásia, e o continente Africano (elaborado pela autora; dados IEA, 2020).

Com base nos dados apresentados na figura 15, percebe-se que na América e na Europa existe uma maior dependência das matrizes tradicionais de energia, como petróleo e gás natural. Na Ásia e Oceania tem-se uma situação similar, entretanto com participação representativa do carvão na oferta energética no bloco econômico. O continente africano, por outro lado, apresenta uma oferta de energia pautada principalmente em

biocombustíveis. Em 2018, foram ofertados, na África, 378.639 ktep sob forma de biocombustíveis para o setor. Sendo, nessa análise, o cenário com maior participação de biocombustíveis na oferta energética.

Analisando especificamente o Brasil, quanto ao total de energia ofertada (1990-2019), existe uma presença forte do petróleo na oferta total de energia (1104.997 ktep, em 2019), seguido por um setor de vocação brasileira que são biocombustíveis (92.906 ktep, em 2019). Segundo a IEA (2020), neste período a demanda por energia primária no Brasil praticamente dobrou, em consequência do aumento do consumo de energia elétrica e da demanda por combustíveis para transporte.

Mundialmente, conforme Figura 16, o setor de energia renovável, a partir de 2015, conseguiu ultrapassar as energias não renováveis quanto à capacidade de gerar energia elétrica. A partir de 2015, a capacidade de geração de eletricidade das fontes não renováveis cresceu, em média, 115 GW por ano, com uma certa volatilidade. Em contraste, as fontes renováveis expandiram sua capacidade em até 160 GW, entre 2014 e 2017 (IRENA, 2021).

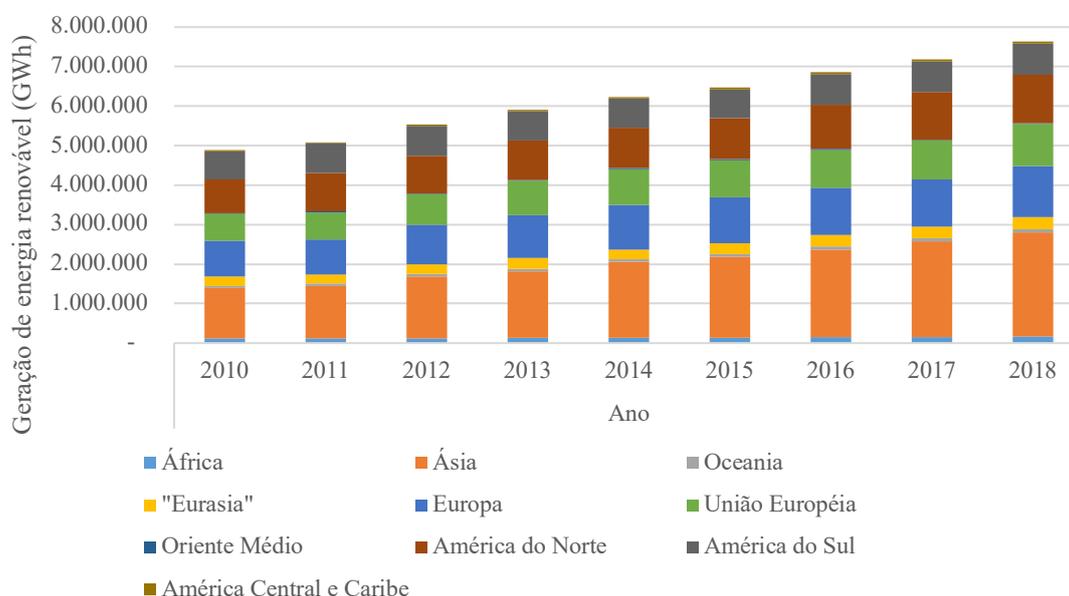


**Figura 16.** Expansão anual, entre 2001 e 2020, na participação das fontes renováveis na capacidade de geração elétrica mundial (adaptado de IRENA, 2021).

Ao analisarmos de forma mais regional, foram constatados comportamentos diferenciados. Desde 2010, na Europa, América do Norte e Oceania a capacidade de

geração elétrica das fontes não renováveis sofrem reduções médias de 85 GW anualmente. Entretanto, na Ásia e Oriente Médio observou-se, no mesmo período, aumento na capacidade de geração de energia de fontes não renováveis. Mostrando, portanto, que apesar do aumento da capacidade energética de geração de eletricidade das fontes renováveis mundialmente, ainda são necessários esforços para impulsionar e expandir a transição para energias de baixo carbono em algumas regiões (IRENA, 2019a).

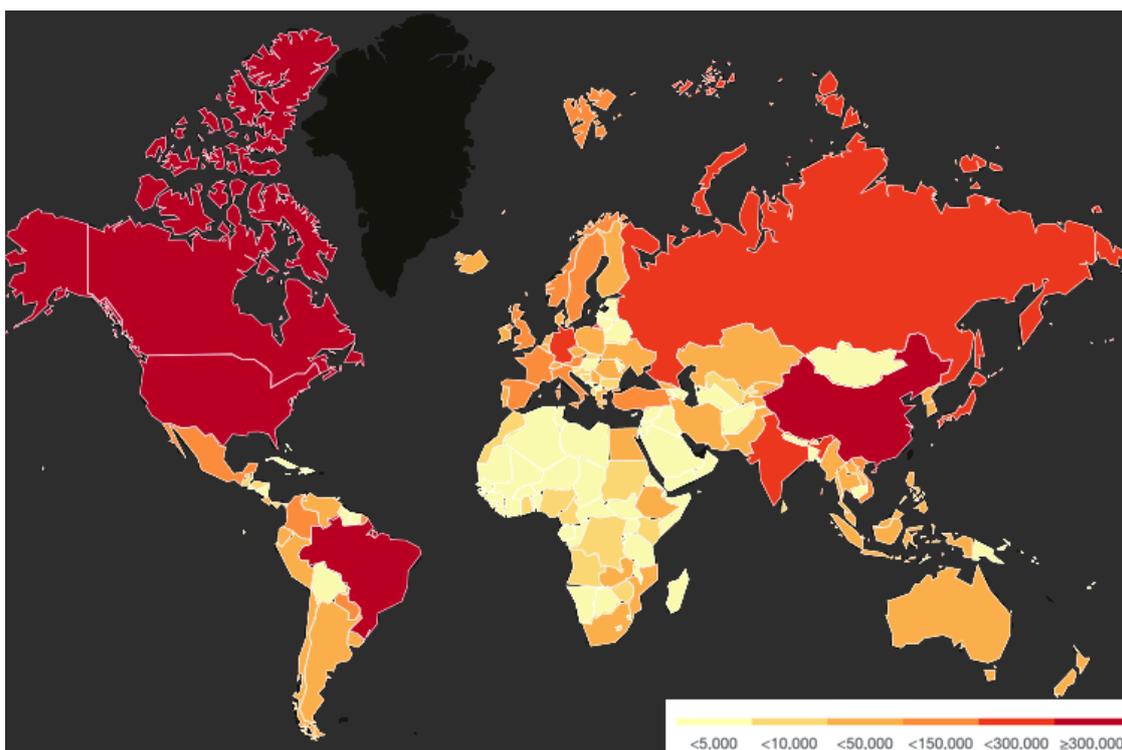
Ao tratarmos exclusivamente das energias renováveis, percebemos que, com aumento de políticas de incentivo, demandas econômicas, sociais e ambientais e capacidade produtiva e consumo energético, a geração de energia utilizando tais fontes vem aumentando nos últimos anos (Figura 17).



**Figura 17.** Geração de energia utilizando fontes renováveis (hidrelétrica, eólica, solar, bioenergia e geotérmica), entre 2010 e 2018 (elaborado pela autora, dados: IRENA, 2020a).

Os países com maiores geradores desse tipo de energia (Figura 18), em 2018<sup>7</sup>, foram: China, Estados Unidos, Brasil e Canadá. Neste ano, os países produziram, respectivamente, 1.811.174 GWh, 743.177 GWh, 495.945 GWh, 427.970 GWh (IRENA, 2020a).

<sup>7</sup> Última atualização da IRENA quanto a geração de energia renovável nos países.



**Figura 18.** Geração de energias renováveis, em 2018 (adaptado de IRENA, 2020b).

Com relação a esses quatro países, a *Internacional Renewable Energy Agency* (IRENA) destaca algumas informações sobre os perfis energéticos, conforme Tabela 10. Estes dados são importantes para a contextualização de cada país no setor.

**Tabela 10.** Perfil energético dos países destaques na geração de energia renovável no mundo, Brasil, Estados Unidos, Canadá e China.

<b>Capacidade elétrica (%)</b>	<b>China</b>	<b>Estados Unidos</b>	<b>Brasil</b>	<b>Canadá</b>
Não renovável	62	77	17	32
Renovável	38	23	83	68
Hidro/marinha	43	32	77	80
Solar	27	24	2	3
Eólica	28	39	11	13
Bioenergia	2	5	11	3
Geotérmica	0	1	0	0

Elaborado pela autora (IRENA, 2020d).

A fim de contribuir ainda mais para o setor e atingir suas metas de desenvolvimento, em 2019 e 2020, esses países lançaram diversas políticas, protocolos ou subsídios para fomento de atividades, conforme mostra Tabela 11.

**Tabela 11.** Últimas políticas, programas e legislação pertinentes ao setor energético na China, Estados Unidos, Brasil e Canadá, em 2019 e 2020.

<b>País</b>	<b>Ano</b>	<b>Políticas, programas ou legislação</b>
<b>China</b>	2020	Implementação de opiniões na construção de um melhor meio ambiente para desenvolvimento para suporte de Empresas privadas de saúde na economia de energia e proteção do meio ambiente
		Plano para conservação da energia industrial
		Valores mínimos permitidos para eficiência energética e “notas” para eficiência energética de ar-condicionado
2019	Padrões para consumo energético em prédios	
	Política de subsídios para promoção e aplicação de novas energias veiculares	
<b>Estados Unidos</b>	2019	Código de construção comercial da Carolina do Norte
		Código de construção residencial da Carolina do Norte
		Padrão de baixo carbono dos combustíveis na Califórnia
		Regulamentos do Colorado
2020	Resolução nº 806 da ANP <sup>8</sup>	
<b>Brasil</b>	2019	Programa de incentivo a inovação tecnológica na agricultura – Inovagro <sup>9</sup>
		Máxima perda técnica em transformadores de distribuição
		Padrões de desempenho mínimo de energia para motores
	Programa Rota 2030 – mobilidade e logística <sup>10</sup>	
<b>Canadá</b>	2020	Regulamento para inovação tecnológica e redução de emissões
		Diretiva 060: Queima, incineração e ventilação da indústria de petróleo
	Regulamento para redução na emissão de metano	

<sup>8</sup> Regulamenta os procedimentos para controle de queima e perda de petróleo e de gás natural.

<sup>9</sup> Financiamento para incorporação de inovações tecnológicas nas propriedades rurais, visando aumento de produtividade e melhor gestão.

<sup>10</sup> Apoiar o desenvolvimento tecnológico, a competitividade, a inovação, a segurança veicular, a proteção ao meio ambiente, a eficiência energética e a qualidade de automóveis, caminhões, ônibus, chassis com motor e autopeças.

<b>País</b>	<b>Ano</b>	<b>Políticas, programas ou legislação</b>
Diretriz de gestão de emissões		

Elaborado pela autora (IRENA, 2020d).

Tratando especificamente do setor de bioenergia, ou seja, setor de geração de energia que utiliza biomassa como insumo, os países com maior representatividade são: Brasil, Finlândia, Dinamarca, Estônia, Suécia, Croácia, Alemanha, Itália, Reino Unido, Estados Unidos e outros de menor representatividade. O total de bioenergia utilizada, expressa de forma per capita, é mais alto na Finlândia, com mercado de bioenergia dominado por biomassa sólida (IEA Bioenergy, 2018).

Na Finlândia e Dinamarca, a produção de energia elétrica via bioenergia representa mais de 15% da produção, enquanto em países como Reino Unido, Brasil, Alemanha, Suécia, Estônia, Áustria, Itália e Bélgica a eletricidade produzida por biomassa representa aproximadamente de 6 a 8% do total (IEA Bioenergy, 2018).

Para geração de eletricidade, o uso de biomassa pode ser diversificado (na forma sólida, líquida ou gasosa) e irá variar de acordo com as disponibilidades de recursos em cada país. Na China, por exemplo, a geração de energia via biomassa está pautada principalmente em dejetos e resíduos agrícolas. Enquanto nos Estados Unidos e nos países nórdicos os resíduos florestais são os mais predominantes (IEA Bioenergy, 2017).

No setor de transporte o cenário muda um pouco. O Brasil é líder neste segmento, com uso de biocombustíveis no transporte maior do que 20% do total, seguido pela Suécia, com 16%. Na Noruega, França, Áustria, Dinamarca, Estados Unidos, Bélgica e Alemanha o uso de biocombustíveis para transporte está entre 4 e 7 % (IEA Bioenergy, 2018).

O relatório do IEA Bioenergy (2018) traz informações também sobre consumo de biomassa para combustível e aquecimento para as indústrias, uso residencial e comercial, serviços públicos e atividades de agricultura e florestais. A biomassa, neste contexto, é muito utilizada para geração de calor na sua forma mais direta. Nos países escandinavos, o uso da biomassa para aquecimento é extremamente importante. E, de forma geral, a Suécia apresenta a maior proporção para provimento de calor e combustível, com quase 70%, seguido por Finlândia, Brasil, Estônia, Dinamarca, Croácia e Áustria.

Segundo relatório do Ibá (2020), especificamente para o carvão vegetal, o Brasil apresenta-se como principal produtor mundial, sendo responsável por 12% da produção mundial, em 2019. Em seguida, tem-se os seguintes países: Nigéria (9%), Etiópia (9%), República Democrática do Congo (5%), Índia (5%), Gana (4%), Tanzânia (4%), Madagascar (3%), China (3%), Tailândia (3%).

### 3.6 How? – Quais os processos produtivos de biomassa florestal utilizados no Brasil?

Tradicionalmente, no Brasil existe o aproveitamento energético diretamente da lenha, do bagaço da cana-de-açúcar, da lixívia (resíduo na produção de papel e celulose) e das cascas de arroz através do processo de combustão. Além disso, os resíduos da cana de açúcar, resíduos de madeira (cavacos), palhas das culturas de soja e milho, resíduos de coco, feijão, amendoim e cacau, resíduos agroindustriais e pecuários de confinamento, lodo de estação de tratamento de esgoto e resíduos sólidos urbanos entre outros, podem ser utilizados para combustão direta ou produção de biogás (EPE, 2020).

A utilização da biomassa pode ocorrer via diversas rotas tecnológicas, nas quais são consideradas as características dos insumos (EPE, 2020). Desta forma, com relação aos aspectos técnicos da biomassa, suas características físicas e químicas devem ser consideradas, uma vez que são alteradas em função do tratamento aplicado. As principais propriedades são: teor de umidade, teor de cinza, poder calorífico (FURTADO *et al.*, 2012) e densidade básica (AGROICONE, 2015).

O teor de umidade refere-se à quantidade de água livre na biomassa (NOGUEIRA; SILVA LORA, 2003), tendo importante influência no processo de queima do material e no poder calorífico. Sendo, de forma geral, a alta umidade relacionada à redução do poder calorífico, uma vez que parte significativa do processo de combustão é gasto para evaporação da água no material (AGROICONE, 2015).

O teor de cinzas quantifica a quantidade de material inorgânico presente na madeira (SILVA; BIANCHINI, 2020), sendo determinado por meio da análise imediata. A quantificação do teor de cinza torna-se importante pois a cinza é um material resultante da queima da madeira e pode ser um material corrosivo e, eventualmente, causar danos aos equipamentos e filtros (BRAND, 2010).

O poder calorífico é a quantidade de energia que será liberada e que pode ser utilizada no processo de geração de energia (FURTADO *et al.*, 2012), ou seja, é a quantidade de

calor, em forma de energia térmica, que é liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa (NOGUEIRA; SILVA LORA, 2003). Sendo fortemente influenciada pela composição química e tipo da biomassa, teor de umidade e teor de cinzas (BRAND, 2010).

A densidade básica está relacionada à facilidade ou dificuldade na queima do material para obtenção de energia. Madeiras com baixa densidade implicam uma queima mais rápida com menor produção de energia por unidade de volume, enquanto madeiras com maior densidade básica são capazes de produzir mais energia. Entretanto, a maior densidade contribui para maior dificuldade no início da queima do material (VALE *et al.*, 2002).

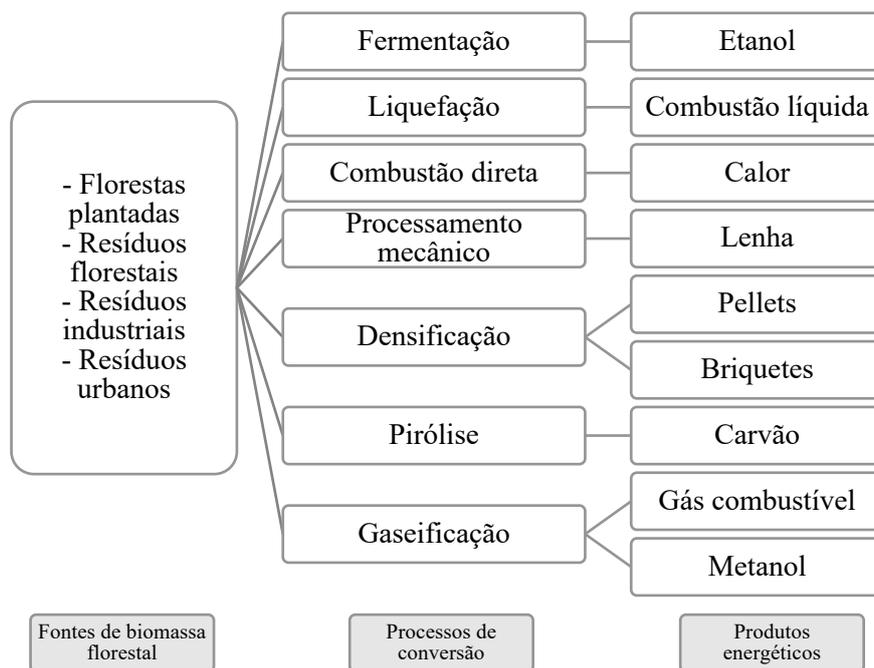
Compreender as propriedades da biomassa é importante para o processo produtivo de geração de energia e bons produtos energéticos. Para um bom rendimento, por exemplo, na produção de carvão vegetal, além de controlar corretamente o processo de carbonização, a qualidade da madeira também é importante. E a qualidade da madeira, está ligada a:

- densidade da madeira: madeiras mais densas geram carvão mais denso (com mais massa), sendo considerado um carvão de qualidade;
- teor de umidade: o ideal é que o teor de umidade da madeira que será carbonizada esteja entre 30 e 40%. Madeira com teor de umidade acima desse limite pode afetar o rendimento gravimétrico e qualidade do carvão;
- conhecer a composição química média da madeira: madeiras com maior teor de lignina resultam em maior rendimento de carvão (MMA, 2019).

O uso sustentável dessa matéria prima, ao ser utilizada como combustível, por exemplo, pode contribuir positivamente para o desenvolvimento de qualquer país. Entretanto, o uso em larga escala, a crescente demanda e o aumento populacional podem formar um cenário desafiador para o uso sustentável deste recurso. Sendo necessário, portanto, além do manejo do recurso, a geração de novas tecnologias assim como técnicas de gestão e planejamento capazes de contribuir para otimização no processamento e utilização da biomassa florestal (MISRA; LATA, 2013).

As rotas de conversão da biomassa florestal podem ser diversas (Figura 19), sendo função da infraestrutura existente, das condições do mercado, das características finais desejadas no produto (como poder calorífico) e utilização final do produto. Ademais, são

procedimentos fundamentados em processos físicos, químicos, termoquímicos e biológicos (VIDAL; HORA, 2011).



**Figura 19.** Processos de conversão energética da biomassa florestal (VIDAL; HORA, 2011).

Os processos de conversão da matéria prima florestal possuem características, eficiências energéticas e produtos diferentes (Tabela 12). Conferindo, desta forma, à biomassa florestal uma ampla utilização desde sua forma mais simples como lenha para uso residencial e uso do carvão em caldeiras até a utilização de biogás e bioóleo para geração de energia elétrica em plantas industriais. Os processos de conversão, portanto, além de aumentar a gama de produtos e subprodutos, auxilia no incremento da homogeneidade e densidade energética, assim como na melhoria das condições de armazenamento e transporte (NOGUEIRA; SILVA LORA, 2003).

**Tabela 12.** Principais características dos processos de conversão da biomassa florestal em produtos energéticos.

Processo de conversão	Características	Produto final
<b>Fermentação</b>	- Processo biológico anaeróbico; - Conversão de açúcares em álcool.	Etanol
<b>Liquefação</b>	- Transformação da biomassa sob alta temperatura e pressão	Metanol

<b>Processo de conversão</b>	<b>Características</b>	<b>Produto final</b>
<b>Combustão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxidação total ou parcial do carbono e hidrogênio;</li> <li>- Conversão da energia química em calor.</li> </ul>	Calor
<b>Processamento mecânico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método mais simples e antigo;</li> <li>- Corte ou trituração da madeira.</li> </ul>	Lenha
<b>Densificação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplicação de pressão com ou sem ligantes ou aditivos;</li> <li>- Aumento da densidade energética.</li> </ul>	Pellets e briquetes
<b>Pirólise</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Destilação seca;</li> <li>- Queima da madeira, em atmosfera controlada, com limitação ou ausência de oxigênio;</li> <li>- Temperatura entre 300 e 500°C.</li> </ul>	Carvão vegetal, ácido pirolenhoso e alcatrão
<b>Torrefação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquecimento lento, ausência de oxigênio;</li> <li>- Temperatura entre 200 e 300°C;</li> <li>- Alternativa para tratamento de resíduos em pó;</li> <li>- Aumento da densidade energética do material e baixa umidade.</li> </ul>	Produto intermediário entre madeira seca e carvão
<b>Gaseificação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processo termoquímico;</li> <li>- Transformação em gás combustível (mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, hidrocarbonetos leves, dióxido de carbono e nitrogênio);</li> <li>- Alta complexidade e custo.</li> </ul>	Gás síntese, matéria prima para obtenção de combustíveis sintéticos (diesel, gasolina, metanol, etanol e amônia)

Elaborado pela autora (VIDAL; HORA, 2011; BRAND, 2010).

Dentre as diferentes formas de obter energia pela utilização da biomassa florestal, diversas são as rotas tecnológicas existentes para essa função. As rotas tecnológicas, portanto, são adaptadas de acordo com a matéria prima utilizada na geração de energia, o tipo de processo de conversão utilizado e características construtivas. A seguir, é

apresentado uma tabela resumo sobre os principais sistemas utilizados na conversão da biomassa (Tabela 13).

**Tabela 13.** Resumo dos principais sistemas de conversão de biomassa para energia.

Processo de conversão	Sistema	Características	Esquema teórico
Combustão	Fornalha celular de ferradura	Combustível queimado em pilha sob camada de tijolos refratários com entrada de ar pela parede da câmara. Câmara no formato ferradura. Umidade do combustível: até 65%.	
	Fornalha <i>Ward</i>	Combustível queimado em pilha sob camada de tijolos refratários com entrada de ar pela parede da câmara. Umidade do combustível: até 65%.	

**Processo  
de  
conversão**

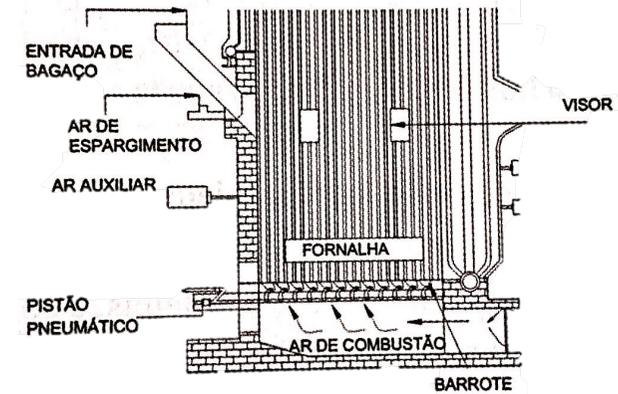
**Sistema**

**Características**

**Esquema teórico**

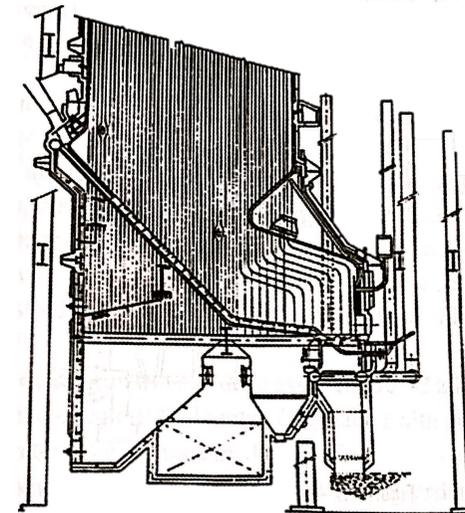
Fornalha grelha  
estacionária  
horizontal

Não é recomendada para materiais de granulometria fina (como serragem). Existe uma certa dificuldade em manter a camada uniforme de combustível, gerando instabilidade na combustão. Umidade do combustível: 5 a 60%. Capacidade de 9 MW.



Fornalha de  
grelha inclinada

A inclinação da grelha (37 a 55°) condiciona a espessura e velocidade de deslocamento do combustível (escolhida também em função das características do combustível). Umidade do combustível: até 65%.



**Processo  
de  
conversão**

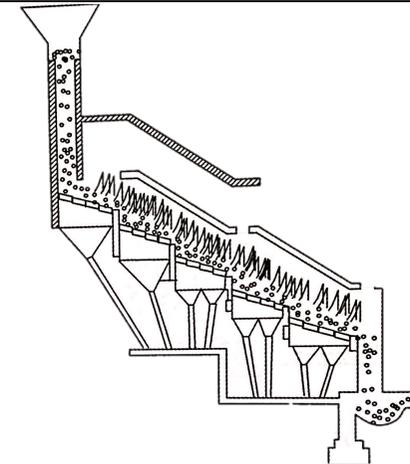
**Sistema**

**Características**

**Esquema teórico**

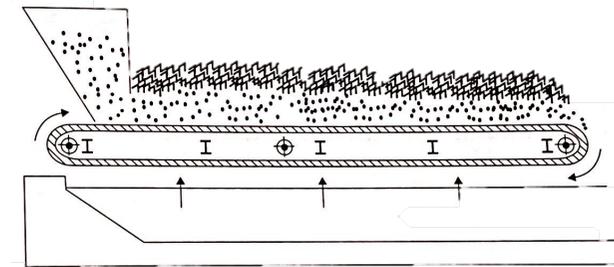
Fornalha grelha  
mecânica ou  
caminhante

Possui componentes móveis para movimentar o combustível de acordo com os estágios da combustão. Sistemas complexos e caros. Recomendados para combustíveis de difícil combustão e alta umidade.



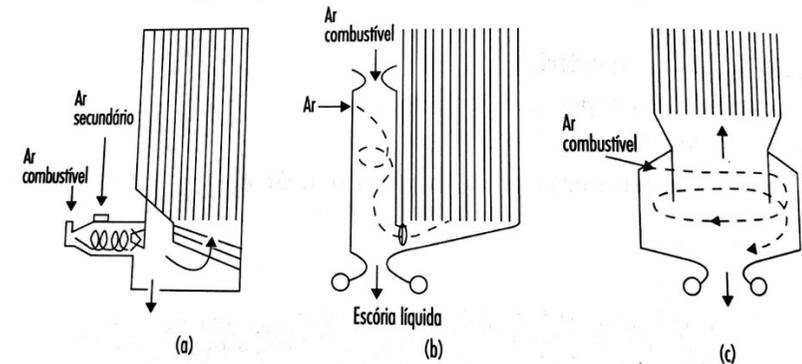
Fornalha grelha  
rotativa

Compostas por sistemas de alimentadores e esteira mecânica. É possível adaptar a velocidade da esteira de acordo com as características do combustível. Alto custo e complexidade. Umidade do combustível de até 55%.



Fornalha  
ciclônica

Ar é injetado na câmara, criando um vórtex, permitindo a circulação das partículas. Umidade do combustível de até 65%.



**Processo de conversão**

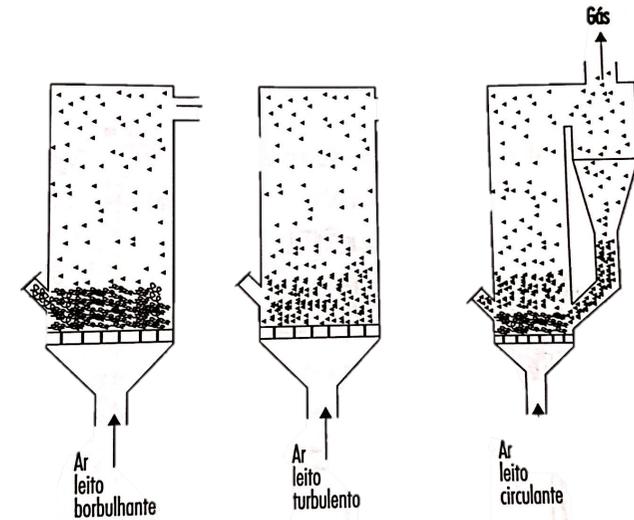
**Sistema**

**Características**

**Esquema teórico**

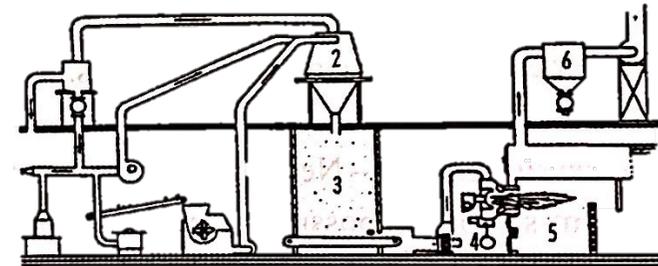
Fornalha de leito fluidizado

Passa uma corrente de ar através do meio inerte, criando uma mistura ar-sólido, possibilitando que as partículas sejam arrastadas com os gases.  
Versatilidade no tipo de combustível.



Fornalha de queima em suspensão

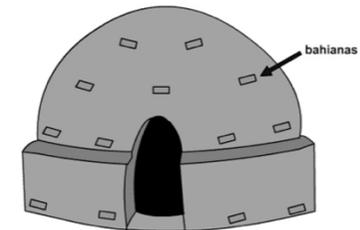
O combustível é alimentado por queimadores. Possuem grelhas pequenas ou nenhum tipo. Permite a queima de combustível fino. Porém são sistemas caros. Umidade do combustível de até 15%.



Carbonização

Forno de alvenaria convencional

Forno de aquecimento interno, fixos e que são abastecidos por carga. Produção de carvão vegetal.



**Processo  
de  
conversão**

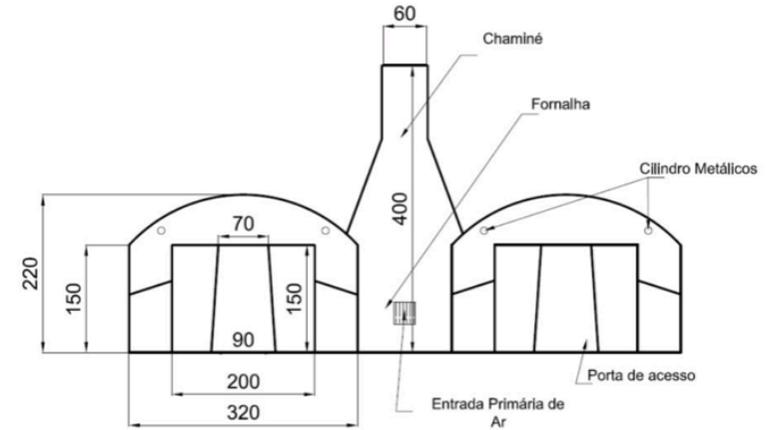
**Sistema**

**Características**

**Esquema teórico**

Sistema forno -  
fornalha

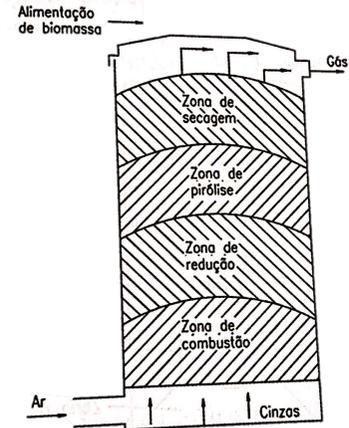
Conjunto onde a fornalha funciona como motor da carbonização, retirando a fumaça dos fornos. Controle da entrada de oxigênio para aumentar gradativamente o calor, em até 360° C na cúpula do forno. Diâmetro das toras entre 6 a 20 cm. Processo otimizado/innovador para produção de carvão vegetal.



Gaseificação

Contracorrente

Sistema mais simples entre os gaseificadores, com fluxo ascendente dos gases, contrário ao fluxo de combustível. Sistema com alta eficiência térmica, mas com alta produção de alcatrão.



**Processo de conversão**

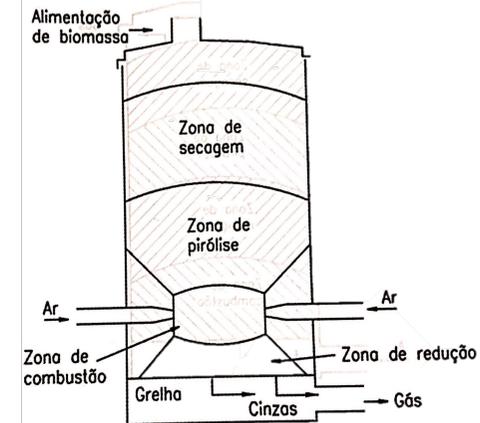
**Sistema**

**Características**

**Esquema teórico**

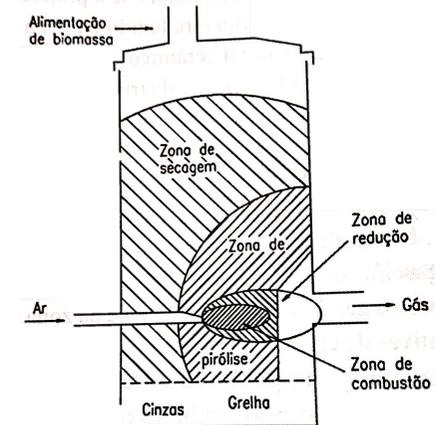
Concorrentes

Tipo de gaseificador mais difundido. A alimentação de combustível e de ar são realizadas no mesmo sentido (fluxo descendente). Projetado para craquear e converter o alcatrão e material particulado.



Fluxo cruzado

O gás é retirado na lateral da câmara de gaseificação, na mesma altura em que o gás é injetado no sistema. Sistema sensível às variações na composição e umidade do combustível, demandando carvão vegetal limpo e seco.



**Processo  
de  
conversão**

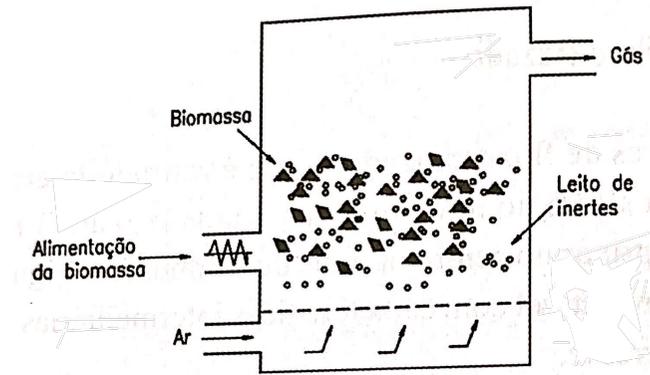
**Sistema**

**Características**

**Esquema teórico**

Leito fluidizado

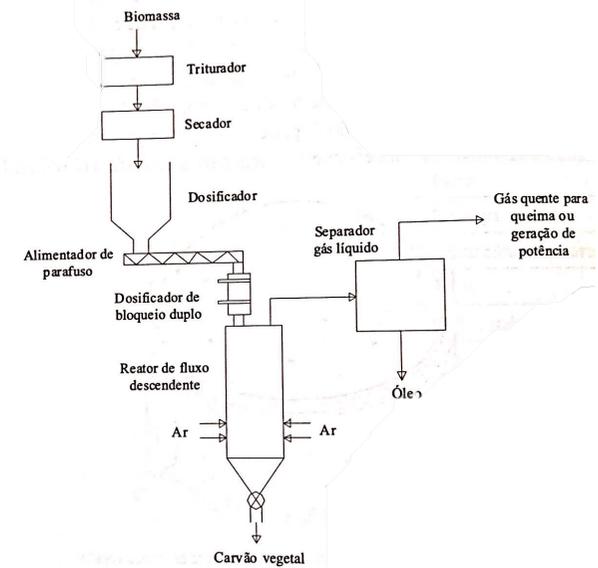
Partículas do combustível ficam suspensas em um leito de partículas inertes (sílica, alumina, etc.), criando melhores condições para troca de calor e homogeneidade da temperatura.



Pirólise

Convencional

Para obtenção de carvão vegetal e bioóleo, deve ser utilizado combustível de 5mm a 500mm, previamente secados (com 10-15% de umidade).



Processo de conversão	Sistema	Características	Esquema teórico
	Ultrarrápido	Possível atingir altas temperaturas e curto tempo de resistência, maximizando a produção. Em geral, embasados no aquecimento indireto da biomassa, pela transferência de calor por meio de gás em contato com a parede do reator.	
Torrefação	Vapor superaquecido	Tecnologia capaz de torreficar pedaços de madeira ou briquetes com dimensões grandes. Recomendável para produção em grande escala, devido a sua complexidade. No sistema, o combustível entra em contato com vapor superaquecido, capaz de iniciar os processos termoquímicos da torrefação.	

Elaborado pela autora (MMA, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2017; SILVA LORA; ZAMPIERE, 2014; LUENGO *et al.*, 2014; SILVA LORA *et al.*, 2014).

A utilização de fornalhas de caldeiras no setor florestal para geração de energia é bem difundida. E, devido à diversidade de matérias prima passíveis de serem utilizadas e produtos a serem gerados, de forma geral, as caldeiras são projetadas para se adaptarem de acordo com a demanda do empreendimento. Além dos projetos específicos para lenha, os fabricantes, muitas vezes, denominam as caldeiras de forma mais ampla para combustíveis lignocelulósicos, englobando uma gama maior de insumos energéticos (SILVA LORA; ZAMPIERE, 2014).

Os autores Silva Lora e Zampiere (2014) destacam alguns projetos específicos para a lenha, como<sup>11</sup>:

- caldeira com formação de vórtex: com capacidade de 230 toneladas de madeira, passível de queimar carvão ou mistura carvão-madeira. Este modelo de caldeira consegue queimar lenha combustíveis com até 65%. E possui um sistema de preservação de perdas para otimizar o processo de combustão;
- caldeira de leito fluidizado circulante: específica para queima de madeira;
- caldeira com grelha rotativa: específica para resíduos florestais e urbanos;
- caldeira de tubos de fogo: podem ser adaptadas para queima de madeira, apesar de serem projetadas para queima de combustíveis sólidos ou gasosos;
- forno de combustão pirolítica: desenvolvido para queima de resíduos agroindustriais e florestais.

Ainda é possível encontrar no Brasil situações em que o carvão vegetal é produzido fora dos padrões e exigências do mercado, com fornos de baixo rendimento e sem controle das emissões atmosféricas. Causando, portanto, impactos econômicos, sociais e ambientais (CARDOSO *et al.*, 2010). Os pequenos e médios produtores, responsáveis por até 80% da produção carvoeira no país, ainda utilizam fornos com baixa capacidade volumétrica, devido aos altos custos e maior investimento necessário para construção de fornos maiores (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Diversos são os formatos e tamanhos de fornos que os produtores de carvão, enraizados em antigos métodos de produção, utilizam. O mais usual é o forno chamado popularmente de rabo-quente<sup>12</sup>.

---

<sup>11</sup> Não serão detalhados nesta seção nomes das empresas que utilizam/fabricam esses produtos.

<sup>12</sup> Representado na tabela anterior como “forno de alvenaria convencional”.

Entretanto, projetos surgem para incentivar a otimização dessa cadeia produtiva e contribuir para a redução das emissões de GEE. Neste contexto, o Projeto Siderurgia Sustentável desenvolve tecnologias e processos sustentáveis na produção e uso do carvão na indústria de aço, ferro-gusa e ferroligas. No projeto, a Universidade Federal de Viçosa conduz estudos sobre o sistema forno-fornalha, de forma a contribuir para a produção de carvão vegetal mais eficiente e sustentável (MMA, 2019).

As diferentes rotas de produção de bioenergia possuem eficiências energéticas distintas. A queima direta residencial, por exemplo, converte 5% do potencial energético da madeira. Enquanto fornos tradicionais possuem 36%, a produção de carvão vegetal possui entre 44% e 80% e fornos modernos de pellet podem alcançar até 80% de eficiência. Em uma escala industrial, no entanto, a eficiência de turbinas a vapor é aproximadamente 40% e sistemas mais modernos de cogeração (alia produção mecânica para o acionamento de geradores de energia elétrica) a eficiência energética pode atingir 85% (VIDAL; HORA, 2011).

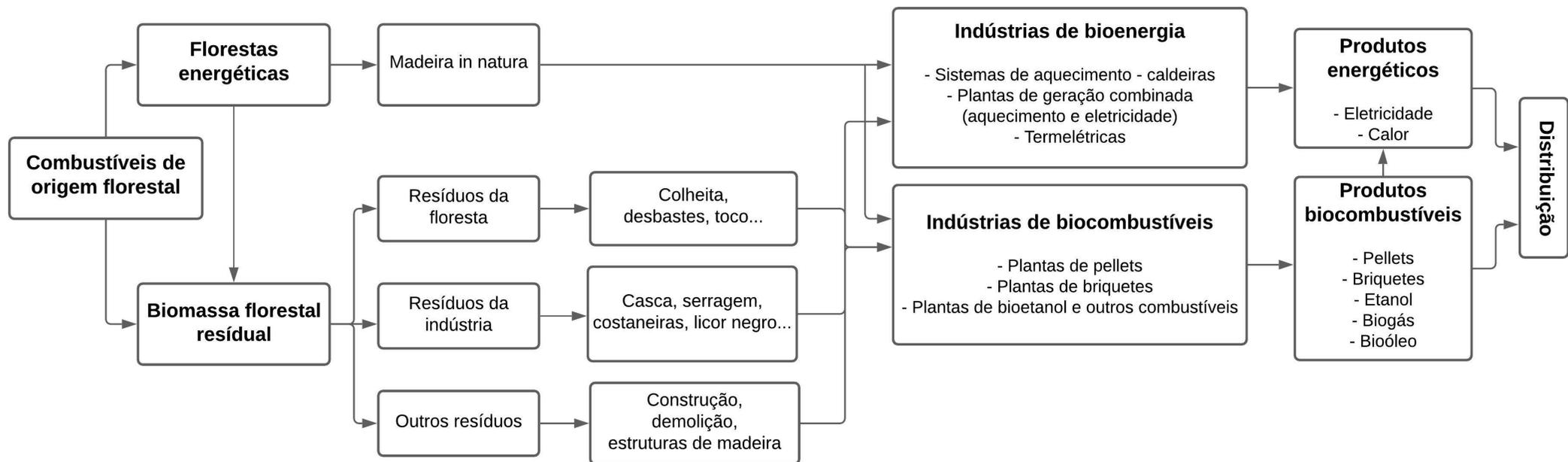
A cada processo de conversão da biomassa florestal, o material passa por alterações na estrutura, morfologia, tipo, formato, densidade energética e poder calorífico. Nesta perspectiva, a biomassa florestal também pode ser classificada de acordo com o seu ciclo de processos termoquímicos de conversão em produto energético. Podendo, portanto, ser classificada como energia primária ou secundária da biomassa, conforme a Tabela 14. A energia primária está relacionada ao primeiro processo de modificação termoquímica, como, por exemplo, a energia do carvão ou dos cavacos, enquanto a fonte secundária refere-se ao material em que a qualidade ou quantidade de energia disponível não é a mesma que a original, ou seja, o material passou por outros processos termoquímicos (FOELKEL, 2016).

**Tabela 14.** Exemplos de materiais energéticos provenientes de biomassa florestal, classificados de acordo com os processos termoquímicos.

<b>Fontes energéticas de biomassa florestal</b>	
<b>Primária</b>	<b>Secundária</b>
Lenha	Carvão vegetal
Cavacos	Madeira torrificada
Resíduos florestais (serragem, cascas, lascas, palitos, refilos, costaneiras, pós de lixamento, sobras de processos etc.)	Bioóleo
Pellets e briquetes	Lignina energética
Podas de árvores urbanas	Biogás
	Gás obtido da gaseificação da biomassa
	Etanol lignocelulósico
	Licor negro

Elaborado pela autora (Fonte: FOELKEL, 2016).

A cadeia produtiva de biomassa (Figura 20) para energia é abastecida por produtos florestais, iniciando no processo de colheita da madeira (em florestas de rápido crescimento) ou resíduos, gerados a partir de fábricas de valor agregado (como fábricas de papel e celulose ou fábricas de pellets) e serrarias. A seguir, o material pode demandar operações como picagem, processamento ou secagem para garantir melhor qualidade à biomassa. O processo de conversão da matéria prima em energia, pode ser realizado de diferentes maneiras, conforme abordado anteriormente. De forma direta, na geração de calor e energia ou indireta, como na produção de biocombustíveis e pellets. Através de processos que envolvem diferentes níveis de tecnologias como: combustão, co-combustão, gaseificação, pirólise, fermentação, peletização ou briquetagem. Os produtos destes processos são destinados ao mercado através de diferentes canais, tais como distribuidores, atacadistas ou varejistas (SHIBANI *et al.*, 2013).



**Figura 20.** Cadeia produtiva da biomassa florestal para produção de energia (elaborado pela autora, adaptado de Shabani *et al.*, 2013; Lopes *et al.*, 2018).

O lucro de cada uma das etapas relacionadas na cadeia produtiva de abastecimento de bioenergia será função da disponibilidade e qualidade da matéria prima, investimento necessário, transporte, operações envolvidas, capital e outros custos (SHIBANI *et al.*, 2013). Ademais, ao utilizar matérias primas florestais como insumo energético, surgem diversos cenários capazes de aumentar o risco desse investimento, como: diversidade de fontes e origens (como florestas plantadas, serrarias ou resíduos), diversas possibilidades de rotas de conversão, diferentes tipos de produtos finais e questões operacionais (colheita e processamento da madeira, distância do plantio a planta industrial, armazenamento dos insumos energéticos, etc.). Desta forma, a modelagem da cadeia produtiva do setor ganha cada vez mais relevância, como forma de otimização de processos e custos (GUNNARSSON *et al.*, 2004).

Outros fatores podem influenciar a cadeia produtiva do setor, como volume e umidade da biomassa florestal, impactando especificamente os custos operacionais da cadeia. Esses fatores podem ser definidos em função de duas propriedades principais:

- tipo: modo de utilização da biomassa, podendo ser cavacos, pellets, lenha e outros;
- qualidade: relacionado principalmente ao teor de umidade do material (DYKEN *et al.*, 2010).

Segundo os autores Dyken *et al.* (2010), ao modelar a cadeia produtiva de biomassa para energia, essas propriedades podem ser alteradas via ações, como: manuseio (ações que intencionalmente alteram ou modificam a aparência do produto, como a pelletização), processamento (ações que intencionalmente alteram a qualidade do produto, como a secagem da madeira) e, transporte e armazenamento (ações não intencionais que podem alterar a qualidade do produto, como secagem natural por tempo prolongado). Identificar e avaliar essas ações são importantes para garantir a qualidade do produto final da cadeia produtiva.

Adicionalmente, os autores Ribeiro *et al.* (2017) destacam que a existência de um mercado estruturado e a demanda por produtos (lenha, carvão vegetal, pellets, cavaco etc.) são condições básicas para o sucesso econômica da atividade florestal para energia. Os autores salientam alguns fatores críticos para a disponibilidade desses produtos no mercado (Tabela 15).

**Tabela 15.** Fatores capazes de influenciar a disponibilidade de biomassa florestal para energia no mercado.

<b>Disponibilidade de biomassa florestal</b>	
Potencial ambiental	Clima
	Topografia
	Solo
Uso da terra e mercado	Forma dominante de produção
	Características de posse da terra
	Manejo das espécies arbóreas
Competição por outros usos	
Usos alternativos na comunidade local	Construção, forragem, proteção ambiental e quebra ventos, sombreamento, alimentos, culturas, medicinal, outros
Demanda comercial externa	Mercado urbano e industrial por biomassa
	Polos de construção civil
Acesso aos recursos de biomassa florestal	
Acesso físico	Distância/logística
	Topografia
	Tipo de biomassa
	Densidade do povoamento
Acesso social	Distribuição da terra
	Competição com a agropecuária e outras atividades
	Diferenciação social e cultural
	Acesso ao mercado
	Políticas governamentais (florestais e energéticas)

Ribeiro *et al.*, 2017.

### 3.7 How much? – Quais custos envolvidos nos processos produtivos de biomassa florestal?

Comparando os custos de produção de energia via recursos alternativos renováveis com a energia de proveniência nuclear e termelétrica a gás natural ou carvão mineral (Tabela 16), principais fontes complementadoras do Sistema Interligado Nacional (SIN), indicadores apontam que os custos das energias renováveis são menores. Esses custos e barreiras de mercado podem ser reduzidos com a ampliação do uso dos recursos energéticos alternativos, por meio de políticas públicas, estabelecimento de metas e incentivos fiscais e de crédito (WWF, 2012).

**Tabela 16.** Comparação dos custos de geração de eletricidade no Brasil.

Fonte	Custo de instalação (R\$/kW)	Custo nivelado aproximado (taxa de desconto de 10%)		Tendência da evolução dos custos nos próximos 10-15 anos
		Mínimo (R\$)	Máximo (R\$)	
Usina Hidrelétrica	3.450,00	60,63	101,35	↑
Pequena Central Hidrelétrica	5.000,00	112,47	161,96	→
Eólica	3.350,00	89,00	118,00	↓
Biomassa	3.000,00	91,00	131,00	↓
Nuclear	3.000,00	155,00	192,68	↑
Gás Natural	3.000,00		173,58	↓
Carvão Pulverizado Nacional	2.750,00		133,55	→

↑, ↓ e → referem-se, respectivamente, às tendências de aumento, redução e estabilização dos custos. Fonte: WWF, 2012.

Os custos de produção de energia através das usinas hidrelétricas tendem a aumentar devido à localização dos empreendimentos que tendem a estar mais distantes dos centros de consumo. No caso na energia nuclear, também com tendência de aumento, a tendência está relacionada aos custos mais altos da utilização dessa tecnologia, restrições de uso e menor venda de sistemas nucleares. Enquanto os custos de produção de pequenas centrais hidrelétricas e do carvão pulverizado tendem a estabilização, uma vez que são tecnologias mais maduras. As fontes eólica, biomassa e gás natural têm perspectivas de redução de

custos. A primeira porque existe investimentos no desenvolvimento de tecnologias e desenvolvimento do setor com ganhos de capacidade de geração por unidade. A biomassa também possui boas perspectivas pois o aprendizado tecnológico no setor tem contribuído para inserção de novas tecnologias. Por fim, o gás natural apresenta um bom cenário devido as reversas existentes no país e suas perspectivas de exploração (WWF, 2012).

Na maior parte dos países, os custos envolvidos na geração de energia utilizando fontes renováveis tendem a serem reduzidos com os anos e a se tornarem cada vez mais competitivos frente às fontes tradicionais de energia. Recentemente, as hidrelétricas e empreendimentos eólicos, por exemplo, estão sendo capazes de prover energia mais barata do que os combustíveis fósseis (IRENA, 2019b).

A análise econômica da geração de energia via biomassa não é tão direta quanto a análise de outros setores de energias renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica, uma vez que o setor está vinculado a outras cadeias produtivas. Sendo, portanto, influenciado pela disponibilidade e qualidade de matéria prima e seus custos a longo prazo. Outra dificuldade nesse tipo de análise é que os custos da matéria prima (por unidade de energia) também são muito variáveis. De forma geral, os resíduos (como licor negro, serragem e resíduos de indústrias florestais) estão associados a menores custos para produção. Enquanto as florestas energéticas, por exemplo, que são dedicadas a esse tipo de produção, estão associadas a custos mais elevados, uma vez que é necessário contabilizar custos de uso da terra, colheita, logística, transporte e armazenamento (IRENA, 2020c).

Além disso, as características físicas do insumo (conteúdo de cinzas, densidade, umidade, tamanho da partícula), podem contribuir para a maior heterogeneidade da matéria prima e, desta forma, são capazes de influenciar o custo produtivo, impactando os custos de transporte, armazenamento e pré-tratamento (IRENA, 2020c). Alguns processos mais robustos de transformação da biomassa florestal em energia suportam essa heterogeneidade, como fornos de lenha que toleram, até certo ponto, toras de diferentes diâmetros, mas processos como a gaseificação demandam matéria prima mais uniforme.

Projetos energéticos movidos a biomassa florestal tendem a ser menos onerosos em países em desenvolvimento, ao serem comparados aos países da OECD (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico). Isso porque nos países em desenvolvimento, geralmente os custos com mão de obra e com commodities tendem a ser menores (IRENA, 2020c).

No estudo realizado pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), em 2018, sobre florestas energéticas de eucalipto, foram levantados os principais fatores de custos. Segundo o estudo<sup>13</sup>, os principais custos para investimento em um projeto de energia via biomassa florestal proveniente de eucalipto, em ordem de importância, são: custos diretos de construção (67%), capital de giro e reservas (13%), custos indiretos de construção e de partida (13%), custos financeiros (5%) e gastos com desenvolvimento e licenciamento do projeto (2%), conforme valores apresentados na Tabela 17.

**Tabela 17.** Custos de investimento, por Watt, para um projeto padrão de termelétrica abastecida com biomassa florestal (eucalipto) no Mato Grosso do Sul.

<b>Categoria</b>	<b>Item</b>	<b>Total (mil reais)</b>	<b>Unitário (R\$/W)</b>
Etapa de desenvolvimento e licenciamento		25.761	0,26
Custos diretos de construção	Construção civil	138.023	1,38
	Equipamento fixo com montagem	667.103	6,67
	Equipamento móvel	5.555	0,06
Custos indiretos de construção e de partida	Custos indiretos	145.021	1,45
	Gastos operacionais – fase de partida	20.906	0,21
Custos financeiros	Custos de estruturação	2.375	0,02
	Juros durante a construção	55.380	0,55
Outros	Capital de giro	130.951	1,31
	Reservas	43.748	0,44
<b>Total</b>		<b>1.234.825</b>	<b>12,35</b>

Fonte: IEMA, 2017.

O domínio tecnológico nacional e a oferta local de equipamentos para geração de energia a vapor (ciclo Rankine) podem contribuir para redução de custos de instalação das usinas, assim como permitir custos mais competitivos para aquisição de equipamentos (BEZERRA JÚNIOR *et al.*, 2019), nos quais representam uma fatia importante dos custos nos empreendimentos a biomassa florestal, como visto anteriormente.

Na formação do preço alvo da energia de biomassa de eucalipto, o fator com maior influência nessa variável é o custo da madeira por ser o principal insumo produtivo, representando 25% do preço (IEMA, 2018). Os preços do insumo florestal para energia podem variar entre 20 e 50% do total do empreendimento. Essa ampla variação decorre

<sup>13</sup> Foi considerado no estudo, a madeira entregue no pátio da indústria responsável pela conversão da madeira em energia. Os custos de transporte estão inclusos no preço de compra da madeira. O processamento da madeira foi considerado como atividade na produção de energia.

do fato dos preços serem tomados localmente, variando entre regiões e países (IRENA, 2020c).

A estrutura de custos é seguida pelo custo de capital próprio (24%), deduções e impostos (22%), investimentos (10%), custos fixos – com exceção da madeira (7%), custos variáveis (5%) e custos de dívida financeira (2%). Ao analisar a variação do preço em função do porte da termelétrica, o estudo conclui que com aumento da capacidade instalada (principalmente de 5 até 50 MW), possibilita que existam ganhos de eficiência, diminuindo, portanto, o consumo de madeira e, por fim, reduzindo o preço final de venda da energia, uma vez que a compra do combustível é o principal fator de custo neste tipo de produção (IEMA, 2018).

Os custos de um empreendimento de energia a partir de biomassa vinculados ao planejamento, engenharia e construção, manuseio do combustível e maquinários são extremamente importantes. Quando localizados em áreas mais remotas, os custos com construção de estradas e de infraestrutura podem ser mais dominantes (IRENA, 2020c). Os custos tenderam a ser maiores na Europa e na América do Norte (IRENA, 2019b), e mais baixos na Ásia e na América do Sul (IRENA, 2020c).

O estudo realizado pela IEMA (2018), ao comparar a diferença dos preços de venda em diferentes mesorregiões do país, concluiu que as proporções das variáveis capazes de influenciar o preço pouco variam entre as mesorregiões. Nessa análise, a elegibilidade a subsídios (SUDAM e SUDENE, Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia e do Nordeste, respectivamente) e competitividade no preço da madeira foram fatores, conforme levantamento dos autores, capazes de influenciar o preço final. E, as regiões Espírito Santo e Bahia, Pampa Gaúcho e Oeste de Minas Gerais apresentaram menores preços (R\$ 514± 10 / MWh). Em contrapartida, as regiões Cerrado, Serra Gaúcha, MATOPIBA e Amazônia, apresentaram preços altos (entre R\$ 582 e 656 / MWh) por possuírem desvantagens quanto ao preço da madeira e não serem elegíveis aos subsídios.

O estudo realizado pelo IEMA (2018) sobre as florestas energéticas no Brasil concluiu que medidas estratégicas podem ser tomadas a fim de garantir a competitividade da energia gerada a partir de recursos florestais, como:

- Preço da madeira: por ser o fator de maior impacto na formação do preço final da energia, ações de fomento à atividade podem contribuir para redução dos preços de venda de energia. O estudo mostra que uma redução de 25% no

preço de compra da madeira pode causar uma redução de 8,3% no preço de venda final da energia;

- Taxa de retorno: uma redução da taxa de retorno do investimento pode impactar as receitas do projeto, inviabilizando a cobertura dos custos e, por fim, impactar o preço de venda. Por exemplo, uma redução de 13 para 12% na taxa de retorno pode gerar uma redução de 3% na receita e redução no preço na mesma proporção;
- Programas de financiamento: o BNDES possui linhas específicas de crédito para o setor elétrico, podendo financiar até 70% dos ativos destinados a usinas termelétricas. Variando a proporção do financiamento entre 60 e 100%, as reduções no preço final poderiam ser de 2,5 a 12,2%, respectivamente;
- Deduções e impostos: fatores como subsídios previstos pela SUDAM/SUDENE, lucro presumido ou programas de isenção de impostos, podem impactar de diferentes formas o preço alvo de venda da energia em -11%, -19,6% e -25,5%, respectivamente, com relação ao preço padrão do projeto;
- Tempo anual de produção: é interessante que a termelétrica encontre o ponto ótimo de tempo de produção a fim de garantir equilíbrio entre formação de receitas e preço final do produto energia. Por exemplo, um projeto de geração de energia térmica a base de biomassa florestal sem operar deve obter uma receita de R\$ 250 Mi para pagamento dos custos. O alto impacto dos custos faz com que o preço alvo seja maior quando a termelétrica opera por menos tempo, uma vez que tempos maiores de operação exigem maiores receitas para pagamento dos custos do empreendimento e, portanto, redução do preço alvo.

O fator colheita e transporte, principalmente ao tratar de resíduos florestais e florestas energéticas, são importantes geradores de custos. Os custos com logística tendem a aumentar de acordo com a distância da planta de energia em relação ao local de coleta da matéria-prima. Esta situação limita tanto a localização quanto ao tamanho da planta de geração de bioenergia (IRENA, 2020c).

Ao analisar os custos produtivos para produção de pellets na Argentina, os autores Uasauf e Becker (2011) encontraram que o custo com a matéria-prima (no caso, resíduos de pinus) foi o maior no cálculo de custo total da produção. No estudo, o custo com insumo foi incorporado aos custos operacionais (insumo madeireiro + custos de produção

(como calor, secagem, eletricidade) + mão de obra). No estudo, também foi analisado que com aumento de produtividade da planta de pellet pode existir redução dos custos de produção. No mercado americano, o custo com aquisição de biomassa para produção de pellets pode chegar a 29% dos custos totais de produção (PIRRAGLIA *et al.*, 2013). Enquanto estudo conduzido por Nabavi *et al.*, (2020) mostrou que os indicadores de viabilidade econômica são muito sensíveis aos custos com insumo para produção de pellets (podendo representar entre 84 e 87% dos custos anuais de produção).

Por fim, existem as forças econômicas externas que são capazes de influenciar a competitividade operacional das empresas florestais no Brasil e, conseqüentemente, os custos envolvidos na produção. Em 2018, a desvalorização da moeda nacional frente ao dólar, atrelado ao aumento dos custos com combustíveis, teve forte impacto na inflação do setor de árvores plantadas. Enquanto o Índice Nacional de Preços ao Consumidor (IPCA), em 2018, foi 3,78%, o Índice Nacional de Custos da Atividade Florestal, em real, foi de 7,24% (IBÁ, 2019).

Apesar dos desafios econômicos que dificultam o aumento da participação da biomassa florestal e dos recursos renováveis na matriz energética brasileira, existem ações capazes de promover economia em escala e aprendizado tecnológico. O desenvolvimento e inovações tecnológicas, somadas às mudanças institucionais, incentivos econômicos e políticas públicas eficazes podem contribuir para minimizar possíveis gargalos. Possibilitando redução dos custos, aumento da produção e, por fim, redução do custo médio de produção e preço do produto.

#### 4. Considerações Finais

Existem alguns desafios a serem superados pelo setor de biomassa florestal com fins energéticos, relacionados desde ao suprimento da cadeia produtiva ao mercado dos produtos e seus coprodutos. Apesar da vocação florestal brasileira, ainda existem aspectos relacionados a propriedades e qualidade da madeira (melhor genótipo a ser utilizado, propriedades físicas, umidade) e dos processos (homogeneidade, qualidade, rendimento, automação e instrumentação) a serem otimizados para maior eficiência e produtividade. Nesse sentido, existem projetos, estudos e iniciativas desenvolvidas no Brasil para reduzir gargalos.

Ao analisar os processos produtivos da biomassa florestal foi possível perceber o quanto os processos e tecnologias evoluíram, de forma a atender as demandas do mercado, os gargalos produtivos (como o uso de resíduos para geração de produtos) e os aspectos ambientais. Diversificando os produtos relacionados à cadeia produtiva biomassa florestal, de acordo com a tecnologia e a matéria-prima disponível. Entretanto, ainda existem ressalvas a serem otimizadas no que se refere a homogeneidade dos produtos finais e normas para estabelecimento de critérios de qualidade.

As rotas tecnológicas de transformação da biomassa *in natura* em produtos com maior valor agregado são amplamente utilizadas no Brasil, o que colabora com a vocação e potencial florestal que o país apresenta. Dessa forma, ressalta-se a necessidade de investimentos, políticas públicas, acesso ao crédito e organização institucional com finalidade de impulsionar o setor e transformar e otimizar o setor energético florestal brasileiro e aumentar sua participação no mercado mundial.

Apesar da crise econômica, o setor energético e o setor florestal ainda respondem positivamente, com demanda e produções crescentes. Devendo, portanto, os produtores e empreendedores no setor atentarem-se às possibilidades de investimento e riscos inerentes às atividades (como por exemplo, a alta volatilidade dos preços da matéria prima que podem eventualmente inviabilizar o projeto). Adicionalmente, a cadeia produtiva de biomassa florestal para energia, necessita de otimização de processos, a fim de minimizar os custos e aumentar a viabilidade econômica das atividades do setor.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Sistema de Informações de Geração da ANEEL. Disponível em: <  
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>> Acesso em: outubro de 2020.

AGROICONE. **Oportunidades para florestas energéticas na geração de energia no Brasil**. Relatório final do projeto “Oportunidades para florestas energéticas na geração de bioenergia”. Curitiba, julho/2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA, PELLETS E BRIQUETES; INSTITUTO BRASILEIRO DE PELLETS, BIOMASSA E BRIQUETE. **Conjuntura nacional e internacional – setor industrial de biomassa, pellets e briquetes**. Curitiba, 2019.

ALAVALAPATI, J. R. R.; LAL, P.; SUSAETA, A.; ABT, R. C.; WEAR, D. N. Forest biomass-based energy. *In*: Wear, David N.; Greis, John G., eds. 2013. **The Southern Forest Futures Project: technical report**. Gen. Tech. Rep. SRS-GTR-178. Asheville, NC: USDA-Forest Service, Southern Research Station.

BEZERRA JÚNIOR, J. G.; TEIXEIRA, T. I.; CUNHA, B. F.; EPE. **Análise da participação de usinas termelétricas a biomassa de madeira em Leilões de energia elétrica**. Grupo de Estudo de Geração Térmica – GGT. XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte, 2019.

BICHEL, A; TELLES, T. S. Spatial dynamics of firewood and charcoal production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**. 313, 127714, 2021.

BRITO, J. O. Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. **Estudos Avançados**. v. 4, n. 9, 1990.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRAZ, R. L.; NUTTO, L.; BRUNSMEIER, M.; BECKER, G.; SILVA, D. A. Resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira na Amazônia – uma análise da cadeia produtiva. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**. v. 5, n. 2, 2014.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**. v. 21, n. 59. 2007.

CÂMARA SETORIAL DA CADEIA PRODUTIVA DE FLORESTAS PLANTADAS. **Produção de Energia a partir da biomassa de madeira**. Disponível em <[https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/florestas-plantadas/2017/35a-ro/app\\_biomassa\\_35ro\\_florestas.pdf](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/florestas-plantadas/2017/35a-ro/app_biomassa_35ro_florestas.pdf)> Acesso em: novembro de 2020.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Revista Cerne**. v. 16, 2010.

COELHO, S. Biomassa como fonte de energia. *In*: PALETTA, F.; COELHO, S.; ZILES, R.; BENEDITO, R.; LÚCIO, G.; MABELLI, R.; GALHARDO, C.; PINHO, J. T.; PEREIRA, E.; SILVA, E. P. **Série de energia e sustentabilidade – Energias renováveis**. São Paulo: Blucher, 2012.

COUTO, L.; MÜLLER, M. D. Florestas energéticas no Brasil. *In*: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (org.). **Biomassa para energia**. 3 ed. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2014.

COSTA, A. C. L.; CASTANHOM, F. P.; FARIA, J. I.; PARMEGGIANI, R. P.; SPADIM, E. R. Energia renovável e a biomassa florestal. *In*: **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes em florestas plantadas**. Publisher: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2018.

DYKEN, S. V.; BAKKEN, B. H.; SKJELBRED, H. I. Linear mixed-integer models for biomass supply chains with transport, storage and processing. **Energy**, v. 35, n. 3, 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Potencial de Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Nota técnica PR 04/18. 2018.

\_\_\_\_\_. **Balço energético nacional 2019: ano base 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

\_\_\_\_\_. **Plano Nacional de energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020.

\_\_\_\_\_. **Balço energético nacional 2021: ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

FOURNEL, S., PALACIOS, J. H., MORISSETE, R., VILLENEUVE, J., GODBOUT, S., HEITZ, M., SAVOIE, P. Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. **Applied Energy**. 141, 247-259, 2015.

FOELKEL, C. Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. **Eucaliptus online book & newsletter**, 2016.

FURTADO, T. S., FERREIRA, J. C., BRAND, M. A., MUNIZ, G. I. B., QUIRINO, W. F. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**. v. 22, n. 4, 795-802, 2012.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2021.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Blucher, 2010.

GUNNARSSON, H.; RÖNNQVIST, M.; LUNDGREN, J. T. Supply chain modelling of forest fuel. **European Journal of Operational Research**. v. 158, n. 1, 2004.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**. 2019.

\_\_\_\_\_. **Relatório Anual – 2020**. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. 2020. ISSN 0103-8435

\_\_\_\_\_. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. 2019. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados> > Acesso em: dezembro de 2020.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**. Disponível em < <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource> > Acesso em: novembro de 2020.

INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable capacity highlights**. 2021.

\_\_\_\_\_. **Renewable energy statistics 2020**. Adu Dhabi, 2020a.

\_\_\_\_\_. **Renewable energy statistics 2020**. 2020b. Acesso através de Resource Watch, 2021. Disponível em < <https://resourcewatch.org/> > Acesso em: janeiro de 2021.

\_\_\_\_\_. **Renewable power generation costs in 2019**. Abu Dhabi, 2020c.

\_\_\_\_\_. **Statistical Profiles**. 2020 d. Disponível em < <https://irena.org/Statistics/Statistical-Profiles> > Acesso em: novembro de 2020.

\_\_\_\_\_. **Renewable capacity highlights**. 2019a.

\_\_\_\_\_. **Renewable power generation costs in 2018**. Abu Dhabi, 2019b.

INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – BIOENERGY. **IEA Bioenergy Countries’ Report – Update 2018 (Bioenergy policies and status of implementation)**. 2018.

\_\_\_\_\_. **Technology Roadmap – delivering sustainable bioenergy**. 2017.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Estudo econômico do custo de energia a partir de madeira de plantios de eucalipto**. Relatório, 2017.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Florestas energéticas: potencial da biomassa dedicada no Brasil**. São Paulo, 2018.

LUENGO, C. A.; FELFI, F. E. F.; BEZZON, G. Pirólise e torrefação de biomassa. *In*: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (org.). **Biomassa para energia**. 3 ed. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Produção sustentável de carvão vegetal: manual de operação de sistema fornos-fornalha**. Brasília – DF, 2019.

NABAVI, V.; AZIZI, M.; TARMIAN, A.; RAY, C. D. Feasibility study on the production and consumption of wood pellets in Iran to meet return-on-investment and greenhouse gas emissions targets. **Renewable Energy**. v. 151, 2020.

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

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**. v. 37, n. 3, 2013.

OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; SALLES, T. T.; CARNEIRO, A. C. O.; LANA, A. Q. Análise de risco econômico de dois sistemas produtivos de carvão vegetal. **Floresta e Ambiente**. v. 24, 2017.

OPALCO. **Board of Directors**. Disponível em < <https://www.opalco.com/person/dr-jerry-whitfield/> > Acesso em: novembro de 2020.

PIRRAGLIA, A.; GONZALEZ, R.; SALONI, D.; DENIG, J. Technical and economic assessment for the production of torrefied ligno-cellulosic biomass pellets in the US. **Energy Conversion and Management**. v. 66, 2013.

RIBEIRO, G. B. D.; ISBAEX, C.; VALVERDE, S. R. Produção de biomassa florestal para energia em sistemas agroflorestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 37, n. 92, 2017.

SHABANI, N.; AKHTARI, S.; SOWLATI, T. Value chain optimization of forest biomass for bioenergy production: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 23, 2013.

SILVA, K. F., BIANCHINI, D. C. Influência do teor de umidade e teor de cinzas na geração de energia térmica de serragem. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**. v. 9, n esp., 692-702, 2020. DOI: 10.19177/rgsa.v9e0I2020692-702

- SILVA LORA, E. E.; ZAMPIERI, M. Classificação e balanço térmico das fornalhas para combustão de biomassa. *In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (org.). Biomassa para energia*. 3 ed. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2014.
- SILVA LORA, E. E.; ANDRADEM R. V.; SANCHEZ, C. G.; GÓMEZ, E. O.; SALES, C. A. V. B. Gaseificação. *In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (org.). Biomassa para energia*. 3 ed. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2014.
- SIMON, F.; GIRAR, A.; KROTKI, M.; ORDONES, J. Modelling and simulation of the wood biomass supply from the sustainable management of natural forests. **Journal of Cleaner Production**. v. 282, 2021.
- SOARES, N. S.; SILVA, M. L.; FONTES, A. A. Análise econômica do mercado brasileiro de carvão vegetal no período de 1974 a 2000. **Scientia Florestalis**. n. 66. 2004.
- RIBEIRO, J. A. **Recursos naturais como insumo energético: um estudo de caso da biomassa florestal**. 1 ed. Curitiba: Appris, 2016.
- RÖDER, M; MOHR, A.; LIU, Y. Sustainable bioenergy solutions to enable development in low- and middle- income countries beyond technology and energy access. **Biomass and Bioenergy**. v. 143, 2020.
- UASUF, A.; BECKER, G. Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. **Biomass and Energy**. v. 3, n. 3, 2011.
- VALE, A. T., BRASIL, M. A. M., LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do Cerrado. **Ciência Floresta**. v. 12, n. 1. 71-80, 2002.
- VIDAL, A. C. F., HORA, A. B. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia**. Papel e Celulose – BNDES Setorial 33, 261-314, 2011.
- VINTERBÄCK, J. Wood pellet use in Sweden: a systems approach to the residential sector. **Acta Universitatis Agriculturae Sueciae: Silvestria**, Issue 152, 2000. ISSN 1401-6230.
- WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **Biomass supply chains: harvesting & collection, pre-treatment and upgrading, storage transportation & handling**. WBA Fact Sheet, 2018.
- \_\_\_\_\_. **Global biomass potencial toward 2035**. WBA Fact Sheet, 2016.

YAN, P.; XIAO, C.; XU, L.; YU, G.; LI, A.; PIAO, S.; HE, N. Biomass energy in China's terrestrial ecosystems: insights into the nation's sustainable energy supply. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 127, 2020.

## ANEXO I

**Tabela 18.** Empreendimentos que utilizam combustíveis de origem florestal para geração de energia elétrica no Brasil.

<b>Empreendimento</b>	<b>UF</b>	<b>Combustível final</b>	<b>Potência outorgada (kW)</b>
Klabin Celulose	PR	Licor Negro	330.000,00
Fibria MS-II	MS	Licor Negro	269.580,00
Suzano Maranhão	MA	Licor Negro	254.840,00
CMPC (Antiga Aracruz Unidade Guaíba)	RS	Licor Negro	250.994,00
Eldorado Brasil	MS	Licor Negro	214.103,00
Suzano Mucuri (Antiga Bahia Sul)	BA	Licor Negro	214.080,00
Aracruz	ES	Licor Negro	210.400,00
Fibria - MS (Antiga VCP - MS)	MS	Licor Negro	175.100,00
Veracel	BA	Licor Negro	126.600,00
Klabin	PR	Licor Negro	113.250,00
Bahia Pulp (Antiga Bacell)	BA	Licor Negro	108.600,00
Cenibra	MG	Licor Negro	100.000,00
Rigesa	SC	Resíduos Florestais	79.193,00
Usiminas 2	MG	Gás de Alto Forno - Biomassa	63.155,00
Jari Celulose	PA	Licor Negro	55.000,00
Ripasa	SP	Resíduos Florestais	53.480,00
Inpasa	MT	Lenha	42.300,00
Klabin Correia Pinto (Antiga Celucat)	SC	Licor Negro	37.822,00
Lwarcel (Antiga Lençóis Paulista)	SP	Licor Negro	36.420,00
Klabin Otacílio Costa (Antiga Igaras)	SC	Licor Negro	33.745,00
F&S Agri Solutions	MT	Resíduos Florestais	30.000,00
Guaçu	MT	Resíduos Florestais	30.000,00
Lages	SC	Resíduos Florestais	28.000,00
Cargill Uberlândia	MG	Resíduos Florestais	25.000,00
Rondon II	RO	Resíduos Florestais	24.000,00
Inpasa Mutum	MT	Lenha	22.360,00
Floraplac	PA	Resíduos Florestais	20.000,00
Usiminas	MG	Gás de Alto Forno - Biomassa	18.810,00

<b>Empreendimento</b>	<b>UF</b>	<b>Combustível final</b>	<b>Potência outorgada (kW)</b>
ERB Candeias	BA	Resíduos Florestais	16.790,00
Miguel Forte	PR	Resíduos Florestais	16.000,00
Berneck Curitibanos	SC	Resíduos Florestais	14.300,00
Berneck	PR	Resíduos Florestais	13.600,00
Orsa	SP	Lenha	13.100,00
Ecoluz	PR	Resíduos Florestais	12.330,00
Viena	MA	Carvão Vegetal	12.200,00
Granol PO	TO	Lenha	11.500,00
Gusa Nordeste	MA	Carvão Vegetal	10.000,00
Irani	SC	Resíduos Florestais	10.000,00
Piratini	RS	Resíduos Florestais	10.000,00
Vetorial Corumbá	MS	Gás de Alto Forno - Biomassa	10.000,00
Itacoatiara	AM	Resíduos Florestais	9.000,00
Piraí	PR	Resíduos Florestais	9.000,00
Algar Agro	MG	Lenha	8.950,00
Metalsider	MG	Gás de Alto Forno - Biomassa	8.800,00
Primavera do Leste	MT	Resíduos Florestais	8.000,00
Simasa	MA	Carvão Vegetal	8.000,00
Energir	RS	Resíduos Florestais	7.000,00
Vetorial	MS	Gás de Alto Forno - Biomassa	6.940,00
Santa Maria	PR	Resíduos Florestais	6.400,00
Cargil Três Lagoas	MS	Resíduos Florestais	6.000,00
Comigo	GO	Resíduos Florestais	5.000,00
Energy Green	PR	Resíduos Florestais	5.000,00
Plantar	MG	Gás de Alto Forno - Biomassa	5.000,00
Predilecta	SP	Biogás - Floresta	5.000,00
Siderúrgica União	MG	Gás de Alto Forno - Biomassa	5.000,00

<b>Empreendimento</b>	<b>UF</b>	<b>Combustível final</b>	<b>Potência outorgada (kW)</b>
Usipar Industria e Comercio	MG	Carvão Vegetal	4.997,00
Celulose Irani	SC	Licor Negro	4.900,00
AVG I-II	MG	Carvão Vegetal	4.800,00
Bio Fuel	RR	Resíduos Florestais	4.800,00
Thermoazul	SC	Resíduos Florestais	4.700,00
Lanxess Cogeração	SP	Resíduos Florestais	4.500,00
Chapecó	SC	Resíduos Florestais	4.000,00
Energia Madeiras	SC	Resíduos Florestais	4.000,00
Forespel - Energia Renovável de Pellets	RS	Resíduos Florestais	3.700,00
Fazenda Santa Marta	MG	Resíduos Florestais	3.600,00
João Neiva	ES	Carvão Vegetal	3.500,00
Rohden	SC	Resíduos Florestais	3.500,00
Caldeira 6 Kairós	PR	Lenha	3.200,00
Nobrecel	SP	Licor Negro	3.200,00
Battistella	SC	Resíduos Florestais	3.150,00
Citrus	SP	Lenha	3.150,00
Iguaçu-Ibicuí-Termo-1-2-4	SC	Resíduos Florestais	3.100,00
Atos	MT	Resíduos Florestais	3.000,00
Dois Vizinhos	PR	Resíduos Florestais	3.000,00
Rações Patense - Itaúna	MG	Resíduos Florestais	3.000,00
SORGATTO	GO	Resíduos Florestais	3.000,00
Terranova I	SC	Resíduos Florestais	3.000,00
Sguário Itapeva	SP	Resíduos Florestais	2.708,00
USITRAR ECO-ENERGY RIO	RJ	Carvão Vegetal	2.700,00
Florevale	MG	Resíduos Florestais	2.520,00
Siderpa	MG	Gás de Alto Forno - Biomassa	2.400,00
USITRAR ECO-ENERGY	MA	Gás de Alto Forno - Biomassa	2.400,00

<b>Empreendimento</b>	<b>UF</b>	<b>Combustível final</b>	<b>Potência outorgada (kW)</b>
Calsete	MG	Gás de Alto Forno - Biomassa	2.000,05
Cisam	MG	Carvão Vegetal	2.000,00
Egídio	MT	Resíduos Florestais	2.000,00
Martins	MT	Resíduos Florestais	2.000,00
Pizzatto	PR	Resíduos Florestais	2.000,00
Valinho	MG	Gás de Alto Forno - Biomassa	2.000,00
Central Termelétrica de Geração (Antiga Forjasul)	RS	Resíduos Florestais	1.800,00
Destilaria Meneghetti	MG	Resíduos Florestais	1.600,00
Conselvan	MT	Resíduos Florestais	1.500,00
Laminados Triunfo	AC	Resíduos Florestais	1.500,00
Tramontina	PA	Resíduos Florestais	1.500,00
Nortao	MT	Resíduos Florestais	1.275,00
Araguassu	MT	Resíduos Florestais	1.200,00
Bragagnolo	SC	Resíduos Florestais	1.200,00
CATIVA I	SC	Resíduos Florestais	1.200,00
Siderurgica Barão de Mauá	MG	Gás de Alto Forno - Biomassa	1.200,00
Madem	RS	Resíduos Florestais	1.000,00
Natureza Limpa	MG	Resíduos Florestais	1.000,00
Ebata	PA	Resíduos Florestais	800,00
Pampa	PA	Resíduos Florestais	550,00
Juruá Florestal	PA	Resíduos Florestais	400,00
Santo Antônio	PA	Resíduos Florestais	60,00
Gaseifamaz I	SP	Resíduos Florestais	27,00
Gaseifamaz II	AM	Resíduos Florestais	27,00

<b>Empreendimento</b>	<b>UF</b>	<b>Combustível final</b>	<b>Potência outorgada (kW)</b>
MARFRIG SÃO GABRIEL RS	RS	Lenha	15,00

Fonte: Elaborado pela autora, a partir de dados do SIGA – ANEEL, 2020.

### **Capítulo 3 . ANÁLISE ECONOMETRICA DO MERCADO DE BIOMASSA FLORESTAL NO BRASIL – o caso do carvão vegetal no mercado brasileiro de energia**

#### 1. Introdução

As florestas, nos últimos anos, vêm sendo analisadas como elemento chave para atacar os desafios inerentes ao desenvolver, comunidades ou nações, de forma sustentável. Nesse cenário, diversas são as metas a serem alcançadas, mas de forma a atingir uma transformação sustentável mudanças robustas e dinâmicas são requeridas, o que se refere a todo o processo de formulação de políticas públicas desde a identificação do problema até a implementação dessas políticas. E, um futuro comum em muitos desses caminhos na busca por mudanças passa pela “eco modernização”, a qual acredita fortemente no poder na bioeconomia como veículo para desenvolver sinergias e otimizar o uso dos recursos existentes (LINDAHL *et al.*, 2017).

A mudança de comportamento no consumo energético mundial transparece essa nova mentalidade e tendência do mercado consumidor e dos governos na busca por caminhos de desenvolvimento sustentáveis. Os recursos renováveis, nos últimos anos, vêm aumentando sua contribuição na geração de energia mundial. E, essa participação tende a crescer com o tempo com o desenvolvimento de tecnologias, otimização de processos produtivos e redução dos custos (COLE *et al.*, 2021).

Entre 2007 e 2017, a participação das energias renováveis mundialmente, aumentou 56,6% no setor de eletricidade, e a capacidade instalada para produção de eletricidade alcançou 2,195 GW. Entretanto, ainda existe muitos desafios para substituir matrizes energéticas dependentes dos combustíveis fósseis. Os países apresentam diferentes características, além dos aspectos políticos e econômicos, e algumas regiões não possuem as mesmas potencialidades geográficas e disponibilidade de recursos. Sendo necessário, portanto, políticas energéticas customizadas para cada realidade de forma a maximizar seus efeitos (KIM, 2021).

O Brasil possui a matriz energética predominantemente de origem renovável, com maior participação da fonte hídrica, que corresponde a 64,9% da oferta interna de eletricidade proveniente de fontes renováveis, seguida pelo gás natural (9,3%), fonte

eólica (8,6%), biomassa (8,4%), carvão e derivados (3,3%), fonte nuclear (2,5%), derivados de petróleo (2,0%) e solar (1,0%). Em 2019, as fontes renováveis representaram 83% da oferta interna de eletricidade<sup>14</sup> (EPE, 2020).

A oferta interna de energia, no Brasil, ao depender dos derivados do petróleo e recursos hídricos fica vulnerável ao mercado internacional e seus preços, e aos riscos ambientais/climáticos relacionados a seca e a volatilidades na capacidade de gerar energia do recurso. Sendo importante, portanto, diversificação da matriz energética e aumento da participação de outras fontes renováveis. Nesse contexto, o uso das energias solar, eólica e biomassa possuem grande potencial no Brasil, país com forte insolação, vento costeiro de qualidade e grande potencial de produção no setor florestal (LIMA *et al.*, 2020).

A biomassa é um recurso energético renovável proveniente de matéria orgânica podendo ser de origem animal, vegetal, florestal, industrial ou urbana (CORTEZ *et al.*, 2014). Segundo Foelkel (2016) a biomassa, do ponto de vista energético, está associada a produção metabólica e química da matéria-prima capaz de ser transformada, posteriormente, em energia para consumo. Especificamente, a biomassa florestal, portanto, consiste na utilização do material lenhoso, incluindo madeira e seus resíduos, para geração de energia.

A madeira utilizada de forma direta, como lenha, e o seu derivado, carvão vegetal, são os principais insumos energéticos no mercado. Adicionalmente, tem-se como alternativas de biomassa florestal, os resíduos de colheita, processamento e industrialização da madeira (como serragens e o licor negro, efluente do processo de produção das indústrias de papel e celulose), cavacos, pellets e briquetes. Os pellets e briquetes representam alternativas com maior valor agregado, características tecnológicas que conferem maior eficiência energética aos produtos e que, nos últimos anos, tem apresentado mercado internacional aquecido.

O uso da biomassa florestal no setor energético tem sido considerado como um mecanismo a ser utilizado na mitigação dos impactos das mudanças climáticas, na redução da vulnerabilidade de áreas como o fogo através do manejo adequado, e na melhoria e no desenvolvimento socioeconômico rural (MANOLIS *et al.*, 2019). Ademais,

---

<sup>14</sup> Referente à soma dos montantes produzidos e importações (em maioria de origem renovável).

a biomassa florestal apresenta diversas origens, assim como rotas tecnológicas de conversão, escalas industriais e usos finais, os quais adicionados a fatores sociais e ambientais, e o contexto regional serão capazes de determinar a viabilidade econômica do empreendimento (BEETON; GALVIN, 2017).

A bioenergia proveniente da floresta é lembrada na literatura especializada como um mecanismo alternativo para atingir o manejo múltiplo da floresta e atingir metas energéticas (como diversificação da matriz energética e garantia da segurança energética do país). Entretanto, ainda enfrenta desafios na falta de suporte eficiente dos governos e compete contra os custos mais baixos de outras fontes de energia, como gás natural, energia eólica e solar (GALIK *et al.*, 2021).

O Brasil é um dos maiores produtores de carvão vegetal no mundo. E, no mercado doméstico de biomassa florestal o carvão possui uma grande representatividade no setor energético. Dessa forma, estudos capazes de analisar o comportamento das forças, oferta e demanda, que atuam no mercado são importantes para organização e otimização do setor, ao conhecer as variáveis capazes de influenciar a dinâmica do mercado.

Diante do exposto, esse capítulo da tese tem como objetivo analisar, com uso de ferramentas econométricas, a oferta e a demanda de biomassa florestal como recurso energético no mercado brasileiro. Analisando, especificamente, o produto energético carvão vegetal.

## 2. Material e Métodos

### 2.1 Fundamentação teórica - metodologia básica econométrica

A análise acerca aspectos relacionados à oferta e demanda de bens é importante economicamente pois esses aspectos são responsáveis por gerir o funcionamento da economia e dos mercados. Dessa forma, essas forças do mercado são capazes de determinar a quantidade de cada bem a ser produzido, assim como os preços em que devem ser comercializados. Demanda e oferta, portanto, podem ser conceituadas como:

- demanda: relaciona a quantidade de um bem que os compradores estão dispostos e podem pagar. E, mantendo todos os outros aspectos econômicos constantes, a

lei da demanda declara que ao aumentar o preço de um bem, a quantidade demandada irá diminuir, e vice-versa;

- oferta: refere-se à quantidade de um bem em que os vendedores estão dispostos e podem produzir. Desta forma, a lei da oferta conceitua que, com todas as variáveis econômicas constantes, quando o preço de um bem aumenta, sua quantidade ofertada no mercado também irá aumentar, e vice-versa (MANKIWI, 2012).

O mercado de um bem, portanto, funciona na tentativa de equilibrar essas duas forças. Culminando, portanto, no que conceitualmente a economia chama de ponto de equilíbrio. Segundo Mankiw (2012) no ponto de equilíbrio a interseção das curvas de demanda e oferta criam o ponto onde o preço do mercado alcança o patamar em que quantidade ofertada é igual a quantidade demandada daquele bem.

Partindo desses conceitos mais básicos, a economia tenta construir modelos simplificados como forma de descrever e compreender o mercado. Para tanto, é possível focar em determinados critérios ou características específicas do mercado específico em que se procura entender. Dessa forma, busca-se primeiramente a forma mais simples e generalista capaz de descrever o mercado que está sendo analisado, para, posteriormente, as variáveis e especificações sejam adicionadas para transformar em um modelo mais realista e menos generalista (VARIAN, 2014).

Para construção e análise desses modelos, na econometria a regressão é a principal ferramenta metodológica utilizada. Segundo Gujarati e Porter (2011), a regressão refere-se ao estudo da relação de dependência de uma variável, a variável dependente, com um ou várias variáveis, chamadas de variáveis explanatórias. Para dessa forma, prever ou estimar o comportamento da população da variável dependente em função de valores conhecidos das variáveis exploratórias.

A metodologia econométrica clássica, sugerida por Gujarati e Porter (2011), segue os seguintes passos:

a) Exposição da teoria ou hipótese: nessa primeira etapa da metodologia deve-se determinar o fenômeno que será analisado e qual hipótese o estudo será fundamentado. Para este projeto, como visto anteriormente, pretende-se modelar a demanda e oferta de biomassa florestal no mercado de energia renovável.

b) Especificação do modelo matemático da teoria: compreendido o que será analisado através de metodologias econométricas, faz-se necessário identificar as “n” variáveis que estão possivelmente relacionadas com a variável dependente e, formular um modelo (conjunto que equações matemáticas) capaz de especificar o que está em análise. Conforme a equação (1) abaixo:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X + \beta_n X_n \quad (1)$$

onde: Y é a variável dependente;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_n$  são parâmetros; X variáveis independentes ou explanatórias do modelo.

c) Especificação do modelo estatístico ou econométrico: a equação (1) possui um caráter limitante ao estudo, pois, através dela supõe-se que existe uma relação exata ou determinística entre as variáveis dependente e independente. Entretanto, as relações entre variáveis econômicas, de forma geral, são inexatas e, para representar esse relacionamento a equação deve ser reescrita da seguinte forma:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X + \beta_n X_n + \mu \quad (2)$$

onde:  $\mu$  representa uma variável estocástica (termo de erro).

d) Estimação dos parâmetros do modelo econométrico: para estimar numericamente os parâmetros, usa-se a análise de regressão como principal ferramenta. Dessa forma, é possível obter um modelo ajustado aos dados amostrados no estudo. Para tal, algumas premissas devem ser analisadas e, se necessário, corrigidas para melhor ajuste do modelo:

- i) O modelo de regressão é linear nos parâmetros;
- ii) A covariância dos erros para cada variável X deve ser zero;
- iii) Para os dados X, o valor do erro médio é zero;
- iv) Para os dados X, a variância dos erros é constante (homocedástica);
- v) Para os dados X, não existe correlação e nem correlação serial entre os termos do erro;
- vi) O número de observações (n) deve ser maior do que o número de parâmetros a serem estimados;
- vii) Deve existir variação suficiente nos valores das variáveis X;
- viii) Não existe colinearidade exata entre as variáveis X;
- ix) Não existe viés de especificação;

- x) O termo estocástico de erro é distribuído normalmente.
- e) Teste de hipóteses

Nessa etapa, são estabelecidos os critérios para verificar estatisticamente se as estimativas estão de acordo com as hipóteses formuladas pela teoria que está sendo testada. Para seleção e comparação dos modelos podem ser utilizados alguns critérios, para assim minimizar a soma dos quadrados dos resíduos (ou aumentar o valor de  $R^2$ ).

f) Projeção ou previsão: caso o modelo escolhido atenda as premissas da hipótese ou teoria, ele pode ser utilizado para realizar prognose da variável dependente a partir de valores esperados das variáveis independentes.

g) Uso do modelo para fins de controle ou de política: a interpretação dos resultados obtidos nas etapas anteriores é de grande importância para respaldo e formulação de políticas e controle do ambiente econômico.

Nesse trabalho não serão realizadas as duas últimas etapas metodológicas propostas por Gujarati e Porter (2011), uma vez que esse estudo não tem como objetivo utilizar a análise econométrica como ferramenta para projeção ou prognose de valores futuros. Assim como não busca aprofundar em aspectos de fomento e políticas públicas sobre a temática, mas sim análise de variáveis capazes de influenciar a demanda e oferta por carvão vegetal em uma série temporal.

## 2.2 Fundamentação analítica

A demanda demonstra a relação entre quantidade demandada a um determinado preço de um bem *ceteris paribus*. Entretanto, outros fatores também podem influenciar na quantidade demandada de um bem, como: preço de bens complementares ou substitutos e renda. Assim como mostra a função de demanda:

$$Q_D = f(P, P_C, P_S, Y)$$

onde  $Q_D$  refere-se à quantidade demandada,  $P$  o preço do bem,  $P_C$  o preço do bem complementar,  $P_S$  o preço do substituto e  $Y$  a renda dos consumidores (PERLOFF, 2015).

A oferta, por outro lado, pode ser influenciada, dentre outros fatores, pelo preço do bem, preço dos fatores de produção, tecnologia disponível, taxas e, regulamentações e

políticas do governo. Dessa forma, a forma funcional geral da oferta de um bem, em um determinado mercado e com as demais condições constantes pode ser descrita como:

$$Q_o = f(P, P_p, T, G)$$

onde  $Q_o$  é a quantidade ofertada,  $P$  o preço do bem,  $P_p$  são os custos de produção,  $T$  refere-se a tecnologia e  $G$  ações governamentais (PERLOFF, 2015).

Na tentativa de descrever o mercado de um determinado bem, outras variáveis podem ser selecionadas para compor o modelo (como: gostos e preferências, variáveis climáticas etc.), assim como também podem ser utilizadas *proxies*. A variável *proxy* é utilizada para relacionar à outra variável correlacionada de difícil mensuração ou não-observada.

### 2.2.1 Variáveis escolhidas

#### Demanda

Preço do carvão vegetal: espera-se que com o aumento do preço do carvão, a quantidade demandada pelo produto seja reduzida.

Preço da lenha: atuando no modelo como bem substituto e, portanto, espera-se que com o aumento do preço desse bem, ocorra redução na quantidade demandada por carvão vegetal.

Quantidade produzida de ferro-gusa: setor produtivo responsável pelo maior consumo de carvão vegetal, a indústria siderúrgica utiliza o carvão vegetal como insumo na produção de ferro-gusa. Portanto, espera-se que aumento da produção do ferro-gusa, aumente a demanda por carvão vegetal.

PIB *per capita*: no modelo essa variável foi utilizada como indicador de renda e, espera-se que com o aumento da renda dos consumidores, exista redução na quantidade demandada pelo produto. Tendo em vista a substituição do carvão por produtos com maior valor agregado e características tecnológicas necessárias de acordo com a utilização final, como briquetes.

#### Oferta

Preço do carvão vegetal: espera-se que o preço do carvão vegetal se relacione de forma positiva com a quantidade ofertada, ou seja, com aumento do preço ocorra aumento da oferta.

Preço do carvão vegetal defasado: espera-se que exista um efeito positivo na relação dessa variável com carvão vegetal. O aumento do preço do ano anterior, impulse produtores a investirem mais na produção e aumentar a quantidade ofertada do produto no mercado.

Salário mínimo: foi utilizado no estudo como um indicador de custo de produção. Sendo, portanto, esperado que o aumento do salário mínimo, reduza as margens de rentabilidade da produção e, por consequência, a quantidade ofertada do produto.

Taxa de câmbio: desvalorização da moeda nacional em relação à moeda estrangeira torna a utilização de produtos derivados do petróleo (com preços influenciados pelo mercado internacional) menos atrativos para serem utilizados, e, portanto, o carvão vegetal torna-se a melhor solução.

Taxa SELIC: por representar a taxa básica de juros no Brasil, a taxa SELIC foi utilizada para representar o custo de oportunidade em ofertar carvão vegetal no mercado. Esperando que, com aumento da taxa de juros, menor seja a quantidade de carvão vegetal no mercado, uma vez que as atividades florestais estão menos atrativas.

### 2.2.2 Modelos propostos

Os modelos de demanda e oferta proposto para análise do mercado de carvão vegetal no Brasil são demonstrados, respectivamente nas equações 3 e 4.

$$\ln Q_{DCarv} = \alpha_1 + \alpha_2 \ln P_{Carv} + \alpha_3 \ln P_l + \alpha_4 \ln GUSA + \alpha_5 \ln PIB + \varepsilon \quad (3)$$

Em que,  $Q_{DCarv}$  é a demanda por carvão vegetal no Brasil (ton.),  $P_{Carv}$  é o preço do carvão vegetal no mercado brasileiro (R\$/ton.),  $P_l$  é o preço da lenha (R\$/m<sup>3</sup>),  $GUSA$  é a quantidade produzida de ferro-gusa no Brasil (ton.),  $PIB$  refere-se ao PIB *per capita* do Brasil (R\$) e  $\varepsilon$  é o termo de erro do modelo.

$$\ln Q_{OCarv} = \alpha_1 + \alpha_2 \ln P_{Carv} + \alpha_3 \ln P_{Carv\ n-1} + \alpha_4 \ln Sal + \alpha_5 \ln TxCamb + \alpha_6 \ln SELIC + \varepsilon \quad (4)$$

Em que,  $Q_{Ocarv}$  é a oferta de carvão vegetal no Brasil (ton.),  $P_{Carv}$  é o preço do carvão vegetal no mercado brasileiro (R\$/ton.),  $P_{Carv\ n-1}$  é o preço do carvão vegetal defasado (R\$/ton.),  $Sal$  é o médio do salário mínimo no Brasil (R\$),  $TxCamb$  refere-se a taxa de câmbio (R\$/US\$),  $SELIC$  é a taxa SELIC (% a.a.) e  $\varepsilon$  é o termo de erro do modelo.

Os modelos foram analisados no software R, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). No estudo, foram analisadas as estatísticas F e  $R^2$  ajustado para existência de modelo significativo. Os coeficientes foram analisados individualmente de acordo com o teste “t” de Student.

Foram analisadas também a presença de autocorrelação, multicolinearidade, heterocedasticidade e aderência a normalidade dos resíduos, respectivamente com o teste de Breusch-Godfrey (BG), o Indicador de Fator de Inflação das Variâncias (FIV), o teste de Breusch-Pagan e o teste de Shapiro-Francia.

### 2.3 Banco de dados

O banco de dado referente à análise desse capítulo é constituído por valores anuais, compreendendo o período entre 1995 e 2019 (ANEXO II). Os dados referentes ao valor e quantidade de carvão vegetal e lenha produzidos no Brasil, no período analisado, foram obtidos junto ao IBGE – Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS). O preço pago pelo carvão (R\$/ton<sup>3</sup>) e pela lenha (R\$/m<sup>3</sup>), foram obtidos através da razão entre o valor e a quantidade produzida.

Quanto ao consumo e produção do carvão vegetal, os dados foram obtidos no Balanço Nacional de Energia (2020) elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética. Os dados referentes ao consumo referem-se a soma de todos os setores que demandam carvão vegetal (como residencial, comercial, público, agropecuário, industrial – cimento, ferro gusa, química, outros na metalurgia, têxtil e outros).

Os dados relacionados a produção de ferro-gusa, taxa de câmbio, taxa SELIC e salário mínimo foram obtidos através do IPEADATA, respectivamente, nos acervos do: Instituto Brasileiro de Siderurgia, Banco Central do Brasil e Ministério da Economia. E, por fim, os valores do PIB *per capita* foram coletados no IBGE nas Contas Nacionais Anuais.

Todos os valores monetários foram deflacionados utilizando o IPCA (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo), para dessa forma desconsiderar o efeito da inflação

durante o período analisado e obter os valores monetários reais (preços e salário mínimo). O ano base para essa operação foi 2019.

### 3. Resultados e discussão

São poucos os estudos que relacionam os fatores condicionantes da demanda e oferta de carvão vegetal. Souza *et al.* (2017) realizaram a análise econométrica dos preços do carvão vegetal em Minas Gerais. Heinmann *et al.*, 2015 analisaram a demanda específica dos Estados Unidos pelo carvão vegetal brasileiro. Lucena *et al.* (2011), analisaram a demanda por carvão vegetal no setor siderúrgico e a relação desse consumo com as produtividades dos plantios de eucalipto. Soares *et al.* (2004) analisaram a demanda e oferta do produto, mas entre o período de 1974 e 2000.

Na área de tecnologia, diversos são os estudos analisando a composição química, rotas tecnológicas, resíduos dos processos, qualidade dos produtos e matérias-primas alternativas, assim como trabalhos que abordam as potencialidades da biomassa florestal no setor energético como ferramenta de mitigação das mudanças climáticas. Entretanto, a maioria dos estudos recentes, relacionados a economia, analisam a viabilidade financeira e os custos dos empreendimentos para geração de energia utilizando biomassa florestal em estudos de casos específicos. Existe, portanto, uma lacuna de conhecimento sobre o carvão vegetal no Brasil a ser preenchida e atualizada.

Para o modelo de demanda do carvão vegetal, na primeira análise, as variáveis que se mostraram significantes para explicar a demanda pelo bem foi apenas a produção de ferro-gusa, a 0,1% de probabilidade. Na Tabela 19 estão apresentados os resultados obtidos para equação de demanda do carvão, através do ajuste MQO.

**Tabela 19.** Estimativas da equação de demanda do carvão vegetal, no Brasil, entre 1995 e 2019.

Variável	Coefficientes	Erro-padrão	Teste t	p-value
Constante	3,13240	1,40160	2,235	0,037*
$\ln P_{\text{Carv}}$	-0,14449	0,09760	-1,480	0,154
$\ln P_1$	0,11176	0,09166	1,219	0,237
$\ln GUSA$	1,33572	0,13376	9,986	$3,24 \cdot 10^{-9***}$
$\ln PIB$	-0,06468	0,04340	-1,490	0,152

\*\*\* Nível de significância = 0,1%; \* 5%.

O coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) indica que 83,63% das variações na quantidade demandada do carvão vegetal podem ser explicadas pelas variáveis significativas do modelo. A estatística F do modelo também apresentou significância ( $p\text{-value} < 0,05$ ) e, portanto, os coeficientes não são iguais a zero e existe modelo capaz de analisar os dados. Os sinais obtidos para os coeficientes do modelo, nessa primeira análise, estão de acordo com os pressupostos do estudo apresentados anteriormente.

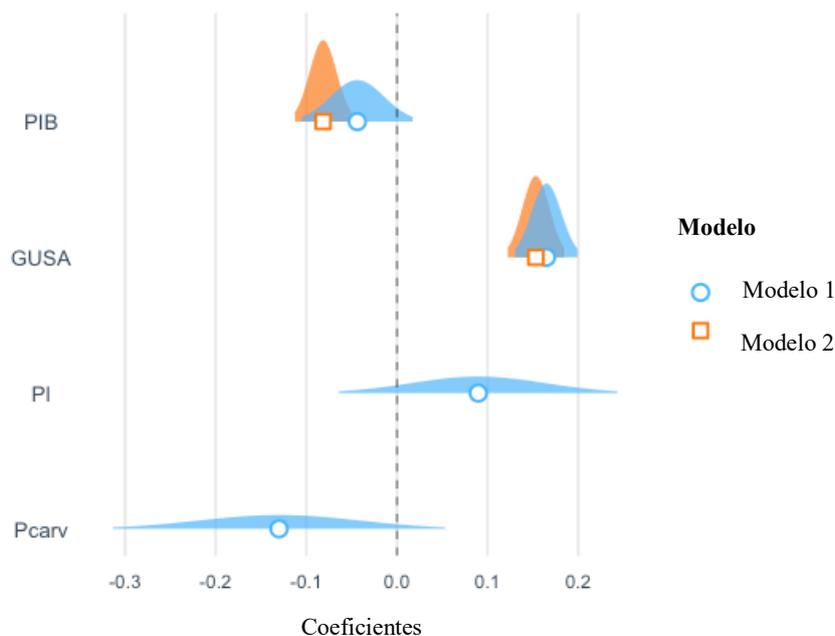
Antes de prosseguir com a análise, foi aplicada a metodologia *stepwise* (Tabela 20) com objetivo de retirar do modelo os parâmetros não significativos, na tentativa de gerar um modelo mais robusto estatisticamente. Essa etapa visa reduzir as interações entre as variáveis propostas no modelo, de forma a otimizar a modelagem (ŻOGAŁA-SIUDEM; JAROSZEWICZ, 2021).

**Tabela 20.** Estimativas dos parâmetros das equações de demanda de carvão vegetal no Brasil, entre 1995 e 2019, após regressão *stepwise*.

Variável	Coefficientes	Erro-padrão	Teste t	p-value
Constante	4,20847	1,23374	3,411	0,0025**
lnGUSA	1,24125	0,12138	10,226	$8,03 \times 10^{-10}$ ***
lnPIB	-0,12046	0,02216	-5,435	$1,85 \times 10^{-5}$ ***

\*\*\* Nível de significância = 0,1%; \*\*1%.

Percebe-se, portanto, que as variáveis  $P_{Carv}$  e  $P_l$  foram retiradas da lista de variáveis do modelo, devido a sua não significância estatística para o modelo. Este novo ajuste possui um  $R^2_{aj}$  de 83,23% e estatística F também significativa. Comparando os modelos de demanda do carvão sem procedimento *stepwise* (Model 1) e após procedimento *stepwise* (Model 2), representados na Figura 21, percebe-se que houve uma pequena melhora na amplitude dos coeficientes  $\alpha$  nas estimativas das variáveis produção de ferro-gusa e PIB, mostrando uma melhora na capacidade preditiva do modelo. Percebe-se, também, que o coeficiente  $\alpha$  das variáveis referentes ao preço do carvão e lenha poderiam ser iguais a zero, explicando a não significância estatística no modelo e deficiência preditiva com grande amplitude de variação para estimações.



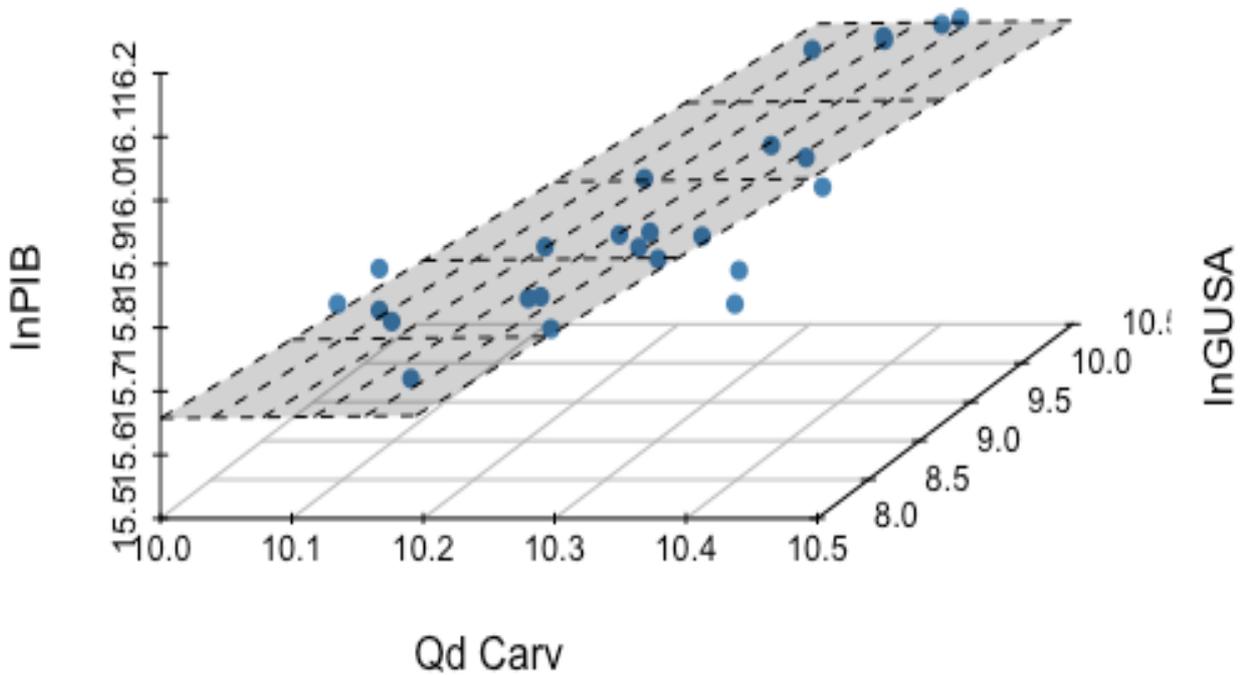
**Figura 21.** Estimativas dos coeficientes das variáveis  $\ln P_{Carv\ n-1}$ ,  $\ln GUSA$  e  $\ln PIB$  do modelo de demanda de carvão vegetal nos modelos antes (Modelo 1) e depois do *stepwise* (Modelo 2).

Observa-se que as variáveis continuaram com os sinais esperados no modelo empírico, sendo (+) para a quantidade produzida de ferro-gusa e (-) para a variável relacionada ao PIB. A significância da variável PIB no modelo, pode ser capaz de indicar situações de desaceleração na economia, por exemplo, a redução do poder aquisitivo do consumidor irá impactar negativamente a demanda pelo carvão vegetal. Ao reduzir o poder aquisitivo do consumidor, existe a tendência na mudança nos padrões de consumo e, de forma geral, os consumidores passam a demandar produtos inferiores ou substitutos (de menor preço no mercado). O modelo, portanto, apresenta a seguinte estrutura matemática:

$$\ln Q_{DCarv} = 4,208 + 1,241 \ln GUSA - 0,120 \ln PIB$$

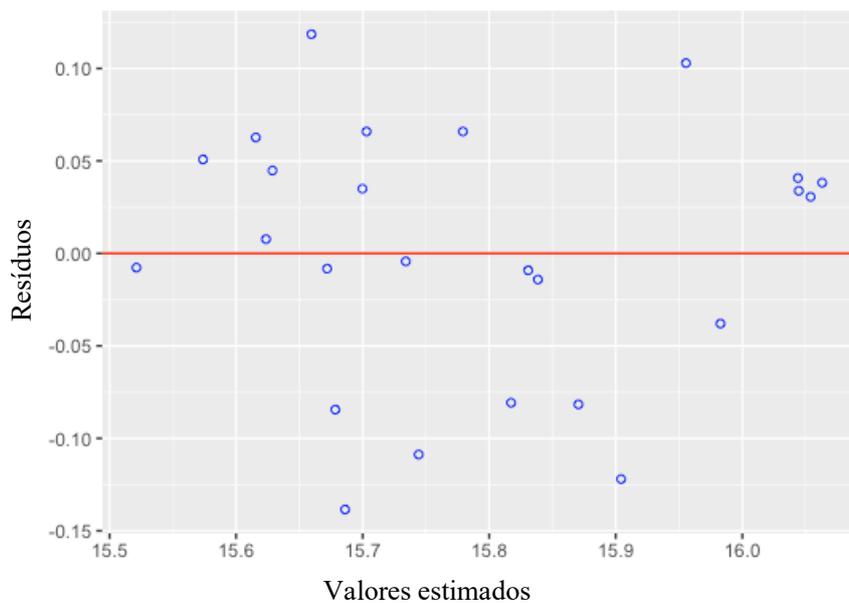
Como o modelo está de forma logarítmica, é possível interpretar as elasticidades (MENDES *et al.*, 2016). Pode-se dizer, portanto, que o aumento de 10% na produção ferro-gusa gera o aumento de 12,41% na quantidade demandada de carvão vegetal, *ceteris paribus*. Souza *et al.* (2004), ao analisar o mercado de carvão vegetal no Brasil, entre 1974 e 2000, encontraram o mesmo comportamento direto entre demanda de carvão vegetal e quantidade de ferro-gusa produzida. No estudo, os autores encontraram uma variação de 10,49% da demanda de carvão, ao aumentar em 10% a produção de ferro-gusa.

O modelo para demanda estimado, portanto, possui a seguinte representação gráfica (Figura 22). Onde, os limites inferiores e superiores do intervalo de confiança (95%) para os coeficientes relacionados ao intercepto do modelo, a produção de ferro-gusa, PIB são, respectivamente: 1,649 e 6,767; 0,989 e 1,492; -0,166 e -0,0744.



**Figura 22.** Representação gráfica do modelo estimado (Qd Carv em toneladas, lnPIB em reais e lnGUSA em toneladas).

Conforme a dispersão aleatória do modelo ajustado e seus resíduos (Figura 23), é possível inferir que não ocorreram problemas de autocorrelação, heterocedasticidade e especificação do modelo.



**Figura 23.** Dispersão dos resíduos do modelo proposto de demanda de carvão vegetal.

Com relação aos testes estatísticos para aderências aos pressupostos da regressão: teste BG rejeitou a possibilidade de correlação serial nos resíduos (a 5% de probabilidade, com  $p\text{-value} = 3,727 \times 10^3$ ); o teste de Shapiro-Francia ( $p\text{-value} = 0,275$ ) indicou que os resíduos possuem aderência a normalidade; o teste de Breusch-Pagan descartou a possibilidade de heterocedasticidade; e, sem problemas de multicolinearidade, com valores de FIV, apresentados na Tabela 21, menores do que 10 conforme dito por Gujarati e Porter (2011).

**Tabela 21.** Indicadores de inflação do modelo de oferta de carvão vegetal para energia no Brasil.

Variável	VIF
lnGUSA	1,019
lnPIB	1,019

Quanto a oferta de carvão vegetal, entre 1995 e 2019, no mercado brasileiro as variáveis que se mostraram significativas nesse banco de dados foram  $\ln P_{\text{Carv}}$  e  $\ln \text{Sal}$ , conforme a Tabela 22. As demais variáveis não foram significativas para esse modelo, na presença desse conjunto de variáveis.

**Tabela 22.** Estimativas da equação de oferta de carvão vegetal no Brasil, entre 1995 e 2019.

Variável	Coefficientes	Erro-padrão	Teste t	p-value
Constante	15,28255	0,58968	25,917	$2,74 \times 10^{-16}$ ***
$\ln P_{\text{Carv}}$	0,65584	0,14276	4,594	0,000198***
$\ln P_{\text{Carv } n-1}$	0,07141	0,05370	1,330	0,199295
$\ln \text{Sal}$	-0,63724	0,12862	-4,9557	$8,8 \times 10^{-5}$ ***
$\ln \text{TxCamb}$	-0,00780	0,08614	-0,091	0,928795
$\ln \text{SELIC}$	0,04709	0,10440	0,451	0,657078

\*\*\* Nível de significância = 0,1%

O modelo apresentou um coeficiente de determinação ajustado igual a 49,94% e estatística F significativa, mostrando que aproximadamente 50% da variância da oferta de carvão vegetal pode ser explicada pelo modelo e que os coeficientes do modelo são diferentes de zero.

Nessa primeira análise sob o modelo proposto para oferta, percebe-se que os sinais encontrados para as variáveis estão de acordo com o pressuposto no estudo aqui realizado, com exceção do coeficiente relacionado à taxa Selic. Caso apresentasse significância estatística, *ceteris paribus*, um aumento de 10% na taxa Selic seria responsável por aumentar 0,47% da oferta de carvão vegetal. E, segundo Soares et al. (2004), nessas situações de aumento na taxa de juros os produtores optam por antecipar o corte do povoamento florestal, aumentando a oferta de carvão de modo a abastecer o mercado a curto prazo.

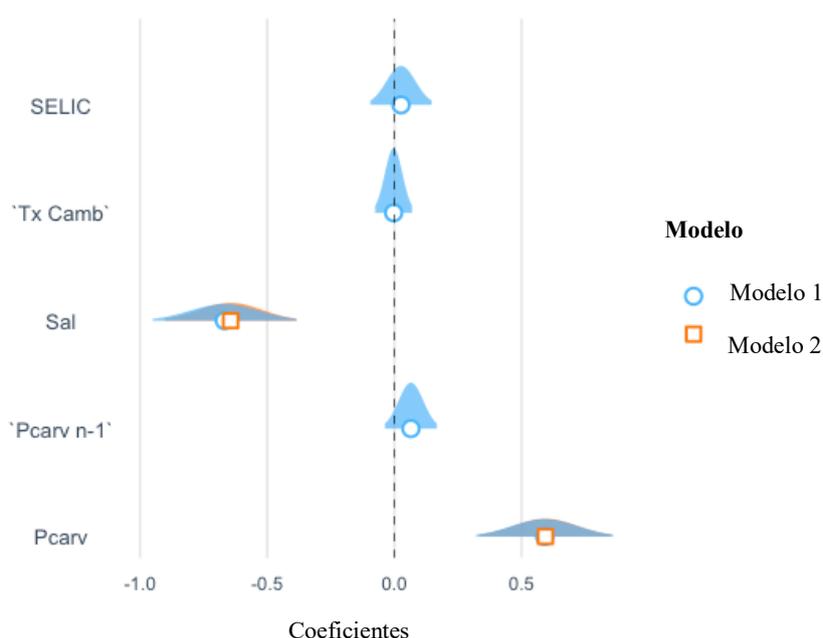
Assim como feito para o modelo de demanda, para prosseguir com a análise, o processo *stepwise* também foi realizado na tentativa de obter um modelo preditivo mais robusto ao retirar do modelo as variáveis não significativas, conforme a Tabela 23.

**Tabela 23.** Estimativas dos parâmetros das equações de oferta de carvão vegetal no Brasil, entre 1995 e 2019, após regressão *stepwise*.

Variável	Coefficientes	Erro-padrão	Teste t	p-value
Constante	15,6334	0,1722	90,791	$2 \times 10^{-16}$ ***
$\ln P_{\text{Carv}}$	0,6592	0,1387	4,752	$9,63 \times 10^{-5}$ ***
$\ln \text{Sal}$	-0,6138	0,1191	-5.153	$3,64 \times 10^{-5}$ ***

\*\*\* Nível de significância = 0,1%.

Observa-se que, nesse momento, o *stepwise* retirou três variáveis não significativas, mantendo as variáveis relacionadas ao preço do carvão vegetal e ao salário mínimo. O modelo para oferta de carvão após o processo *stepwise*, apresentou poucas melhoras, conforme mostra a Figura 24, ao retirar as variáveis que possivelmente poderiam ser iguais a zero (como a taxa SELIC, preço defasado do carvão e taxa de câmbio) comprometendo estatisticamente o modelo. Adicionalmente, é possível perceber a fragilidade de interpretação das variáveis que a depender da situação podem ser iguais a estatisticamente igual a zero.



**Figura 24.** Estimativas dos coeficientes das variáveis do modelo de oferta de carvão vegetal nos modelos antes (Model 1) e depois do *stepwise* (Model 2).

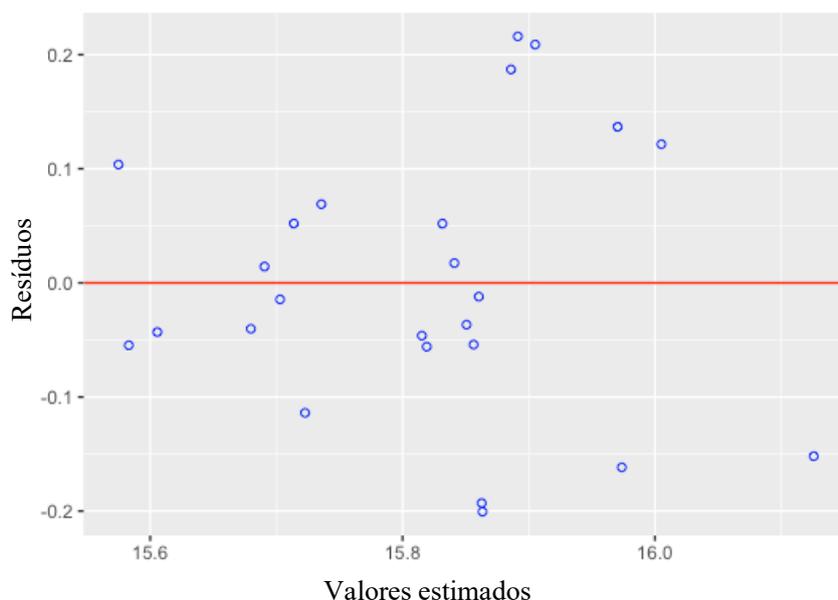
O  $R^2_{aj}$  do modelo *stepwise* foi pouco alterado, passando para 52,66%. E a estatística F continuou significativa. O modelo, portanto, apresenta a seguinte estrutura matemática:

$$\ln Q_{Ocarv} = 15,6334 + 0,6592 \ln P_{Carv} - 0,6138 \ln Sal$$

A variável relacionada ao preço do carvão, nessa situação, apresentou sinal positivo, o que sob o ponto de vista teórico era o esperado. O mesmo ocorreu para a variável relacionada ao salário mínimo que apresentou sinal negativo conforme a hipótese, indicando ter influência negativa na oferta do produto. Ao interpretar o modelo, portanto, pode-se dizer que o aumento de 10% nas variáveis estatisticamente significativas (preço e salário) causariam, respectivamente: aumento na oferta em 6,5% e redução em 6,1%.

Os limites inferiores e superiores do intervalo de confiança (95%) para os coeficientes relacionados ao intercepto do modelo, o preço do carvão e salário são, respectivamente: 15,276 e 15,990; 0,0371 e 0,946; -0,860 e -0,366.

Conforme mostra a Figura 25 existe uma dispersão aleatória do modelo ajustado e seus resíduos, não existindo padrões na distribuição.



**Figura 25.** Dispersão dos resíduos do modelo proposto de oferta de carvão vegetal

Com relação aos testes estatísticos para aderências aos pressupostos da regressão: teste BG rejeitou a possibilidade de correlação serial nos resíduos (a 5% de probabilidade, com p-value = 0,03846); o teste de Shapiro-Francia (p-value = 0,6356) indicou que os resíduos possuem aderência a normalidade; o teste de Breusch-Pagan descartou a presença de heterocedasticidade.

Entretanto, analisando os indicadores de inflação (FIV) foi possível observar uma alta colinearidade para as variáveis preço e salário (com valores de inflação maiores do que 10). Segundo Gujarati & Porter (2011), essa situação pode comprometer a estimativa dos coeficientes da regressão, podendo ser resultado do método de coleta de dados (sendo muito restritivo), tamanho da amostra ou especificação do modelo. Os autores adicionam que a multicolineariedade não viola pressupostos da regressão e, portanto, mesmo diante desse diagnóstico, pode ser possível obter estimativas consistentes, não viesadas e correta estimativa dos erros padrões. Entretanto, a multicolineariedade pode dificultar a obtenção de coeficientes com erros padrões pequenos. Por fim, a multicolineariedade, é um

fenômeno amostral e característica da amostra. E, devido aos problemas oriundos dessa situação o modelo não é indicado para ser utilizado para fins de previsão, atentando-se apenas para estudo de mercado e determinantes da oferta do bem aqui analisado.

#### 4. Conclusão

O modelo de demanda estruturado nesse estudo para o carvão vegetal, apesar da quantidade limitada de variáveis, foi capaz de descrever parte do mercado do carvão vegetal no Brasil. Parte essa, referente ao ferro-gusa, seu principal consumidor e responsável por dinamizar o setor. As variáveis, quantidade produzida de ferro-gusa e PIB *per capita*, foram significativas e atenderam todos os pressupostos da regressão múltipla.

As variáveis relacionadas ao preço do carvão vegetal e salário (utilizado como *proxy* dos custos de produção) foram significativas e apresentaram comportamento conforme esperado, portanto determinantes na oferta de carvão vegetal no Brasil para o período analisado. Apesar a fundamentação teórica e analítica, a equação de oferta do carvão vegetal, apresentou problemas de multicolinearidade, o que pode influenciar o poder preditivo das variáveis. Entretanto, os demais testes aplicados nesse estudo validam a teoria de comportamento das variáveis explicativas do modelo de oferta, conforme a hipótese teórica.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEETON, T. A.; GALVIN, K. A. Wood-based bioenergy in western Montana: the importance of understanding path dependence and local context for resilience. **Ecology and Society**. v. 22, n. 2, 2017. HYPERLINK <https://doi.org/10.5751/ES-09157-220209>
- COLE, W.; GATES, N.; MAI, T. Exploring the cost implications of increased renewable energy for the U.S power system. **The Electricity Journal**. v. 34, issue 5, 2021.
- CORTEZ, L. A. B.; SILVA LORA, E. E.; AYARZA, J. A. C. Biomassa no Brasil e no mundo. *In*: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (org.). **Biomassa para energia**. 3 ed. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2014.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2020: ano base 2019**. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

- FOELKEL, C. Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. **Eucaliptus online book & newsletter**, 2016.
- GALIK, C. S.; BENEDUM, M. E.; KAUFFMAN, M.; BECKER, D. R. Opportunities and barriers to forest biomass energy: a case study of four U.S. states. **Biomass and Bioenergy**. v. 148, 2021.
- GUIJARATI, D.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. Porto Alegre: Bookman, ed. 5, 920 p., 2011.
- HEIMANN, J. P.; DRESCH, A. R.; ALMEIDA, A. L. Demanda dos Estados Unidos por carvão vegetal brasileiro. **Ciência Florestal**. v. 25, n. 2, 2015.
- KIM, C. A review of the deployment programs, impact, and barriers of the renewable energy policies in Korea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 144, 2021.
- LIMA, M. A.; MENDES, L. F. R.; MOTHÉ, G. A.; LINHARES, F. G.; CASTRO, M. P. P.; SILVA, M. G.; SHEL, M. S. Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: reaching the goals of the Paris agreement in Brazil. **Environmental Development**. v. 33, 2020.
- LINDAHL, K. B.; SANDSTRÖM, C.; STÉNS, A. Alternative pathways to sustainability? Comparing forest governance models. **Forest Policy and Economics**. 77, 2017.
- MANKIW, N. G. **Principle of economics**. Southwestern: Cengage Learning, ed. 2, 890 p., 2012.
- MANOLIS, E. N.; ZAGAS, T. D.; KARETSOS, G. K.; PORAVOU, C. A. Ecological restrictions in forest biomass extraction for a sustainable renewable energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 110, 2019.
- MENDES, G. M.; PEREIRA, V. F.; BRAGA, M. J. Paper brazilian firms Market power in the worldwide market. **Revista Árvore**. v. 40, n. 4, 2016.
- PERLOFF, J. M. **Microeconomics**. Boston: Pearson, ed. 7, 804 p., 2015.
- SOUZA, P. D.; MATOS, L.; M. A.; ASSIS, A. L.; CABACINHA, C. D.; ARAÚJO JUNIOR, C. A. Análise econométrica de preços de carvão vegetal no norte de Minas Gerais. **Caderno de Ciências Agrárias**. v. 9, n. 3, 2017.

SOARES, N. S.; SILVA, M. L.; FONTES, A. A. Análise econométrica do mercado brasileiro de carvão vegetal no período de 1974 a 2000. **Scientia Forestalis**. n. 66, 2004.

VARIAN, H. R. **Intermediate microeconomics – a modern approach**. New York, London: W. W. Norton & Company, ed. 9, 825 p., 2014.

ŻOGAŁA-SIUDEM, B; JAROSZEWICZ, S. Fast stepwise regression based on multidimensional indexes. **Information Sciences**. v. 549, 2021

## ANEXO II

Ano	Oferta (ton)	Demanda (ton)	Preço Carvão (R\$/ton)	IPCA	Preço Carvão deplacionado (R\$/ton)	Preço Lenha (R\$/m³)	Produção Ferro-Gusa (ton)	Taxa de Câmbio (R\$/US\$)	PIB per capita	Salário Mínimo (R\$)	Taxa Selic (% a.a.)
1995	7.909.000,00	7.611.000,00	110,22	22,44	21,17	3,51	25.240,20	0,92	4.410,17	19,21	40,25
1996	7.292.000,00	7.053.000,00	119,92	9,56	54,07	6,30	24.129,40	1,01	5.219,36	50,49	24,91
1997	7.013.000,00	6.782.000,00	115,94	5,22	95,73	15,44	24.964,90	1,08	5.729,02	99,08	40,84
1998	6.387.000,00	6.172.000,00	123,27	1,65	322,00	50,22	25.261,00	1,16	5.944,92	339,58	28,96
1999	7.054.000,00	6.816.000,00	134,40	8,94	64,79	7,86	24.532,40	1,86	6.359,80	65,57	19,04
2000	7.713.000,00	7.455.000,00	149,82	5,97	108,16	12,19	27.650,80	1,81	6.900,62	109,01	15,84
2001	7.031.000,00	6.828.000,00	148,01	7,67	83,17	12,21	27.391,00	2,37	7.467,03	101,15	19,05
2002	7.363.721,96	7.147.160,00	250,50	12,53	86,16	7,33	29.695,20	2,82	8.340,58	68,79	24,90
2003	8.657.472,80	8.408.800,00	366,30	9,30	169,76	12,42	32.038,50	2,95	9.506,76	111,23	16,33
2004	10.085.352,00	9.834.000,00	324,06	7,60	183,78	20,45	34.578,70	2,91	10.705,99	147,45	17,75
2005	9.893.020,89	9.671.478,59	305,43	5,69	231,35	27,43	34.352,00	2,39	11.733,45	227,24	18,05
2006	9.559.000,00	9.420.006,99	335,67	3,14	460,75	53,51	32.279,90	2,16	12.880,52	480,41	13,19
2007	9.958.000,00	9.669.860,14	382,19	4,46	369,33	41,23	35.322,70	1,95	14.390,01	367,22	11,18
2008	9.891.500,00	9.611.652,99	467,01	5,90	341,15	31,75	35.481,90	1,72	16.280,82	303,16	13,66
2009	6.343.189,83	6.146.133,33	431,93	4,31	431,93	47,70	25.420,70	1,95	17.271,34	465,00	8,65
2010	7.378.668,07	7.194.713,62	471,91	5,91	344,15	34,16	31.449,40	1,77	19.938,60	371,93	10,67
2011	7.635.730,49	7.434.985,87	512,80	6,50	340,03	33,92	30.787,90	1,67	22.259,91	361,38	10,91
2012	7.309.563,49	7.117.393,86	476,43	5,84	351,61	37,94	27.046,30	2,03	24.278,35	459,04	7,29
2013	6.615.304,08	6.441.386,64	482,53	5,91	351,89	39,40	26.342,90	2,18	26.657,54	494,45	9,90
2014	6.507.440,91	6.411.271,83	525,57	6,41	353,38	37,06	26.810,60	2,33	28.648,74	486,81	11,65
2015	6.443.514,19	6.348.289,84	485,02	10,67	195,92	21,54	27.835,50	3,18	29.466,85	318,30	14,15
2016	5.545.218,50	5.463.269,46	524,80	6,29	359,60	36,88	24.740,80	3,39	30.558,75	602,99	13,65
2017	5.737.675,91	5.652.882,67	546,55	2,95	798,51	74,10	28.369,00	3,20	31.843,95	1.368,97	6,90
2018	6.009.620,49	5.920.808,36	674,86	3,75	775,64	58,21	28.340,00	3,77	33.593,82	1.096,46	6,40
2019	6.196.804,29	6.105.225,90	665,75	4,31	665,75	52,04	26.166,00	3,95	35.161,70	998,00	4,40

## **Capítulo 4 . MERCADO BRASILEIRO DA BIOMASSA FLORESTAL, CARVÃO VEGETAL E LENHA PARA ENERGIA ENTRE 1995 E 2019**

### **1. Introdução**

O desenvolvimento sustentável de nações é uma importante estratégia no contexto mundial moderno, através do desenvolvimento socioeconômico e ambiental. O desenvolvimento, nesse contexto, denominado por alguns autores do ramo como desenvolvimento verde, é considerado uma importante estratégia de política pública dos governos. No setor energético, por exemplo, é necessário desenvolver tecnologias inovadoras e ambientalmente corretas e, nesse contexto, o avanço das tecnologias “verdes” pode auxiliar a geração eficiente de energia, assim como conservar os recursos naturais e reduzir emissões de CO<sub>2</sub>. Essa necessidade de introdução de tecnologias limpas e o constante aumento na demanda de energia, cria um ambiente propício para o desenvolvimento e maior implementação de empreendimentos energéticos com base nos recursos renováveis (SMIRNOVA *et al.*, 2021).

Atualmente, a energia renovável é utilizada em diversos países como alternativa na composição da matriz energética e como forma de redução de impactos ambientais causados pelas fontes convencionais de energia (KIM, 2021). Na busca por alternativas sustentáveis como recursos energéticos, existem várias tecnologias para produção de energia a partir de fontes renováveis com origem da biomassa, geotérmica, hidrelétrica, oceânica, solar ou eólica (GOLDEMBERG, 2010). E diversas são as estratégias, tanto no âmbito acadêmico quanto no governamental, no setor energético e ambiental a fim de contribuir para o desenvolvimento sustentável.

Entre 2020 e 2030, o Brasil deve continuar como uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, liderando na trajetória mundial rumo à transição energética. Em 2020, 48% da matriz energética brasileira foi suprida por fontes renováveis. Nesse ano, especificamente, no setor elétrico, as fontes renováveis representaram 85% da oferta de energia. Esse cenário muito contribui para o cumprimento da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), firmada no Acordo de Paris, e com os compromissos firmados nacionalmente para o setor de energia (MME; EPE, 2021).

A biomassa florestal é considerada uma alternativa para a expansão e diversificação da matriz energética brasileira (BEZERRA JÚNIOR *et al.*, 2019) e vem

sendo valorizada como fonte renovável de energia (SIMIONI *et al.*, 2017). E, se utilizada de maneira adequada, pode ser sustentável. Sendo sua utilização sustentável definida, portanto, por meio do manejo florestal adequado ou através do uso de resíduos florestais, industriais ou urbanos (VIDAL; HORTA, 2011).

As florestas são demandadas pela sociedade e pelos governos de diferentes maneiras. Primeiramente, são lembradas pelo nobre papel de prover ambientes com biodiversidade, ajudando a regular o clima mundial e oferecendo proteção do solo. Somando o importante papel produtivo com ampla gama de produtos madeireiros e não madeireiros. Segundo, as florestas recebem destaque nas questões de adaptação frente as mudanças climáticas, assim como em ações mitigadoras na transição energética para fontes renováveis (LINDAHL *et al.*, 2017; KESKITO *et al.*, 2016).

A biomassa florestal como recurso energético, pode atuar como potencial mecanismo para manejo múltiplo da floresta e como forma de atingir metas políticas. Entretanto, o cenário florestal energético ainda enfrenta desafios, como falta de competitividade frente aos menores custos do gás natural, recursos eólicos e solar. O olhar integrador entre biomassa florestal e a gerência de empreendimentos florestais pode ser uma ferramenta interessante para redução de custos de produção e melhoria da competitividade do insumo energético florestal, além de contribuir para o manejo das florestas produtivas como na redução de matéria orgânica em campo e aproveitamento de resíduos (GALIK *et al.*, 2021). Sendo importante, portanto, a necessidade de estudos para analisar e auxiliar o fomento da atividade florestal no cenário energético.

O carvão vegetal e a lenha apresentam tendências de crescimento na matriz energética do Brasil. E, por serem recursos renováveis passaram a ser ponto focal em estudos e políticas públicas com o objetivo de reestruturar a cadeia produtiva desses produtos e, dessa forma, suprir a demanda do mercado (SIMIONI *et al.*, 2017). O carvão vegetal e a lenha são demandados por diversas atividades econômicas, como: a fabricação de produtos de madeira, fabricação de produtos de siderurgia e outras atividades industriais e serviços (IBÁ, 2020). Além do uso doméstico, ainda usual no país.

Diante do exposto, esse capítulo teve como objetivo analisar as taxas de crescimento das quantidades produzidas e dos preços do carvão vegetal e da lenha, no

período entre 1995 e 2019. E verificar, se as taxas de crescimento são reflexo de mudanças na demanda ou oferta desses produtos.

## 2. Material e Métodos

Os dados utilizados nesse trabalho referentes a quantidade produzida (ton. e m<sup>3</sup>, para carvão vegetal e lenha respectivamente) e valor da produção (Reais) foram coletados junto ao IBGE, especificamente no sistema relacionado a Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS), entre os anos de 1995 e 2019, de acordo com a disponibilidade de dados. A partir desses dados, a evolução dos preços para os produtos foi obtida através da razão entre valor da produção e quantidade do produto produzida (equação 1).

$$P = \frac{V_{prod}}{Q_{prod}} \quad (1)$$

Onde: P preço do produto (R\$/ton. e R\$/m<sup>3</sup>, no caso do carvão vegetal e da lenha); V<sub>prod</sub> é o valor da produção do produto carvão vegetal ou lenha (R\$); Q<sub>prod</sub> refere-se à quantidade produzida de carvão vegetal e lenha (ton. e m<sup>3</sup>, respectivamente).

A série histórica obtida dos preços de carvão vegetal e da lenha foram corrigidas pelo índice de Preço ao Consumidor (IPCA), publicado pelo IBGE, utilizando como base o ano de 2019. Por fim, os valores referentes a quantidade e preço do carvão vegetal e da lenha, utilizados nessa análise estão representados na Tabela 24.

**Tabela 24.** Dados utilizados para análise, referente a quantidades e aos preços do carvão vegetal e da lenha no Brasil entre 1995 e 2019.

Ano	Carvão		Lenha	
	Quantidade (ton)	Preço (R\$/ton)	Quantidade (m <sup>3</sup> )	Preço (R\$/m <sup>3</sup> )
1995	4.286.990	21,17	28.166.284	3,51
1996	4.063.903	54,07	36.565.831	6,30
1997	5.432.402	95,73	27.131.675	15,44
1998	4.326.821	322,00	30.252.670	50,22
1999	3.817.972	64,79	35.770.568	7,86
2000	3.814.696	108,16	40.469.405	12,19
2001	3.821.628	83,17	30.042.485	12,21
2002	3.955.643	86,16	46.410.020	7,33
2003	4.381.592	169,76	33.826.588	12,42

Ano	Carvão		Lenha	
	Quantidade (ton)	Preço (R\$/ton)	Quantidade (m³)	Preço (R\$/m³)
2004	4.343.602	183,78	34.004.544	20,45
2005	5.498.842	231,35	35.542.255	27,43
2006	5.114.580	460,75	36.110.455	53,51
2007	6.336.469	369,33	39.089.275	41,23
2008	6.197.383	341,15	42.037.848	31,75
2009	5.018.271	431,93	41.410.850	47,70
2010	4.951.207	344,15	48.103.232	34,16
2011	5.478.973	340,03	51.741.429	33,92
2012	6.257.504	351,61	56.761.788	37,94
2013	6.589.420	351,89	55.392.485	39,40
2014	7.240.423	353,38	56.170.820	37,06
2015	6.182.517	195,92	54.533.947	21,54
2016	5.542.716	359,60	53.007.731	36,88
2017	5.524.715	798,51	54.901.839	74,10
2018	6.429.554	775,64	52.518.348	58,21
2019	6.373.741	665,75	51.179.751	52,04

Para análise das taxas de crescimento, as estimativas foram obtidas conforme proposto por Gujarati e Porter (2011). Segundo os autores, essa análise pode ser realizada ao utilizar modelos semilogarítmicos e conhecimento sobre juros compostos. Onde, partindo da equação (2), tem-se:

$$Y_t = Y_0(1 + r)^t \quad (2)$$

sendo:  $Y_t$  o preço ou quantidade ao longo do período  $t$ ;  $Y_0$  preço ou quantidade iniciais;  $r$  é a taxa de crescimento composta ou geométrica de  $Y$  ao longo de tempo  $t$ ;  $t$  o período em análise.

Aplicando o logaritmo natural na equação anterior, é possível reescrever a equação, conforme (3):

$$\ln Y_t = \ln Y_0 + t \ln(1 + r) \quad (3)$$

Considerando  $\beta_1 = \ln Y_0$  e  $\beta_2 = \ln(1+r)$  e incluindo o termo de erro na equação (3), tem-se o modelo necessário para a análise da taxa de crescimento (4).

$$\ln Y_t = \beta_1 + \beta_2 t + \mu_t \quad (4)$$

No modelo (4), o coeficiente angular  $\beta_2$  mede a variação proporcional constante em Y para uma determinada variação proporcional no valor do regressor. A taxa de crescimento, portanto, será dado pelo antilogaritmo do  $\beta_2$  estimado pelo modelo, subtraindo-o por um e multiplicado por 100. O sinal do coeficiente angular determina se a taxa de crescimento é crescente (se apresentar sinal positivo) ou decrescente (caso seja negativo) (GUJARATI; PORTER, 2011). Os modelos de taxa de crescimento foram estimados pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO), considerando 5% de probabilidade de significância.

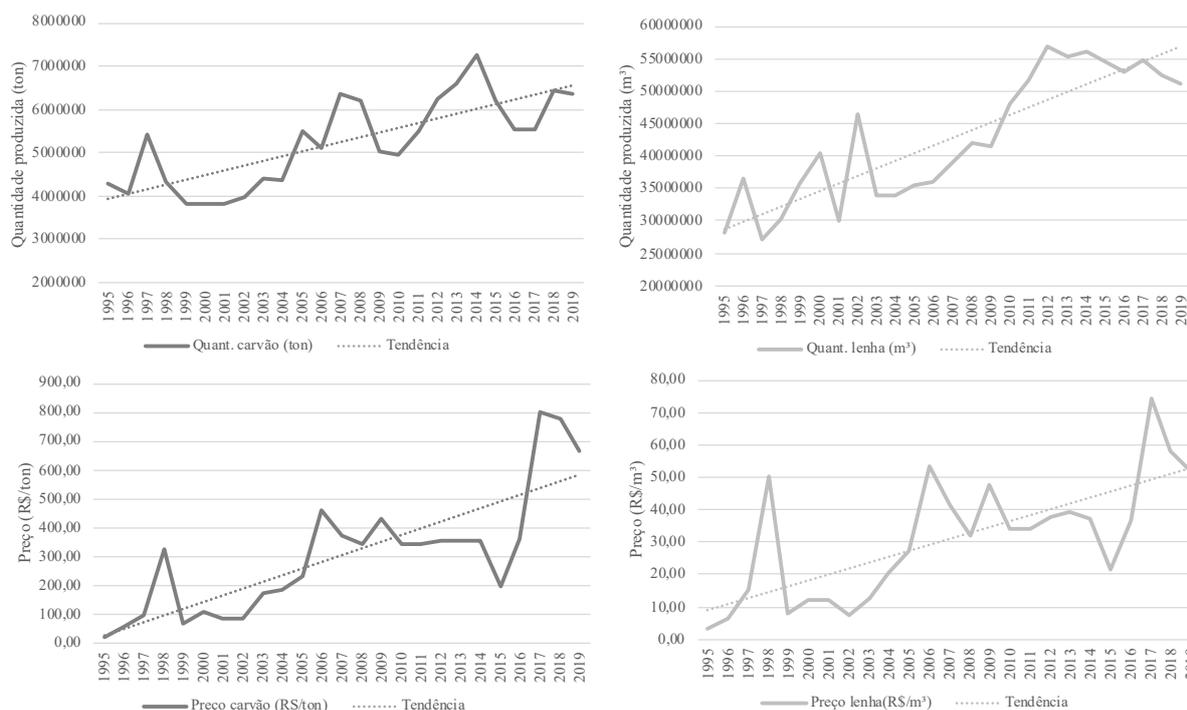
O comportamento das taxas de crescimento foi analisado à luz das teorias clássicas econômicas, relacionados aos fatores ligados às curvas de oferta e demanda. Onde há variação positiva no preço e na quantidade, há deslocamento da demanda para direita e, a variação negativas do preço e da quantidade, deslocam a curva de demanda para esquerda. Enquanto para a curva de oferta, a variação negativa no preço e positiva da quantidade, será relacionada ao deslocamento da curva de oferta para direita; e, variação positiva no preço e comportamento negativo na quantidade, desloca a curva de oferta para esquerda (PINDICK; RUBINFELD, 2018; PERLOFF, 2015; VARIAN, 2014; MANKIW, 2012), conforme esquematizado na Tabela 25.

**Tabela 25.** Deslocamento das curvas de demanda e oferta relacionado com os possíveis sinais (+ sendo positivo e – representando o negativo) das taxas de crescimento do preço e da quantidade dos produtos analisados.

<b>Varição taxa de crescimento do preço do produto</b>	<b>Varição da taxa de crescimento da quantidade do produto</b>	<b>Deslocamento dominante da curva</b>
+	+	Demanda para direita
-	-	Demanda para esquerda
-	+	Oferta para direita
+	-	Oferta para esquerda

### 3. Resultados e discussão

Os valores presentes ao banco de dados, referentes a quantidade produzida e preços de carvão vegetal e lenha, apresentam a evolução temporal conforme a Figura 26.



**Figura 26.** Evolução do preço e quantidade produzida de carvão vegetal e lenha, e suas respectivas tendências lineares, entre 1995 e 2019.

Segundo a EPE (2019), em 2018, o setor industrial (ferro-gusa e aço) foi o setor que mais consumiu carvão vegetal como insumo energético, representando 29% do consumo total. Seguido pelo setor industrial de alimentos e bebidas (23%), setor de papel e celulose e setor de cerâmica (ambos com 21%), setor residencial (5%) e setor de indústrias de cimento (1%). No mesmo período, a lenha foi consumida principalmente pelo setor residencial (65%), seguido pelo setor agropecuário (27%), setor industrial (7%) e setor industrial – têxtil (1%).

O Balanço de Energia (EPE, 2021), referente ao ano de 2020, traz que os principais setores consumidores de carvão vegetal no Brasil continuam sendo ferro-gusa e aço, ferroligas, residencial e comercial, cimento, agropecuário e indústria química.

Como mostram as equações (5) a (8), a quantidade produzida e os preços do carvão vegetal, apresentam tendências positivas de crescimento. E, portanto, para esse período de análise, apresentam tendências crescentes.

$$\ln Q_C = -26,85 + 0,021t \quad (5)$$

$$\ln P_C = -197,331 + 0,101t \quad (6)$$

$$\ln Q_L = -39,25 + 0,028t \quad (7)$$

$$\ln P_L = -161,91 + 0,0822t \quad (8)$$

Em que:  $Q_C$  e  $Q_L$  referem-se as quantidades produzidas de carvão vegetal e de lenha, respectivamente;  $P_C$  e  $P_L$  são os preços do carvão vegetal e da lenha;  $t$  o período analisado (1995 e 2019).

Os modelos foram significantes estatisticamente, assim como os seus respectivos coeficientes de regressão ( $\beta_1$  e  $\beta_2$ ), com  $p$ -value  $> 0,05$ . Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das equações estimadas por essa análise foram, respectivamente: 60,35%, 68,17%, 75,99% e 56,8%.

As taxas de crescimento, no período de 1995 a 2019, para as quantidades produzidas e preços do carvão vegetal e lenha no Brasil, estão dispostos na Tabela 26.

**Tabela 26.** Taxas de crescimento da quantidade e preço do carvão vegetal e lenha no Brasil, entre 1995 e 2019.

<b>Produto</b>	<b>Taxa de crescimento da quantidade</b>	<b>Taxa de crescimento do preço</b>
Carvão vegetal	4,97%	26,18%
Lenha	6,73%	20,85%

As taxas de crescimento, tanto para quantidade quanto para o preço do carvão vegetal e da lenha mostram que existe tendência crescente na produção e nos preços dos produtos. Mostrando que devido ao deslocamento da curva de demanda para direita, existe, predominantemente, um aumento de demanda e popularidade desses produtos do mercado brasileiro. O deslocamento da curva, pode estar relacionado ao aumento na procura por produtos renováveis para o suprir o setor energético. Corroborada pela procura mundial, e do Brasil, por novas fontes energéticas (principalmente fontes renováveis), assim como maior diversificação das matrizes energéticas e aumento da segurança energética dos países. E, dessa forma, reduzir a dependência energética por fontes fósseis ou até mesmo reduzir a supremacia de uma única fonte energética. Segundo relatório da *Internacional Energy Agency – IEA* (2021) sobre o mercado formado pela energia renovável, em 2020, os recursos renováveis para energia foram os únicos com aumento na demanda, enquanto o consumo de outros combustíveis reduziu.

Os resultados contribuem para a hipótese de que fatores relacionados a demanda possuem maior capacidade de influenciar no aumento da taxa de crescimento. E isso pode ser explicado por padrões de consumo dos bens como, renda, preço de bens relacionados, gostos e preferências (ALMEIDA *et al.*, 2009). A volatilidade da economia brasileira, frente a crises econômicas e sociais, pode atuar como fator capaz de influenciar o aumento na demanda por esses produtos. A lenha, por exemplo, tende a ser mais utilizada para cocção em residências, usualmente, com menores rendas ou como substituto ao gás GLP e suas flutuações de preço. Além disso, sabe-se que o uso da biomassa florestal sólida na matriz energética dos países possui forte correlação negativa com o grau de desenvolvimento do país (VIDAL; HORTA, 2011).

O aumento na demanda por esses produtos, pode estar relacionada também, ao crescimento de outros setores produtivos no Brasil. Como o crescimento da produção de grãos, por exemplo, que utiliza a lenha ou carvão vegetal para secagem de produto, contribuindo para a elevação dos preços. Além disso, a demanda pelo carvão vegetal segue o comportamento da indústria siderúrgica, que nos anos 2000 iniciou um intenso processo de otimização e aumento de produção (SIMIONI *et al.*, 2017). Esse cenário positivo, quanto às taxas crescentes, do carvão vegetal e da lenha, evidencia a capacidade produtiva do setor florestal. Podendo ser explicada, por exemplo, em função da melhoria na produtividade das florestas e da eficiência dos processos de conversão da madeira em carvão vegetal (CGEE, 2015).

Os autores Simioni *et al.* (2017), relatam que existe, no Brasil, uma produção insuficiente para atender à demanda por lenha e carvão vegetal, contribuindo para o aumento dos preços em diversas regiões do país e aumento da “pressão” por carvão vegetal e lenha de origem nativa. Situação evidente na região Centro-Oeste do Brasil, onde existe uma grande demanda proveniente de atividades agropecuária. Deixando claro, portanto, a necessidade do desenvolvimento de alternativas para uso eficiente desses recursos.

Os autores Lindahl *et al.* (2017) ao analisarem as principais políticas florestais no mundo, constataam que a demanda por fontes de energia alternativa (como a bioenergia proveniente da floresta e de seus recursos) apresenta uma crescente demanda, em países como Brasil e Alemanha. Nesse contexto de bioeconomia, a produção florestal passa a ser avaliada como uma solução alternativa para múltiplos desafios da sustentabilidade,

uma vez que o setor pode ser capaz de criar sinergias entre produção e objetivos ambientais urgentes. Essa possível dinâmica florestal no setor energético, potencializa o desenvolvimento eficiente e economicamente viável das atividades florestais.

Espera-se que, diante da retomada do crescimento econômico e das relações comerciais dos países somado com o crescimento populacional após o pico da crise da COVID-19, nos próximos anos exista uma recuperação da demanda interna e externa por produtos de *commodities* agrícolas, minerais e energéticas. No médio e longo prazo, é possível que ocorram ganhos de competitividade em alguns setores energéticos devido o aumento de investimentos em infraestrutura e na realização de reformas econômicas (MME; EPE, 2021). Cenário esse, que pode contribuir para continuidade no crescimento do setor florestal no campo energético.

#### 4. Conclusão

A análise realizada nesse capítulo, indica que, no período entre 1995 e 2019, as taxas de crescimento referentes a quantidade produzida e ao preço para o carvão vegetal e a lenha foram crescentes. Sendo, portanto, resultado predominantemente em decorrência do deslocamento da curva de demanda para a direita, indicando aumento da demanda por esses produtos.

Esse comportamento, pode ser explicado pela matriz energética que o país tem procurado adotar nos últimos anos, na busca por segurança energética e diversificação sustentável e renovável. Ademais, especificamente para a lenha, a conjuntura social e econômica no país, podem ser fatores que contribuam para aumento na procura por esse insumo energético como alternativa a bens com preços superiores.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOAGYE, B.; GYAMFI, S.; OFOSU, E. A.; DJORDJEVIC, S. Status of renewable energy resources for electricity supply on Ghana. **Scientific African**, 11, 2021.

ALMEIDA, A. N.; SANTOS, A. J.; SILVA, J. C. G. L.; BITTENCOURT, A. M. Análise do mercado dos principais produtos não-madeiráveis do Estado do Paraná. **Floresta**, v. 39, n. 4, 2009.

BEZERRA JÚNIOR, J. G.; TEIXEIRA, T. I.; CUNHA, B. F.; EPE. **Análise da participação de usinas termelétricas a biomassa de madeira em Leilões de energia**

**elétrica.** Grupo de Estudo de Geração Térmica – GGT. XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte, 2019.

CORTEZ, L. A. B.; SILVA LORA, E. E.; AYARZA, J. A. C. Biomassa no Brasil e no mundo. *In:* CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (org.). **Biomassa para energia.** 3 ed. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2019: ano base 2018.** Rio de Janeiro: EPE, 2019.

\_\_\_\_\_. **Balanco energético nacional 2021: ano base 2020.** Rio de Janeiro: EPE, 2021.

GALIK, C. S.; BENEDUM, M. E.; KAUFFMAN, M.; BECKER, D. R. Opportunities and barriers to forest biomass energy: a case study of four U.S. states. **Biomass and Bioenergy.** v. 148, 2021.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável.** Série sustentabilidade, v. 4, 94 p. São Paulo: Blucher, 2010.

GUIJARATI, D.; PORTER, D. C. **Econometria básica.** Porto Alegre: Bookman, ed. 5, 920 p., 2011.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual – 2020.** 2020.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Renewable Energy Market Update – Outlook for 2021 and 2022.** 2021.

KESKITALO, E. C.; BERGH, J.; FELTON, A.; BJORKMAN, C.; BERLIN, M.; AXELSSON, P.; RING, E.; AGREN, A.; ROBERGE, J.; KLAPWIJK, M. J.; BOBERG, J. Adaptation to Climate Change in the Swedish Forestry. **Forests,** 7, 28, 2016.

KIM, C. A review of the deployment programs, impact, and barriers of the renewable energy policies in Korea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 144, 2021.

LIMA, M. T. D. S. L.; SOUZA, M. C. D. Discorrendo sobre o uso das termelétricas no Brasil. **Ciência e Natura,** v. 37, 2015. ISSN 2179-460X 0100-8307.

MANKIW, N. G. **Principle of economics.** Southwestern: Cengage Learning, ed. 2, 890 p., 2012.

- LINDAHL, K. B.; SANDSTROM, C.; STÉNS, A. Alternative pathways to sustainability? Comparing forest governance models. **Forest Policy and Economics**, 77, 2017.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia – 2030**. 2021.
- MME. **Resenha energética brasileira - exercício de 2014**. 2015.
- NAZIR, M. S.; MAHDI, A. J.; BILAL, M.; SOHAIL, H. M.; ALI, N.; IQBAL, H. M. N. Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm - A review. **Science of the Total Environment**, 683, 436-444, 2019.
- PEREIRA, M. G. *et al.* The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3786-3802, 2012. ISSN 13640321.
- PERLOFF, J. M. **Microeconomics**. Boston: Pearson, ed. 7, 804 p., 2015.
- PORTO, M. F. D. S.; FINAMORE, R.; FERREIRA, H. Injustiças da sustentabilidade: Conflitos ambientais relacionados à produção de energia “limpa” no Brasil. **Revista Crítica de Ciências Sociais**, n. 100, p. 37-64, 2013. ISSN 0254-1106 2182-7435.
- SMIRNOVA, E.; KOT, S.; KOLPAK, E.; SHESTAK, V. Governmental support and renewable energy production: A cross-country review. **Energy**. v. 230, 2021,
- SILVA, S.; CÂNDIDO, G. A. Matriz energética limpa e renovável: um desafio para o Planejamento Energético Nacional e uma oportunidade para a Região Nordeste do Brasil. **Espacios**, v. 36, n. 15, 2015.
- SIMIONI, F. J.; MOREIRA, J. M. M.; FACHINELLO, A. L.; BUSCHINELLI, C. C. A.; MATSUURA, M. I. S. F. Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal as silviculturas no Brasil. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, 2017.
- LAZARETTI, D. S. A energia da floresta. **Revista Opiniões**. 38: 5 p. 2015.
- VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. **Perspectivas do setor de biomassa de energia e madeira para a geração de energia**. Papel e Celulose, BNDS Setorial 33, 2011.
- VARIAN, H. R. **Intermediate microeconomics – a modern approach**. New York, London: W. W. Norton & Company, ed. 9, 825 p., 2014.