



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



FELIPE FIRMINO DINIZ

**ECOEFIÊNCIA E ESTRUTURA DE MERCADO
INTERNACIONAL DOS PRODUTOS FLORESTAIS PARA
ENERGIA**

JOÃO PESSOA – PB
2022

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N° 93

FELIPE FIRMINO DINIZ

**ECOEFIÊNCIA E ESTRUTURA DE MERCADO INTERNACIONAL DOS
PRODUTOS FLORESTAIS PARA ENERGIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior
Orientador

**JOÃO PESSOA – PB
2022**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

D585e Diniz, Felipe Firmino.

Ecoeficiência e estrutura de mercado internacional
dos produtos florestais para energia / Felipe Firmino
Diniz. - João Pessoa, 2022.

150 f. : il.

Orientação: Luiz Moreira Coelho Junior.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Bioenergia. 2. Biomassa. 3. Economia regional. 4.
Economia florestal. I. Coelho Junior, Luiz Moreira. II.
Título.

UFPB/BC

CDU 502.174.3(043)

FELIPE FIRMINO DINIZ

**ECOEFICIÊNCIA E ESTRUTURA DE MERCADO INTERNACIONAL DOS
PRODUTOS FLORESTAIS PARA ENERGIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de Julho de 2022.

Prof. Dr. Flávio José Simioni

UDESC



Prof. Dra. Márcia Batista da Fonseca

UFPB

Dr. Tiago Santos Telles

IDR-PR



Dr. Luiz Moreira Coelho Junior
Orientador

**JOÃO PESSOA – PB
2022**

Deus Pai, Filho e Espírito Santo.

Aos meus pais Expedito Joaquim Diniz
(*in memoriam*) e Marilene Firmino Diniz

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Louvado seja Deus pai e Jesus Cristo por me proporcionar chegar até aqui, em todo o tempo me fortalecendo, sendo meu companheiro e dando a sabedoria que precisava para seguir em frente.

A minha mãe, Marilene Firmino Diniz, que com tantas dificuldades me ensinou a infinita sabedoria, as grandes lições da vida, muitas vezes difíceis de aprender, mas sem elas não teria progresso. Aos meus irmãos José Ronielyson Diniz e Magdiel Diniz por me proporcionar crescer com eles, e aprender a sempre viver feliz. À minha esposa, Edna Diniz, que com paciência, carinho e bondade, sempre manteve disposta a me auxiliar.

Eternamente grato ao professor Luiz Moreira Coelho Junior, pela pessoa e profissional que é, pela orientação, instrução, amizade e puxões de orelha que me aperfeiçoou nesta jornada acadêmica.

Agradeço o apoio de Edvaldo, Anna Manuella, Joice, Amadeu, Josicleide e meus colegas da vida acadêmica que tinham sempre palavras de ânimo.

Aos amigos Jamaci Júnior, Raquel, Emmanuel, Dayse Dantas, Djalma Neto, Felipe Aduino, por todo companheirismo, incentivo e pelo laço de amizade criado.

À Universidade Federal da Paraíba, pelo conhecimento adquirido. Ao Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) pela oportunidade. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

A todos os professores e profissionais do CEAR que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a minha formação acadêmica.

Aos amigos verdadeiros do passado, do presente e do futuro. Por fim, meus cordiais agradecimentos a todos que contribuíram e que acreditaram em mim de forma direta ou indiretamente para realização deste objetivo de vida.

*Tudo foi criado por Ele e para Ele.
Colossenses 1:16*

*Aqueles que se aplicam a conhecer a
vontade de Deus estão recebendo a
mais alta educação que é dado aos
mortais.*

Ellen G. White

RESUMO

Visando atender às necessidades da economia mundial e proteger o meio ambiente do consumo exacerbado dos combustíveis fósseis, o sétimo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável - 7 ODS vem em defesa de uma energia limpa e acessível. Em busca de avaliar estratégias e políticas públicas ao mercado sustentável, proporcionando circularidade nos processos produtivos, a economia circular tem se tornado comum como modelo econômico. A bioenergia vem para complementar a crescente demanda energética mundial e os recursos florestais para energia vem ganhando espaço na matriz energética global, seja na mitigação das emissões dos gases de efeito estufa, na segurança alimentar, no emprego e na renda. Contudo, esta dissertação analisou a ecoeficiência e estrutura do mercado internacional dos produtos florestais para energia (PFE) de 1961 a 2020. Mais especificamente, realizou uma revisão sistemática de literatura para a bioenergia sob a perspectiva da economia circular; avaliou a ecoeficiência dos PFE por meio de uma análise multicritério, analisou a concentração e a dinâmica do mercado internacional mundial e a competitividade das exportações deles. As metodologias utilizadas foram a bibliometria e análise de conteúdo; a análise multicritério (*Promethee*); indicadores de concentração de mercado; análise diferencial e estrutural, e; vantagens comparativas reveladas. Os principais resultados mostraram que estudos relacionados à bioenergia e economia circular são recentes, ademais ressaltaram que dentre os PFE mais ecoeficientes o carvão e os *pellets* foram os preferíveis. Nos indicadores de concentração de PFE, até final do século XX, as importações foram concentradas, as exportações moderadamente concentradas e a produção competitiva. A partir do século XXI, houve tendências de desconcentração e depois de 2010 as importações, as exportações e a produção de PFE tiveram um mercado competitivo. As análises, diferencial e estrutural, mostraram que diante das metas de descarbonização enérgicas, se elevou o consumo de PFE. Desse modo, por meio das vantagens comparativas reveladas, os países com vocação florestal se especializaram na produção de PFE. Conclui-se que os PFE representam uma opção energética adequada, segura e circular, proporcionando uma estrutura de mercado competitivo e sustentável.

Palavras-chave: Bioenergia. Biomassa. Economia Regional. Economia Florestal.

ABSTRACT

Aiming to meet the environmental needs of the world economy and protect the environment from the exacerbated consumption of fossils, the seventh Goal defends clean and affordable energy. In search of evaluation strategies and public policies for the sustainable market, providing circularity in production processes, the circular has become an economic model. Bioenergy comes to a growing world energy demand and energy resources for energy consumption comes in the global energy matrix in the mitigation of complementary forests of greenhouse gases, in food security, in the greenhouse and in the economy. More specifically, it carried out a review of eco-efficiency recommendations and the international energy framework for bioenergy (PFE) for a bioenergy from a circular economy perspective; evaluated the echo of PFEs through a multi-criteria analysis, adjusting to a global concentration and competitiveness of their exports. The methodologies used were bibliometrics and content analysis; a multi-criteria analysis (Promethee); market concentration indicators; differential and structural analysis, and; revealed comparative advantages. The main results that are efficient and the bioenergy economics studies are recent, the most important being the most environmentally friendly PFEs and the pellets are the most recent. In the late 20th century PFE mergers, as indicators were projected, as final concentrated and competitive mergers. From the 21st century onwards, deconcentration trends occurred and after 2010 of production, exports and FE production had a competitive market. As a consumption, differential and consumption model, which is in front of the PFE carbonization goals, if he is the consumer. In this way, through the comparative advantages revealed, countries with a forestry vocation have specialized in the production of PFE. It is concluded that PFE represents an adequate, safe and circular energy option, providing a functional and sustainable market structure.

Keywords: Bioenergy. Biomass. Regional Economy. Forest Economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama do sistema da economia circular, "diagrama da borboleta".	21
Figura 1.2. Cadeia de Produtos Florestais	23
Figura 1.3. Distribuição mundial da cobertura vegetal.	24
Figura 1.4. Classificação da bioenergia proveniente da biomassa florestal	25
Figura 2.1. Distribuição espacial dos países, por quartis, das publicações do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo, no período de 2003 a 2020.	38
Figura 2.2. Evolução das publicações e das citações (Artigos e Artigos de Revisão) do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo no período de 2003 a 2020.	38
Figura 2.3. Distribuição espacial dos países, que colaboram entre si nas publicações de mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo.	40
Figura 2.4. Evolução da rede de palavras-chave associada ao mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo, no período de 2016 a 2020.	41
Figura 3.1. Abordagem Proposta do Método <i>Promethee</i> .	59
Figura 3.2. Classificação parcial e total de preferência do desempenho ambiental dos <i>pellets</i> e briquetes.	64
Figura 3.3. Classificação parcial e total de preferência do desempenho ambiental do carvão vegetal, cavaco, lenha, e resíduos florestais.	65
Figura 3.4. Classificação total entre as alternativas dos Produtos Florestais para Energia.	67
Figura 3.5. Apresentação no plano cartesiano dos produtos florestais para energia	68
Figura 4.1. Evolução da produção (a), importação (b), exportação (c) e consumo aparente (d) dos produtos florestais para energia categorizados, em milhões de m ³ no mundo entre 1961 a 2020.	81
Figura 4.2. Evolução da Razão de concentração da produção (a), importação (b), exportação (c) e consumo aparente (d) dos produtos florestais para energia em milhões de m ³ no mundo entre 1961 a 2020.	86
Figura 4.3. Evolução dos índices HHI'(a), Entropia de Theil (ajustado) (b), e o CCI (c) e Gini (d) do mercado de produtos florestais para energia de 1961 a 2020.	88
Figura 5.1. Distribuição espacial da produção dos PFE no mundo, em milhões de m ³ , para 2000, 2010 e 2020.	101
Figura 5.2. Distribuição espacial do efeito estrutural (P), diferencial (D) e regional teórico (R) no mundo entre 2000-2020.	102
Figura 5.3. Distribuição espacial do efeito alocativo (A) no mundo, de 2000-2020.	105
Figura 5.4. Distribuição espacial do efeito especialização no mundo, de 2000-2020.	108
Figura 5.5. Distribuição espacial do efeito competitividade no mundo, de 2000-2020.	109
Figura 6.1. Evolução dos Top 5 países (base 2020) exportadores (a) e importadores (b) de produtos florestais para energia, de 1990 a 2020.	119
Figura 6.2. Evolução das exportações (a) e importações (b) de produtos florestais para energia, de 1990 a 2020.	120
Figura 6.3. Evolução da vantagem comparativa revelada dos Top5 países (base 2020) (a) exportadores e por categoria de PFE (b), de 1990 a 2020.	124
Figura 6.4. Evolução da taxa de cobertura dos Top 5 países(base 2020) (a) exportadores e por categoria de PFE (b), de 1990 a 2020.	126
Figura 6.5. Evolução do índice de competitividade dos Top 5 países (base 2020) (a) exportadores e por categoria de PFE (b), de 1990 a 2020.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Exportações das commodities florestais para energia, em metro cúbico(m ³), por regiões geográficas, de 2000 e 2020.....	27
Tabela 2.1. Classificação dos periódicos de maior impacto, organizado em ordem decrescente em quantidade de publicação, no período de 2003 a 2020.....	39
Tabela 2.2. Categorização dos principais produtos florestais para energia.....	43
Quadro 2.3. Premissas da economia circular e suas bases teóricas.....	47
Tabela 3.1. Função de preferência utilizado na análise dos critérios das alternativas.	60
Tabela 3.2. Parâmetros de preferência, indiferença e peso dos critérios.....	60
Tabela 3.3. Média dos parâmetros dos Produtos Florestais para Energia.	62
Tabela 4.1. <i>Ranking</i> dos 10 maiores países do PFE (base = 2020) para a produção, importação, exportação e consumo aparente (x10 ⁶ m ³) para 1961, 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2020.	83
Tabela 4.2. <i>Ranking</i> da produção de lenha, carvão vegetal, cavaco, <i>pellets</i> , resíduos de madeira e outros aglomerados dos 10 maiores países, em milhões de m ³ para 2020.....	84
Tabela 5.1. Classificação do efeito alocação.....	100
Tabela 5.2. Variação da produção de PFE, percentual e absoluta, por categorias no mundo, de 2000, 2010 e 2020.	101
Tabela 5.3. Setores com vantagem competitiva especializada, dos 10 países em destaque como maiores produtores de produtos florestais para energia de 2000-2020.	107
Tabela 6.1. Evolução da vantagem comparativa revelada dos Top 10 países exportadores e o Brasil para 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020.....	122
Tabela 6.2. Evolução da taxa de cobertura do top 10 de países e do Brasil para 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020.	125
Tabela 6.3. Evolução do índice de competitividade do top 10 de países e do Brasil para 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020.	127

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Definição e refinamento da amostragem da revisão sistemática de literatura do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular.	36
Quadro 2.2. Principais tecnologias apresentadas na literatura e suas vantagens e desvantagens.	44

LISTA DE SIGLAS

AEBIOM	<i>European Biomass Association</i>
EU	União Europeia
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
MCDA	Análise de Decisão Multicritérios
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEC	<i>Organization of Petroleum Exporting Countries</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PACB	Programa de Assistência à Cultura de Biomassa
PFE	Produtos Florestais Para Energia
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate</i>
WBA	World Bioenergy Association
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	16
1.1. INTRODUÇÃO	16
1.2. OBJETIVOS	18
1.2.1. Objetivo Geral.....	18
1.2.2. Objetivos Específicos.....	18
1.3. Referencial Teórico.....	19
1.3.1. Economia Circular	19
1.3.2. Caracterização da Bioenergia Florestal e Ecoeficiência	21
1.4. Descrição do Mercado de PFE.....	23
1.4.1. Panorama da Bioenergia Florestal	23
1.4.2. Mercado mundial de produto florestal para energia	27
1.4.3. Indicadores de Concentração	28
1.4.4. Panorama das Tecnologias e Características da Bioenergia	28
1.4.5. Propriedade Técnicas do Combustível Florestal.....	29
2. ARTIGO 1 - A BIOENERGIA SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA	31
2.1. INTRODUÇÃO	33
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	34
2.2.1. Objeto de Estudo	34
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
2.3.1. Bibliométrica do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular.	37
2.3.2. Diagnóstico sobre as categorias dos produtos florestais para energia	41
2.3.3. Avaliação das tecnologias bioenergéticas.....	44
2.3.4. A conjectura e base teórica da economia circular	46
2.4. CONCLUSÃO	48
2.5. REFERÊNCIAS.....	49
3. ARTIGO 2 – ECOEFICIÊNCIA DOS PRODUTOS FLORESTAIS PARA ENERGIA: UMA ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO	55
3.1. INTRODUÇÃO	57

3.2. MATERIAL E MÉTODOS	58
3.2.1. Objeto de estudo.....	58
3.2.2. Método <i>Promethee</i>	59
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
3.3.1. Análise dos produtos florestais para energia.....	62
3.3.2. Classificação das alternativas de processo tecnológico modernos	64
3.3.3. Classificação das alternativas entre as tecnologias tradicionais	65
3.3.4. Classificação total dos produtos florestais para energia	66
3.4. CONCLUSÃO	68
3.5. REFERÊNCIAS	69
4. ARTIGO 3 – CONCENTRAÇÃO DO MERCADO INTERNACIONAL DOS PRODUTOS FLORESTAIS PARA ENERGIA.....	73
4.1. INTRODUÇÃO	75
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	76
4.2.1. Dados utilizados	76
4.2.2. Medidas de concentração e de desigualdade.....	77
4.2.3. Razão de concentração	77
4.2.4. Índice de <i>Herfindahl–Hirschman</i>	78
4.2.5. Índice de entropia de Theil (E).....	79
4.2.6. Índice de concentração compreensível (CCI)	80
4.2.7. Coeficiente de Gini (G).....	80
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.3.1. O mercado internacional dos produtos florestais para energia	80
4.3.2. Análise da concentração do mercado do PFE.....	85
4.3.3. Concentração segundo indicadores <i>HHI, E', CCI e Gini</i>	87
4.4. CONCLUSÃO	90
4.5. REFERÊNCIAS	91
5. ARTIGO 4 – DINÂMICA ESPACIAL DOS PRODUTOS FLORESTAIS PARA ENERGIA NO MUNDO	95
5.1. INTRODUÇÃO	97
5.2. MATERIAL E MÉTODOS	98
5.2.1. Objeto de estudo.....	98
5.2.2. Modelo Estrutural-Diferencial (<i>Shift Share</i>).....	99
5.2.3. Modelo Estrutural-Diferencial Ampliado	99

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
5.3.1. Evolução da produção de PFE no mundo (2000-2020)	100
5.3.2. Método Estrutural-Diferencial Simples	101
5.3.3. Método Estrutural-Diferencial Ampliado	105
5.4. CONCLUSÃO	110
5.5. REFERÊNCIAS	110
6. ARTIGO 5 – COMPETIVIDADE DOS PRODUTOS FLORESTAIS PARA ENERGIA NO MERCADO INTERNACIONAL	113
6.1. INTRODUÇÃO	115
6.2. MATERIAL E MÉTODOS	117
6.2.1. Objeto de estudo.....	117
6.2.2. Market Share	117
6.2.3. Índice de vantagem comparativa revelada (VCR)	118
6.2.4. Taxa de Cobertura (TC)	118
6.2.5. Índice de Competitividade (IC).....	118
6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	119
6.3.1. Conjuntura da exportação no comércio de PFE no mundo.....	119
6.3.2. Vantagem comparativa dos <i>players</i> no setor bioenergético mundial.....	121
6.3.3. Taxa de Cobertura.....	124
6.3.4. Índice de Competitividade do mercado de PFE.....	127
6.4. CONCLUSÃO	128
6.5. REFERÊNCIAS	129
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	133
REFERÊNCIAS	135

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. INTRODUÇÃO

As florestas têm potencial energético e fornecem matéria-prima na produção renovável. A biomassa florestal está entre as principais fontes de energia no mundo e possui competitividade no mercado de biocombustíveis sólidos. A energia produzida por meio dela conceitua-se como bioenergia, que contribui tanto para a segurança alimentar e energética, quanto para a redução dos gases de efeito estufa (POGGI; FIRMINO; AMADO, 2018). Ela representa cerca de 9% do fornecimento total de energia primária do mundo, com potencial de representar 18% até 2050 (*International Renewable Energy Agency - IRENA, 2022*). A ecoeficiência, processo eficiente de promoção de sociedades mais resilientes e sustentáveis, busca alcançar uma gestão socioambiental, gerando valor, reduzindo o consumo de recursos e os impactos ambientais (REBOLLEDO-LEIVA *et al.*, 2022). Ela leva em consideração tecnologias, produtividade e rendimento energético na seleção de espécies florestais para produção dos produtos florestais energéticos (MORENO *et al.*, 2020).

Para reduzir os riscos de mudanças climáticas severas é necessário o fortalecimento da biomassa florestal como fonte de energia. Já para o alcance da economia circular e cumprimento de metas globais, é necessário reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE), efetuar mudanças no sistema de produção e uma ampliação na distribuição de energia, bem como uma na ampliação da matriz energética com fontes renováveis (SIARUDIN; INDRAJAYA, 2020).

Há evidências de que os amplos indicadores de concentração são os primeiros a alertar sobre competição, monopólio e desigualdade no setor energético, no entanto, a imprecisão dessas medidas significa que, isoladamente, dificilmente podem nos dizer quais são os fatores que influenciaram a competitividade (*Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD, 2018*). Tendo em vista a estreita relação entre atividade econômica e meio ambiente, bem como, produção e consumo dos produtos florestais para energia (PFE) no mundo, é importante analisar a ecoeficiência e competitividade, a modernização e os fatores que influenciam na dinâmica de mercado (FEIJÓ *et al.*, 2003).

Considerando setores poucos explorados e com grande potencial de desenvolvimento, uma avaliação sobre o mercado dos PFE, corroborando com a tomada de decisões estratégicas. Para auxiliar os tomadores de decisão, tanto do setor público como do setor privado, se faz necessária uma análise de mercado da concentração, desigualdade e ecoeficiência dos PFE no mundo ao longo do tempo, bem como uma análise da vantagem comparativa revelada entre os países (ABASIAN; RÖNNQVIST; OUHIMMOU, 2019).

Existem estudos que relacionam a bioenergia no contexto da economia circular e seu impacto no mercado florestal, como os de Manniello *et al.* (2020); Sirouset *et al.* (2020); Acevedo *et al.* (2020); Kairyte *et al.* (2020); Sherwood, (2020). Eles interligam a bioenergia no contexto da economia circular e seu impacto no mercado florestal, trabalhos como estes demonstram a relevância na literatura científica.

Dentre os estudos que abordam a concentração e desigualdade de mercado de produtos florestais, destacam-se os de: Soares *et al.* (2014), Heimann *et al.* (2015) e Oliveira *et al.* (2017) e Coelho Junior (2021). Assim, reconhecida a importância de pesquisas referentes a concentração, desigualdade de mercado como ferramenta para a tomada de decisão, este trabalho teve como objetivo analisar a concentração do mercado mundial, as tendências, a dinâmica, o desempenho e as vantagens comparativas reveladas da bioenergia florestal para uma economia circular.

A dissertação foi construída com a composição de um referencial teórico e cinco artigos científicos e o período de análise de 1961 a 2020. O referencial teórico apresentou os principais conceitos relativos à bioenergia e sua perspectiva de mercado global, processos tecnológicos de transformação bioenergética, apresentação e uma breve descrição do setor florestal.

A base teórica para o trabalho encontra-se relacionada ao modelo neoclássico de análise do comércio internacional Heckscher-Ohlin (1970), a partir da definição de índices de concentração e competitividade do mercado internacional de PFE. Além disso, o referencial metodológico utilizado passou da bibliometria e análise de conteúdo; a análise multicritério (Promethee); indicadores de concentração de mercado; análise diferencial e estrutural, e as vantagens comparativas reveladas

No primeiro artigo, realizou-se uma revisão sistemática da literatura, com ênfase nos estudos de bioenergia e economia circular, a partir de periódicos indexados na base da *Institute for Scientific Information (ISI)*, *Web of Science* e *Scopus*, no período de 1945 a 2020. O segundo analisou a ecoeficiência dos produtos florestais para energia (PFE), por meio de uma análise multicritério. Os principais resultados mostraram que estudos relacionados à bioenergia e economia circular são recentes; dentre os PFE mais ecoeficientes o carvão e os *pellets* foram os preferíveis.

O terceiro artigo analisou a concentração, desigualdade e consumo aparente dos produtos florestais para energia, de 1961 a 2020. Para mensurar a concentração foram utilizados a Razão de Concentração [CR(k)], Índice de *Herfindahl-Hirschman* (HHI), o Índice de Entropia de Theil, Índice de Concentração Compreensível (CCI) e o coeficiente de desigualdade de Gini (G). O quarto estudo analisou a dinâmica dos produtos florestais para energia no mundo. Para

mensurar a dinâmica utilizou o modelo *shift-share* com diferentes efeitos, a exemplo do efeito diferencial, efeito estrutural e efeito alocativo. O quinto apresentou a vantagem comparativa revelada dos produtos florestais para energia no mundo. Utilizamos os indicadores de competitividade do comércio: Market Share (MS), Vantagem Comparativa Revelada (VCR), Taxa de Cobertura (TC) e Índice de Competitividade (IC), a fim de determinar a competitividade das exportações dos produtos florestais para energia (PFE) no mundo.

A estrutura de mercado pode ser estudada em vários setores, como na agricultura, bancário, serviços, transportes e energético. Sendo um tema complexo, pode ser analisado sob diversos aspectos: socioeconômicos, ambientais e técnicos etc. Por se tratar de um estudo de relevância contemporânea, ele precisa receber maior atenção e ser devidamente explorado.

O mercado de PFE proporciona formatos organizacionais que privilegiam a interação entre os países e a ampliação do setor energético. Destacam-se por auxiliar nas reduções das emissões de gases poluentes e constituem uma fonte energética para produção de alimento. A atividade econômica destes produtos proporciona e facilita transações energéticas entre os países, formando uma identidade cultural e socioeconômica que beneficia o desenvolvimento econômico de produção limpa. O comércio de PFE pode oferecer oportunidades potenciais para uma economia circular global, através da reutilização de produtos florestais e resíduos, a partir do processamento desses materiais. Por esse motivo, é relevante que analise a estrutura do mercado internacional de produtos florestais para energia, bem como a existência de ecoeficiência de tais produtos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar a ecoeficiência e a estrutura de mercado internacional dos produtos florestais para energia para uma economia circular.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Realizar uma revisão sistemática por meio de uma análise bibliométrica aplicada a bioenergia sob a perspectiva da economia circular.
- b) Avaliar a ecoeficiência dos produtos florestais para energia por meio de uma análise multicritério (*Promethee*).
- c) Analisar a concentração de mercado dos produtos florestais para energia no mundo.
- d) Analisar a dinâmica e expansão do mercado mundial dos produtos florestais para energia.

- e) Analisar a competitividade internacional dos produtos florestais para energia.

1.3. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico está estruturado em tópicos relevantes à bioenergia e à economia circular no mundo e os principais conceitos relacionados a esta temática da pesquisa. Apresenta o conceito aplicado à economia circular, biomassa florestal, caracterização das florestas plantadas, energia florestal, distribuição global das florestas, classificação da bioenergia, caracterização dos produtos de origem florestal, tecnologias aplicadas à conversão de energia de base florestal. Além do conceito de vantagem comparativa e de mercado internacional, como meio de alcançar o desenvolvimento econômico de um país como o modelo teórico neoclássico de Heckscher-Ohlin-Samuelson.

1.3.1. Economia Circular

A escassez de recursos naturais, o aumento da taxa de poluição, do número de áreas degradadas e a quantidade de resíduos acumulados em aterros, rios e lagos são resultados do modelo econômico atual (modelo linear), promovendo danos ambientais de longo prazo causados pela negligência do desenvolvimento econômico sem consentimento da sustentabilidade (PRIETO-SANDOVAL *et al.*, 2018).

Economia circular (EC) remonta o desenvolvimento econômico projetada para auxiliar empresas, a sociedade e o meio ambiente. Surge em 1989 por meio de trabalhos publicados por David W. Pearce e R. Kerry Turner. Contrapondo a economia tradicional e linear, cujo lema era “extrair, produzir e descartar”, surge o conceito de economia circular, inspirado na lógica reutilização cíclica dos produtos (MCCARTHY *et al.*, 2018).

Em contraste com o modelo linear, a economia circular é regenerativa por *design* e visa o uso ecoeficiente do consumo de recursos finitos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2019). A missão da EC visa resolver os problemas da perspectiva de escassez de recursos e poluição ambiental, fazendo com que o consumo da matéria-prima seja de forma equilibrada entre o ecossistema e sistema socioeconômico (YONG, 2007). A análise inclui: reestruturação no consumo da matéria-prima a partir de uma abordagem circular, em seguida, transformar os resíduos em novos recursos e aumentar a eficiência de utilização de recursos e redução da intensidade das emissões.

A economia circular apresenta algumas modelos de aplicação como do berço ao berço, conceito proposto pelo químico Braungart e pelo arquiteto McDonough em "*Cradle to Cradle*:"

Rethinking the Way We Make Things". Esta proposta avalia e mede a circularidade dos produtos. Outro conceito de modelo da economia circular é "*The Economy Blue*" ao qual propõem que, o ambiente com características ecológicas seja a base para soluções sustentáveis (HAWKEN *et al.*, 2013; BOCKEN *et al.*, 2016). A economia circular visa ser restauradora e regenerativa por *design*, baseada na teoria de sistemas, que visa auxiliar na fase de projeto de produtos e serviços, com foco em maximizar sua utilidade (PAULI, 2010).

Para Sauv  *et al.* (2016) o conceito de EC está ligado a outros conceitos, tais como ecologia industrial e simbiose industrial. Ele tenta aproximar o atual ciclo tecnológico baseado em resíduos de um ciclo biológico, onde nada se perde e todo o "lixo"   reaproveitado de outra forma. Desse modo, o entendimento conceitual permite mostrar de forma eficaz a importância em todas as escalas, para grandes e pequenas empresas, para organiza es e indivíduos, globais e locais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2019). Os benefícios de mudar de uma economia linear para uma economia circular são destacados neste estudo na perspectiva de mercado energético.

Isso se d  com base em três princípios, de acordo com *Ellen MacArthur Foundation* (2019), elimina o de resíduos e polui o, manter produtos e materiais em uso sist mico, regenerar os sistemas naturais. O conceito emergente de economia circular tem recebido muita aten o,   medida que o mundo está se concentrando em um nível mais alto de sustentabilidade de solu es de engenharia relacionadas   gestão de resíduos. Zabaniotou (2018) afirmou que na bioeconomia circular baseada em resíduos, a bioenergia desempenha um papel importante na economia de países subdesenvolvidos.

A economia circular revela e projeta os impactos negativos da atividade econômica que causam danos   saúde humana e aos sistemas naturais para favorecer atividades que preservam os recursos naturais (SILVA *et al.*, 2019; AGUILAR *et al.*, 2019; RUDKE *et al.*, 2020). Isso significa projetar para durabilidade, reutiliza o, remanufatura e reciclagem para manter os produtos, componentes e materiais circulando na economia. Evita o uso de recursos não renováveis e preserva ou melhora os renováveis, a Figura 1.1, mostra a essência da economia circular.

A fim de possibilitar redu o de resíduos e emissões de gases poluentes, as tecnologias de conversão energéticas como pirólise, gaseifica o, combustão e torrefa o são vitais para o crescimento da economia circular, especialmente para apoiar os países em desenvolvimento e suas economias emergentes (VASKALIS *et al.*, 2019).

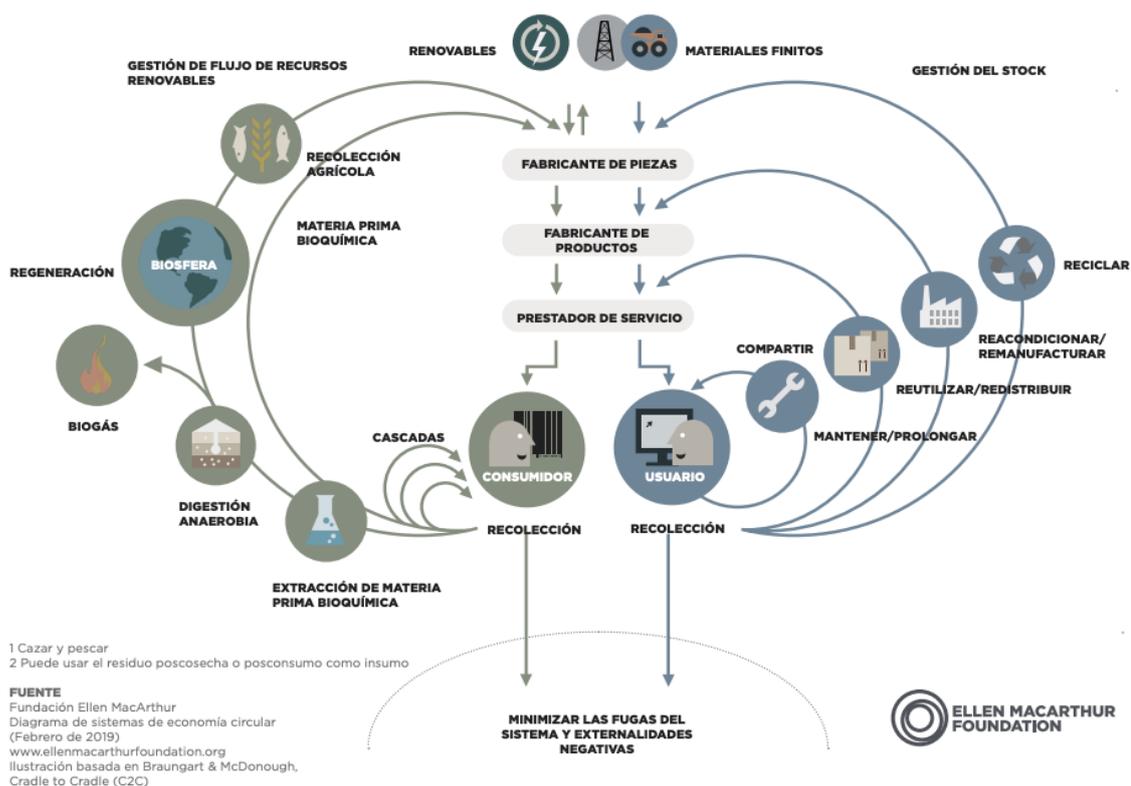


Figura 1.1. Diagrama do sistema da economia circular, "diagrama da borboleta".
Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2019).

1.3.2. Caracterização da Bioenergia Florestal e Ecoeficiência

A biomassa é um recurso renovável proveniente de matéria orgânica, que tem por objetivo a produção de energia (OLOFSSON; BORJESSON, 2018; WBA, 2020). Ela sempre teve papel importante na matriz energética mundial, sendo em sua maioria biomassa florestal. Segundo Magalhães (1982), ela tem finalidade energética foi introduzido na década de 80, que tinham como objetivo a produção do maior volume de biomassa por área em menor espaço de tempo. A biomassa florestal está entre as principais alternativas emergentes aos combustíveis fósseis e pode fornecer energia e vários subprodutos (KARTTUNEN *et al.*, 2016).

As florestas cobrem um terço da superfície da terra, estima-se que mais de um terço da população mundial depende da floresta, bens e serviços para o fornecimento direto de alimentos, lenha, materiais de construção, remédios, emprego e renda (*Food and Agriculture Organization - FAO*, 2017). O desmatamento é prejudicial para a consolidação da economia circular, definido como a conversão da floresta para outro uso da terra ou a redução permanente da cobertura das árvores, sendo como impacto ambiental negativo a degradação florestal, que é a redução da capacidade de uma floresta de fornecer bens e serviços (FAO, 2017).

Uma nação que preserva seu ambiente natural no desenvolvimento econômico fornece segurança alimentar, que é um estado onde todas as pessoas têm acesso físico, social e econômico suficiente, alimentos seguros e nutritivos para atender às suas necessidades dietéticas e preferências alimentares para uma vida ativa e saudável (FAO, 2017). Os quatro pilares da segurança alimentar são: disponibilidade, acesso, utilização e estabilidade. A disponibilidade somente é alcançada quando se há comida adequada para as necessidades das pessoas. A estabilidade, por sua vez, refere-se ao determinante temporal da segurança alimentar e nutricional e afeta a disponibilidade, acesso e utilização (MARKOU *et al.*, 2018).

A cadeia produtiva florestal com enfoque na geração de bioenergia é importante para o desenvolvimento socioeconômico de uma nação, visando produção de biocombustíveis florestais, as florestas plantadas têm potencial energético cuja matéria-prima é obtida do seu manejo e colheita (AGROICONE, 2015). A biomassa florestal compõe a matéria orgânica vegetal originária de florestas, constituída por madeira e por resíduos florestais (HU *et al.*, 2012; JIANG *et al.*, 2019). Já os biocombustíveis florestais são caracterizados como combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos. Produzidos a partir da biomassa florestal, tais como lenha, carvão vegetal, briquetes, licor negro, etanol celulósico, entre outros, considerados fontes estratégicas e renováveis de bioenergia (AGROICONE, 2015), como representado na Figura 1.2.

Potenciais espécies para produção de produtos florestais com fins energéticos são as dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, que com o passar dos anos e com o aprimoramento de novas tecnologias, começaram a ser utilizadas de maneira crescente (LAZZARI *et al.*, 2019; SCHWERZ *et al.*, 2020).

O crescimento econômico leva a um aumento na produção, o que leva a um maior impacto ambiental em todas as etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço. Os desafios ambientais (alterações climáticas, acidificação, eutrofização, etc.) devem ser abordados numa perspectiva de ecoeficiência para criar economias mais eficientes e promover sociedades mais resilientes e sustentáveis. O conceito de ecoeficiência foi introduzido e amplamente reconhecido pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) em 1992. Ele reúne os aspectos econômicos e ambientais necessários para promover a prosperidade econômica, usar os recursos de forma mais eficiente e reduzir as emissões (GÓMEZ-CALVET *et al.*, 2016; VERFAILLIE e BIDWELL, 2000). A ecoeficiência é um conceito-chave, incluindo aspectos ambientais e econômicos, para promover o uso mais eficiente dos recursos e reduzir as emissões. Portanto, uma perspectiva de ecoeficiência no *design* de produtos e serviços é essencial na busca da sustentabilidade no mercado de PFE.

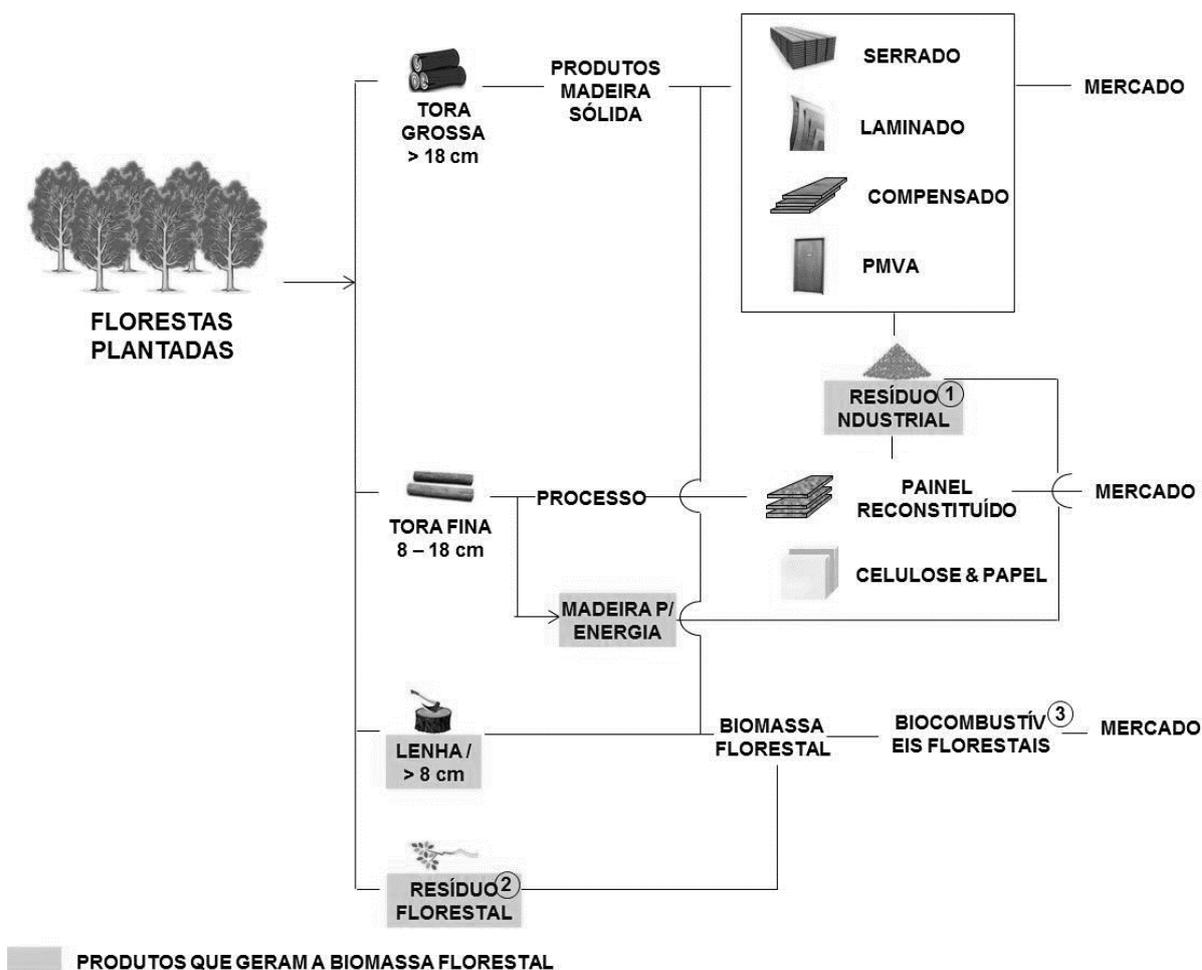


Figura 1.2. Cadeia de Produtos Florestais
Fonte: AGROICONE (2015).

1.4. Descrição do Mercado de PFE

1.4.1. Panorama da Bioenergia Florestal

A energia da biomassa florestal, que também pode ser chamada de combustível de madeira, é definida como todos os tipos de combustíveis provenientes direta ou indiretamente da biomassa florestal. Os principais tipos de energia florestal provenientes das regiões menos desenvolvidas são a lenha e o carvão vegetal (FAO, 2017). Os principais países com maior cobertura florestal no mundo são representados na Figura 1.3.

A Rússia apresenta a maior parcela de cobertura floresta no mundo entre os países, com 815 milhões de hectares (20%), em seguida o Brasil, com 497 milhões de hectares (12%), o Canadá ocupa a uma área de 347 hectares (9%), os Estados Unidos, com 310 hectares (8%), China com 220 hectares (3%), Austrália com 134 hectares (3%), Congo com 126 hectares (3%). Indonésia, Peru e Índia representam cerca de 2%. Os demais países somam cerca de 1,3 bilhões

de hectares (34%). Enquanto, as florestas cobrem cerca de 1/3 das terras em todo mundo (FAO, 2020).

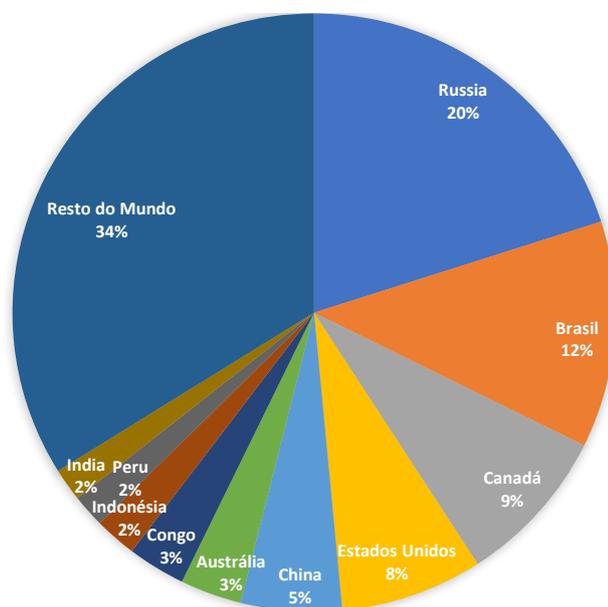


Figura 1.3. Distribuição mundial da cobertura vegetal em 2020.
Fonte: FAO (2020).

A energia florestal gerada a partir de produtos florestais, geralmente através de processos de combustão, é usada para cozinhar, aquecer ou gerar eletricidade. O termo "energia florestal" também é usado para se referir a materiais derivados de madeira utilizados para fins energéticos, que podem estar em forma sólida, líquida ou gasosa, representado na Figura 1.4.

O Brasil possui a segunda maior área florestal do mundo, respondendo por 58% da área terrestre do país. Aproximadamente 493,5 milhões de hectares de terra são cobertos por florestas naturais e plantações. Neste total, 48,85 milhões de hectares (98,5%) são compostos por florestas primárias e 7,7 milhões de hectares (1,5%) são compostos por Plantio (FAO, 2015). O país possui a maior biodiversidade do planeta, respondendo por mais de 20% do número total de espécies no mundo todo, incluindo as atividades extrativas, segundo dados do IBGE (2017).

Nos países em desenvolvimento, o combustível de madeira é cada vez mais usado para a geração de energia e para o aquecimento doméstico, usando tecnologias limpas e eficientes, impulsionado em parte pela preocupação com as mudanças climáticas e pelo desejo de diminuir as emissões de gases de efeito estufa causados por combustíveis fósseis (BASSO, 2017). Por exemplo, a energia de madeira é responsável por mais de 10% do consumo de energia em 13

países europeus (FAO, 2017). Sendo assim, a madeira para uso de energia pode vir de várias fontes, como florestas naturais, plantações florestais, árvores fora das florestas, resíduos de madeira de indústrias de colheita florestal e processamento de madeira, e outros resíduos de madeira (MORENO *et al.*, 2020).

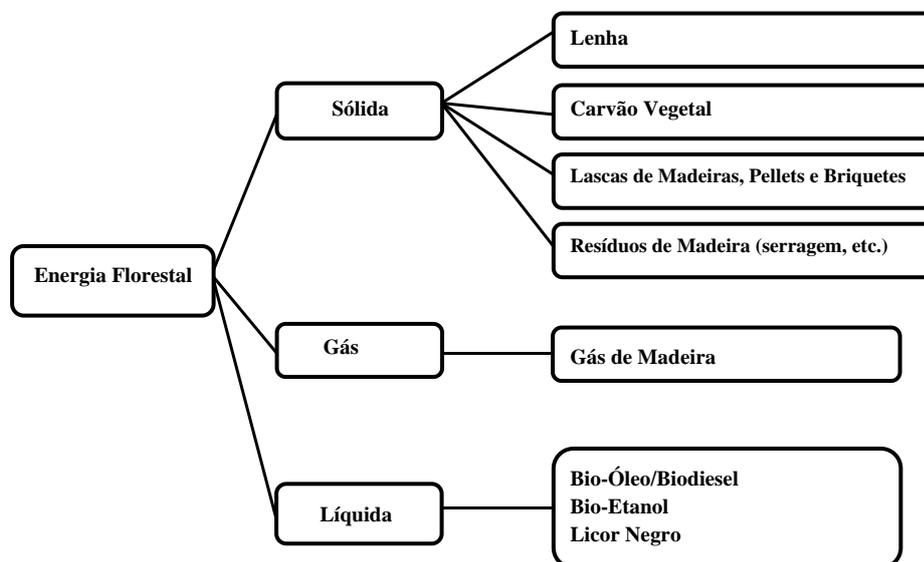


Figura 1.4. Classificação da bioenergia proveniente da biomassa florestal
Fonte: FAO (2017).

A energia florestal é frequentemente o combustível mais acessível e localmente disponível para cozinhar e aquecer, especialmente entre grupos de baixa renda nos países em desenvolvimento (KONG; RONNQVIST; FRISK, 2012; TAKAHASHI; SASAKI, 2019). A madeira pode ser usada diretamente como combustível em sua forma original ou após o processamento, ou transformação em carvão vegetal, pelotas, briquetes ou chips, ou em vários produtos em formas líquidas, ou gasosas (DWIVEDI *et al.*, 2016).

Nesse contexto, os países têm respondido aos desafios energéticos e ambientais, impulsionando a produção de energia renovável e bioenergia. Os ecossistemas florestais fornecem uma grande variedade de bens e serviços ecossistêmicos, entre os quais o fornecimento de biomassa de madeira (AIE, 2017). A bioenergia apresenta algumas dificuldades, como a utilização de grande quantidade de água e a competição à demanda de alimentos, que pode ser prejudicada pela produção agrícola destinada à obtenção de energia (ZABANIOTOU, 2018). Para que o desempenho ambiental seja cada vez mais eficiente, devem-se levar no processo mercantil, quais são as principais espécies utilizadas no mercado para produção de energia e como se comporta no meio ambiente.

As coníferas são caracterizadas como: toda madeira derivada de árvores classificadas botanicamente como gimnosperma, já as não-coníferas, são toda madeira derivada de árvores classificadas como angiosperma. Existe também a classificação de madeira tropical, que é toda madeira não conífera para usos industriais, que cresce ou é produzida nos países situados entre o Trópico do Câncer e o Trópico de Capricórnio.

Existem mais de 550 espécies de coníferas, sendo as mais conhecidas o cipreste, o cedro, o abeto, o zimbros, o larício, o pinheiro, a sequoia e o teixo. São formados em várias regiões frias do mundo, como norte da Europa, Ásia e América do Norte. Algumas espécies crescem nas florestas tropicais da Ásia, enquanto outras nas regiões mais quentes da Austrália e da África. Várias árvores coníferas também crescem na América do Sul. Entre as existentes no Brasil, a araucária é a mais famosa. Dotadas de troncos e caules lenhosos, as coníferas podem ser arbustos baixos ou árvores muito altas. Em geral, suas folhas parecem agulhas, mas alguns tipos têm folhas em forma de escamas, lâminas ou cunhas (GERNANDT; PÉREZ-DE LA ROSA, 2014)

Entende-se sobre remoção de madeira, todo volume de todas as árvores, vivas ou mortas, que são derrubadas e removidas da floresta, terras arborizadas ou locais de derrubada. Excluindo assim, casca, outras biomassas não amadeiradas e qualquer madeira que não seja removida, por exemplo, tocos, galhos e topos de árvores, resíduos de derrubada e resíduos de colheita (FAO, 2017). Os resíduos de madeira proveniente das florestas ou da indústria são uma fonte potencialmente importante de energia renovável. Eles são gerados como um subproduto da colheita de madeira em todo o mundo. Para otimizar o aproveitamento dessa biomassa é necessário conhecer suas propriedades físicas e químicas (NUREK; GENDEK; ROMAN, 2019).

A lenha é toda madeira que será usado como combustível para fins como cozimento, aquecimento ou produção de energia. Inclui madeira colhida de caules principais, galhos e outras partes de árvores (FAO, 2017). As lascas de madeira, que pela literatura entende-se, toda madeira que foi reduzida a pequenos pedaços, sendo adequada para polpa, para a produção de fibras, para uso como combustível, ou para outros fins (ABASIAN *et al.*, 2019; AHMADI *et al.*, 2020; ALTMAN *et al.*, 2013; GEORGE BARJOVEANU *et al.*, 2020; BRYNGEMARK, 2020).

O carvão vegetal é caracterizado como madeira carbonizada por combustão parcial ou aplicação de calor de fontes externas. Incluindo o usado como combustível ou em outros usos, por exemplo, como agente de redução na metalurgia ou como meio de absorção ou filtração (NUNES & MATIAS, 2020). Os resíduos de madeiras são as que foram reduzidas a pequenos

pedaços e são adequadas para produção de fibras, para uso como combustível. Pelotas de madeira são designadas como as aglomerações produzidas diretamente por compressão ou pela adição de um fichário em proporção não superior a 3% por peso. Outros aglomerados: aglomerados além de pelotas de madeira, por exemplo, briquetes ou troncos (BYWATER *et al.*, 1994; CHUDY *et al.*, 2019; FAO, 2014).

Segundo a agência *International Renewable Energy Agency*– IRENA (2022), o setor residencial, utiliza a biomassa florestal como principal combustível utilizado para cozinhar e aquecer, principalmente na forma de carvão vegetal em áreas urbanas, e lenha zonas rurais como nas urbanas.

1.4.2. Mercado mundial de produto florestal para energia

A Tabela 1.1 apresenta o crescimento bruto adicional das atividades florestais para energia nas regiões geográficas do mundo. Segundo a FAO (2020), no mercado mundial, o setor florestal contribuiu com aproximadamente US\$10 bilhões, ou seja, 0,01% do produto interno bruto mundial, em 2020. A participação do setor florestal para energia tem crescido continuamente nos últimos anos, principalmente no segmento de *pellets* e outros aglomerados, onde o aumento da tecnologia tem contribuído com este setor.

Em 2018, o consumo brasileiro de madeira proveniente de florestas plantadas para uso industrial foi de 220,9 milhões de metro cúbico m³, o que representa um aumento de 7,2% em relação ao consumo de 2017 (IBÁ, 2019). Entre 2000 e 2020, o subsetor de processamento de madeira teve um crescimento significativo, com um pequeno aumento na produção de lenha, e o subsetor de celulose e papel manteve-se estável.

Tabela 1.1. Exportações das commodities florestais para energia, em metro cúbico (m³), por regiões geográficas, de 2000 e 2020.

Região	Carvão Vegetal		Lascas de Madeira		Lenha		Resíduos de Madeira		Pellets de Madeira		Outros Aglomerados	
	2000	2020	2000	2020	2000	2020	2000	2020	2000	2020	2000	2020
África	34,91	120,66	151,20	133,09	0,06	31,17	0,07	2,16	-	2,09	-	7,97
Américas	22,77	186,42	649,28	713,42	8,91	11,60	91,57	28,47	-	1444,98	-	51,03
Asia	113,42	649,52	212,74	1774,36	2,37	4,17	7,74	8,15	-	465,04	-	68,32
Europa	54,66	379,01	169,76	729,96	69,37	411,27	137,19	261,17	-	2430,30	-	229,19
Oceania	0,42	0,27	467,32	739,83	0,02	4,71	0,85	2,69	-	15,17	-	0,64
Mundo	226,17	1335,88	1650,30	4090,65	80,73	462,91	237,42	302,64	-	4357,58	-	357,15

Fonte: FAO (2020).

1.4.3. Indicadores de Concentração

A partir dos pressupostos dos modelos ricardianos, podemos observar que eles não são a melhor representação da realidade, portanto, suas conclusões devem ser devidamente qualificadas e posicionadas. Ricardo deixou um importante legado na teoria econômica. Seu conceito de vantagem comparativa abriu novos terrenos para debates sobre padrões de comércio internacional e deu origem a novas formulações teóricas voltadas para analisar o comércio internacional. O mesmo aconteceu com o modelo teórico neoclássico Heckscher-Ohlin, que iniciou seu trabalho sobre comércio internacional em 1919. Incorpora novas variáveis ao estudo dos determinantes do comércio e tenta avaliar o impacto na distribuição de renda quando um país se estende ao comércio (GONÇALVES, 2005).

O desenvolvimento da teoria econômica relacionada à estrutura corporativa levou ao surgimento de um novo conceito que justifica a estrutura de mercado. Estudos de concentração e competitividade como os de Hirschman (1945), Herfindahl (1950) e Rosenbluth (1955) podem ocorrer nos setores. A concentração industrial é um dos componentes mais importantes da competição entre países. Existe uma relação inversa entre concentração e competição. À medida que a concentração aumenta, a concorrência entre as empresas diminui, aumentando assim o poder de mercado virtual da indústria (POSSAS, 1999).

O poder de mercado é definido como a participação da produção ou vendas globais de uma empresa em determinado setor. Embora o poder de mercado possa não ser mostrado, outras medidas de tamanho podem ser utilizadas, como patrimônio líquido, capacidade produtiva instalada ou número de funcionários (KON, 1999).

Para Resende e Boff (2002), há pelo menos três razões pelas quais uma alta participação de mercado não implica necessariamente em alto poder de mercado. Primeiro, deve haver barreiras à entrada de outras empresas, dificultando a entrada de novos concorrentes. Em segundo lugar, reduzir custos ou diferenciar um produto pode não significar ter a capacidade de controlar o preço de venda do produto. Por fim, ao calcular a concentração, ignora-se a existência de substitutos próximos vendidos em outros mercados.

1.4.4. Panorama das Tecnologias e Características da Bioenergia

Para que a energia possa ser destinada ao uso final, muitas vezes tem que ser convertida de sua forma primária para uma forma que seja mais conveniente para transporte e uso (BIANCO; PORISIENSI, 2016; CHAVES CASTRO, 2017). As tecnologias de conversão de energia da madeira variam de processos simples e tradicionais, até modernos e altamente eficientes (FAO, 2014).

A evolução da utilização dos produtos florestais para energia só se torna viáveis, em larga escala, se evoluírem de uma situação tecnológica primitiva e rudimentar, para a incorporação de tecnologias florestais mais avançadas, de forma a assegurar maior eficiência e tornarem-se ecológica e economicamente compatíveis (BRITO, 2007). Abaixo estão listados os principais exemplos de tecnologia para conversão energética.

- **Pirólise**

Processo que aquece a biomassa em ambiente fechado, na ausência ou presença de quantidades controladas de oxigênio, a temperaturas acima de 300°C, gerando como subproduto, o carvão vegetal (MORENO *et al.*, 2020). Pirólise é a gaseificação da biomassa na ausência de oxigênio.

- **Gaseificação**

A gaseificação é um processo que converte materiais carbonáceos orgânicos ou fósseis a altas temperaturas (> 700°C), sem combustão, com uma quantidade controlada de oxigênio e/ou vapor em monóxido de carbono, hidrogênio e dióxido de carbono. Existem três grandes tipos: fluxo arrastado, leito fluidizado e leito móvel.

- **Torrefação**

Em teoria, a torrefação durante adensificação pode resolver os problemas encontrados com a biodegradação e durabilidade das biopartículas. A adição de um processo de compactação após o processo de torrefação fornece uma solução para alguns dos problemas da biomassa de torrefação, como baixa densidade de energia e formação de poeira (BORGES, 2015). Existem vantagens na torrefação de biomassa, pois é um termoquímico que em processo de conversão tem a capacidade de padronizar as propriedades da biomassa, tornando-as mais consistentes do que o carvão (NUNES; MATIAS, 2020).

- **Combustão direta**

A combustão é um processo químico em que as substâncias reagem rapidamente com o oxigênio e liberam calor. A substância original é chamada de combustível e a fonte de oxigênio é chamada de oxidante. O combustível pode ser sólido, líquido ou gasoso, mas para propulsão de aeronaves o combustível geralmente é líquido.

1.4.5. Propriedade Técnicas do Combustível Florestal

- **Poder Calorífico**

A principal preocupação relevante para o aproveitamento da bioenergia florestal está relacionada ao baixo poder calorífico da biomassa. Portanto, o valor calorífico é o parâmetro

chave para avaliar a qualidade do combustível de um material de biomassa especial em aplicações energéticas (DERRADJI; ERREBAI; AMARA, 2017).

Entende-se que o poder calorífico seja a energia interna contida no combustível, sendo que quanto mais alto for, maior será a energia contida, sendo um critério de maximização (CARVALHO *et al.*, 2020).

- **Massa volumétrica (Densidade)**

A densidade dos produtos florestais constitui-se em uma das mais importantes características para identificar a qualidade. Esta propriedade física é obtida a partir da relação entre massa absolutamente seca e o volume, sendo expressa em g/cm^3 ou kg/m^3 (SANTOS, 2010). Quanto maior a densidade menor é o teor de cinzas, conseqüentemente, melhor o desempenho ambiental energético (SIROUS *et al.*, 2020).

- **Teor de Umidade (%)**

A influência da umidade é diretamente na qualidade da combustão e no poder calorífico da biomassa. Pode ser definida como a medida de quantidade de água livre na biomassa. A presença de água na biomassa representa a redução do poder calorífico (VIEIRA, 2012).

- **Teor de Cinzas**

A composição das cinzas e as propriedades derivadas dos produtos são os aspectos-chave na estratégia de utilização pós-processamento da biomassa. Pode incluir reutilização/reciclagem de acordo com as normas e princípios da economia circular, bem como o descarte seguro. Por esta razão, é importante sempre manter o limite rigoroso para o teor de cinzas. O teor de cinzas na biomassa florestal é um problema complexo. A quantidade de cinzas depende do conteúdo da matéria orgânica e inorgânica e possíveis impurezas. O teor de cinzas em biomassa depende do ponto de amostragem, tempo de colheita e condições de colheita (ZAJA, 2018; SIROUS *et al.*, 2020).

2. ARTIGO 1 - A BIOENERGIA SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

RESUMO

Neste estudo foi realizada uma revisão sistemática da literatura, por meio da técnica de bibliometria aplicada à economia circular no mercado bioenergético. Os dados foram obtidos na plataforma *Scopus* e *Web of Science* e compreende o período de 1945 a 2020. As palavras-chave foram: "market", "concentrat*", "competitive", "forest* and product*", "bioenerg*", "biomass", "circular product*", "circular econom*", "industrial ecolog*". O Rstudio foi utilizado como ferramenta para tratamento dos dados primários. A distribuição espacial dos países foi realizada por quartis por meio de software Qgis versão 3.10.0. A partir dos resultados da análise dos 60 artigos revisados, verifica-se que os primeiros estudos de alto impacto (≥ 1) iniciaram em 2003. O período de 2018 a 2020 apresentou maiores quantidades de publicações relacionado a bioenergia e economia circular. Os Estados Unidos teve maior contribuição, representando 16% das publicações. Já a Itália foi o país que teve maior destaque na Europa, com um total de 6 artigos publicados. Os periódicos de maior relevância na amostra foram o *Energies*, *Energy e Sustainability*, somando 15 publicações, em seguida a *Journal of cleaner production*, *Forests*, *Scandinavian journal of forest research* com 4, 3 e 3 publicações, respectivamente. *Design regenerativo*, economia de performance e ecologia industrial, foram as principais bases teóricas da economia circular abordadas pelos autores. As principais palavras-chave foram: resíduos florestais, emissões de carbono, bioeconomia e mudanças climáticas, além da bioenergia e economia circular. Os principais produtos florestais para energia abordados nos artigos foram: lasca de madeira, lenha (madeira em tora), carvão vegetal, resíduos florestais e aglomerados. As principais tecnologias atraentes na produção de bioenergia estiveram relacionadas à pirólise, gaseificação e combustão, sendo a torrefação ainda incipiente em estudos. Através do panorama, a produção de bioenergia à base de madeira e seus derivados é um tema oportuno de amplo interesse.

Palavras chave: Biomassa Florestal, Bibliometria, Mercado Florestal.

ARTICLE 1 - BIOENERGY FROM THE PERSPECTIVES OF THE CIRCULAR ECONOMY: A SYSTEMATIC REVIEW

ABSTRACT

This study was carried out a systematic review of the literature, using the bibliometrics technique applied to the circular economy in the bioethical market. The data were obtained from the Scopus and Web of Science platform and covers the period from 1945 to 2020. The keywords were: "market", "concentrat*", "competitive", "forest and product*", "bioenerg* ", "biomass", "circular product*", "circular economy*", "industrial ecology*". Rstudio was used as a primary data processing tool. The spatial distribution of countries was performed by quartiles using Qgis software version 3.10.0. From the high-impact studies initiated (≥ 60 articles in the historical series), the period from 2018 to 2023. The United States had the greatest contribution, representing 16% of publications. Italy was the most prominent country in Europe, with a total of 6 articles published. The largest journals in the sample were Energies, Energy and Sustainability, totaling 15 publications, followed by Journal of Cleaner Production, Forests, Scandinavian Journal of Forest Research with 4, 3 and 3, respectively. Regenerative design, performance economics, industrial ecology, were the main theoretical bases of the circular economy addressed by the authors. The main keywords were: forest residues, carbon modification, bioeconomy and maintenance, in addition to bioenergy and circular economy. The main forest products for energy analyzed in the articles were: wood chips, firewood (log wood), charcoal, forest residues and agglomerates. The main attractive technologies are the production of studies, the gas still seeks the epir determination, being the recipient of the roasting in a roasting. Across the big picture, wood-based bioenergy production and its results is a broad topic of interest.

Keywords: Forest Biomass, Bibliometrics, Forest Market.

2.1. INTRODUÇÃO

A bioenergia é uma fonte de energia limpa, a fim de reduzir os efeitos das mudanças climáticas e contribuir com a economia circular. Por meio de políticas internacionais e pelo aumento do custo dos combustíveis fósseis, a bioenergia se tornou uma estratégia fundamental na mitigação das emissões de gases poluentes (RIDING *et al.*, 2015). Estima-se que, até 2050, a bioenergia fornecerá 30% da demanda energética mundial (GUO *et al.*, 2015).

A *Food and Agriculture Organization* – FAO registrou um fornecimento de 9 bilhões de toneladas de culturas florestais em 2017 e mais de 5 bilhões de metros cúbicos de produtos florestais (madeira e placas, excluindo papel e celulose) (FAO, 2019). O setor da bioenergia destaca-se para enfrentar os desafios na agricultura, geração de energia e no descarte de resíduos florestais, além de favorecer a implantação de tecnologias limpas e soluções de reaproveitamento da biomassa florestal (RIDING *et al.*, 2015). A biomassa florestal que atualmente não é utilizada, por exemplo, os resíduos da colheita, torna-se matéria-prima orgânica alternativa ao petróleo bruto e ao gás natural na produção de energia, com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas (SHERWOOD, 2020). Ela desempenha um papel importante como sumidouros de carbono, além disso, as florestas plantadas reduzem a exploração de florestas nativas em alguns países (BUONOCORE *et al.*, 2019). Alavi-Borazjani *et al.* (2020), Raphael Asada *et al.* (2020), Ferreira-Santos *et al.* (2020) & Vlachokostas *et al.* (2020) evidenciam que este potencial do mercado florestal, contém melhorias ambientais sobre a redução de gases do efeito estufa e a difusão de tecnologias verdes.

As revisões sistemáticas são práticas de pesquisas que têm como base uma coleta de dados, a fim de reunir estudos semelhantes, analisando-os de forma crítica por diferentes metodologias (BASTIAN *et al.*, 2010). Elas são uma ferramenta para identificar, avaliar e interpretar estudos disponíveis e relevantes sobre uma determinada questão de pesquisa de alto impacto no meio científico (KITCHENHAM, 2007). Na literatura existem trabalhos como de Manniello *et al.* (2020), Sirous *et al.* (2020), da Cruz Tarelho & Dias Martins (2020), Acevedo *et al.* (2020), Kairyte *et al.* (2020), Riding *et al.* (2015) Sherwood, (2020) & Vlachokostas *et al.* (2020) que afirmam que o setor de bioenergia tem potencial na formação de uma economia circular.

A técnica bibliométrica analisa de modo estatístico a produção científica (publicações) e seu estabelecimento como ferramenta matemática para dimensionamento da produção científica, a fim de quantificar a comunicação da escrita científica (DOMINGUES *et al.*, 2018; REIS, 2015). Ela fornece um processo altamente estruturado de evidências existentes nos

principais bancos de dados (TRANFIELD *et al.*, 2003). Usar a revisão sistemática para investigação de publicações contribui para o desenvolvimento de uma base de conhecimento útil, para gerar intelecto sobre as áreas de estudo e para apontar novas oportunidades de pesquisa, ao mesmo tempo em que contribui para melhorar a sustentabilidade.

Pesquisas recentes têm realizado análises bibliométrica em bioenergia sob a perspectiva da economia circular. Por exemplo, Mao *et al.* (2018) realizaram uma análise bibliométrica na *Web of Science* palavras-chave “*Biomass energy*” and “*Environment**” dos anos de 1998 a 2017; Ferrari *et al.* (2020) forneceram uma análise bibliométrica das tendências de publicação sobre os temas de biomassa e bioenergia em todo o mundo nos últimos 20 anos (de 2000 a 2019) e Ampese *et al.* (2021) avaliaram as aplicações atuais da biomassa florestal e seus subprodutos para energia no mundo.

Com o objetivo de identificar as premissas, metodologias e o desenvolvimento de pesquisas, bem como lacunas existentes associadas à bioenergia florestal, realizou-se uma revisão sistemática, através da técnica de bibliometria aplicadas a economia circular no mercado bioenergético, com base nos dados da plataforma *Web of Science* e *Scopus*, entre os anos de 1945 a 2020.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Objeto de Estudo

Etapa 1: Definição de palavras-chave.

Utilizou o banco de dados da *Scopus* e *Web of Science* (WoS), de 1945 a 2020. Foram realizadas duas pesquisas contemplando o tema de energia florestal (termos relacionados) e economia circular (termos relacionados).

A primeira pesquisa teve como termo de pesquisa relacionado ao mercado florestal, biomassa (e seus sinônimos), a busca foi conduzida pelo “título” e "título". Na segunda, tinha como termos de sequência de pesquisa relacionados com economia circular (e seus sinônimos). A busca foi conduzida pelo “título” e "tópico" nos bancos de dados da WoS e Scopus.

As etapas da bibliometria adotadas foram adaptadas de Tranfield *et al.* (2003) e apresentam informações obtidas a partir do software's RStudio, Vosview e dados no Excel. Tais ferramentas permitiram ponderar o fator de impacto (FI), com objetivo de aferir a produção científica dos autores, a qualidade das publicações, o fator de impacto da respectiva revista para identificar a relevância do artigo (GARFIELD, 1999; ARIA & CUCCURULLO, 2017; DOMINGUES *et al.*, 2018).

Etapa 2 e 3: Pesquisa no banco de dados e Critério de documento

O conjunto das palavras-chave utilizou símbolos de truncção e operadores booleanos, tanto na primeira pesquisa como na segunda pesquisa, como segue: palavras-chave da primeira pesquisa: ("*market*" OR "*conceatrat**" OR "*competitive*") AND ("*forest* and product**" OR "*bioenerg**" OR "*biomass*"). As palavras-chave da segunda pesquisa foram ("*forest* and product**" OR "*bioenerg**" OR "*biomass*") AND ("*circular product**" OR "*circular econom**" OR "*industrial ecolog**").

Após a busca nas bases de dados, obteve-se um total de 758 artigos, critérios de exclusão e inclusão foram determinados e utilizados na pesquisa. Os critérios de inclusão ou exclusão estavam relacionados ao conteúdo do documento e ao fator de impacto da revista. Da mesma forma, os documentos que são artigos e artigos de revisão foram incluídos, os demais documentos foram excluídos. Dos 758 artigos, 608 permaneceram, como mostra no Quadro 2.1.

Etapa 4: Exclusão de Documentos duplos e Fator de Impacto (<1).

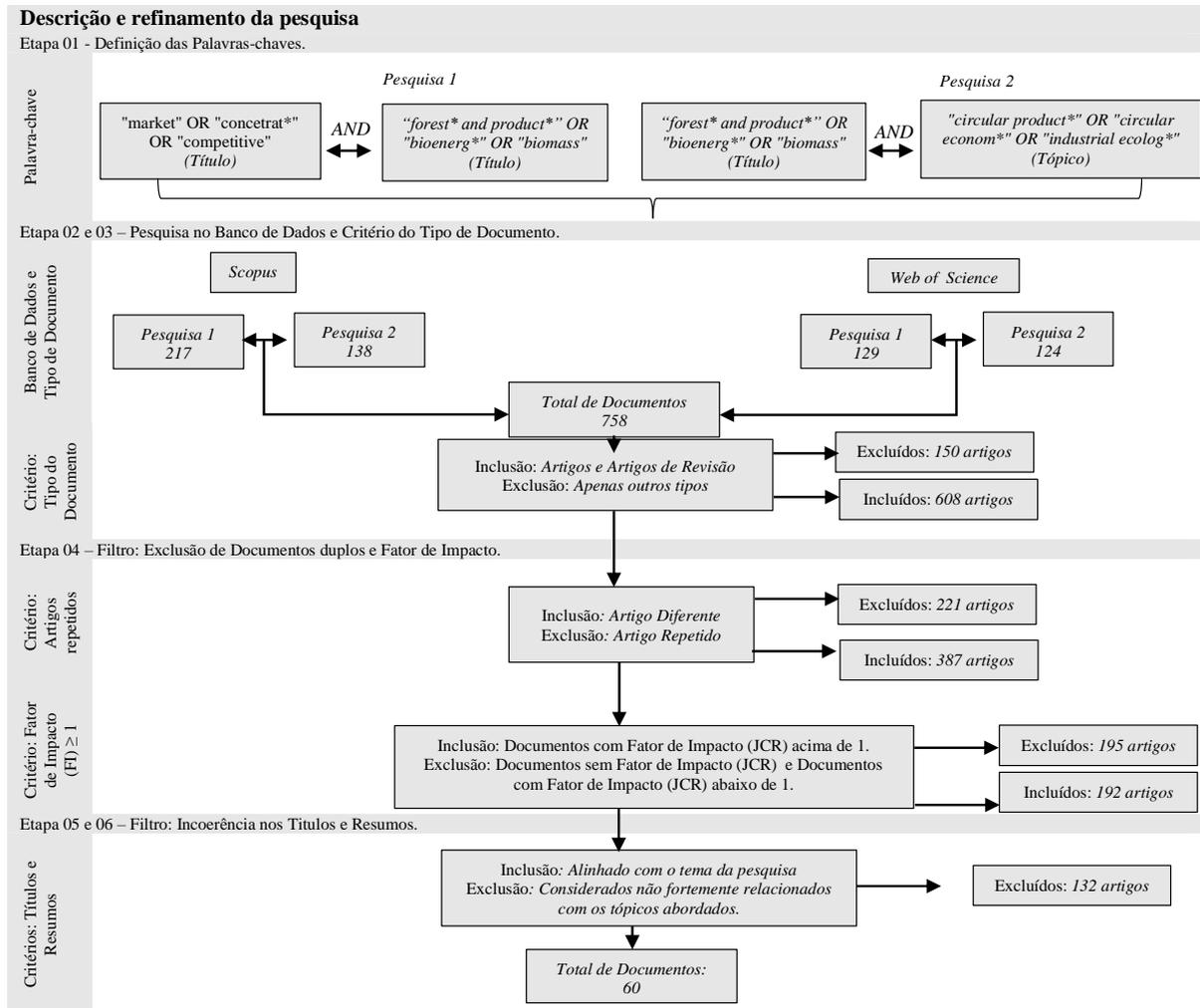
O *RStudio* identificou os arquivos duplicados, posteriormente gerou-se uma planilha com informações dos autores, revistas, países e citações, com uma série de critérios e técnicas de classificação (FI), nos quais foram aplicadas. Os estudos relevantes e mais impactantes foram selecionados e alinhados. Subsequentemente, os artigos duplicados foram excluídos e artigos com $FI < 1$. Dos 608 artigos, 192 permaneceram.

Etapa 5 e 6: Títulos e Resumos

Após leitura do título, foram lidos resumos de estudos que não se enquadravam ao tema da pesquisa. Após isso, os demais estudos que não foram encontrados vinculados aos tópicos de interesse foram excluídos e, 60 artigos relacionados ao tema permaneceram.

Durante a revisão dos artigos, foram selecionados apenas aqueles que abordaram os temas de interesse do estudo. Não obstante, na seção de resultados deste artigo, as análises realizadas foram baseadas nos conjuntos de documentos identificados como pesquisas de alto impacto, dado os métodos e abordagens utilizados. Os autores destacam que o presente estudo não afirma estar isento de limitações, pois é exaustivo, baseia-se nos tópicos e filtros utilizados conveniente para pesquisa.

Quadro 2.1. Definição e refinamento da amostragem da revisão sistemática de literatura do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular.



Fonte: Adaptado de Bezerra *et al.* (2022).

Relatório de divulgação da análise

O mapa que apresenta a distribuição espacial dos países por quartis foi construído por meio do *software* gratuito e de linguagem aberta de Sistema de Informação Geográfica QGIS versão 3.10.0 (QGIS, 2019), com auxílio de dados (*shapefile*) baixados na plataforma do IBGE.

A distribuição espacial dos países foi realizada seguindo a metodologia de Crespo (2009), por quartis no período final de 60 publicações de 2003 a 2020, conforme a Equação 1.

$$Q_k = \frac{k \sum f_i}{4} \quad (1)$$

Em que, f_i = publicações dos artigos por país; k = número de ordem do quartil.

Na revisão bibliométrica foi revelada a evolução das publicações e das citações (artigos e artigos de revisão), anual e acumulada, e realizada a classificação dos periódicos de maior impacto em publicação e citação. A análise de países com maiores interações entre publicações foi projetada no programa da web biblioshyne. Após o *upload* dos dados é fornecido mapas destes países. A evolução da rede de palavras-chave esteve associada ao mercado bioenergético sob perspectivas da Economia Circular no mundo, no período de 2016 a 2020.

Durante a construção da revisão bibliométrica, fundamentada em dados quantitativos, foram utilizadas informações qualitativas, através de uma análise indutiva, para sistematizar os resultados que demonstrasse à visão dos estudos e as perspectivas da aplicação na economia circular e expansão da bioenergia. A fim de esclarecer o objeto de estudo, categorizou-se os produtos florestais para energia, que foram apresentados com maior frequência entre os autores e correlacionou as principais tecnologias bioenergéticas apresentadas na literatura.

A partir das análises apresentadas foi possível desenvolver uma revisão sistemática da literatura, integrando os estudos de bioenergia e economia circular, além de fornecer uma visão de lacunas para pesquisas futuras sobre o tema.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Bibliométrica do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular.

A Figura 2.1 apresenta a distribuição espacial dos países, por quartis, das publicações ao longo do período de 2003 a 2020. Foram encontradas sessenta publicações distribuídas em vinte países. O Q₁ composto pelos Estados Unidos - EUA registrou a maior quantidade de trabalhos, com 10 publicações, representando 17% das publicações. A Itália, por sua vez, apresentou uma relevante quantidade de publicações na Europa, integrando isoladamente o Q₂ com a produção de seis artigos. Para Noruega, Espanha, Portugal, Reino Unido, Finlândia, Grécia, Irlanda e Suécia, que integram o Q₃ com vinte e uma publicações, o Q₄ formado pelos demais países com uma publicação cada. É importante destacar que houve estudos nos quais não tiveram países específicos em suas pesquisas, mas blocos econômicos (união europeia), os quais não fizeram parte dos quartis. O bloco econômico contou com 10 publicações. Por fim, 4 publicações que não fazem referência nem a países, nem a blocos econômicos.

A Figura 2.2 apresenta a evolução das publicações e das citações (Artigos e Artigos de Revisão) do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo, anual e acumulado, no período de 2003 a 2020. O primeiro artigo da amostra é datado do ano de 2003, este não teve citação entre os artigos da seleção, tal estudou e discutiu os custos de diferentes

tecnologias para fornecimento de energia, e expressou quais custos seriam necessários na mitigação de CO₂.

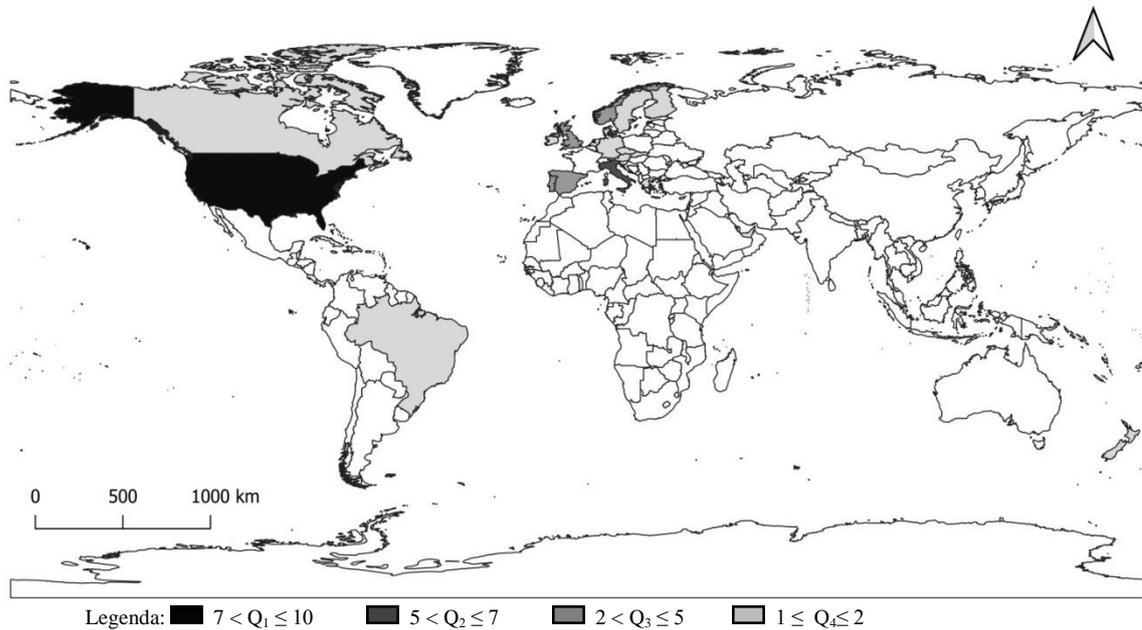


Figura 2.1. Distribuição espacial dos países, por quartis, das publicações do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo, no período de 2003 a 2020. Fonte: Os autores (2022).

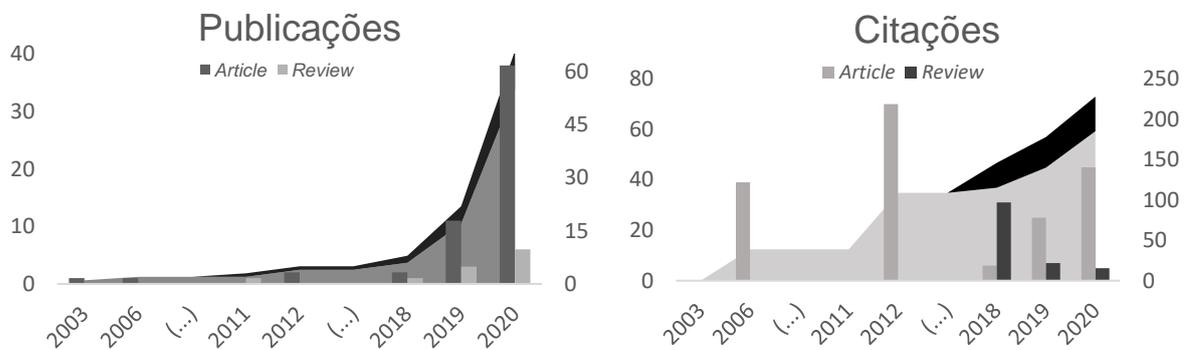


Figura 2.2. Evolução das publicações e das citações (artigos e artigos de revisão) do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo no período de 2003 a 2020. Fontes: Os autores (2022).

Após três anos sem estudos de alto impacto sobre a temática definida, foi publicado em 2006 um artigo que apresentou um modelo comercial e de mercado, para projetar o uso de bioenergia baseada em combustíveis florestais e subprodutos da indústria florestal na Noruega, para três cenários dos preços futuros de eletricidade e petróleo. Os impactos sobre a silvicultura e as indústrias florestais dos diferentes cenários de preços de energia também foram estudados.

A vantagem da metodologia sugerida é que ela permite avaliações do potencial econômico da bioenergia, levando em consideração a competição por matérias-primas, a demanda específica de calor de várias regiões, inter-regional e internacional do mercado energético (FOLSLAND BOLKESJØ; TRØMBORG; SOLBERG, 2006a). A partir de 2018, houve menor crescimento na quantidade de publicações, atingindo um maior pico no ano de 2020 com 43 publicações de artigos que somaram 50 citações. O interesse por alcançar as metas e acordos globais, aprovado em 2015, com o objetivo de reduzir o aquecimento global e a difusão do conhecimento de novas tecnologias, pode ter impulsionado as publicações nos anos de 2018 a 2020 (SHERWOOD, 2020).

A Tabela 2.1 apresenta a classificação dos periódicos de maior impacto, classificados pela maior quantidade de publicação, no período de 2003 a 2020. Os principais periódicos da amostra foram o *Energies*, *Energy e Sustainability*, com cinco artigos cada e 1 ,4 e 9 citações respectivamente, em seguida aparece o *Journal of Cleaner Production*, com 4 publicações. A *Forests e Scandinavian Journal of Forest Research*, com três publicações cada. A *Forest Science* apesar conter apenas dois artigos foi que teve maior impacto médio (28 citações/artigo).

Tabela 2.1. Classificação dos periódicos de maior impacto, organizado em ordem decrescente em quantidade de publicação, no período de 2003 a 2020.

Revista	Quantidade	Citações
<i>Energies</i>	5	1
<i>Energy</i>	5	4
<i>Sustainability</i>	5	9
<i>Journal of cleaner production</i>	4	35
<i>Forests</i>	3	2
<i>Scandinavian journal of forest research</i>	3	42
<i>Agronomy-basel</i>	2	1
<i>Energy policy</i>	2	8
<i>Forest science</i>	2	56
<i>Journal of industrial ecology</i>	2	5
<i>Renewable energy</i>	2	5
<i>Agribusiness</i>	1	0
<i>Agroforestry systems</i>	1	19
Outras revistas	23	32
Total	60	219

Fonte: Os autores (2022).

As pesquisas sobre mercado bioenergético sob a perspectiva da economia circular são recentes, contudo, nos últimos anos tem ganhado espaço nos principais periódicos. Os resultados permitem inferir que as publicações de alto impacto não mudaram de periódicos-alvo na série temporal analisada. Ainda é recente para ser conclusivo sobre as tendências, já

que ainda não existe uma série temporal extensa. O tema parece incipiente, sendo favorável para o desenvolvimento da pesquisa nos anos seguintes. O que se pode deduzir é onde pesquisas de alto impacto foram conduzidas até agora. É possível também inferir notável interesse de estudos mais recentes sobre o tema.

A Figura 2.3 apresenta os principais países, que cooperaram na publicação de artigos: A China e USA, registraram a maior quantidade de interação entre si, com quatro publicações. O Brasil e Alemanha são os países que mais apresentaram cooperação com outros países, o Brasil com três interações e a Alemanha com duas interações. É possível inferir que, essas interações evidenciam de forma direta suas relações nas publicações, e indireta nos interesses de mercado entre os países. Considerou-se para esta análise no mínimo duas frequências de interações entre os países. Eles têm em comum, tópicos relacionados a mercado mundial, bioenergia e economia circular em seu escopo científico. O que indica a existência de interesse dos países em práticas sustentáveis e políticas que proporcionem uma economia circular no setor bioenergético.

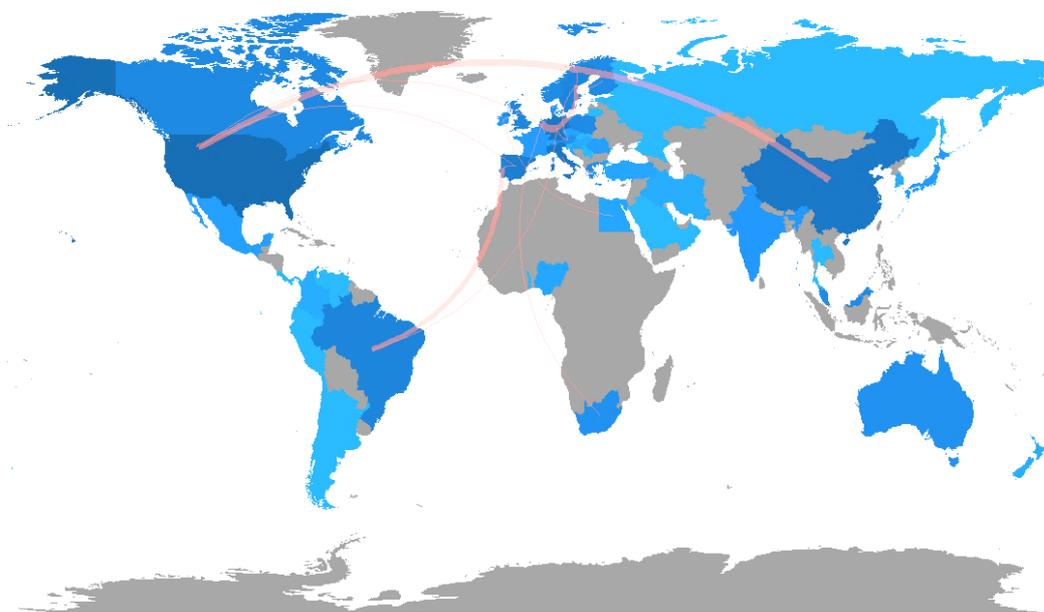


Figura 2.3. Distribuição espacial dos países, que colaboram entre si nas publicações de mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo.

Fonte: Os autores (2022).

A Figura 2.4 revela os mapas visuais de co-ocorrência, ocorrências conjuntas de pesquisas, construídos no software VOSviewer, baseado em dados de texto, considerando títulos e resumos, utilizando o método de contagem completa do VOSviewer com um número mínimo de ocorrências de 43 termos, utilizando os 60 artigos de alto impacto, que formam o

recicladados pelo maior tempo possível. Isso traz uma nova estratégia de desenvolvimento que permite a "dissociação" dos recursos utilizados a partir do crescimento econômico.

O modelo tradicional de economia linear tem se tornado discutível, no contexto em atual, pois o crescimento populacional e o aumento da demanda por alimento e energia são cada vez maiores. A economia circular fornece um modelo de fluxo diferente, onde nenhum recurso é desperdiçado (VASKALIS *et al.*, 2019). Tais estratégias são prioridades na política, pois abrange todos os setores da economia, incluindo agricultura como sendo uma das mais importantes indústrias bioenergéticas.

A Tabela 2.2 aborda a categorização de produtos florestais para energia, que contribuem para o desenvolvimento de uma economia circular. O uso de biomassa residual (florestas abandonadas e tipologias de biomassa que atualmente não estão sendo utilizadas), aglomerados (troncos, briquetes) é particularmente importante, para desenvolver uma economia circular (TORREIRO *et al.*, 2020). Resíduos de biomassa podem contribuir entre 100 a 400 EJ para o fornecimento global de energia (VASKALIS *et al.*, 2019).

Na Europa, a lenha é responsável por cerca de 45% de toda a biomassa de madeira usada para energia, e ainda conta com lascas de madeiras, *pellets* de madeira e outros aglomerados (HÄNNINEN *et al.*, 2018). A biomassa florestal tradicional, tipicamente lenha, é consumido principalmente por domicílios individuais, em processo de cozimento e aquecimento, enquanto a biomassa moderna (lascas e *pellets* de madeira) é usada em escala industrial (HÄNNINEN *et al.*, 2018). Sánchez *et al.* (2019) analisaram a situação atual da bioenergia na Espanha e não há demanda de *pellets* no setor doméstico, viabilizando a exportação para Portugal, Irlanda, Reino Unido, Itália e França.

As políticas bioenergéticas elevaram a importância das matérias-primas de biomassa no mundo, o qual se destaca a União Europeia (UE) (VASKALIS *et al.*, 2019). Isso ajuda a criar condições para o desenvolvimento sustentável (SIROUS *et al.* 2020). A China tem fortes ambições de economia circular, embora através de políticas sociais diferentes dos demais países (SHERWOOD, 2020).

Em 2010, a demanda na UE por *pellets* de madeira aumentou 7%, onde América do Norte dobrou seu volume de exportação para a Europa nos últimos dois anos (JEFFERS *et al.*, 2013). No que diz respeito aos combustíveis sólidos, especialmente aqueles com potencial para substituir o carvão, várias opções surgiram, como *pellets* de biomassa, que são produtos obtidos a partir da secagem, moagem e posterior adensamento de partículas de biomassa em agregados cilíndricos de diâmetro e comprimento variável (NUNES & MATIAS, 2020). A produção anual

de *pellets* de madeira como combustível, ultrapassou mais de 30 MT, no mercado europeu (FAO, 2019).

Tabela 2.2. Categorização dos principais produtos florestais para energia.

	Biomassa Florestal	Propriedades	Autores
Lasca de Madeira	Madeira que foi reduzida a pequenos pedaços, adequada para produção de fibras, para uso como combustível, ou para outros fins. Exclui lascas de madeira feitas diretamente na floresta a partir de madeira redonda.	Alto teor umidade; Baixo teor de poder calorífico, em comparação aos outros produtos; Baixa densidade a granel em comparação aos outros produtos; Combustível renovável neutro em carbono.	Abasian <i>et al.</i> (2019); Ahmadi <i>et al.</i> (2020); Altman <i>et al.</i> (2013); George Barjoveanu <i>et al.</i> (2020); Bryngemark (2020); Buonocore <i>et al.</i> (2019); Bywater <i>et al.</i> (1994); Chudy <i>et al.</i> (2019); Costa <i>et al.</i> (2020); Ericsson <i>et al.</i> (2004); Halaj & Brodrechtova (2018); Hänninen <i>et al.</i> (2018); Havlickova <i>et al.</i> (2011); Matthias Jordan <i>et al.</i> (2019); Lybæk (2008); Modolo <i>et al.</i> (2018); Moiseyev <i>et al.</i> (2013); Moliner <i>et al.</i> (2020); Nunes & Matias (2020); Olofsson & Borjesson (2018).
Lenha (madeira em tora)	Toda madeira derrubada ou de outra forma colhida e removida. Madeira obtida a partir de remoções, ou seja, as quantidades retiradas das florestas e das árvores fora da floresta, incluindo madeira recuperada de perdas naturais, derrubadas e madeireiras.	Madeira removida com ou sem casca, incluindo madeira removida em sua forma redonda, Aproximadamente ao quadrado ou em outra forma (por exemplo, galhos, raízes, tocos e brocas (onde estas são colhidas) e madeira que é aproximadamente moldada ou pontuda.	Asada <i>et al.</i> (2020); Dorning <i>et al.</i> (2015); Folsland Bolkesjø <i>et al.</i> (2006); Gustavsson & Madlener (2003); Jiang <i>et al.</i> (2019); Jiehong Kong <i>et al.</i> (2015); Nepal <i>et al.</i> (2019); Calliope Panoutsou (2016).
Carvão Vegetal	Madeira carbonizada (combustão parcial) ou aplicação de calor de fontes externas. Inclui carvão vegetal usado como combustível ou para outros usos, por exemplo, como agente de redução na metalurgia ou como meio de absorção ou filtração.	Baixa umidade; Alto teor de poder calorífico; Combustível Renovável; Baixos requisitos de processamento.	Nunes e Matias (2020); Asada <i>et al.</i> (2020); Dorning <i>et al.</i> (2015); Bianco & Porsieni (2016); Delgado-Garcia <i>et al.</i> (2016); Morana <i>et al.</i> (2017).
Resíduos Florestais	Provenientes de operações de desbaste e da derrubada final, principalmente topos e galhos, de vegetação rasteira.	Alto teor de umidade; Teor moderada de poder calorífico; Densidade a granel moderada; Combustível renovável neutro em carbono; Requer quebra, secagem e adensamento quando for preciso.	Ericsson <i>et al.</i> (2004); Palmieri <i>et al.</i> (2020); Paredes-Sanchez <i>et al.</i> (2018); Tauro <i>et al.</i> (2018); Torreiro <i>et al.</i> (2020).
Agglomerados	Briquetes, <i>pellets</i> e aglomerações produzidas diretamente por compressão, com diâmetro não superior a 25 mm e comprimento não superior a 100 mm.	Teor moderado de umidade; Teor moderada de poder calorífico; Densidade a granel moderada; Combustível renovável neutro em carbono; Requer quebra e adensamento.	Dorning <i>et al.</i> (2015); Ericsson <i>et al.</i> (2004); Hänninen <i>et al.</i> (2018); Jeffers <i>et al.</i> (2013); Wei Jiang <i>et al.</i> (2019); Jordan <i>et al.</i> (2019); Lee (2017); Modolo <i>et al.</i> (2018); Moiseyev <i>et al.</i> (2013); Moreno <i>et al.</i> (2018); Moliner <i>et al.</i> (2020); Moreno <i>et al.</i> (2020); Nunes & Matias, (2020); Panoutsou (2016); Sánchez <i>et al.</i> (2019); Sherwood (2020); Sirous <i>et al.</i> (2020), da Cruz Tarelho, & Martins (2020); Spampinato <i>et al.</i> (2019); Susaeta & Lal, (2018); Yarima Torreiro <i>et al.</i> (2020); Toscano <i>et al.</i> (2019).

Fonte: Os autores (2022).

Flak (2020) apresentou as grandes oportunidades em empresas de bioenergia da Áustria, Itália e Espanha, o que se deve ao fato de que tais empresas têm uma ampla variedade de ferramentas e soluções para o mercado de produtos florestais para energia. Jiang *et al.* (2019) mostram que a exportação de *pellets* de madeira para o Reino Unido é crescente e que as empresas de energia do Reino Unido, estão usando *pellets* de madeira importadas da região sul dos Estados Unidos, para gerar eletricidade e cumprir a meta nacional. Nos últimos anos, o uso de madeira residual na forma de lascas de madeira é uma opção favorável para cumprir as

metas climáticas (JORDAN *et al.*, 2019). A biomassa sólida é utilizada como combustível para energia em usinas, enquanto é mais frequentemente empregada em forma de *pellets* em aquecimento doméstico (MOLINER *et al.*, 2020). Resíduos florestais representam um potencial de biomassa florestal que pode ser usada para a produção de combustível de madeira. Ericsson *et al.* (2004) revelam que a Suécia tem enorme potencial na produção de energia proveniente desta fonte. A biomassa florestal residual, por fim, torna-se mais barato, quanto ao uso direto de lenha (madeira redonda) (KONG *et al.*, 2015).

2.3.3. Avaliação das tecnologias bioenergéticas

Existem tecnologias de conversão de biomassa usados, por exemplo, bioquímico (conversão enzimática, fermentação, digestão anaeróbica), termoquímica (combustão, gaseificação, pirólise, liquefação hidrotérmica) (CASSON MORENO *et al.*, 2020). Existiu uma frequência nas tecnologias: pirólise, gaseificação e combustão. A torrefação foi abordado apenas no estudo de Nunes & Matias (2020), que apresentou as vantagens da torrefação associadas as outras tecnologias.

Torreiro *et al.* (2020) avaliaram o potencial da biomassa das podas florestais e das podas de videiras com alta disponibilidade na Europa. Nunes & Matias (2020) evidenciaram o potencial da biomassa florestal quando é, devidamente pré-tratado, processado e convertida em combustível renovável, capaz de repor o combustível fóssil dependendo do processo de conversão utilizado. Assim, identificam-se as principais tecnologias na literatura estudada no Quadro 2.2. A maior parte dos estudos abordaram a combustão como uma das principais tecnologias e, por conseguinte, a gaseificação.

A torrefação apresentou apenas um artigo onde, Nunes & Matias (2020), estudaram a capacidade de transformar a biomassa de resíduos (resultante de atividades florestais, agrícolas ou industriais) em produto semelhante ao carvão vegetal para geração de eletricidade. Dentro desse quadro, Moreno *et al.* (2018) destaca a importância da biomassa de resíduos como nutriente sob o paradigma da economia circular. Consequentemente, a torrefação tem vantagens consideráveis sobre outros combustíveis de biomassa, como *pellets* tradicionais ou lascas de madeiras, porque resultam em produto de maior poder calórico, e isso não necessita de estruturas físicas para seu armazenamento e propriedades semelhantes ao carvão vegetal (NUNES & MATIAS, 2020).

Quadro 2.2. Principais tecnologias apresentadas na literatura e suas vantagens e desvantagens.

TECNOLOGIA	VANTAGENS	DESVANTAGES	AUTORES
------------	-----------	-------------	---------

É um processo de conversão termoquímica que tem a capacidade de padronizar as propriedades da biomassa, tornando-as mais consistentes.	Eliminação de compostos orgânicos voláteis e redução da umidade, contribuindo para o aumento do teor de carbono fixo; Tecnologia de pré-tratamento; Aumento da densidade energética.	Eleva os níveis de processamento; Encarece os custos da matéria-prima (biomassa).	Nunes & Matias (2020).
Processo que aquece a biomassa em ambiente fechado, na ausência ou presença de quantidades controladas de oxigênio, a temperaturas acima de 300 °C.	Podem ser convertidos em bio-óleo, biochar (para melhoramento no manejo do solo); Baixa pegada de carbono.	Gás de baixo poder calorífico. Encarecem o processo, no tratamento de purificação dos gases produzidos.	Abasian <i>et al.</i> (2019); Ahmadi <i>et al.</i> (2020); Moreno <i>et al.</i> (2020); Halaj & Brodrechtova (2018); Lee (2017); Moliner <i>et al.</i> (2020); Vaskalis <i>et al.</i> (2019); Zabaniotou (2018).
É o processo de reação termoquímica entre o carbono e hidrocarbonetos em baixas taxas de oxigênio, ocorrendo em temperaturas de 400 a 900 °C.	Tecnologia disponível para micro e médias escalas devido às altas relações de aquecimento e eficiências globais; Um gás de alto poder calorífico; Considerada a maneira mais eficiente para obter hidrogênio a partir de biomassa; Tecnologia de baixo emissão de CO ₂ .	Processo de tratamento lento; Encarece os custos da produção.	Ahmadi <i>et al.</i> (2020); Moreno <i>et al.</i> (2020); Costa <i>et al.</i> (2020); Acevedo <i>et al.</i> (2020); Ericsson <i>et al.</i> , (2004); Guest <i>et al.</i> (2011); Gustavsson & Madlener (2003); Jordan <i>et al.</i> (2019); Moliner <i>et al.</i> (2020); Riding <i>et al.</i> (2015); Sherwood (2020); Torreiro <i>et al.</i> (2020); Vaskalis <i>et al.</i> (2019).
Processo de oxidação de determinado combustível, na presença de oxigênio, e que objetiva a geração de energia na forma de calor.	Diferentes tipos de substâncias ou materiais podem ser empregados na combustão, incluindo combustíveis fósseis, resíduos ou biomassa.	Produção de Gases (dióxido de carbono e água); Pode ser significativamente menos eficiente do que a gaseificação.	Abasian <i>et al.</i> (2019); Ahmadi <i>et al.</i> (2020); Barjoveanu <i>et al.</i> (2020); Buonocore <i>et al.</i> (2019); Moreno <i>et al.</i> (2020); Chudy <i>et al.</i> (2019); Costa <i>et al.</i> (2020); Acevedo <i>et al.</i> (2020); Ericsson <i>et al.</i> (2004); Bolkesjø <i>et al.</i> (2006); Halaj & Brodrechtova (2018); Hänninen <i>et al.</i> (2018); Jeffers <i>et al.</i> (2013); Jordan <i>et al.</i> (2019); Jürgens <i>et al.</i> (2006); Lybæk (2008); Mertens <i>et al.</i> (2016); Modolo <i>et al.</i> (2018); Moreno <i>et al.</i> (2018); Moliner <i>et al.</i> (2020); Nepal <i>et al.</i> (2019); Sanchez <i>et al.</i> (2019); Rendeiro <i>et al.</i> (2011); Riding <i>et al.</i> (2015); Sheldon (2020); Sirous <i>et al.</i> (2020), da Cruz Tarelho, & Martins (2020); Sosa <i>et al.</i> (2015); Saeta <i>et al.</i> (2020); Toscano <i>et al.</i> (2019); Vaskalis <i>et al.</i> (2019); Vlachokostas <i>et al.</i> (2020); Zabaniotou (2018).

Fonte: Os autores (2022).

A combinação da pirólise para geração de energia renovável e produção de *biochar*, carvão vegetal para correção do solo, oferece uma estratégia atraente, a fim de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. São produzidos produtos líquidos e sólidos, mas a proporção de cada um pode ser variada dependendo das condições de reação (ZABANIOTOU, 2018). Já a gaseificação apresentou vantagens notáveis em relação à combustão, e deve ser destaque no futuro para os formuladores de políticas na busca de tecnologias limpas (MOLINER *et al.*,

2020). O planejamento e o gerenciamento das tecnologias de bioenergia devem ser baseados na avaliação dos aspectos ambientais, ecológicos e socioeconômicos (BUONOCORE *et al.*, 2019). Além disso, o tratamento termoquímico com baixa pegada de carbono, possibilita melhorar a capacidade de recursos e aumentar a eficiência, reduzindo a geração de resíduos e otimizando a reutilização, assim como reciclagem na produção de biocombustíveis (VASKALIS *et al.*, 2019).

2.3.4. A conjectura e base teórica da economia circular

O Quadro 2.3 apresenta as principais bases teóricas da economia circular encontradas nos artigos e suas premissas, baseados em Sehnem *et al.* (2020). Os estudos beneficiam as bases teóricas como: *Design* Regenerativo, Economia de Performance e Ecologia Industrial. A economia circular envolve mudança no modelo econômico linear atual, na reciclagem e na reutilização de nutrientes, entre os estágios do ciclo de vida (GEISSDOERFER *et al.*, 2018). Desse modo, a geração de resíduos é minimizada quando inspirado em imitar os ciclos naturais de carbono, da água ou do nitrogênio (BOCKEN *et al.*, 2016). Existem três princípios fundamentais: (1) preservar e aumentar o capital natural, controlando os estoques que são finitos, usando fluxos de recursos renováveis para equilibrar o sistema; (2) otimizar a produção de recursos; (3) promoção da eficácia do sistema, identificando e eliminando externalidades negativas, mudança climática e liberação de toxinas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION - EMF, 2015).

Tal modelo de economia combina diferentes gêneros e ideias, como: ecologia industrial, engenharia do ciclo de vida, gestão do ciclo vida, economia de desempenho, etc. A ecologia industrial apresenta a ação e pesquisa ferramentas principais, buscando soluções em fenômenos ecológicos do modelo semelhante à biomimética, inspiradas na natureza, e outra buscar um equilíbrio entre os sistemas naturais e os sistemas construídos pelos humanos. A *International Society for Industrial Ecology* e a *Journal of Industrial Ecology* são espaços atualmente utilizados para publicações desta escola. Assim, As premissas da *Economia Circular* (EC) têm sido aperfeiçoadas e desenvolvidas pelas seguintes escolas de pensamento: o *design* regenerativo, que nasceu nos Estados Unidos, sendo aplicados para todos os sistemas produtivos (GEISENDORF; PIETRULLA, 2017).

A economia de performance desenvolvida por Walter Stahel, arquiteto e economista, em coautoria com Genevieve Reday, estabeleceu a visão de uma economia em ciclos e seu impacto na competitividade econômica. Stahel trabalhou no desenvolvimento de uma abordagem de “ciclo fechado”, "*cradle to cradle*" (berço a berço) no final de 1970 para

processos de produção. Posteriormente, o conceito foi materializado por Braungart e McDonough em: “*Cradle to Cradle: Rethinking the Way We Make Things*” (MCDONOUGH e BRAUNGART, 2002). A Ecologia industrial aborda o ciclo fechado nos quais os resíduos servem como insumo, eliminando assim a noção de um subproduto indesejável (BOCKEN *et al.*, 2016). Janine Benyuys, autora de biomimética: inspirada pela natureza, define sua abordagem que estuda as melhores ideias da natureza e então imita esses *designs* e processos para solucionar os problemas humanos (REAP, BAUMEISTER e BRAS, 2005).

Quadro 2.3. Premissas da economia circular e suas bases teóricas.

<i>Base teórica</i>	<i>Elementos</i>	<i>Perspectivas</i>	<i>Premissas</i>	<i>Autores</i>
Design Regenerativo	Fornecer uma estrutura conceitual e metodológica para criar, aplicar, adaptar e integrar uma diversidade de tecnologias modernas e antigas para projetar, gerir e promover a evolução contínua da sustentabilidade dos ambientes construídos, tendo resultados ecológicos e sociais.	<i>Upcycle</i>	Usa novos modelos e padrões de <i>design</i> aos produtos.	Ahmadi, Kannangara e Bensebaa, (2020); Asada <i>et al.</i> (2020); Attard <i>et al.</i> (2020); Barjoveanu <i>et al.</i> (2020); Buonocore <i>et al.</i> (2019); Flak, (2020); Folsland, Trømborg e Solberg, (2006); Guest <i>et al.</i> (2011); Lybæk, (2008); Moiseyev, Solberg; Kallio, (2013); Moreno <i>et al.</i> (2018); Susaeta, Lal, (2018); Torreiro <i>et al.</i> (2020); Toscano <i>et al.</i> (2019); Vaskalis <i>et al.</i> (2019); Vlachokostas <i>et al.</i> (2020).
		<i>Cradle to cradle</i>	Possibilita sistemas cíclicos, recursos que sejam reutilizados e circulem em fluxos seguros.	Galik, (2012); Barker, (1996); Buonocore <i>et al.</i> (2019); Javier Acero <i>et al.</i> (2019); Jordan <i>et al.</i> (2019); Manniello e Canio <i>et al.</i> (2020); Nonini e Fiala, (2019); Panoutsou, (2016); Sánchez <i>et al.</i> (2019); Rendeiro <i>et al.</i> (2011); Susaeta e Lal, (2018); Saeta <i>et al.</i> (2020); Vlachokostas <i>et al.</i> (2020); Zabaniotou, (2018).
Economia de Performance	Persegue quatro objetivos principais, prolongar a vida útil dos produtos; produtos de longa duração; atividades de reparo e prevenção de resíduos.	<i>Closed loop</i>	Preza a circularidade dos recursos.	Bryngemark, (2020); Ericsson <i>et al.</i> (2004); Kong, Rönqvist e Frisk, (2015); Manniello, Canio <i>et al.</i> (2020); Moreno <i>et al.</i> (2020); Nepal <i>et al.</i> (2015); Rendeiro <i>et al.</i> (2011); Sherwood, (2020); Sirous <i>et al.</i> (2020).
		<i>Double loop</i>	Busca criar alternativas novas aos resíduos e reintroduzi-lo na cadeia de produção.	Chudy <i>et al.</i> (2019); Costa <i>et al.</i> (2020); Guest <i>et al.</i> (2011); Gustavsson e Madlener, (2003); Jordan <i>et al.</i> (2019); Moreno <i>et al.</i> (2020); Olofsson e Börjesson, (2018); Sirous <i>et al.</i> (2020); Vaskalis <i>et al.</i> (2019); Zabaniotou, (2018).
Ecologia Industrial	Fluxo de materiais e energia através de sistemas industriais, possibilitando visualizar a área polar industrial como um ecossistema em que os resíduos de uma indústria são sempre usados por outra indústria.	Logística reversa	Atribui responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores.	Acevedo <i>et al.</i> (2020); Hernandez, Solorzano, Nunez e Vargas, (2017); Jiang <i>et al.</i> (2019); Riding <i>et al.</i> (2015).
		Economia espiral	Enfatiza o ciclo biológico e o ciclo técnicos nos materiais.	Moliner, Marchelli e Arato, (2020); Nunes e Matias, (2020); Olofsson e Börjesson, (2018); Sheldon, (2020); Susaeta <i>et al.</i> (2012).
		Simbiose industrial	Existência de mutualismo, na cooperação e no compartilhamento.	Abasian, Ronnqvist e Ouhimmou, (2019); Dorning <i>et al.</i> (2015); Acevedo <i>et al.</i> (2020); Halaj e Brodrechtova, (2018); Jürgens, Schlamadinger e Gomez, (2006); Manniello <i>et al.</i> (2020); Modolo <i>et al.</i> (2018); Nepal <i>et al.</i> (2019); Saghaei, Ghaderi e Soleimani, (2020); Sosa <i>et al.</i> (2015).

Fonte: Os autores (2022).

Existem algumas limitações em relação à pesquisa e seleção de artigos relacionados a EC, apenas dois bancos de dados foram adotados. Utilizamos critérios de exclusão e inclusão. Observou-se que carecem estudos, que demonstrem os impactos ambientais ao uso da biomassa, para atender a uma demanda grande por energia. Estudos que demonstrem os problemas com o uso da terra, como o estoque de carbono mantido no solo, abastecimento de água e a proteção da biodiversidade. A respeito do processo de torrefação, estudos recentes vêm sendo desenvolvidos, principalmente em termos de controle e estabilidade. No entanto, ainda não pode ser considerado como uma tecnologia madura, por isso, é necessário investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D).

2.4. CONCLUSÃO

Os Estados Unidos registrou a maior quantidade de trabalhos, sendo dez publicações, representando 16%. A Itália foi o país que se destacou na quantidade de publicações na Europa, com um total de seis artigos. As publicações e citações dos artigos da amostra foram datados a partir de 2003. Atingiu um maior pico no ano de 2020 com quarenta e três publicações.

Os periódicos mais significativos da amostra foram: *Energies*, *Energy e Sustainability*, com cinco artigos cada, em seguida, *Journal of Cleaner Production*, com quatro publicações, posteriormente, a *Forests e Scandinavian Journal of Forest Research*, com três publicações cada.

A China e USA, registraram a maior quantidade de interação entre si nas publicações de trabalhos, com quatro publicações. O Brasil e Alemanha foram os países que mais compartilharam informações com outros países. As principais palavras-chave encontradas no contexto da bioenergia sob a perspectiva da economia circular foram: resíduos florestais, emissões de carbono, bioeconomia e mudança climática, além da bioenergia e economia circular.

Os principais produtos florestais para energia abordados nos artigos foram: lasca de madeira, lenha (madeira em tora), carvão vegetal, resíduos florestais e aglomerados. A maior parte dos artigos abordaram tecnologias atraentes na produção de bioenergia, a exemplo da pirólise, gaseificação e combustão, sendo a torrefação ainda incipiente em estudos.

As principais bases teóricas entre os artigos foram: *Design Regenerativo*, *Economia de Performance e Ecologia Industrial*. As principais premissas da EC encontradas foram: *double loop*, *upcycle*, *economia espiral*, *closed loop*, *cradle to cradle*, *logística reversa* e *simbiose*

industrial. Através do panorama, a produção de bioenergia à base de madeira e seus derivados apresenta um tema oportuno no contexto da economia circular.

2.5. REFERÊNCIAS

- ABASIAN, F.; RÖNNQVIST, M.; OUHIMMOU, M. Forest bioenergy network *design* under market uncertainty. **Energy**, v. 188, 2019.
- ABT, K. L.; ABT, R. C.; GALIK, C. Effect of bioenergy demands and supply response on markets, carbon, and land use. **Forest Science**, v. 58, n. 5, p. 523–539, 2012.
- AHMADI, L.; KANNANGARA, M.; BENSEBAA, F. Cost-effectiveness of small scale biomass supply chain and bioenergy production systems in carbon credit markets: A life cycle perspective. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 37, 2020.
- ALAVI-BORAZJANI, S. A.; CAPELA, I.; TARELHO, L. A. C. Valorization of biomass ash in biogas technology: Opportunities and challenges. **Energy Reports**, v. 6, p. 472–476, 2020.
- ALTMAN, I. *et al.* Market Development of Biomass Industries. **Agribusiness**, v. 29, n. 4, p. 486–496, 2013.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.
- ASADA, R. *et al.* Bioeconomic transition?: Projecting consumption-based biomass and fossil material flows to 2050. **Journal Of Industrial Ecology**.
- ATTARD, J. *et al.* Mapping and analysis of biomass supply chains in Andalusia and the Republic of Ireland. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 11, 2020.
- BARJOVEANU, G. *et al.* Life cycle assessment of polyphenols extraction processes from waste biomass. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, 2020a.
- BARKER, S. N. Gasification and pyrolysis - Routes to competitive electricity production from biomass in the UK. **Energy conversion and management**, v. 37, n. 6–8, p. 861–866, 1996.
- BEZERRA, M. C. DA C.; GOHR, C. F.; MORIOKA, S. N. Organizational capabilities towards corporate sustainability benefits: A systematic literature review and an integrative framework proposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, 2020.
- BIANCO, L.; PORISIENSI, S. From linear to circular economy in Ferriere Nord: Ladle slag and Biomass case studies [Trasformazione da lineare a circolare del processo EAF. Esperienza in Ferriere Nord SpA: Il caso della scoria siviera e dei carboni]. **Metallurgia Italiana**, v. 108, n. 10, p. 1–26, 2016.
- BRYNGEMARK, E. Bioenergy versus forest conservation: a partial equilibrium analysis of the Swedish forest raw materials market. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 35, n. 7, p. 367–382, 2020.
- BUONOCORE, E. *et al.* Indicators of environmental performance to assess wood-based bioenergy production: A case study in Northern Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 221, n. 2019, p. 242–248, 2019.
- BOCKEN, N. M. P.; DE PAUW, I.; BAKKER, C.; VAN DER GRINTEN, B. Product *design* and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 33, n. 5, p. 308–320, 2016.
- BYWATER, I.; SCOTT, K.; ARNOUX, L. COMPETITIVE POWER-GENERATION FROM BIOMASS. **Renewable energy**, v. 5, n. 5–8, p. 849–851, 1994.

- CASSON MORENO, V. *et al.* Techno-economic and environmental sustainability of biomass waste conversion based on thermocatalytic reforming. **Waste Management**, v. 101, p. 106–115, 2020.
- CASTRO AMPESE, L. *et al.* Macaúba’s world scenario: a bibliometric analysis. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13399-021-01376-2>>.
- CHENG, W. *et al.* Compras Públicas Verdes , conceitos ausentes e tendências futuras e uma revisão crítica. 2017.
- CHUDY, R. P. *et al.* Effects on forest products markets of second-generation biofuel production based on biomass from boreal forests: a case study from Norway. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 3, p. 218–227, 2019.
- COSTA, M. *et al.* The “INNOVARE” project: Innovative plants for distributed poly-generation by residual biomass. **Energies**, v. 13, n. 15, 2020.
- CRESPO, A. **Antonio Arnot Crespo - Estatística Fácil.pdf**.
- CARRICONDO ANTON, J. M. *et al.* Reduction of Phosphorous from Wastewater Through Adsorption Processes Reusing Wood and Straw Ash Produced in Bioenergy Facilities. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 231, n. 3, 2020.
- DELGADO-GARCIA, R. *et al.* Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomásas de reducido poder calorífico. **Dyna (Spain)**, v. 83, n. 199, p. 183–190, 2016.
- DI BITONTO, L. *et al.* Residual Mexican biomasses for bioenergy and fine chemical production: correlation between composition and specific applications. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2020.
- DOMINGUES, M. A. *et al.* Mapeamento da ciência com o pacote R Bibliometrix: Uma aplicação no estudo de empreendedorismo acadêmico. **Anais do 9th ISTI - International Symposium on Technological Innovation**, v. Vol.9/n.1, p. 287–294, 2018.
- DUQUE-ACEVEDO, M. *et al.* The management of agricultural waste biomass in the framework of circular economy and bioeconomy: An opportunity for greenhouse agriculture in Southeast Spain. **Agronomy**, v. 10, n. 4, 2020.
- ERICSSON, K. *et al.* Bioenergy policy and market development in Finland and Sweden. **Energy policy**, v. 32, n. 15, p. 1707–1721, 2004.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Circular Economy Overview. 2015. Disponível online: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy> (acessado em 21 de novembro de 2021).
- FAO. FOREST PRODUCTS DEFINITIONS General terms FAOSTAT-Forestry JOINT FOREST SECTOR QUESTIONNAIRE Item code Item Code Definition. 1994.
- FERREIRA-SANTOS, P. *et al.* Green and Sustainable Valorization of Bioactive Phenolic Compounds from Pinus By-Products. **Molecules**, v. 25, n. 12, jun. 2020.
- FERRARI, G. *et al.* Bibliometric Analysis of Trends in Biomass for Bioenergy Research. 2020. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/energies>.
- FLAK, J. Technologies for Sustainable Biomass Supply-Overview of Market Offering. **Agronomy-basel**, v. 10, n. 6, jun. 2020.
- FOLSLAND BOLKESJØ, T.; TRØMBORG, E.; SOLBERG, B. Bioenergy from the forest sector: Economic potential and interactions with timber and forest products markets in Norway. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 21, n. 2, p. 175–185, 2006a.
- GARFIELD, E. Journal impact factor: a brief review. **CMAJ**. 1999; 161(8):979-80.

- GEISSDOERFER, M.; MORIOKA, S. N.; DE CARVALHO, M. M; Evans, S. Modelos de negócios e cadeias de abastecimento para a economia circular. *J. Clean. Prod.* 2018, 190, 712–721.
- GEISENDORF, S.; PIETRULLA, F.. The circular economy and circular economic concepts a literature analysis and redefinition. *Thunderbird International Business Review*, 2017.
- GUO, M., SONG, W., BUHAIN, J., 2015. Bioenergia e biocombustíveis: história, status e perspectiva. *Renovar. Sustentar. Energia Rev.* 42, 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>.
- GUEST, G. *et al.* Life cycle assessment of biomass-based combined heat and power plants: Centralized versus decentralized deployment strategies. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 6, p. 908–921, 2011b.
- GUSTAVSSON, L.; MADLENER, R. CO₂ mitigation costs of large-scale bioenergy technologies in competitive electricity markets. **Energy**, v. 28, n. 14, p. 1405–1425, nov. 2003.
- GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11–32, 15 fev. 2016
- 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, p. 201–209, 2018a.
- 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, p. 201–209, 2018b.
- HÄNNINEN, R. *et al.* Complexity of Assessing Future Forest Bioenergy Markets—Review of Bioenergy Potential Estimates in the European Union. **Current Forestry Reports**, v. 4, n. 1, p. 13–22, 2018.
- HAVLICKOVA, K. *et al.* Modelling of biomass prices for bio-energy market in the Czech Republic. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 19, n. 9, p. 1946–1956, 2011.
- HOLZINGER, H. **The Circular Economy in the European Union**. [s.l.: s.n.].
- JEFFERS, R. F.; JACOBSON, J. J.; SEARCY, E. M. Dynamic analysis of policy drivers for bioenergy commodity markets. **Energy Policy**, v. 52, p. 249–263, 2013.
- JIANG, W. *et al.* The impact of the biomass crop assistance program on the united states forest products market: An application of the global forest products model. **Forests**, v. 10, n. 3, 2019a.
- JIANG, W. *et al.* The Impact of the Biomass Crop Assistance Program on the United States Forest Products Market: An Application of the Global Forest Products Model. **FORESTS**, v. 10, n. 3, 2019b.
- JORDAN, M. *et al.* Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach. **Energy**, v. 189, 2019a.
- JÜRGENS, I.; SCHLAMADINGER, B.; GOMEZ, P. Bioenergy and the CDM in the emerging market for carbon credits. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, n. 5–6, p. 1051–1081, 2006.
- KAIRYTE, A. *et al.* Fire suppression and thermal behavior of biobased rigid polyurethane foam filled with biomass incineration waste ash. **Polymers**, v. 12, n. 3, 2020.
- KITCHENHAM, B. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 126, n. 5, p. 589–598, 2007.

- KONG, J.; RÖNNQVIST, M.; FRISK, M. Using mixed integer programming models to synchronously determine production levels and market prices in an integrated market for roundwood and forest biomass. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 179–199, 2015a.
- LEE, D. H. Econometric assessment of bioenergy development. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 45, p. 27701–27717, 2017.
- LYBÆK, R. Discovering market opportunities for future CDM projects in Asia based on biomass combined heat and power production and supply of district heating. **Energy for Sustainable Development**, v. 12, n. 2, p. 34–48, 2008.
- MANG, P.; REED, B. Regenerative Development and *Design*. Encyclopedia Sustainability Science & Technology, p. 8855 – 8879, 2012. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_303>
- MANNIELLO, C. *et al.* Planning the Flows of Residual Biomass Produced by Wineries for the Preservation of the Rural Landscape. **Sustainability**, v. 12, n. 3, 2020.
- MAO, G. *et al.* Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. *Science of The Total Environment*, v. 635, p. 1081–1090, 1 set. 2018.
- MERTENS, A. *et al.* Context Matters-Using an Agent-Based Model to Investigate the Influence of Market Context on the Supply of Local Biomass for Anaerobic Digestion. **Bioenergy RESEARCH**, v. 9, n. 1, p. 132–145, mar. 2016.
- MODOLO, R. C. E. *et al.* Fly ash from biomass combustion as replacement raw material and its influence on the mortars durability. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 2, p. 1006–1015, 2018a.
- MOISEYEV, A.; SOLBERG, B.; KALLIO, A. M. I. Wood biomass use for energy in Europe under different assumptions of coal, gas and CO₂ emission prices and market conditions. **Journal of Forest Economics**, v. 19, n. 4, p. 432–449, 2013.
- MOLINA-MORENO, V. *et al.* The use of led technology and biomass to power public lighting in a local context: The case of baeza (Spain). **Energies**, v. 11, n. 7, 2018a.
- MOLINER, C.; MARCHELLI, F.; ARATO, E. Current status of energy production from solid biomass in North-West Italy. **Energies**, v. 13, n. 17, 2020a.
- MORANA, A. *et al.* Development of an energy biorefinery model for chestnut (*Castanea sativa* Mill.) shells. **Energies**, v. 10, n. 10, p. 1–14, 2017.
- MORENO, V. C. *et al.* Techno-economic and environmental sustainability of biomass waste conversion based on thermocatalytic reforming. **Waste management**, v. 101, p. 106–115, jan. 2020.
- MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. Paperback, 193 pag. April 2002. ISBN13: 9780865475878.
- NEPAL, P. *et al.* Projected Market Competition for Wood Biomass between Traditional Products and Energy: A Simulated Interaction of US Regional, National, and Global Forest Product Markets. **Forest Science**, v. 65, n. 1, p. 14–26, 2019.
- NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O. Biomass torrefaction as a key driver for the sustainable development and decarbonization of energy production. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 3, p. 1–9, 2020a.
- OLOFSSON, J.; BORJESSON, P. Residual biomass as resource - Life-cycle environmental impact of wastes in circular resource systems. **Journal of cleaner production**, v. 196, p. 997–1006, 2018.
- PALMIERI, N. *et al.* Circular Economy Model: Insights from a Case Study in South Italy. **Sustainability**, v. 12, n. 8, 2020.

- PANOUSO, C. The role of sustainable biomass in the heat market sector for EU27. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 5, n. 4, p. 430–450, 2016.
- PAREDES-SANCHEZ, J. P. *et al.* Energy utilization for distributed thermal production in rural areas: A case study of a self-sustaining system in Spain. **Energy conversion and management**, v. 174, p. 1014–1023, 2018.
- PAREDES-SANCHEZ, J. P. *et al.* Evolution and perspectives of the bioenergy applications in Spain. **Journal of cleaner production**, v. 213, p. 553–568, mar. 2019.
- PEARCE, D. W.; TURNER, R. K. *Economics of Natural Resources and the Environment*. (1989). Hemel Hempstead, Harvester Wheatsheaf, London. Italian edition 1991 by Il Mulino, Bologna.
- REIS, F. C. M. A. Universidade Federal De Minas Gerais Escola De Ciência Da Informação Programa De Pós-Graduação Em Ciência Da Informação. 2015.
- RENDEIRO, G. *et al.* Analysis on the feasibility of biomass power plants adding to the electric power system - Economic, regulatory and market aspects - State of Para, Brazil. **Renewable energy**, v. 36, n. 6, p. 1678–1684, jun. 2011.
- REAP, J.; BAUMEISTER, D.; BRAS, B. Holism, biomimicry and sustainable engineering. In: *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2005. p. 423-431.
- RIDING, M. J. *et al.* Harmonising conflicts between science, regulation, perception and environmental impact: The case of soil conditioners from bioenergy. **Environment International**, v. 75, p. 52–67, 2015a.
- RIDING, M. J. *et al.* Harmonising conflicts between science, regulation, perception and environmental impact: The case of soil conditioners from bioenergy. **Environment international**, v. 75, p. 52–67, 2015b.
- S.N., B. Gasification and pyrolysis — Routes to competitive electricity production from biomass in the UK. **Fuel and Energy Abstracts**, v. 37, n. 3, p. 198, 1996.
- SAGHAEI, M.; GHADERI, H.; SOLEIMANI, H. *Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand*. **Energy**, v. 197, 2020.
- SEHNEM, S. *et al.* Circular economy in the wine chain production: maturity, challenges, and lessons from an emerging economy perspective. *Production Planning and Control*, v. 31, n. 11–12, p. 1014–1034, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1695914>>.
- SHELDON, R. A. Biocatalysis and biomass conversion: Enabling a circular economy: Biocatalysis and Biomass Conversion. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 378, n. 2176, 2020.
- SIROUS, R. *et al.* Mixed biomass pelleting potential for Portugal, step forward to circular use of biomass residues. **Energy reports**, v. 6, n. 1, p. 940–945, 2020.
- SIROUS, R. *et al.* Mixed biomass pelleting potential for Portugal, step forward to circular use of biomass residues. **Energy Reports**, v. 6, p. 940–945, 2020b.
- SOSA, A. *et al.* Managing the moisture content of wood biomass for the optimisation of Ireland's transport supply strategy to bioenergy markets and competing industries. **Energy**, v. 86, p. 354–368, 2015.
- SHERWOOD, J. The significance of biomass in a circular economy. **Bioresource Technology**, v. 300, 2020.
- SPAMPINATO, G. *et al.* **Carbon Sequestration by Cork Oak Forests and Raw Material to Built up Post Carbon City**. (calabro, f and dellaspina, l and bevilacqua, c, ed.) new

- metropolitan perspectives: local knowledge and innovation dynamics towards territory attractiveness through the implementation of horizon/e2020/agenda2030, vol 2. **anais...**: smart innovation systems and technologies. gewerbestr. 11, Cham, CH-6330, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2019.
- SUSAETA, A. *et al.* Economics of intercropping loblolly pine and switchgrass for bioenergy markets in the southeastern United States. **Agroforestry Systems**, v. 86, n. 2, p. 287–298, 2012.
- SUSAETA, A.; LAL, P. Impacts of climate change and bioenergy markets on the profitability of slash pine pulpwood production in the Southeastern United States. **Forests**, v. 9, n. 10, 2018.
- TAURO, R. *et al.* The potential for sustainable biomass *pellets* in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. **Renewable & sustainable energy reviews**, v. 82, n. 1, p. 380–389, 2018.
- TERRONES-SAETA, J. M. *et al.* Study of the incorporation of biomass bottom ashes in ceramic materials for the manufacture of bricks and evaluation of their leachates. **Materials**, v. 13, n. 9, 2020.
- TORREIRO, Y. *et al.* The Role of Energy Valuation of Agroforestry Biomass on the Circular Economy. **Energies**, v. 13, n. 10, 2020a.
- TOSCANO, G. *et al.* Engineered solid biofuel from herbaceous biomass mixed with inorganic additives. **Fuel**, v. 256, nov. 2019.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review* Introduction: the need for an evidence-informed approach. **British Journal of Management**, v. 14, p. 207–222, 2003.
- TRUONG, N. L.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. **Primary energy and climate change effects of forest residues and fossil coal for electricity production with and without carbon capture and storage**. European Biomass Conference and Exhibition Proceedings. **Anais...ETA-Florence Renewable Energies**, 2016. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019689438&partnerID=40&md5=6b6f04b58e193aa8122671793899273b>>
- VASKALIS, I. *et al.* Towards Circular Economy Solutions for The Management of Rice Processing Residues to Bioenergy via Gasification. **Sustainability**, v. 11, n. 22, nov. 2019.
- VLACHOKOSTAS, C. *et al.* Decision Support System to Implement Units of Alternative Biowaste Treatment for Producing Bioenergy and Boosting Local Bioeconomy. **Energies**, v. 13, n. 9, 2020.
- WANG, Q.; WALTMAN, L. Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. **Journal of Informetrics**, v. 10, n. 2, p. 347–364, 2016.
- ZABANIOTOU, A. *Redesigning* a bioenergy sector in EU in the transition to circular waste-based Bioeconomy-A multidisciplinary review. **Journal of cleaner production**, v. 177, p. 197–206, mar. 2018.

3. ARTIGO 2 – ECOEFICIÊNCIA DOS PRODUTOS FLORESTAIS PARA ENERGIA: UMA ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

RESUMO

Neste artigo, com base na análise de decisão multicritério, foi avaliada a ecoeficiência dos produtos florestais para energia (PFE). As alternativas foram definidas de acordo com a *Food and Agriculture Organization* (FAO), as categorias de PFE selecionadas foram: carvão vegetal, *pellets* de madeira, cavaco de madeira, lenha, briquetes e resíduos florestais. Considerou a seleção de espécies, tecnologias, produtividade de biomassa e rendimento energético. Para medição do desempenho e *Ranking* das categorias de PFE foi utilizado o método de classificação *Promethee* I, fluxos ϕ^+ e ϕ^- na avaliação parcial e *Promethee* II, fluxo líquido ϕ na classificação completa. Os critérios definidos foram: poder calorífico, densidade, teor de umidade, teor de cinzas e teor fixo de carbono. Os resultados sugerem que entre as tecnologias modernas, o *Promethee* II classificou os *pellets* de madeira preferível, com fluxo líquido ϕ de 0,17 e os briquetes, com -0,05. Entre as tecnologias tradicionais, a avaliação completa, apresentou fluxo líquido positivo ao carvão vegetal com 0,21. O cavaco de madeira, lenha e os resíduos florestais não apresentaram um fluxo líquido positivo, obtendo respectivamente -0,03, -0,05, -0,28. O carvão vegetal foi preferível a todas as alternativas em análise, pois obteve o fluxo líquido superior, entre as alternativas. Este estudo concluiu que é possível fazer uma classificação de PFE, por meio da análise multicritério e verificar o PFE que possui melhor ecoeficiência.

Palavras-chave: Bioenergia Florestal, Economia Circular, *Promethee*.

ARTICLE 2 – ECO-EFFICIENCY OF FOREST PRODUCTS FOR ENERGY: A MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS

ABSTRACT

In this article, based on multi-criteria decision analysis, the eco-efficiency of forest products for energy (PFE) was evaluated. The alternatives were defined according to the Food and Agriculture Organization (FAO), the categories of PFE selected were: charcoal, wood pellets, wood chips, firewood, briquettes and forest residues. It considered the selection of species, technologies, biomass productivity and energy yield. To measure the performance and Ranking of the PEF categories, the classification method Promethee I was used, with flows ϕ^+ and $[\phi]^-$ in the partial evaluation and Promethee II, net flow ϕ in the complete classification. The criteria defined were: calorific value, density, moisture content, ash content and fixed carbon content. The results suggest that among modern technologies, Promethee II rated wood pellets as preferable, with a net flux of 0.17 and briquettes, with -0.05. Among the traditional technologies, the complete evaluation showed a positive net flow to charcoal with 0.21. Wood chips, firewood and forest residues did not present a positive net flow, obtaining respectively -0.03, -0.05, -0.28. Charcoal was preferable to all the alternatives under analysis, as it obtained the highest net flow among the alternatives. This study concluded that it is possible to make a PEF classification through multicriteria analysis and to verify the PEF that has the best eco-efficiency.

Keywords: Forest Bioenergy, Circular Economy, *Promethee*.

3.1. INTRODUÇÃO

O sétimo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável - (ODS) vem em defesa da oferta e uso de uma energia limpa e acessível, visando atender às necessidades da economia mundial e proteger o meio ambiente. Ele prevê para 2030 um aumento substancial da participação de energias renováveis na matriz energética global. A bioenergia tem um papel fundamental para as metas de descarbonização e mitigação do desmatamento no mundo (*United Nations Framework Convention on Climate - UNFCCC*, 2021; HOLZINGER, 2020), assim como os recursos florestais têm um papel crucial para redução do aquecimento global. O aumento da demanda por energia, bem como, os problemas ambientais causados pelo consumo de combustíveis fósseis, são desafios enfrentados pela sociedade (ACEVEDO *et al.*, 2020). Desse modo, o uso racional e renovável da energia é uma estratégia central para atingir o ODS 7 no mundo (LI *et al.*, 2020; NABUURS *et al.*, 2017).

A bioenergia representa a maior parte do uso de energia renovável hoje, respondendo por cerca de 9% do fornecimento total de energia primária do mundo. Até o final de 2050 representará 18% do consumo energético global (*International Renewable Energy Agency - IRENA*, 2022). Os produtos florestais para energia (PFE) contribuirão com US\$ 259 bilhões e 1,1 milhão de empregos na economia da América do Norte até 2030. Segundo a *Food and Agriculture Organization - FAO* (2020), a produção de PFE saltou de 2,45 bilhões de m³, em 2010 para 2,64 bilhões de m³, em 2020. A *International Energy Agency – IEA* (2016), prevê um investimento de US\$ 25–60 bilhões por ano até 2030 para atender ao aumento de demanda por biocombustível de madeira e cerca de US\$ 200 bilhões por ano entre 2050 e 2060.

As tecnologias de conversão tradicionais incluem a combustão direta, contudo problemas relacionados a transporte e acessibilidade são fatores que prejudicam sua expansão. As tecnologias modernas de conversão energética ampliam e difundem a biomassa adensada, que torna este combustível acessível ao mercado internacional (DANSO-BOATENG; ACHAW, 2022; SOARES *et al.*, 2021). O conceito de ecoeficiência busca alcançar uma gestão e produção sustentáveis, gerando mais valor, reduzindo o consumo de recursos e os impactos ambientais (REBOLLEDO-LEIVA *et al.*, 2022). Assim, a ecoeficiência dos PFE's deve considerar a seleção de espécies florestais, tecnologias, produtividade e rendimento energético da biomassa (MORENO *et al.*, 2020). As alterações climáticas e os desafios para combatê-las devem ser abordados numa perspectiva de ecoeficiência ao criar economias mais eficientes. Ressalta-se que a ecoeficiência foi introduzida inicialmente pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) no ano de 1992 compõe aspectos econômicos e ambientais

importantes na promoção da prosperidade econômica, utilização dos recursos de forma mais eficiente e redução das emissões (GÓMEZ-CALVET *et al.*, 2016; VERFAILLIE; BIDWELL, 2000).

A análise da gestão e produção sustentável utiliza técnicas de Análise de Decisão Multicritérios (MCDA), introduzidas para classificar alternativas com base na variedade de critérios, sendo necessário o emprego de funções de preferências (TZENG; HUANG, 2011). Myllyviita *et al.* (2017) justifica-se que utilização do método tem hegemonia, em comparação com outras ferramentas de avaliação, como indicadores de sustentabilidade, avaliação do ciclo de vida e análise de custo-benefício. A metodologia *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)* foi desenvolvida por Brans *et al.* (1986). É um dos métodos mais conhecidos e mais amplamente aplicados em análises decisórias (WU; ZHANG; YI, 2020). Para identificar e comparar as tecnologias convencionais e modernas em relação aos critérios técnicos, o *Promethee* se torna viável para avaliar a ecoeficiência dos PFE's.

Alguns testes que aplicam técnicas ao método *Promethee*, foram desenvolvidas no setor bioenergético por Lerche *et al.* (2019) que avaliaram a viabilidade de projetos bioenergéticos. Schröder *et al.* (2019) analisaram cenários do uso da bioenergia no mundo, utilizando critérios de sustentabilidade, econômicos e sociais, onde os *pellets* de madeira apresentaram desempenho relativamente favorável. Li *et al.* (2022) aplicaram o *Promethee* na seleção fontes de energias renováveis na China. Contudo, ainda é uma lacuna a uma análise da ecoeficiência de PFE.

Em busca de constituir um *ranking* das alternativas dos PFE's demonstrando o desempenho técnico e auxiliar na orientação de políticas públicas, neste artigo, por meio da análise de decisão multicritério *Promethee*, foi avaliada a ecoeficiência dos produtos florestais para energia (PFE).

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Objeto de estudo

Os produtos florestais para energia (PFE) foram selecionados como alternativas, e são constituídos pela lenha – Le, carvão vegetal – CV, cavaco de madeira – CM, resíduos de florestais – RF, *pellets* - Pe e briquetes – BT estão disponíveis na *Food and Agriculture Organization* – FAO.

3.2.2. Método Promethee

A Figura 3.1 apresenta que a proposta do Método *Promethee* que consiste em quatro seções: formulação dos problemas; aplicação do método *Promethee*, interpretação de resultados e apoio a decisão. A identificação do problema aborda os recursos de biomassa disponíveis para conversão em energia. Existem limitações nos processos produtivos, que vão desde secagem até transformações físicas. Na natureza, a biomassa vegetal possui características que prejudicam sua ecoeficiência. Desse modo, alta umidade, baixo poder calorífico, baixa densidade aparente e variabilidade de condições levam a baixos desempenhos energéticos.

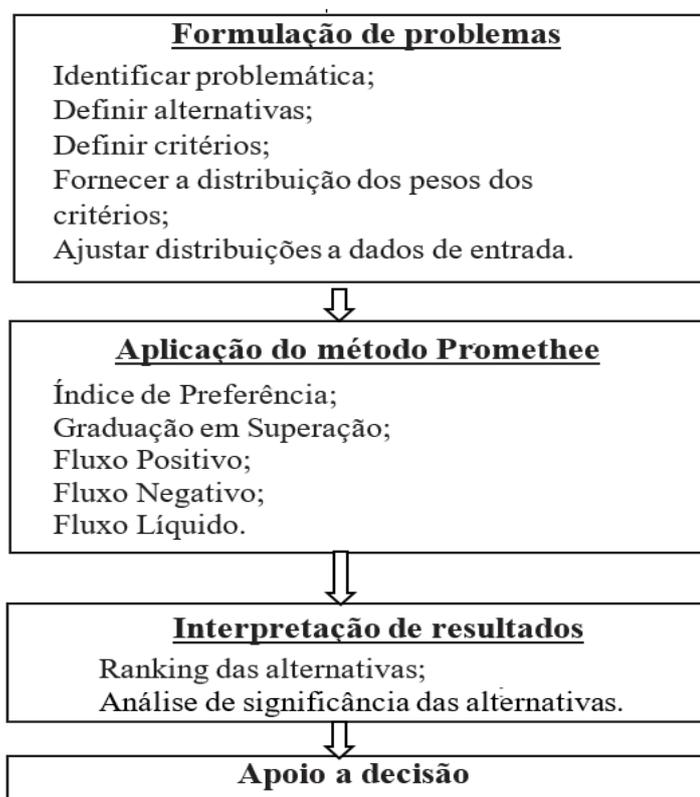


Figura 3.1. Abordagem Proposta do Método *Promethee*.

Fonte: Hyde *et al.* (2003).

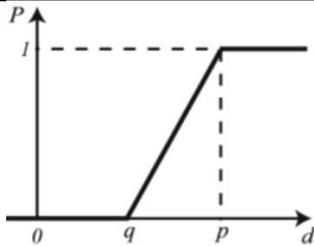
Para definição dos parâmetros técnicos dos critérios realizou uma revisão de literatura, com a base da *Scopus* e *Web of Science* (WoS), utilizados os termos: energia florestal, bioenergia, carvão vegetal, cavaco de madeira, lenha, briquetes, *pellets* de madeira, resíduos florestais. Foram selecionados cinco critérios para de mensurar e descrever diferentes aspectos de PFE: densidade, umidade, teor de cinzas, poder calorífico e teor fixo de carbono.

Foram utilizadas as referências técnicas para o carvão vegetal (JESUS *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2012 E BRAND *et al.*, 2013), cavaco de madeira (LIESKOVSKÝ *et al.*, 2017; CARVALHO *et al.*, 2020 e GENDEK *et al.*, 2016), lenha (Radin e Maia, 2014 e Yazdani

et al., 2020), briquetes (RABIER *et al.*, 2006 E SINGH, 2004), *pellets* de madeira (HALIM e SWITHEBANK, 2016; QUÉNO, 2015; TOSCANO *et al.*, 2013; OHMAN *et al.*, 2004 e RABIER *et al.*, 2006), resíduos florestais (NAM *et al.*, 2020; NUREK *et al.*, 2019; DUKES, BAKER e GREENE, 2013 e WHITTAKER *et al.*, 2011). A definição dos pesos dos critérios foi equivalente, levando em consideração a importâncias de tais aspectos técnicos na análise.

A Tabela 3.1 mostra a função de preferência utilizada foi a Pseudocritério (Função Linear) conforme Brans *et al.* (1986) e a Tabela 3.2 apresenta os parâmetros de preferência, indiferença e peso dos critérios. A função de preferência elimina os efeitos de escalas ligadas às unidades em que os critérios são expressos (BRANS; DE SMET, 2016; BRANS; VINCKE; MARESCHAL, 1986). Os valores de indiferença (q) e preferência (p) podem ser definidos dependendo do tipo de função do critério selecionada.

Tabela 3.1. Função de preferência utilizado na análise dos critérios das alternativas.

Função	Definição	Parâmetro
	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d - q}{p - q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	d (valor do critério); q (limite de indiferença); p (limite de preferência).

Fonte: Brans, Vincke e Mareschal (1986).

Tabela 3.2. Parâmetros de preferência, indiferença e peso dos critérios.

Parâmetros	Densidade	Teor de Umidade	Teor de Cinza	Poder Calorífico	Teor de Carbono
Mini/Maxi	Maximizar	Minimizar	Minimizar	Maximizar	Maximizar
Peso	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
q (limite de indiferença)	311,33	9,81	2,55	1731,71	19,59
p (limite de preferência)	802,18	24,33	6,2	4517,23	47,02

Fonte: Autores, 2022.

A análise de sensibilidade (GAIA) baseia-se na redução do espaço de critérios multidimensionais para um plano de critérios bidimensionais para permitir a apresentação visual direta dos resultados. Os procedimentos de aplicação do método para determinação dos fluxos positivo, negativo e líquido, seguem as seguintes etapas adaptadas de Behzadian *et al.* (2010):

Etapa 1. Determinação de Desvio com base em comparações de par em par entre as alternativas. Quando se deve maximizar a alternativa utiliza a Equação 1, e quando é pra minimizar a alternativa utiliza-se a Equação 2.

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (1)$$

$$d_j(a,b) = g_j(b) - g_j(a) \quad (2)$$

Onde, $d_j(a,b)$ = a diferença entre as avaliações de (a) e (b) em cada critério; $g_j(a)$ = Valor da alternativa (a), em cada critério; $g_j(b)$ = Valor da alternativa (b), em cada critério.

Etapa 2. Aplicação da função de preferência nos resultados dos desvios da comparação de par em par das alternativas para normalizando da avaliação, dado na Equação 3.

$$P_j(a,b) = F_j[(d_j(a,b))] \quad (3)$$

Onde, $P_j(a,b)$ = preferência da alternativa (a) em relação à alternativa (b) em cada critério; F_j = função de preferência escolhida (Pseudocritério Linear).

Etapa 3. Determinação dos pesos dos critérios de avaliação. Em que a soma dos pesos de todos os critérios tem que ser igual a 1, o que é demonstrado na Equação 4.

$$\sum_{j=1}^k W_j = 1 \quad (4)$$

Onde, W_j = Pesos dos critérios de avaliação.

Etapa 4. Cálculo do índice de preferência global, determinado pela Equação 5.

$$\forall a,b \in A, \pi(a,b) = \sum_{j=1}^k P_j(a,b)w_j \quad (5)$$

Onde, $\pi(a,b)$ = a preferência (a) sobre (b) é definido pela soma ponderada de $p(a,b)$ para cada critério e w_j é o peso associado ao critério j .

Etapa 5. Cálculo dos fluxos de superação, no qual demonstra o fluxo positivo e o fluxo negativo, que é somatório de uma alternativa quando foi superior entre as demais alternativas (Equação 6) e o somatório de uma alternativa quando ela foi inferior as demais alternativas (Equação 7).

$$\phi^+_{(a)} = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a,x) \quad (6)$$

$$\phi^-_{(a)} = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (7)$$

Onde, $\phi^+_{(a)}$ = Fluxo de superação positivo para cada alternativa. $\phi^-_{(a)}$ = Fluxo de superação negativo para cada alternativa.

Etapa 6. Cálculo do fluxo líquido de superação, que é a diferença entre o fluxo positivo e o fluxo negativo de uma mesma alternativa, demonstrado na Equação 8.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (8)$$

Onde, $\phi(a)$ = Fluxo líquido de superação de cada alternativa.

O *software* utilizado foi o Visual *Promethee* Acadêmico (GAIA), desenvolvido por Mareschal e Brans (1988).

A interpretação dos resultados foram avaliados em tecnologias modernas e tradicionais e uma avaliação completa entre os dois processos. A análise das tecnologias modernas avaliou a ecoeficiência entre o briquete e o *pellets* de madeira. Na análise das tecnologias tradicionais foram avaliados: carvão vegetal, lenha, resíduos florestais e cavaco, tendo em vista, insights sobre produtividade e aplicabilidade. A análise de sensibilidade, foi possível por meio do *Promethee* I (parcial) que utilizou os fluxos positivo e negativo, e o *Promethee* II (total) que utilizou o fluxo líquido.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Análise dos produtos florestais para energia

A Tabela 3.3 mostra a média dos parâmetros (umidade, teor de cinzas, teor fixo de carbono, densidade e poder calorífico) dos Produtos Florestais para Energia aplicados no Visual *Promethee* Acadêmico (GAIA).

Tabela 3.3. Média dos parâmetros dos Produtos Florestais para Energia.

PFE	Densidade (Kg/m ³)	Umidade (%)	Teor de Cinzas (%)	Poder Calorífico (Kj/kg)	Teor Carbono (%)
Carvão Vegetal	290	5,0	1,9	19.318	71,1
<i>Pellets</i>	1.070	6,6	0,5	17.400	17,7
Cavaco de Madeira	320	38,8	2,6	19.430	5,3
Lenha	706	20,0	2,3	13.524	44,1
Resíduos Florestais	210	20,4	5,9	15.500	18,7
Briquetes	1.138	12,5	9,0	18.199	22,0

Fonte: Os autores (2022).

O carvão vegetal obteve uma maior quantidade de teor fixo de carbono entre as alternativas com 71,1%, sendo preferíveis para uso siderúrgico conforme Neves *et al.* (2011), devido à estabilidade térmica e elevado poder energético. Os resultados sugerem que o baixo teor de umidade do carvão vegetal, com 5%, demonstrou melhores benefícios, inferiores apenas aos *pellets*. Além disso, apontam que as indústrias brasileiras inovaram com tecnologias sua produção em relação a outras regiões. A utilização de florestas plantadas na produção do carvão vegetal tem menor impacto ambiental e contribui na competitividade, emprego e desenvolvimento regional, bem como, desempenha um papel importante contra as mudanças climáticas (SHERWOOD, 2020).

Os *pellets* de madeira tiveram a segunda maior densidade entre os PFE com 1070 kg/m^3 , ficando atrás apenas dos briquetes, onde obteve 1138 kg/m^3 . Segundo Madlener (2005), a alta densidade reduz os custos de transporte na comercialização do combustível sólido. Os *pellets* de madeira apresentaram pouca geração de cinzas entre os PFE, com 0,5%. A densidade de energia das partículas foi maior que a do cavaco. Essas análise infere o fácil manuseio do PFE, devido a facilidade no transporte e alta resistência.

A combinação desses fatores facilita seu transporte, seja em pequenos lotes, granéis, caminhões ou navios, sem afetar seu balanço energético pode ser armazenado por longos períodos de tempo sem perda de matéria seca e sem alterar significativamente sua eficiência térmica (QUÉNO *et al.*, 2019). O uso de fogões e caldeiras com alimentação automática e ajustada durante a combustão permite reduzir a emissão de partículas finas e poluentes, comparados aos tradicionais fogões à lenha (KISTLER *et al.*, 2012).

A biomassa residual apresentou desvantagens como: alto teor de umidade, com 20,4%, natureza fibrosa, alto volume a granel, natureza hidrofílica e baixo poder calorífico (SHARMA; SARMAH; DUBEY, 2020). Simioni *et al.* (2021) observaram variações na qualidade da biomassa, expressa pela redução do teor de umidade e, conseqüentemente, aumento do poder calorífico. Apesar do cavaco de madeira apresentar um alto poder calorífico, também, obteve a umidade elevada. Dukes, Baker e Greene (2013) afirmam que, quanto maior for o teor de umidade na biomassa florestal, maior serão os custos totais do sistema, sendo o pré-tratamento necessários para superar esses desafios.

3.3.2. Classificação das alternativas de processo tecnológico modernos

A Figura 3.2 mostra a classificação parcial e total de preferência da ecoeficiência dos *pellets* e briquetes.

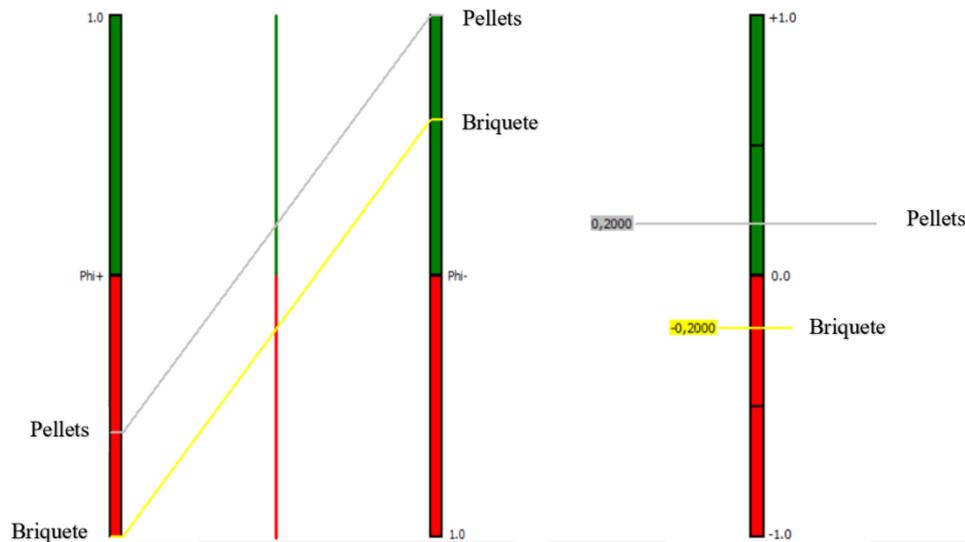


Figura 3.2. Classificação parcial e total de preferência da ecoeficiência dos *pellets* e briquetes. Fonte: Os autores (2022).

Na avaliação do *Promethee* I (parcial) utilizou os fluxos ϕ^+ e ϕ^- . Os *pellets* e briquetes revelaram-se com incomparabilidade, ou seja, no cruzamento de informações não houve grau de preferência, resultando em ecoeficiência semelhantes. Entre os *pellets* e briquetes os critérios de densidade, com 1.070 Kg/m³, 1.138 Kg/m³ e poder calórico 17.400 Kj/kg e 18.199 Kj/kg respectivamente, podem ter influenciado no resultado parcial. A definição dos critérios pode ter influenciado para esses resultados. Os *pellets* de madeira apresentaram fluxo negativo, com 0,06, e fluxo positivo, com 0,22. O briquete apresentou fluxo negativo, com 0,21, e fluxo positivo, com 0,18. A classificação completa pelo *Promethee* II (total) resultou do fluxo líquido ϕ . Os *pellets* de madeira apresentaram-se preferível, com fluxo líquido de 0,17 e os briquetes, com -0,03. A umidade de 6,6%, e o baixo teor de cinzas de 0,5% foram fatores que influenciaram na avaliação completa.

Mohammadi *et al.* (2019) avaliaram o desempenho ambiental dos *pellets*, por meio do ciclo de vida e obteve resultados ótimos acerca da ecoeficiência. O desempenho energético foi relevante na pesquisa, e demonstram que o *pellets* possuem tecnologia semelhante aos briquetes. Kline *et al.* (2021) propõem que o *pellets* de madeira são ótimos aliados à substituição

dos combustíveis fósseis, geram efeitos positivos em energia acessível e limpa (ODS 7), consumo e produção responsável (ODS 12) e vida na terra (ODS 15).

Os resultados inferem que os pontos fortes da cadeia de fornecimento de *pellets* são seu alto potencial energético compactado, reduzindo os custos com transporte. A cadeia de fornecimento de *pellets* oferece uma oportunidade de transição para indústrias e inovações de baixo carbono, incentivando uma melhor gestão de recursos. O resultado do briquete na classificação completa esteve relacionado ao alto teor de cinzas, com 9,0%, prejudicando sua classificação na classificação da ecoeficiência. Deboni *et al.* (2019) e Zajac *et al.* (2018) sugerem que o alto teor de cinza eleva os custos de transporte e reduz a geração de energia líquida, podendo existir substâncias nocivas e prejudiciais ao meio ambiente.

3.3.3. Classificação das alternativas entre as tecnologias tradicionais

A Figura 3.3 reflete a classificação parcial e total de preferência do desempenho ambiental do carvão vegetal, cavaco, lenha, e resíduos florestais.

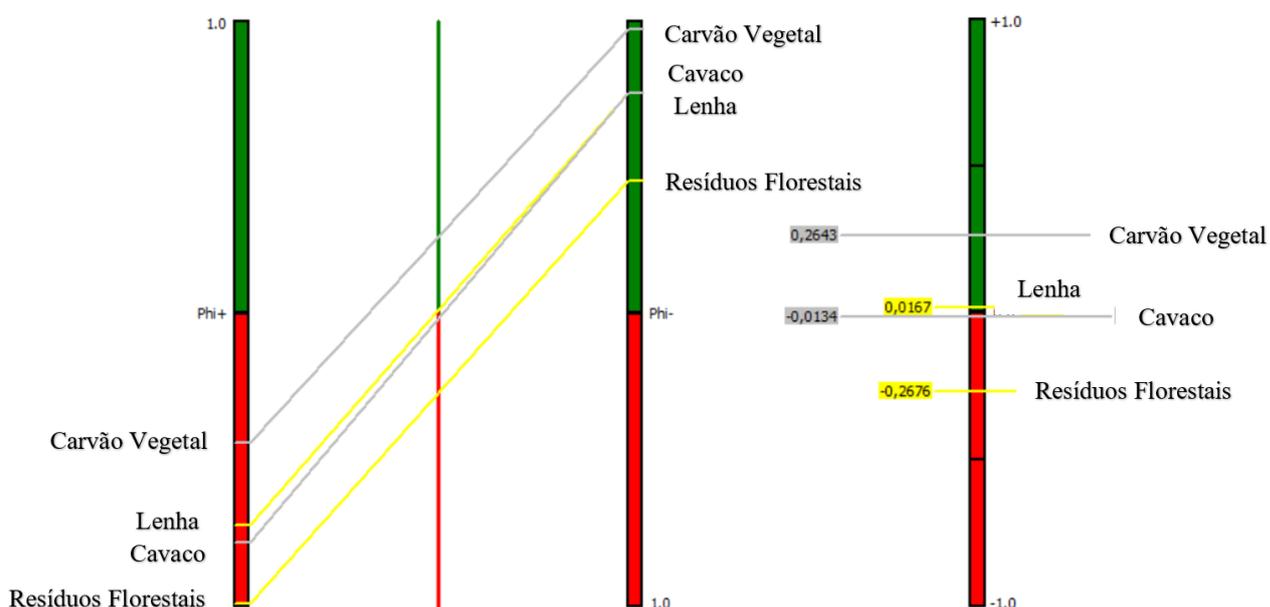


Figura 3.3. Classificação parcial e total de preferência do desempenho ambiental do carvão vegetal, cavaco, lenha, e resíduos florestais.

Fonte: Os autores (2022).

A classificação do *Promethee I* (parcial) entre as tecnologias tradicionais obteve o carvão vegetal e os resíduos florestais como incomparáveis, ou seja, no cruzamento de informações não houve grau de preferência no desempenho ambiental. Entre o carvão vegetal

e os resíduos florestais, os critérios de densidade, com 290 Kg/m³, 210 Kg/m³ e poder calórico 1.318 Kj/kg, 15.500 Kj/kg respectivamente, podem ter influenciado no resultado parcial. O carvão vegetal, por sua vez, apresentou fluxo negativo de 0,09, e fluxo positivo de 0,30, já o resíduo florestal apresentou fluxo negativo de 0,29 e fluxo positivo de 0,01. Embora os resíduos florestais tenham revelado incomparável, ou seja, não houve cruzamento entre os fluxos positivo e negativo, entre as alternativas de PFE, o uso deste produto florestal, obteve crescimento na produção de energia, resultou em uma redução líquida na emissão de CO₂ de acordo com a FAO (2017) e Truong *et al.* (2016). O cavaco de madeira foi preferível em comparação com a lenha, pois apresentou densidade de 320 Kg/m³, poder calorífico de 19.430 Kj/kg, teor fixo de carbono 5,3% valores inferiores à lenha. Ele apresentou fluxo negativo, com valor de 0,15, menor que a lenha, que obteve de fluxo positivo 0,18. Segundo Deboni *et al.* (2019), o mix entre cavaco e resíduos florestais possibilitou melhor desempenho na qualidade do combustível, os autores evidenciaram a diminuição do teor de umidade e cinzas, conseqüentemente, aumento do poder calorífico líquido, resultando em ecoeficiência do PFE.

A avaliação do *Promethee II* (total) obteve fluxos líquidos de preferência com valores entre -0,28 a +0,30, indicando a variação dos fluxos de preferência nas alternativas. O carvão vegetal apresentou fluxo líquido de 0,21. Já, o cavaco de madeira, lenha e os resíduos florestais não apresentaram um fluxo líquido positivo, obtendo respectivamente -0,03, -0,05, -0,28.

O carvão vegetal demonstrou desempenho ambiental superior entre as alternativas em análise. A baixa preferência do cavaco de madeira, lenha e resíduos florestais em comparação ao carvão vegetal, pode ser atribuída a um alto índice de umidade com valores respectivamente de 38,8%, 20% e 20,4%. O cavaco apresentou ecoeficiência entre as alternativas, quando não há uma grande distância entre a fonte de produção da biomassa e o consumidor industrial. O uso dele requer um espaço de estocagem suficiente para permitir-lhe perder sua umidade, a fim de aumentar seu poder energético e evitar sua degradação por agentes biológicos (GEJDOS *et al.*, 2015). Segundo Nam *et al.* (2020) a matéria dos combustíveis sólidos de madeira com umidade acima de 20% geralmente não é preferível, necessitando da secagem como pré-tratamento.

3.3.4. Classificação total dos produtos florestais para energia

A tomada de decisão relacionada aos produtos florestais diz respeito à difícil solução de problemas com interações políticas, econômicas, sociais e ambientais. Diante das limitações na aplicação do método de tomada de decisão multicritério (MCDA), por existirem diversas variáveis, ainda sim, fornece suporte para a situação real da avaliação de desempenho ambiental

e técnica no contexto da produção de bioenergia florestal. A tecnologia de produção de PFE se aperfeiçoou, permitindo o aproveitamento de vários tipos da biomassa florestal. Assim, a produtividade das fábricas aumentou, gerando menor custo de produção em escala, tornando-se competitiva frente às outras fontes de energia (TROMBORG *et al.*, 2013). A Figura 3.4 demonstra a classificação total entre as alternativas PFE.

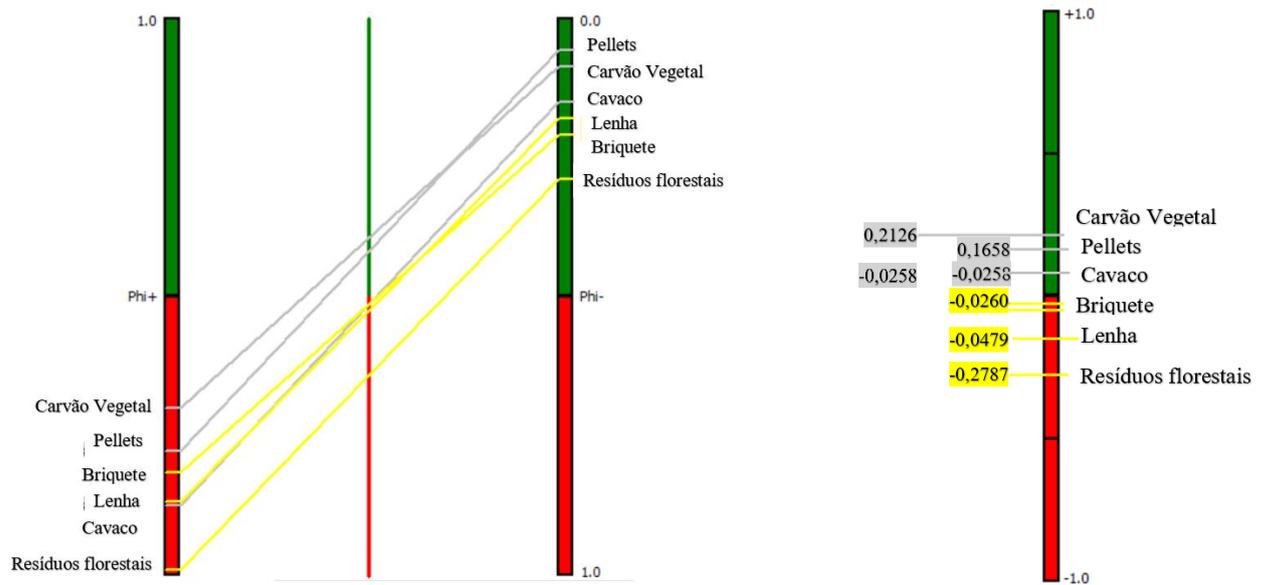


Figura 3.4. Classificação total entre as alternativas dos Produtos Florestais para Energia.
Fonte: Os autores (2022).

A Figura 3.5 apresenta o mapa em plano GAIA dos produtos florestais e dos critérios de avaliação. A análise do plano GAIA identificou os critérios mais importantes que afetam a qualidade do PFE. Critérios localizados próximos ao início do plano de coordenada GAIA apresentam leve impacto nos resultados do *Ranking*. De acordo com Análise GAIA, alternativas mais próximas da orientação do eixo de cada critério são as mais recomendáveis. O eixo de decisão (apresentado como vetor vermelho no plano GAIA) aponta para uma solução ideal. As alternativas mais próximas ao vetor de decisão apresentaram ser ecoeficiente, com base nos resultados, tais alternativas foram são: carvão vegetal e cavaco de madeira, o que os classifica como PFE de preferência.

Por outro lado, a análise GAIA identificou que as mesmas alternativas de preferência, apresentaram elevado teor de cinzas, podendo afetar o desempenho técnico e ambiental de acordo com Dibdiakova *et al.* (2015). As categorias de PFE como lenha e resíduos florestais estão distantes do eixo horizontal do plano GAIA, indicando como de baixa preferência.

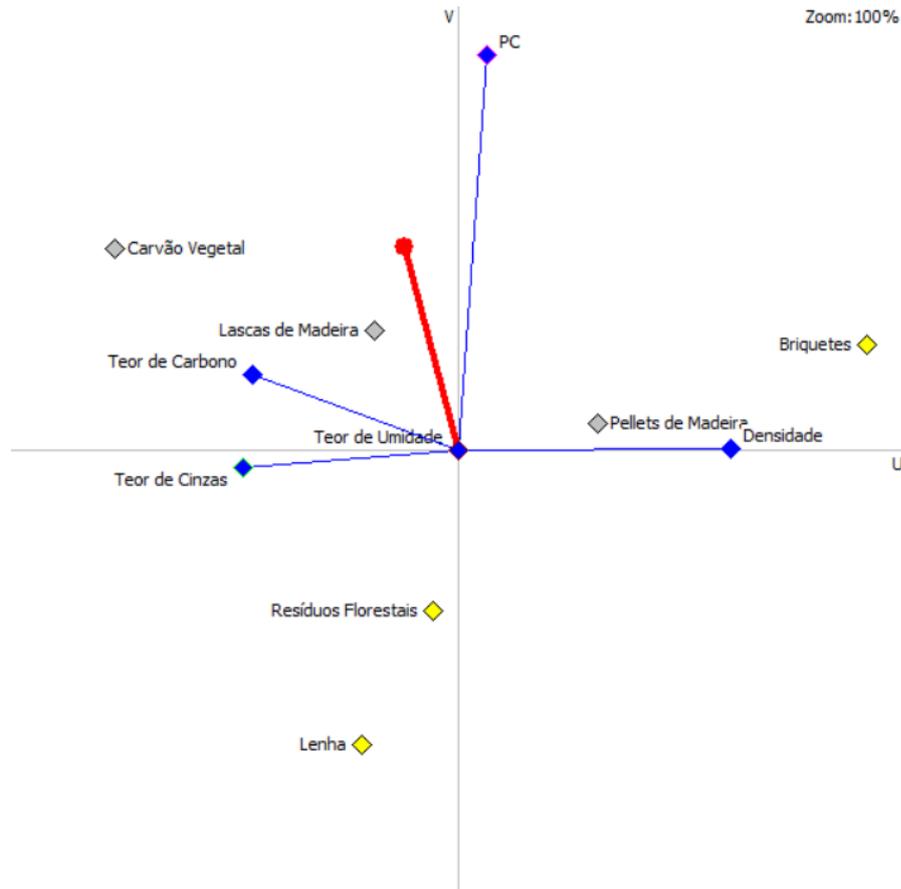


Figura 3.5. Apresentação no plano cartesiano dos produtos florestais para energia
Fonte: Os autores (2022).

3.4. CONCLUSÃO

Um modelo de análise de decisão multicritério foi desenvolvido para classificação da ecoeficiência de PFE. O *Promethee I* (*Ranking* parcial) classificou as tecnologias modernas, *pellets* e briquetes como incomparáveis, pois apresentaram um equilíbrio de desempenho entre os critérios. O *Promethee II* (*Ranking* completo) apresentou fluxo líquido dos *pellets* superior ao dos briquetes, resultado de uma análise de preferência aos *pellets*.

Na avaliação do *Promethee I* (*Ranking* parcial) para as tecnologias tradicionais, o carvão vegetal e resíduos florestais foram classificados como incomparáveis. O cavaco de madeira foi classificado como mais ecoeficiente em comparação a lenha. A classificação completa, por meio do *Promethee II*, apresentou fluxo líquido ϕ positivo ao carvão vegetal, representando o melhor desempenho deste produto florestal. Por fim, o cavaco de madeira apresentou ecoeficiência superior à lenha e aos resíduos florestais.

Logo, este trabalho revelou lacunas entre alguns critérios de PFE's, necessitando assim a inclusão de critérios que possam avaliar qualitativamente. A adição do custo com transporte, degradação biológica, emissão equivalente de CO₂ e logística é proposta para pesquisas futuras.

3.5. REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, D. M. et al. The management of agricultural waste biomass in the framework of circular economy and bioeconomy: An opportunity for greenhouse agriculture in Southeast Spain. **Agronomy**, v. 10, n. 4, 2020.
- BEHZADIAN, M. et al. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 1, p. 198–215, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>>.
- BRAND, M. A. et al. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 41, n. 99, p. 401–410, 2013.
- BRANS, N.; VINKE, P.H. A preference Ranking organization method: the PROMETHEE method for multiple criteria decision making. *Manag. Sci.* 31 (6), 647–656. 1985.
- BRANS, J. P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects : The PROMETHEE method. **European Journal of Operational Research**, v. 24, p. 228–238, 1986.
- BRANS, J. P.; CHEVALIER, A.; KUNSCH, P.; MACHARIS, C.; SCHWANINGER, M. Combining multicriteria decision aid and system dynamics for the control of socio-economic processes. **European Journal of Operational Research**. Res. 109, 428–441. 1998.
- BAILIS, R. et al. Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. *Energy for Sustainable Development, Special Issue on Charcoal*, v. 17, n. 2, p. 189–200, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082612000774>>.
- CARVALHO, D. E. et al. Qualidade energética de cavacos de pinus spp. em diferentes condições de armazenamento. **Energia na Agricultura, Botucatu**, v. 35, n. 2, p. 236–245, abril-junho, 2020, v. 1, n. 9, p. 1–10, 2020.
- DANSO-BOATENG, E.; ACHAW, O. and biofuel production from biomass using thermochemical conversions technBioenergyologies — a review. v. 10, n. June, p. 585–647, 2022.
- DEBONI, T. L. et al. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable Energy**, v. 135, p. 1291–1302, 2019.
- DEBONI, T. L. et al. Models for estimating the price of forest biomass used as an energy source: A Brazilian case. **Energy Policy**, v. 127, n. 2090, p. 382–391, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.021>>.
- DIBDIAKOVA, J.; WANG, L.; LI, H. Characterization of Ashes from *Pinus Sylvestris* forest Biomass. *Energy Procedia, Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015)*, v. 75, p. 186–191, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215010577>>.
- DUKES, C. C.; BAKER, S. A.; GREENE, W. D. In-wood grinding and screening of forest residues for biomass feedstock applications. **Biomass and Bioenergy**, v. 54, p. 18–26, 2013.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Sustainable wood fuel for food security A Smart choice: green renewable and affordable. 2017.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). FAO and the Ministry of Energy of Zambia. Sustainable bioenergy potential in Zambia – An integrated bioenergy and food security assessment. Environment and Natural Resources Management Working Papers No. 84. Rome. 2020.
- GENDEK, A.; ANISZEWSKA, M.; CHWEDORUK, K. Bulk density of forest energy chips. **Ann. Warsaw Univ. Life Sci. – SGGW, Agricult.**, v. 67, p. 101–111, 2016.

- HALIM, S. A.; SWITENBANK, J. Characterisation of Malaysian wood pellets and rubberwood using slow pyrolysis and microwave technology. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 122, p. 64–75, 2016.
- HOLZINGER, H. **The Circular Economy in the European Union**. Cham: Springer International Publishing, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-50239-3>>.
- HYDE, K.; MAIER, H. R.; COLBY, C. Incorporating uncertainty in the Promethee mcdm method. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, cited By 81, v. 12, n. 4–5, p. 245–259, 2003. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33746512815&doi=10.1002%2Fmcdm.361&partnerID=40&md5=1d7b97a477e32a16dbb39942f3c51a3a>>.
- IRENA. Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers. [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_Global_Trade_Hydrogen_2022.pdf>
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. Tracking the Progress of Clean Energy 2016. Energy Technology Perspectives 2016 Excerpt. AIE Entry to the Ministry of Clean Energy. **International Energy Agency**, Paris, France.
- JESUS, M. S. et al. Energy characterization of different species of Eucalyptus. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 11–16, 2017.
- KLINKE, K. L. et al. Effects of Production of Woody Pellets in the Southeastern United States on the Sustainable Development Goals. **Sustainability**, v. 13, n. 2, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/821>>.
- LERCHE, N. et al. Using methods of Multi-Criteria Decision Making to provide decision support concerning local bioenergy projects. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 68, 2019.
- LI, P. et al. A novel PROMETHEE method based on GRA-DEMATEL for PLTSs and its application in selecting renewable energies. **Information Sciences**, v. 589, p. 142–161, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025521013116>>.
- LI, T.; LI, A.; GUO, X. The sustainable development-oriented development and utilization of renewable energy industry—A comprehensive analysis of MCDM methods. **Energy**, v. 212, 2020.
- LIESKOVSKÝ, M. et al. Ash Content vs. the Economics of Using Wood Chips for Energy: Model Based on Data from Central Europe. **BioResources**, v. 12, n. 1, p. 1579–1592, 2017.
- MADLENER, R. Energy systems in transition : perspectives for the diffusion of small-scale wood pellet heating Leif Gustavsson and Krushna Mahapatra. v. 29, p. 327–347, 2005.
- MORENO, V. C. et al. Techno-economic and environmental sustainability of biomass waste conversion based on thermocatalytic reforming. **waste management**, v. 101, p. 106–115, jan. pp.1–22, 2020.
- MOHAMMADI, A. et al. Environmental performance of end-of-life handling alternatives for paper-and-pulp-mill sludge: Using digestate as a source of energy or for biochar production. **Energy**, v. 182, p. 594–605, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421931196X>>.
- MYLLYVIITA, T., ANTIKAINEN, R. AND LESKINEN, P. ‘Sustainability assessment tools –their comprehensiveness and utilisation in company-level sustainability assessments in Finland. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, Vol. 24, No. 3, pp.236–247, 2017.
- NAM, N. H. et al. Physico-chemical characterization of forest and agricultural residues for energy conversion processes. **Vietnam Journal of Chemistry**, v. 58, n. 6, p. 735–741, 2020.
- NABUURS, G. J. et al. By 2050 the mitigation effects of EU forests could nearly double

- through climate smart forestry. **Forests**, v. 8, n. 12, p. 1–14, 2017.
- NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO A. M.; TRUGILHO P. F.; SILVA V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. *Pesqui Florest Bras* 31(68):319–330, 2011.
- NUREK, T.; GENDEK, A.; ROMAN, K. Forest residues as a renewable source of energy: Elemental composition and physical properties. **BioResources**, v. 14, n. 1, p. 6–20, 2019.
- OLIVEIRA, A. C. et al. Evaluation of different levels of thinning on properties of wood and charcoal from Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla. **Floresta**, v. 42, n. 1, p. 59–68, 2012.
- SOARES, H. C. C. et al. Analysis of the worldwide concentration of pellet imports (2012–2018). **Revista Arvore**, v. 45, p. 1–11, 2021.
- QUÉNO, L. R. M. et al. Aspectos técnicos da produção de pellets de madeira. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1478–1489, 2019.
- QUÉNO, L. R. M. Produção de pellets de madeira no Brasil : estratégia, custo e risco do investimento. **Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais**, p. 145, 2015.
- RABIER, F. et al. Particle density determination of pellets and briquettes. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 11, p. 954–963, 2006.
- RADIN, G.; MAIA, C. H. Custo energético de lenha e cavaco de madeira para secagem de grãos em agroindústria. 2014.
- REBOLLEDO-LEIVA, R. et al. Coupling Material Flow Analysis and Network DEA for the evaluation of eco-efficiency and circularity on dairy farms. **Sustainable Production and Consumption**, v. 31, p. 805–817, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922000768>>.
- ROY, B. Modeling Comprehensive Preferences: Three Operational Approaches for Progressing beyond the Description Problematic. p. 237–267, 1996. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-2500-1_11>.
- SCHRÖDER, T. et al. Using PROMETHEE to assess bioenergy pathways. **Central European Journal of Operations Research**, v. 27, n. 2, p. 287–309, 2019.
- SINGH, R. N. Equilibrium moisture content of biomass briquettes. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 3, p. 251–253, 2004.
- SIMIONI, F. J. et al. Eco-efficiency in the transformation of forest biomass residues in electrical energy. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 23, n. 5, p. 1443–1456, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10098-021-02039-6>>.
- SHARMA, H. B.; SARMAH, A. K.; DUBEY, B. Hydrothermal carbonization of renewable waste biomass for solid biofuel production: A discussion on process mechanism, the influence of process parameters, environmental performance and fuel properties of hydrochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 123, p. 109761, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120300575>>.
- TOSCANO, G. et al. Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements. **Biomass and Bioenergy**, v. 56, n. 0, p. 317–322, 2013.
- TZENG, G. H.; HUANG, J.J. Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications. CRC Press, Taylor and Francis Group, A Chapman & Hall Book, Boca Raton. 2011.
- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE (UNFCCC). Glasgow Climate Pact., 2021. v. 2. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf>>.
- WHITTAKER, C. et al. Energy and greenhouse gas balance of the use of forest residues for bioenergy production in the UK. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 11, p. 4581–4594, 2011.
- WU, Y.; ZHANG, T.; YI, L. An Internal Type-2 Trapezoidal Fuzzy Sets-PROMETHEE-II based Investment Decision Framework of Compressed Air Energy Storage Project in China

under the Perspective of Different Investors. **Journal of Energy Storage**, v. 30, 2020.

YAZDANI, M. G.; LIGOH, N.; ALI, M. H. Properties and environmental impact of available firewood in Brunei Darussalam. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 476, n. 1, 2020.

ZAJAC, G. et al. Chemical Characteristics of Biomass Ashes. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 2885, 24 out. 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2885>>.

4. ARTIGO 3 – CONCENTRAÇÃO DO MERCADO INTERNACIONAL DOS PRODUTOS FLORESTAIS PARA ENERGIA

RESUMO

Neste artigo foi analisada a concentração no mercado internacional dos produtos florestais para energia (PFE) entre 1961 a 2020. Para tanto foram utilizados dados de produção, exportação e importação dos PFE estão disponíveis na *Food and Agriculture Organization* (FAO). Os indicadores aplicados foram a Razão de Concentração [CR(k)], Índice de *Herfindahl-Hirschman* (HHI), o Índice de Entropia de Theil, Índice de concentração compreensível (CCI) e o coeficiente de Gini (G). Os principais resultados mostram que o PFE representou 2,4 bilhões de m³ na produção energética mundial e um crescimento médio de 7,4% a.a. Os PFE's mais significativos na produção e no consumo aparente foram a lenha, o cavaco e os resíduos de madeira, sendo os principais países produtores a China, a Índia, o Brasil e os Estados Unidos. Percebeu-se que os índices CR(4) e CR(8) nas primeiras décadas (1961-1981) foram moderadamente altos, tendo uma leve queda nas últimas décadas (1990-2020). Além disso, O índice de G indicou um leve aumento na desigualdade a partir de 1991 nas importações e exportações, representando uma maior participação dos países no mercado global do PFE. Os países com expressiva participação na produção, importação e exportação, devem buscar estratégias comerciais para reter as vantagens competitivas conquistadas.

Palavras-Chave: Bioenergia, Economia Florestal, Mercado Internacional.

ARTICLE 3 – CONCENTRATION OF THE INTERNATIONAL MARKET FOR FOREST PRODUCTS FOR ENERGY

ABSTRACT

In this article, the concentration in the international market of forest products for energy (PFE) between 1961 and 2020 was analyzed. For this purpose, data on production, export and import of PFE were available at the Food and Agriculture Organization (FAO). The indicators applied were the Concentration Ratio [CR(k)], Herfindahl-Hirschman Index (HHI), Theil's Entropy Index, Comprehensive Concentration Index (ICC) and the Gini coefficient (G). The main results show that PFE represented 2.4 billion m³ in world energy production and an average growth of 7.4% p.a. The most significant PFE's in production and apparent consumption were firewood, chip and wood residues, with the main producing countries being China, India, Brazil and the United States. The CR(4) and CR(8) indices in the first decades (1961-1981) were moderately high, with a slight decrease in the last decades (1990-2020). The G index indicated a slight increase in inequality from 1991 onwards in imports and exports, representing a greater participation of countries in the global PEF market. Countries with significant participation in production, imports and exports should seek commercial strategies to retain the competitive advantages they have gained.

Keywords: Bioenergy, Forest economy, International market.

4.1. INTRODUÇÃO

O combustível proveniente dos produtos florestais tem um papel importante na garantia e manutenção da segurança energética e alimentar para um terço da população mundial (*Food and Agriculture Organization - FAO, 2017*). Os produtos florestais para energia (PFE) percorrem o espectro de madeira como lenha, cavaco, resíduos de madeira até produtos altamente processados, como *pellets* de madeira, carvão vegetal e outros aglomerados. Nos últimos anos, a biomassa florestal, constitui a maior parte do fornecimento de bioenergia em todos os continentes (*World Bioenergy Association - WBA, 2020*), impulsionando um futuro de baixo carbono e a utilização de novas tecnologias com propósitos de criar produtos e serviços mais sustentáveis, também chamada de bioeconomia (*CHUDY et al., 2019*).

A bioenergia teve uma participação significativa em termos de energia gerada através de calor direto nos continentes, variando de 89% na Oceania a 100% na África. Ela é a maior fonte de calor renovável do mundo, com uma participação de mais de 95%, seguida pela energia solar com 3% e geotérmica com 2% (*WBA, 2020*). As culturas florestais são bem conhecidas por sua capacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e aumentar o estoque de carbono do solo. Ao fazê-lo, três dos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas são alcançados, a saber, ODS 2 sobre segurança alimentar e agricultura sustentável, ODS 7 sobre energia acessível, sustentável e moderna e ODS 13 sobre ação para combater as mudanças climáticas e seus impactos (*BONFANTE et al., 2017*).

A produção do PFE no mundo vem crescendo nos últimos anos, contribuindo com US\$ 259 bilhões e 1,1 milhão de empregos na economia da América do Norte até 2030 (*KAIRYTE et al., 2020; FAO, 2017*). O Relatório de Avaliação Global dos Recursos Florestais - FRA (2020), produzido pela FAO (2021), informa ainda que 93% (3,75 bilhões de ha) da área de florestas em todo o mundo são compostos por florestas nativas e 7% (290 milhões de ha) por florestas plantadas. É interessante notar que o documento mostra que mais da metade das florestas do mundo (54%) está localizada em apenas cinco países: Rússia, Brasil, Canadá, Estados Unidos e China. Estima-se no mundo que cerca de 2,7 bilhões de pessoas dependem de combustíveis sólidos providos das florestas (*FAO, 2017*). O desenvolvimento de uma bioeconomia nesta área está associado às estratégias de diversificação, principalmente, em setores pouco explorados, mas com potencial de crescimento e poder de mercado, como o PFE no mundo, conjugada à própria necessidade de conseguir economias de escala e escopo (*COELHO JUNIOR et al., 2010*).

No sentido *lato* em economia industrial, entende-se "concentração de mercado" como um processo que consiste no aumento do controle exercido pela atividade econômica, sendo dos componentes mais importantes para analisar a competição entre os países. A concentração de mercado é um elemento da estrutura de mercado importante na determinação do seu comportamento e, conseqüentemente, na determinação da qualidade da atuação do setor (CHEUNG *et al.*, 2017; BUSU, 2020; SHEETAL *et al.* 2020).

Existe uma relação inversa entre concentração e concorrência, sendo que, à medida que se eleva a concentração, o grau de competição diminui e amplia o poder de mercado das firmas (POSSAS, 1999). O poder de mercado se configura na participação que uma determinada empresa possui no seu setor industrial. Já os indicadores de concentração são elementos empíricos necessários à análise da estrutura de mercado e evidenciam a dimensão da competitividade (HAGUENAUER, 2012).

Pesquisas recentes sobre a concentração de mercado foram as de Yumou & Shilong (2021) que evidenciaram a competição na construção civil na China; e de Kozak & Wierzbowska (2021), sobre o mercado bancário no Sul Leste e Europa Central. No setor florestal, Coelho Junior *et al.* (2020) estudaram as usinas termelétricas de base florestal no Brasil; Coelho Junior *et al.* (2019) discorrem sobre o valor bruto da produção de lenha na Paraíba e da produção de carvão vegetal no estado da Paraíba; Pjanic *et al.* (2018) analisaram a concorrência do mercado de empreendimentos florestais e agropecuários em Voivodina e Schettini *et al.* (2016), investigaram a competitividade do mercado internacional de *pellets*.

Conhecer a concorrência do mercado no setor do PFE é fundamental para a tomada de decisão dos segmentos que dependem dessa matéria-prima. Logo, este artigo analisou a concentração do mercado internacional dos produtos florestais para energia, entre 1961 a 2020.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Dados utilizados

Com base nas informações disponíveis na *Food and Agriculture Organization* - FAO, os produtos florestais para energia (PFE) foram constituídos pela lenha – Le [metro cúbico (m³)], carvão vegetal – CV [toneladas (t)], cavaco (cavaco) – LM [metro cúbico (m³)], dos resíduos de madeira – RM [metro cúbico (m³)], dos *pellets* - Pe [toneladas (t)], e dos outros aglomerados (briquetes) – OA [toneladas (t)]. Para uniformizar as unidades de medida dos PFE para m³, foi realizada a conversão pela densidade média de 350 kg/m³ para o carvão vegetal (PROTÁSIO *et al.*, 2021; ZUBAIRU & GANA, 2014), de 725 kg/m³ de *pellets* (RABIER *et*

al., 2006; TUMULURU, 2018) e de 1100 kg/m³ dos briquetes (BRAMMER, LAUER & BRIDGWATER, 2006).

Para mensurar a concentração mundial dos PFE pelo somatório dos países da produção - P, das exportações - X e das importações - M e o consumo aparente (CA) conforme Equação 1, no período de 1961 a 2020.

$$CA_{ij} = P_{ij} + X_{ij} - M_{ij} \quad (1)$$

em que,

CA_{ij} = consumo aparente do produto florestal para energia i no ano j ;

P_{ij} = produção do produto florestal para energia i no ano j ;

M_{ij} = importação do produto florestal para energia i no ano j ;

X_{ij} = exportação do produto florestal para energia i no ano j .

Para avaliação da conjuntura dos PFE nos países, foi apresentado o total gerado em 1961 – 2020, 1961 – 1980, 1981 – 2000 e 2001 – 2020. Utilizou-se a Taxa de crescimento geométrica (TGC) para observar as alterações (ganhos e perdas) no PFE entre 1961 e 2020. De acordo com Cuenca e Dompieri (2017), é expressa em porcentagem anual (% p.a.) pela Equação 2.

$$TGC = \left(\sqrt[n]{\frac{V_t}{V_0}} - 1 \right) * 100 \quad (2)$$

em que,

V_t = exportações do produto florestal para energia no último ano (2020);

V_0 = exportações do produto florestal para energia no ano inicial (1990);

n = variação temporal do consumo (expresso em anos totais).

4.2.2. Medidas de concentração e de desigualdade

As medidas de concentração podem ser classificadas como parciais ou sumárias. A concentração do mercado do PFE foi determinada por meio de índices parciais (parte dos dados) e sumários (totalidade dos dados). O índice parcial usado foi a razão de concentração e os índices sumários utilizados foram o Índice de *Hirschman-Herfindahl*, o Índice de Entropia de *Theil*, Índice de Concentração Integral e Coeficiente de Gini.

4.2.3. Razão de concentração

A Razão de concentração [CR(p)] foi proposta por Bain (1959). Este indicador avaliou a parcela dos principais países produtores, exportadores e importadores de produtos florestais

para energia p ($i = 1, 2, 3, \dots, p$) de fontes da FAO. Compreende a forma algébrica na Equação 3, da Razão de Concentração como:

$$CR(p) = \sum_{i=1}^p S_i \quad (3)$$

Onde,

$CR(p)$ = Razão de Concentração de p países participantes do mercado de produtos florestais para energia;

S_i = *market share*, em porcentagem, do país i participantes do mercado de produtos florestais para energia.

Convencionalmente, utiliza-se o $CR(4)$, $CR(8)$, para a análise de concentração dos países. Conforme o valor do índice aumenta, eleva-se o poder dos maiores países participantes do mercado de produtos florestais para energia.

O $CR(k)$ varia entre 0 e 100% e conforme Bain (1959) pode ser classificado em: Baixo [$CR(4) < 35\%$; $CR(8) < 45\%$], Moderadamente Baixo [$35\% \leq CR(4) < 50\%$; $45\% \leq CR(8) < 70\%$], Moderadamente Alto [$50\% \leq CR(4) < 65\%$; $70\% \leq CR(8) < 85\%$], Alto [$65\% \leq CR(4) < 75\%$; $85\% \leq CR(8) < 90\%$] e Muito Alto [$CR(4) \geq 75\%$; $CR(8) \geq 90\%$].

4.2.4. Índice de Herfindahl–Hirschman

O Índice *Herfindahl-Hirschman* (HHI), também conhecido como Índice Herfindahl, é uma ferramenta de análise de concentração de mercado proposta por Hirschman (1945) e Herfindahl (1950), o qual apresenta vantagens como a capacidade de agregar o total de países participantes do mercado de produtos florestais para energia (RESENDE, 1994).

O HHI mede a concentração industrial utilizando os dados de todos os países, em dada indústria, por meio da Equação 4:

$$HHI = \sum_{i=1}^p S_i^2 \quad (4)$$

Em que,

p = número de países que participam do mercado de produtos florestais para energia;

s_i = *market share*, em porcentagem, do país i para o valor da participação dos países no mercado de produtos florestais para energia.

O HHI evidencia os pesos relativos da participação de cada país. Ao se elevar ao quadrado o *market share* dos países, atribui-se um maior peso aos que têm maior participação. Segundo Resende (1994), o limite inferior do índice é $1/p$, situação em que todos os países têm o mesmo tamanho. Já o limite superior do índice é igual a 1, indicando haver uma concentração máxima, quando há uma situação de monopólio. Para o uso de análises comparativas, quando

ocorre uma variação no número de países, Resende (1994) sugeriu um ajuste na fórmula do *HHI*, de acordo com a Equação 5, da seguinte forma:

$$HHI' = \frac{1}{(p-1)}(pHHI - 1); p > 1 \quad (5)$$

Após o ajuste, o *HHI'* é avaliado entre 0 e 1, sendo que 0 implica em condições de desconcentração e 1 implica em monopólio, no qual a medida que o índice se afasta de zero, maior será a concentração.

O índice alterna entre 0 e 1, Resende e Boff (2002) classificam em: desconcentrado ($0 \leq HHI' < 0,10$), pouco concentrado ($0,10 \leq HHI' < 0,15$), moderadamente concentrado ($0,15 \leq HHI' \leq 0,25$), Alta concentração ($HHI' > 0,25$).

4.2.5. Índice de entropia de Theil (E)

O cálculo deste índice é o inverso da concentração, ou seja, quanto menor o valor do índice, mais concentrado o setor. Proposto por Theil (1967), o Índice de Entropia foi originalmente formulado para se verificar o conteúdo informacional da mensagem que as firmas transmitiriam, dado o grau de surpresa que as mesmas teriam, diante de certo evento. O índice, porém, pode ser aplicado à economia industrial para medir a concentração de qualquer setor. A fórmula matemática, com base na Equação 6, utilizada para o cálculo da Entropia (*E*) é:

$$E = -\sum_{i=1}^p S_i \cdot \ln(S_i) \quad (6)$$

em que,

p = número de nações que participam do mercado mundial de produtos florestais para energia;

S_i = *market share* do país *i* no mercado mundial de produtos florestais para energia;

ln = logaritmo neperiano.

Um número maior de países implica em um valor mais elevado da *Entropia*, dependendo do quão desigual é o tamanho das mesmas. Em situações de monopólio, o valor da Entropia é igual a zero, o que significa concentração máxima. Já o limite superior do índice é igual a $\ln(n)$, isto é, os países possuem parcelas iguais de mercado e concentração mínima (RESENDE; BOFF, 2002).

Resende (1994), sugeriu que, para análises intertemporais, a expressão para o cálculo da Entropia fosse ajustada de acordo com a Equação 7:

$$E' = -\frac{1}{\ln(p)} \sum_{i=1}^p S_i \cdot \ln(S_i) \quad (7)$$

Assim, a Entropia será avaliada entre 0 e 1, sendo que 0 implica monopólio (concentração máxima) e 1 implica em concorrência perfeita (concentração mínima).

4.2.6. Índice de concentração compreensível (CCI)

O Índice de concentração compreensível (CCI), proposto por Horvarth (1970), é capaz de medir tanto a dispersão relativa quanto a magnitude absoluta, e apresentar uma forma de solucionar algumas das deficiências apresentadas pelos indicadores mencionados. Seus limites são 0 a 1, representando monopólio quando o valor for igual 1, ao passo que um valor próximo de 0 representa desconcentração. O cálculo do CCI está exposto na Equação 8.

$$CCI = S_1 + \sum_{i=2}^n S_i^2 [1 + (1 - S_i)] \quad (8)$$

Onde,

S_1 = maior participação de mercado entre os países organizados em ordem decrescente.
 S_i = participação de mercado do país i no mercado de produtos florestais para energia.

4.2.7. Coeficiente de Gini (G)

O Coeficiente de Gini (G) é uma medida de desigualdade desenvolvida por Gini (1912). Este índice foi originalmente criado para medir a desigualdade de renda e pode, também, ser usado para medir o grau de desigualdade do PFE no mundo. O índice de Gini é uma ferramenta complementar aos coeficientes de concentração, uma vez que uma concentração elevada implica em uma desigualdade maior. O coeficiente de Gini (G) é, representado pela Equação 9.

$$G = 1 - \frac{\sum_{i=1}^p (S_{ij} + S_i)}{p} \quad (9)$$

Em que,

p = número de países participativos no mercado florestal para energia;
 S_{ij} = participação cumulativa no mercado florestal para energia em ordem crescente;
 S_i = *market share*, em porcentagem, do país i no mercado florestal para energia.

O indicador alterna entre 0 e 1, classificando a desigualdade em: nula a fraca ($0 < G \leq 0,25$), fraca a média ($0,25 < G \leq 0,5$), média a forte ($0,5 < G \leq 0,7$), forte muito forte ($0,7 < G \leq 0,9$) e muito forte a absoluta ($0,9 < G \leq 1$).

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. O mercado internacional dos produtos florestais para energia

A Figura 4.1 apresenta a evolução do mercado internacional do PFE, no período de 1961 a 2020. Houve um aumento na quantidade produzida, passando de 1,5 bilhões de m^3 , em 1961, para 2,6 bilhões de m^3 , em 2020. Segundo a FAO (2021), 168 países estiveram participando deste comércio em 1961 e a quantidade ao longo dos anos oscilou pouco, chegando a 197, em

2020. No período de 1961-2020, foram produzidos por categoria do PFE em termos percentuais, 86,3% de lenha, 4,7% de carvão vegetal, 4,9% de cavaco, 3,8% de resíduos de madeira, ficando abaixo de 1% os *pellets* de madeira e outros aglomerados.

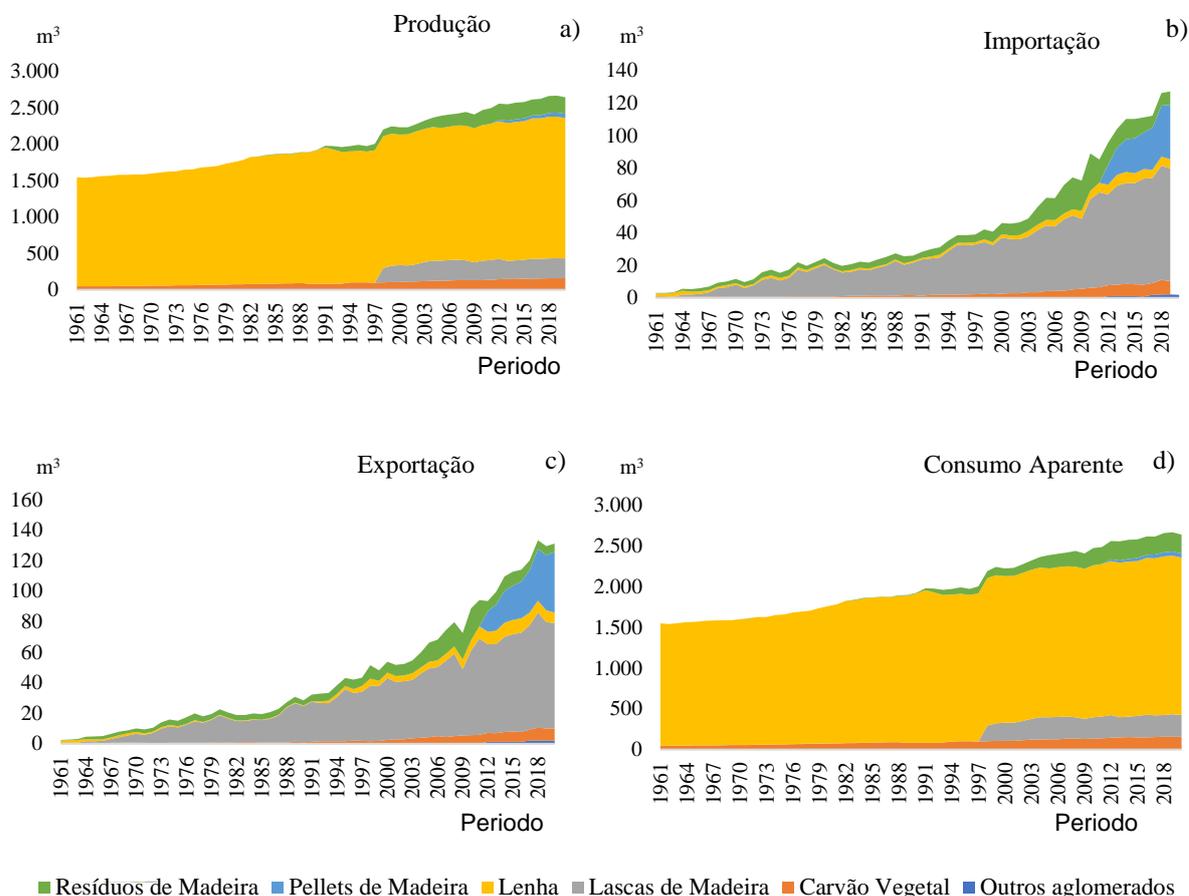


Figura 4.1. Evolução da produção (a), importação (b), exportação (c) e consumo aparente (d) dos produtos florestais para energia categorizados, em milhões de m^3 no mundo entre 1961 a 2020.

Fonte: FAO (2022).

No período de 1961-1980, o consumo mundial do PFE cresceu a uma taxa média de 0,6% ao ano. Em 1980 o valor total das exportações mundiais do PFE foi de US\$ 860,09 milhões. Historicamente a lenha foi a categoria do PFE mais produzida no mundo, pois ela é uma importante fonte de energia primária, tanto para países desenvolvidos como para a população dos países em desenvolvimento. A madeira, uma categoria do PFE, representava a primeira fonte de energia do Brasil até o ano de 1972, quando sua liderança foi perdida e substituída pela energia derivada do petróleo (BRITO, 1990).

Em 1973, a crise mundial do petróleo, resultou no aumento de quatro vezes nos preços do petróleo (VENN, 2016) o que possivelmente contribuiu, no ano seguinte, com o crescimento médio no consumo do PFE, que saltou de 0,1% em 1973, para 1,4% em 1974 e se manteve em

crescimento nos anos seguintes. No período de 1981-2000, as exportações cresceram a taxa anual de 4,9%, partindo de US\$ 948,09 milhões e chegando a US\$ 2,19 bilhões. O número de países importadores do PFE saltou de 41 para 140, o que tornou o mercado global mais competitivo. As políticas energéticas globais, que estimularam a conservação e o desenvolvimento de fontes alternativas de energia, a exemplo do Projeto Independência, anunciado pelo presidente dos Estados Unidos, Richard Nixon, em reação ao embargo petrolífero da *Organization of Petroleum Exporting Countries* – OPEC (VENN, 2016).

No período de 2001-2020, houve uma crescente produção do PFE, a taxa anual de 0,8% e o valor da produção passaram de 2,2 bilhões de m³ em 2001, para 2,6 bilhões de m³ em 2020. Neste ciclo, com as conferências e metas globais para redução do aquecimento global, incentivou a abertura do livre comércio energético, portos foram abertas, com o objetivo de desenvolver sistemas globais de logística, facilitando o bom fluxo de pessoal, bens, fundos e tecnologia (YANG, 2009). O ano de 2012 é o marco da inserção de categorias do PFE no mercado global, a exemplo de: *pellets* e outros aglomerados. Devido à importância crescente dos *pellets* e outros aglomerados como combustível de biomassa na Áustria e na Europa, muitas empresas entraram neste mercado (KARKANIA; FANARA; ZABANIOTOU, 2012; YULDASHEV *et al.*, 2020). Entre as categorias do PFE nas exportações mundiais se destaca o cavaco, com valor total da exportação mundial, foi de US\$ 1,5 bilhões em 2001 e US\$ 4,9 bilhões em 2020, com crescimento anual de 6%. No período de 1961-2021, as exportações de cavaco contribuíram com 64,8%, seguido dos resíduos de madeira (13,3%), dos *pellets* (8,8%), do carvão vegetal 5,7%, da lenha (6,8%) e dos outros aglomerados (0,6%).

A Tabela 4.1 apresenta o *Ranking* dos 10 maiores países em produção, importação, exportação e consumo aparente do PFE. Os principais países foram: China, Índia, Brasil, Estados Unidos, Etiópia, Congo, Nigéria, Gana, Uganda e Indonésia, que somaram em 2020 uma produção de 1,3 bilhões de m³, uma representatividade de 52% no mercado global. O Brasil, os EUA e a China, têm grande influência neste mercado, pois ocupam elevada área florestal (WBA, 2020). Os principais países na importação do PFE foram Japão, China, Reino Unido, República da Coreia, Dinamarca, Itália, Finlândia, Polônia, França e Áustria, somaram um total de 1,12 milhões de m³ em 1961. Em 2019, a representatividade dos dez principais países foi de 89,04 milhões de m³ (Tabela 4.1), uma parcela de 70%. O relatório de 2015 da *Environmental Investigation Agency* - EIA, inferiu que estimular o mercado bioenergético mediante a criação de leis e regulamentação, bem como, um sistema de registro voluntário para importadores, comerciantes e varejistas de produtos de madeira, eleva o desempenho no mercado florestal.

Tabela 4.1. *Ranking* dos 10 maiores países do PFE (base = 2020) para a produção, importação, exportação e consumo aparente ($\times 10^6$ m³) para 1961, 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2020.

	Países	1961	1970	1980	1990	2000	2010	2020
Produção	China	285,09	302,10	321,94	292,85	244,74	302,49	314,21
	Índia	157,17	190,42	235,67	280,54	282,13	317,54	310,47
	Brasil	98,51	110,57	126,68	133,53	150,55	139,96	175,32
	Estados Unidos	41,43	35,82	72,50	83,55	134,85	97,24	147,46
	Etiópia	40,05	48,04	58,82	77,15	95,79	111,97	126,38
	Congo	19,00	24,95	33,78	46,44	68,99	82,39	94,45
	Nigéria	38,44	41,81	46,03	57,01	68,16	74,47	79,89
	Gana	6,58	8,30	10,74	14,39	29,69	42,35	53,52
	Uganda	14,52	19,46	27,06	30,87	36,13	42,30	47,53
	Indonésia	236,50	199,97	166,00	126,40	91,92	63,30	44,71
	Total Top 10	937,29	981,43	1099,23	1142,74	1202,95	1274,00	1393,94
Resto do mundo	608,45	616,96	657,07	779,59	1027,16	1195,42	1272,42	
Total Mundial	1545,74	1598,39	1756,30	1922,33	2230,11	2469,42	2666,36	
Importação	Japão	0,03	6,32	16,40	14,31	20,29	22,14	24,11
	China	0,32	0,13	0,28	1,23	2,23	10,19	20,60
	Reino Unido	0,07	0,15	0,06	0,19	0,36	1,12	13,05
	República da Coreia	-	-	-	0,13	1,92	1,41	5,70
	Dinamarca	-	-	0,04	0,12	1,09	2,95	5,46
	Itália	0,62	0,50	0,68	0,90	2,70	4,77	5,19
	Finlândia	0,04	0,76	0,34	0,35	1,36	4,46	4,40
	Polônia	-	-	-	-	0,01	0,74	3,59
	França	0,01	0,11	0,52	0,68	0,99	1,47	3,56
	Áustria	0,04	0,16	0,31	0,78	1,12	2,86	3,37
	Total Top 10	1,12	8,14	18,62	18,69	32,08	52,10	89,04
Resto do mundo	1,86	3,57	5,89	7,34	13,95	36,92	38,15	
Total Mundial	2,99	11,71	24,51	26,03	46,03	89,02	127,19	
Exportação	Vietnã	-	-	-	-	0,45	7,69	22,15
	Estados Unidos	0,01	3,56	6,53	8,15	8,69	6,06	15,32
	Austrália	-	-	6,60	5,06	10,29	10,46	14,19
	Chile	-	-	-	3,30	2,59	4,58	5,57
	Rússia	-	0,00	0,00	0,00	1,82	4,20	5,45
	Bielorrússia	-	-	-	-	0,02	0,46	4,97
	Letônia	-	-	-	-	0,92	4,54	4,58
	Canadá	0,28	1,43	1,93	1,74	1,89	3,38	4,16
	Alemanha	0,05	0,18	0,72	1,86	4,56	4,73	3,85
	Tailândia	0,13	0,04	0,11	0,06	0,79	3,20	3,07
	Total Top 10	0,47	5,22	15,89	20,17	32,00	49,31	83,30
Resto do mundo	1,96	4,78	6,71	8,36	21,69	39,31	46,14	
Total Mundial	2,43	9,99	22,60	28,53	53,69	88,63	129,44	
Consumo Aparente	China	285,40	302,21	322,21	293,61	243,90	312,41	334,56
	Índia	157,17	190,42	235,69	280,54	282,12	317,49	310,28
	Brasil	98,51	110,57	126,61	133,51	149,29	138,45	173,44
	Estados Unidos	41,73	33,50	67,16	76,86	127,58	92,27	133,23
	Etiópia	40,05	48,04	58,82	77,15	95,79	111,97	126,38
	Congo	19,00	24,95	33,78	46,44	68,99	82,04	94,45
	Nigéria	38,44	41,81	46,03	57,01	68,08	74,22	79,40
	Gana	6,58	8,30	10,74	14,39	29,69	42,33	53,51
	Uganda	14,52	19,49	27,06	30,87	36,13	42,30	47,53
	Indonésia	236,47	199,90	165,88	125,45	91,27	61,44	44,12
	Total Top 10	937,86	979,19	1093,99	1135,84	1192,83	1274,92	1396,89
Resto do mundo	608,44	620,92	664,22	783,99	1029,61	1194,89	1267,22	
Total Mundial	1546,29	1600,11	1758,21	1919,83	2222,44	2469,81	2664,12	

Fonte: FAO (2022).

A partir de 1961 até a década de 1990 (30 anos), as exportações somaram aproximadamente 445 milhões de m³, e entre 1991 a 2010 (20 anos), houve um volume na exportação equivalente a 1 bilhão de m³. As exportações do PFE, no período de 2011 até 2020 (10 anos), atingiram 1 bilhão de m³, tais valores expressaram rápido crescimento na série histórica. Isso ocorre por diversos fatores, pelo crescimento na produção nas regiões tradicionais, inserção de novas categorias do PFE e a inovação tecnológica (SIMIONI *et al.*, 2021).

Observou-se que houve crescimento do consumo aparente no período em estudo, porém de 1991 a 1997 verificou-se uma redução no consumo de lenha e de resíduos de madeira, o que apenas em 1998 foi recuperado. Nos anos seguintes, o crescimento do consumo se tornou aproximadamente constante para a lenha. Os resíduos de madeira existiram um moderado crescimento. A recessão do início da década de 1990 afetou o mercado bioenergético. Acredita-se que isso se deva ao aperto da política monetária em resposta às preocupações com a inflação, o choque do preço do petróleo em 1990, a perda de confiança dos consumidores e das empresas devido ao fim da Guerra Fria e a subsequente recessão (KANG; RATTI; YOON, 2015).

A Tabela 4.2 ilustra o *Ranking* da produção do PFE por categoria, tendo como base, o ano de 2020. Os principais países nas exportações mundiais do PFE foram Vietnã, Estados Unidos, Austrália, Chile, Rússia, Bielorrússia, Letônia, Canadá, Alemanha e Tailândia (Tabela 4.1), nos quais somaram um total de 0,47 milhões de m³ nas exportações em 1961. Em 2020 estes países obtiveram um total de 83,3 milhões de m³ exportados, com uma contribuição de 64,3% no mundo (Tabela 4.1).

Tabela 4.2. *Ranking* da produção de lenha, carvão vegetal, cavaco, *pellets*, resíduos de madeira e outros aglomerados dos 10 maiores países, em milhões de m³ para 2020.

Lenha		Carvão vegetal		Cavaco		<i>Pellets</i>		Resíduos de Madeira		Outros Aglomerados	
Países	M.m ³										
Índia	302,24	Brasil	18,21	China	44,38	USA	11,60	China	104,00	Brasil	2,18
China	159,97	Nigéria	13,35	USA	44,26	Canadá	5,28	Brasil	19,14	Alemanha	0,73
Brasil	123,30	Etiópia	13,20	Austrália	18,19	Alemanha	4,28	USA	13,24	Rússia	0,70
Etiópia	113,15	Índia	8,23	Vietnã	17,50	Vietnã	4,28	Rússia	10,00	Ucrânia	0,50
Congo	86,70	Congo	7,75	Rússia	14,28	Rússia	2,71	Suécia	9,30	Polônia	0,29
Nigéria	66,54	Tanzânia	5,98	Chile	12,71	Letônia	2,67	Canadá	8,77	Vietnã	0,22
USA	60,53	Gana	5,88	Brasil	11,79	Suécia	2,62	Polônia	6,70	Romênia	0,18
Gana	47,64	China	4,64	Alemanha	11,71	França	2,34	Japão	6,46	Tcheco	0,13
Uganda	44,18	Tailândia	4,34	Suécia	11,30	Áustria	2,12	Tailândia	6,00	Bósnia	0,11
Indonésia	40,41	Egito	4,19	Canadá	10,02	Polônia	1,90	França	4,94	USA	0,10
Top 10	1044,65	Top 10	85,77	Top 10	196,13	Top 10	39,81	Top 10	188,56	Top 10	5,15
Resto do Mundo	885,61	Resto do Mundo	67,43	Resto do Mundo	73,36	Resto do Mundo	18,24	Resto do Mundo	38,75	Resto do Mundo	0,88
Mundo	1930,27	Mundo	153,20	Mundo	269,49	Mundo	58,05	Mundo	227,32	Mundo	6,03

Fonte: FAO (2022).

Madlener (2005) projetou boas perspectivas no uso do pellet de madeira e Lamers *et al.* (2018) afirmaram que os biocombustíveis sólidos seriam a próxima “*commodity*” energética global. Os *pellets* são usados predominantemente em aplicações residenciais, como caldeiras e fogões (TOSCANO *et al.*, 2013). De acordo com Pereira (2017) o Reino Unido é maior importador de *pellets* para aquecimento e energia, proveniente do sudeste dos EUA e Canadá.

O Brasil, líder mundial em carvão vegetal e outros aglomerados, foi responsável por 11,7% de todo o carvão vegetal produzido globalmente em 2019. Simioni *et al.* (2017) avaliaram a produção de carvão vegetal da silvicultura no Brasil, apresentando o crescimento do carvão vegetal no país, proveniente de florestas plantadas ao longo da última década. Tal comportamento corrobora com os dados do Instituto Brasileiro de Árvores – IBÁ (2019), que confirma crescimento, o qual ocorre principalmente em função do aumento da demanda de diversos segmentos da indústria (siderurgia, metalurgia, cimento, etc.).

Em 2018, o Brasil produziu 91% do seu carvão vegetal oriundas de árvores plantadas, confirmando a tendência de queda no uso de madeira de florestas nativas já apresentadas nos últimos anos (IBÁ, 2019; SIMIONI *et al.*, 2021). O setor contribuiu significativamente para o desenvolvimento socioeconômico das regiões de base florestal e ratificou o compromisso com a economia circular.

Os Estados Unidos lideram a produção de cavaco e *pellets*, com uma participação de 16,7% e 21,8% respectivamente, de toda produção mundial. Uma razão para o crescimento da bioenergia nos principais países produtores de PFE, em 1991, foi a implantação de imposto sobre a energia proveniente de combustíveis fósseis (BRYNGEMARK, 2020).

De um mercado limitado e regional de produtores locais, que supriam as necessidades de consumidores em escala individual, o *status* deste biocombustível sólido mudou e se tornou “*commodity*”, negociada nos mercados internacionais para abastecer usinas termoeletricas no mundo (HEINIMO; JUNGINGER, 2009; LAMERS, 2018). Conquanto, Schipfer *et al.* (2020) afirmam que o mercado de *pellets* para aquecimento em pequena escala, tem indiscutivelmente uma tecnologia madura, contudo sua comercialização está amadurecendo no mundo.

4.3.2. Análise da concentração do mercado do PFE

A razão de concentração (CR) analisou apenas as parcelas detidas pelos (*p*) maiores países em relação ao total. Suas variações representaram mudanças que ocorrem envolvendo os principais países e suas participações no mercado, como demonstrado na Figura 4.2. A análise da concentração do PFE foi realizada em três cortes temporais: de 1961 a 1980 - período pós-guerra; de 1981 a 2000 - final do século XX e início do livre mercado; de 2001 a 2020 – período da globalização e crises globais.

No período de 1961-1980, o CR(4) da produção do PFE mostrou-se moderadamente alto, o CR(8) mostrou-se moderadamente baixo, com tendência de queda no CR(4) e CR(8) (Figura 4.2). Coelho Junior *et al.* (2013) obtiveram resultados semelhantes na concentração de produtos florestais. Para Scherer e Ross (1990), quando os quatro países maiores produtores detêm mais de 40% do mercado de determinado produto, a estrutura desse mercado é oligopolística. Assim, no período 1961-1981, a indústria do PFE apresentou uma estrutura de mercado com concentração moderada (Figura 4.2). Os países que ocuparam o CR(4) foram: China, Índia, Indonésia e Brasil, os quais financiaram atividades e políticas para incentivar a bioenergia florestal (SHEETAL *et al.*, 2020).

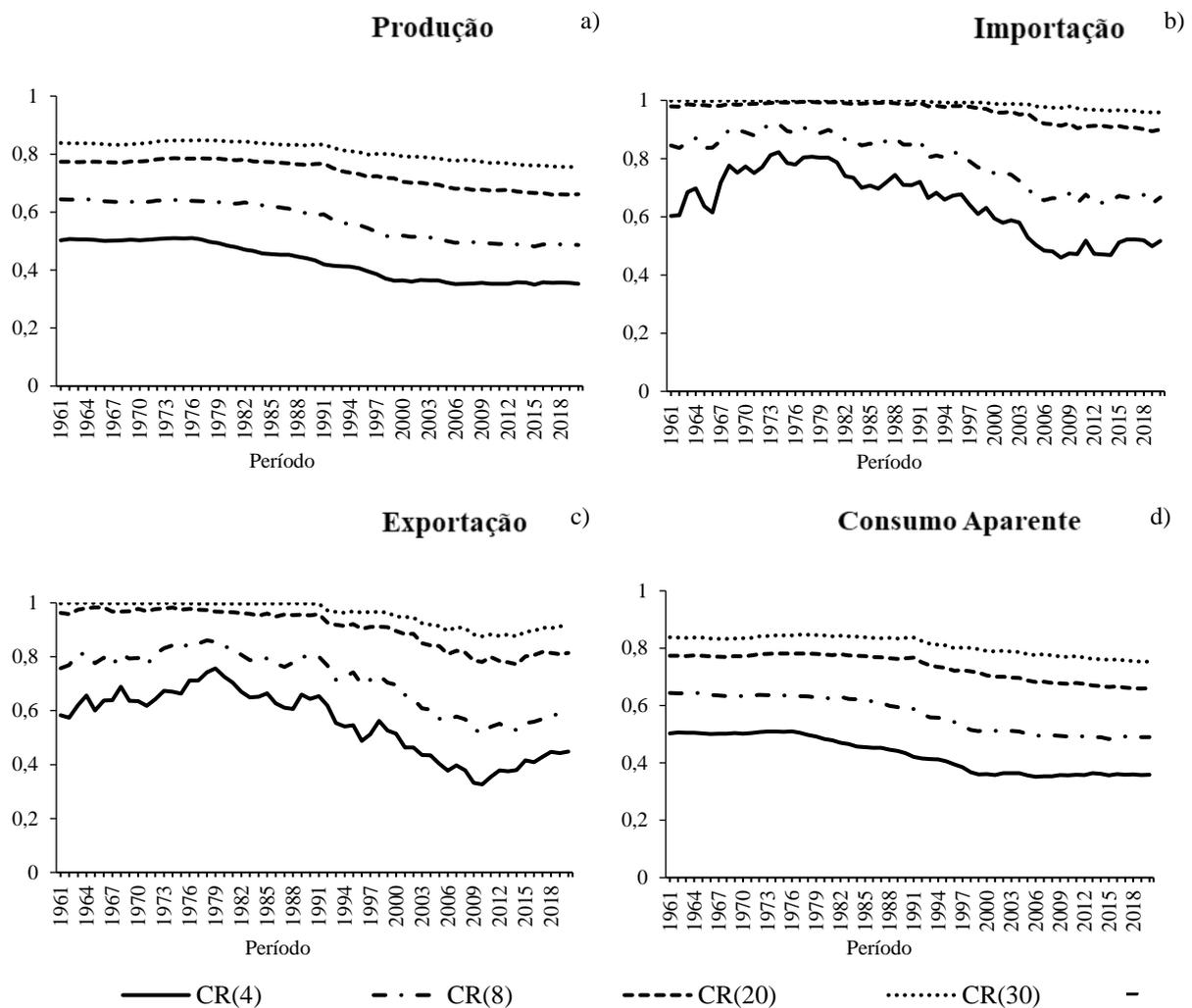


Figura 4.2. Evolução da razão de concentração da produção (a), importação (b), exportação (c) e consumo aparente (d) dos produtos florestais para energia em milhões de m³ no mundo entre 1961 a 2020.

Fonte: Os autores (2022).

No período de 1981-2000 o CR(4) da produção do PFE perdeu essa condição (moderadamente alto) e iniciou a caminhada em direção a uma situação de mercado

competitivo. Observa-se uma tendência de queda no CR(4) e CR(8) a partir dos anos de 1983, enquanto o CR(20) e o CR(30) apresentam uma leve tendência de redução apenas em 1993. A Indonésia neste período perdeu posição no *Ranking* para os EUA que ocupou o CR(4) nos anos posteriores (Figura 4.2).

No período 2001-2020 observou-se uma tendência de redução da concentração das exportações de produtos florestais. O grau de concentração foi moderadamente baixo, já que esteve entre o intervalo de 35% e 36%. Os principais países neste período foram: Índia, China, Brasil e os Estados Unidos existindo maior competição entre os países (Figura 4.2). A projeção para os próximos anos é que se chegue a uma concentração ainda mais baixa, isto é, a um mercado mais competitivo.

Os resultados apontam que a queda dos índices de concentração no período de 1961-2020, aconteceu devido à necessidade dos países ampliarem suas fontes energéticas e corroborar com as metas globais na redução das emissões de CO₂. Hoje, tais índices apresentam-se moderadamente baixo, inferindo uma melhor concorrência do PFE. Destaca-se que a redução dos índices de concentração no período de 1991 a 2020 na importação do PFE esteve associada à entrada de novos países neste segmento, tal fato reflete a entrada dos países para competir no mercado internacional do PFE. Seguindo as orientações de Bain (1959), para avaliar a concentração dos quatro maiores CR(4), observou-se que o índice variou de 35% a 51% com média de 43%, indicando um grau de concentração moderadamente baixo (Figura 4.3).

O índice de concentração das exportações dos PFE mostrou-se variável. Em 1979 atingiu o maior pico no CR(4), de 0,79 (muito alto) e no CR(8), 0,85 (Alto). Em 2009, o CR(4), foi de 0,33 (moderadamente baixo) e em 2010 o CR(8), foi de 0,51 (moderadamente baixo), permanecendo até os dias atuais, o que se pode inferir maior participação de países nas exportações do PFE. A redução na concentração de mercado amplia a concorrência saudável, resultado de investimentos por parte das empresas nos países de livre mercado.

4.3.3. Concentração segundo indicadores *HHI*, *E'*, *CCI* e *Gini*.

Os indicadores sumários (*HHI*, *E'*, *CCI* e *Gini*) incorporam todos os países, permitindo analisar, não apenas entre os (*p*) maiores países, como é o caso das razões de concentração. A figura 4.3 apresenta a evolução dos índices *HHI'*(a), Entropia de Theil (ajustado) (b), *Gini* (c) e o *CCI* (d) do mercado de produtos florestais para energia de 1961 a 2020.

No período de 1961-1980 ocorreu leve variação no índice *HHI'*, apresentou um mercado desconcentrado (0,08), em 1961 e pouco concentrado (0,17), em 1980, com média de

0,13. Já na fase de 1981-2000 ocorreu uma tendência de desconcentração, já que os índices foram decrescentes até o ano de 2000 (Figura 4.3). Neste período, destaca-se a inserção novos países exportadores, passando de 41 países no ano de 1981, para 102 países em 2000, o que tornou o mercado desconcentrado, ou seja, $HHI' < 0,10$, segundo Resende e Boff (2002), indica um mercado altamente competitivo. Tromborg e Solberg (2010) mostraram que a competitividade da bioenergia e os níveis de produção, além da inserção de novos países, está associado à evolução do preço geral do combustível.

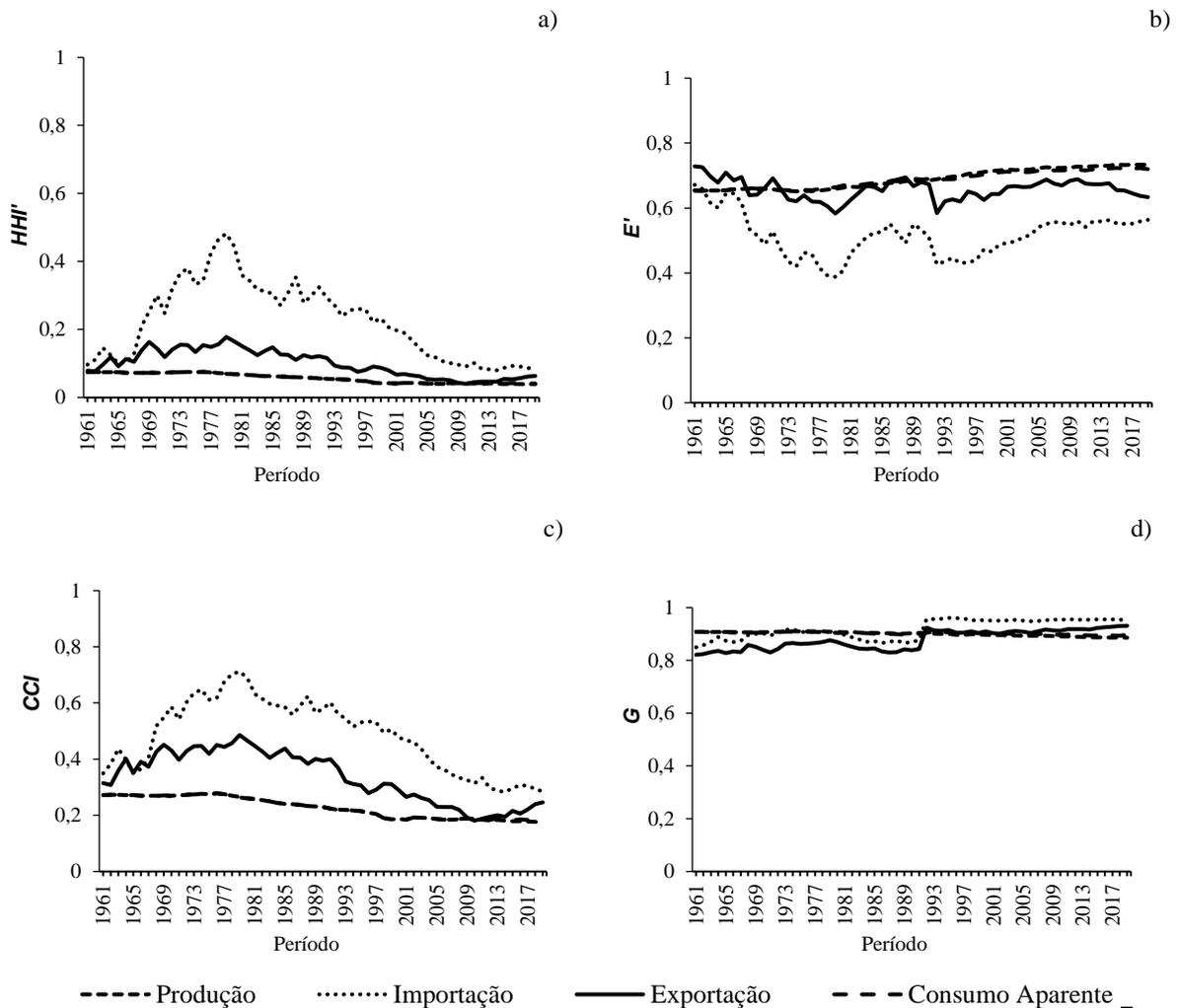


Figura 4.3. Evolução dos índices HHI' (a), Entropia de Theil (ajustado) (b), CCI (c) e Gini (d) do mercado de produtos florestais para energia de 1961 a 2020.

Fonte: Os autores (2022).

No período de 2001-2020 aproxima-se gradualmente da situação de heterogeneidade do mercado, ou seja, o ideal para competitividade. A concentração medida pelo HHI' também apresentou decréscimo, com valor médio de 0,05, indicando desconcentração do mercado (Figura 4.3). Segundo as classificações do HHI' , as exportações mundiais de produtos florestais

apresentaram mercado não concentrado, com $HHI < 0,15$. Apenas na década de 1960 indicaram, em anos específicos, que o mercado não é altamente competitivo, com $HHI < 0,10$ (Figura 4.3).

Já no ciclo de 1961-1980, há pouca variação no número de países, porém, a concentração da exportação, iniciou com 0,72, em 1961, passando para 0,58, em 1980, principalmente devido ao crescimento do *market share* dos países com vocação florestal (Ex. Brasil, Índia, China), onde houve ganhos tecnológicos via incentivos de políticas públicas. Em 1981-2000, além de uma elevação na concentração, porém, em 1992 com a entrada de novos países, o índice caiu e voltou a 0,58, evidenciando o crescimento do *market share* dos principais países do setor florestal (Figura 4.3). No período de 2001-2020, o índice apresentou pouca variação, com média de 0,66, indicando distribuição da parcela do mercado, aproximando-se de uma concorrência perfeita.

O Índice CCI confirma o HHI' e E' , pois no período de 1961-1980 obteve concentração relativa. Já no período de 1981-2000, apresentou desconcentração relativa, com valor máximo de 0,45 em 1981, e de 0,27 em 1996. Coelho Júnior et al. (2013) analisaram a indústria de produtos florestais no mundo e encontraram valores de desconcentração. Os indicadores encontrados pelos autores mencionados apontam que a influência da produção de produtos florestais compete no mercado energético. Neste período, o setor bioenergético e as indústrias florestais estiveram intimamente interligados por meio do mercado de matérias-primas florestais. Ambos os setores competem por matérias-primas florestais, mas também são interligados por meio de sinergias comerciais. As serrarias são fornecedoras (diretas) de subprodutos (por exemplo, serragem) e fornecedoras (indiretas) de resíduos da colheita. No entanto, os subprodutos também podem ser utilizados nas indústrias de celulose e papel, algo que provoca competição por matéria-prima (BRYNGEMARK, 2019).

De 2001-2020, o indicador permaneceu em queda, em 2001 com 0,18 (produção e consumo aparente), 0,47 (importação), 0,27 (exportação). Em 2010, apresentou constante na produção e consumo aparente com 0,18, a importação e exportação reduziram para 0,31 e 0,18 respectivamente e em 2020 chegaram a 0,17 (produção), 0,29 (importação), 0,24 (exportação) e 0,18 (consumo aparente). Os resultados indicam que as quedas nos indicadores se devem a entrada de novos países, com taxa de crescimento anual de 0,13% na produção, 2,12% na importação e 2,74% na exportação de PFE, em valores absolutos, em 2001 foram 192, 138, e 102 países, já em 2020 saltaram para 197, 210 e 175 países produtores, importadores e exportadores, respectivamente. Tal crescimento na utilização de fontes renováveis para produção de energia deve-se ao comprometimento dos países às metas de redução das emissões de gases do efeito estufa (HUANG; ZHAI, 2021).

Entre 1961-1980, não existe uma variação expressiva no indicador de G, sendo o valor médio de 0,85, classificado por Gini (1912) como desigualdade muito forte. No período de 1981-2000, o indicador de 1992 se aproximou de 1 com média de 0,87 (Figura 4.3). Infere-se que tais resultados são devidos a inserção de novos países e o compromisso com a mudança climática. No período de 2001-2020, o índice de Gini, manteve-se praticamente estável de 0,91-0,93, e média de 0,91, classificado como desigualdade absoluta nas exportações de PFE (Figura 4.3), possivelmente devido aos ganhos tecnológicos via incentivos de políticas públicas e cumprimento de metas globais no desenvolvimento de energias limpas e de baixo custo (LAMERS *et al.*, 2018). Ince *et al.* (2011) afirmam que as fontes de abastecimento do setor florestal no mundo estão variando, à medida que a demanda por matéria-prima de madeira para combustível aumenta.

Os resultados dos indicadores sumários (*HHI*, Entropia de Theil - ajustado, Gini e o CCI) podem inferir que a diminuição da concentração causou uma redução do poder de mercado dos países, que antes tinham um monopólio. Desse modo, os resultados apresentaram que a competitividade do mercado se tornou forte, aumentando a produção, preços mais justos e elevação no bem-estar geral do setor econômico.

4.4. CONCLUSÃO

O PFE no mundo continua sendo um combustível relevante na matriz energética, importante fonte de energia renovável, potencialmente neutra em carbono, contribuindo com a economia circular. Os mais significativos na produção e consumo foram a lenha, cavaco e resíduos de madeira, sendo os principais países produtores a China, Índia, Brasil e os Estados Unidos. Já na importação e exportação foram de cavaco, resíduos de madeira e *pellets*, sendo os principais países importadores Japão, China, Reino Unido, República da Coreia e Dinamarca. Os principais países nas exportações foram Vietnã, Estados Unidos, Austrália e Chile.

Segundo a classificação de Bain, a Razão de Concentração dos países produtores do PFE é moderadamente alta e moderadamente baixa para as importações e exportações. Os indicadores *HHI* e CCI assinalam movimentos de desconcentração das produções, importações e exportações mundiais do PFE. Os países com expressiva participação na produção, importação e exportação, devem buscar estratégias comerciais para reter as vantagens competitivas conquistadas.

O índice de Gini mostra que, apesar dos países importadores e exportadores de PFE tenham aumentado no período analisado, poucos concorrentes concentraram cada vez mais importações e exportações internacionais de PFE. Apesar da tendência decrescente do CR(4) e CR(8), há uma elevação de G, uma vez que os ganhos obtidos com a entrada de novos países no setor têm sido dissipados em favor de uns poucos concorrentes que aumentaram sua escala do comércio internacional.

4.5. REFERÊNCIAS

- BAIN, J. **Industrial organization**. New York: J. Wiley, 1959. 274 p.
- BRAMMER, J. G.; LAUER, M.; BRIDGWATER, A. V. Opportunities for biomass-derived “bio-oil” in European heat and power markets. **Energy Policy**, v. 34, n. 17, p. 2871–2880, 2006.
- BRYNGEMARK, E. **The Competition for Forest Raw Materials in the Presence of Increased Bioenergy Demand : Partial Equilibrium Analysis of the Swedish Case**. 2019. Disponível em: <<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-72540>>.
- BRYNGEMARK, E. Bioenergy versus forest conservation: a partial equilibrium analysis of the Swedish forest raw materials market. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 35, p. 367–382, 2020.
- BUSU, M. A Market Concentration Analysis of the Biomass Sector in Romania. **Resources**, v. 9, n. 6, p. 64, 29 maio 2020.
- BONFANTE, A. et al. Supporting local farming communities and crop production resilience to climate change through giant reed (*Arundo donax* L.) cultivation: An Italian case study. **Science of The Total Environment**, v. 601–602, p. 603–613, 1 dez. 2017.
- BRITO, J. O. Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. *Estudos Avançados*, v. 4, n. 9, p. 221–227, ago. 1990. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141990000200011&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 14 mar. 2022.
- CHUDY, R. P. et al. Effects on forest products markets of second-generation biofuel production based on biomass from boreal forests: a case study from Norway. **Scandinavian Journal of Forest Research**, cited By 3, v. 34, n. 3, p. 218–227, 2019. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85061767786&doi=10.1080%2F02827581.2019.1578403&partnerID=40&md5=20cde53ed6be9f970bc6045a0ae8a38f>>.
- CUENCA, M. A. G.; DOMPIERI, M. H. G. Dinâmica espacial da canavicultura e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 47, n. 4, p. 91-106, 2017.
- COELHO JUNIOR, L. M.; REZENDE, J. L. P.; ÁVILA, E. S.; OLIVEIRA, A. D.; BORGES, L. A. C. Analysis of the Brazilian cellulose industry concentration (1998 a 2007). *Cerne, Lavras*, v.16, n.2, abr.-jun. 2010.
- COELHO JUNIOR, L. M.; DE REZENDE, J. L. P.; DE OLIVEIRA, A. D. Concentração Das Exportações Mundiais De Produtos Florestais. **Ciencia Florestal**, v. 23, n. 4, p. 691–701, 2013.
- COELHO JUNIOR, L. M. et al. Regional Concentration of The Gross Production Value of Firewood in Paraíba. *FLORESTA E AMBIENTE*, v. 26, n. 3, 2019.
- COELHO JUNIOR, L. M. et al. Concentration and Spatial Clustering of Forest-Based Thermoelectric Plants in Brazil. *IEEE ACCESS*, v. 8, p. 221932–221941, 2020.

- CHEUNG, S. O.; LEVINA, B.; NIU, Y. Concentration analysis of new private residential units market in Hong Kong. **Construction Economics and Building**, v. 17, n. 2, p. 1–23, 2017.
- ENVIRONMENTAL INVESTIGATION AGENCY (EIA). Stealing the Last Forest: Austria's largest timber company, land rights, and corruption in Romania food and agriculture organization of the united. 2015.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAO. Sustainable woodfuel for food security. Sustainable wood fuel for food security A Smart choice: green renewable and affordable, p. 34, 2017.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAO Statistics Division. Rome, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 10 dez. 2021.
- GINI, C. Variabilità e mutabilità (1912). In: PIZETTI, E.; SALVEMINI, T. (Ed.). Reprinted in memorie di metodologica statistica. Rome: Libreria Eredi Virgilio Veschi, 1955.
- HAGUENAUER, L. Competitividade: conceitos e medidas: uma resenha da bibliografia recente com ênfase no caso brasileiro. **Revista Economia Contemporânea**. vol.16, n.1, pp. 146-176, 2012.
- HERFINDAHL, O. C. Concentration in the Steel Industry. 1950. 175 f. Thesis (Ph.D.) - Columbia University, New York, 1950.
- HIRSCHMAN, A. O. National power and the structure of foreign trade. Berkley: University of California, 1945. 172 p. HIRSCHMAN, A. O. The paternity of an index. *The American Economic Review*, Pittsburgh, v. 54, n. 5, p 761-762, Sept. 1964
- HORVARTH, J. Suggestion for a Comprehensive Measure of Concentration. *Southern Economic Journal*, 36, 446-452 (1970).
- HUANG, M. T.; ZHAI, P. M. Achieving Paris Agreement temperature goals requires carbon neutrality by middle century with far-reaching transitions in the whole society. **Advances in Climate Change Research**, v. 12, n. 2, p. 281–286, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.03.004>>.
- INCE, P. J. et al. Modeling future U.S. forest sector market and trade impacts of expansion in wood energy consumption. **Journal of Forest Economics**, v. 17, n. 2, p. 142–156, 2011.
- IBÁ, I. B. DE Á. Relatório 2019 Report 2019. **Relatório**, p. 1–80, 2019.
- KAIRYTE, A. et al. Fire Suppression and Thermal Behavior of Biobased Rigid Polyurethane Foam Filled with Biomass Incineration Waste Ash. **Polymers**, v. 12, n. 3, mar. 2020.
- KARKANIA, V.; FANARA, E.; ZABANIOTOU, A. Review of sustainable biomass pellets production - A study for agricultural residues pellets' market in Greece. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1426–1436, 2012.
- KANG, W.; RATTI, R. A.; YOON, K. H. Time-varying effect of oil market shocks on the stock market. **Journal of Banking & Finance**, Recent Developments in Financial Econometrics and Applications, v. 61, p. S150–S163, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378426615002381>>.
- KOZAK, S.; WIERZBOWSKA, A. Banking Market Concentration and Bank Efficiency. Evidence from Southern, Eastern and Central Europe. **South East European Journal of Economics and Business**. 2021;16(1): 38-52. <https://doi.org/10.2478/jeb-2021-0004>
- LAMERS, P. et al. Biomass market dynamics supporting the large-scale deployment of high-octane fuel production in the United States. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 10, n. 7, p. 460–472, jul. 2018.
- MADLENER, R. Energy systems in transition : perspectives for the diffusion of small-scale wood pellet heating Leif Gustavsson and Krushna Mahapatra. v. 29, p. 327–347, 2005.
- PEREIRA, A. S. Uso de Pellets De Madeira Para Energia: Pesquisa De Mercado. p. 1–73, 2017.

- POSSAS, M. L. Estruturas de mercado em oligopólio: economia e planejamento. 2. ed. São Paulo: Hucitec, 1999. p. 191.
- PROTÁSIO, P. T. et al. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of Eucalyptus clones from Brazilian energy forests. *Renewable Energy*, v. 164, p. 34–45, 2021. PJANIC, M.; VUKOVIĆ, B.; MIJIĆ, K. Analysis of the market concentration of agricultural enterprises in AP Vojvodina. 2018
- YANG, Y. C. A comparative analysis of free trade zone policies in Taiwan and Korea based on a port hinterland perspective. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, v. 25, n. 2, p. 273–303, 2009. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S2092-5212\(09\)80006-0](http://dx.doi.org/10.1016/S2092-5212(09)80006-0)>.
- YULDASHEV, F. et al. Techno-economic analysis of plantation biomass production and small-scale wood pellet processing for bioenergy market. *International Wood Products Journal*, cited By 0, 2020. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090458090&doi=10.1080%2F20426445.2020.1816766&partnerID=40&md5=21942a53f7c80d45944d17ed170133be>>.
- YUMOU, W.; SHILONG, L. Market Concentration, Market Power, and Firm Growth of Construction Companies, **Advances in Civil Engineering**. vol. 2021, Artigo ID 9990846, 9 páginas, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9990846>
- RESENDE, M. Medidas de concentração industrial: uma resenha. *Revista Análise Econômica*, Porto Alegre, v. 12, n. 21, p. 24–33, jul./set. 1994.
- RESENDE, M.; BOFF, H. Concentração industrial. In: KUPFER, D.; HASENCLEVER, L. (Org.). *Economia industrial: fundamentos teóricos e práticas no Brasil*. Rio de Janeiro: Campus, 2002. p. 73–90.
- SCHIPFER, F. et al. The European wood pellets for heating market - Price developments, trade and market efficiency. *Energy*, v. 212, p. 118636, dez. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118636>>.
- SCHERER, F. M.; ROSS, D. *Industrial market structure and economic performance*. 3rd ed. Boston: Houghton Mifflin, 1990. 270 p.
- SHEETAL; KUMAR, R.; SHASHI. Export competitiveness and concentration analysis of major sugar economies with special reference to India. **Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies**, v. 10, n. 5, p. 687–715, 2020.
- SIMIONI, F. J. et al. Eco-efficiency in the transformation of forest biomass residues in electrical energy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 23, n. 5, p. 1443–1456, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10098-021-02039-6>>.
- SIMIONI, F. J. et al. Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. **Ciência Florestal, Santa Maria.**, v. v. 27, n., p. 731–742, 2017.
- TOSCANO, G. et al. Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements. *Biomass and Bioenergy*, v. 56, n. 0, p. 317–322, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.05.012>>.
- TRØMBORG, E.; SOLBERG, B. Forest sector impacts of the increased use of wood in energy production in Norway. **Forest Policy and Economics**, v. 12, n. 1, p. 39–47, 2010.
- THEIL, H. *Economics and information theory*. Amsterdam: North-Holland, 1967. 488 p
- RABIER, F. et al. Particle density determination of pellets and briquettes. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 11, p. 954–963, 2006.
- TUMULURU, J. S. Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. **Carbon Resources Conversion**, v. 1, n. 1, p. 44–54, 2018.
- VENN, F. *The oil crisis*. The Oil Crisis 1–220 (Taylor and Francis, 2016). doi:10.4324/9781315840819
- WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. WBA. *Global Bioenergy Statistics 2020* p. 1–64,

2020. Disponível em: <https://worldbioenergy.org/uploads/201210_WBA_GBS_2020.pdf>. ZUBAIRU, A.; GANA, S. A. Production and Characterization of Briquette Charcoal by Carbonization of Agro-Waste. **Energy and Power**, v. 4, n. 2, p. 41–47, 2014.

5. ARTIGO 4 – ANÁLISE DIFERENCIAL-ESTRUTURAL MUNDIAL DOS PRODUTOS FLORESTAIS PARA ENERGIA

RESUMO

Neste artigo foi analisada a composição estrutura-diferencial (*shift-share*) do mercado internacional dos produtos florestais para energia (PFE) entre 2000 a 2020. Os dados estão disponíveis na *Food and Agriculture Organization* (FAO). A análise utilizou informações da produção dos PFE. Foram aplicados os modelos estrutural-diferencial (*shift-share*) e estrutural-diferencial ampliado. A América do Norte, Austrália e Europa apresentaram as maiores participações de países com efeitos positivos. O carvão e a lenha tiveram as maiores participações nos países. Os cinco principais países que apresentaram efeito estrutural (P) positivos foram: EUA (16×10^6), Canadá (7×10^6), Japão (7×10^6), Finlândia (6×10^6) e França (5×10^6). Os 5 principais países com efeito diferencial positivo foram: Myanmar (38×10^6), China (36×10^6), Gana (20×10^6), Etiópia (20×10^6), Congo (18×10^6). No período de 2000-2020, 29 países apresentaram vantagem comparativa especializada (VCE), 51 países apresentaram vantagem comparativa não especializada (VCNE), 39 países apresentaram desvantagem não especializada (DCNE) e 48 países apresentaram desvantagem competitiva especializada (DCE). O aumento nos preços de petróleo, gás e eletricidade, incentivou o consumo de PFE. As indústrias híbridas (óleo/gás/*peletts*) elevaram o consumo de biomassa florestal no período de 2000-2020. A dinâmica do consumo de PFE no mundo foi motivado pelo aumento da demanda em regiões mais competitivas e especializadas.

Palavras-chave: Bioenergia, *Shift-share*, Competitividade.

ARTICLE 4 – WORLD SHIFT-SHARE ANALYSIS OF FOREST PRODUCTS FOR ENERGY

ABSTRACT

In this article, the structure-differential composition (shift-share) of the international market for forest products for energy (PFE) between 2000 and 2020 was analyzed. Data are available from the Food and Agriculture Organization (FAO). The analysis used information from the production of PEF. Structural-differential (shift-share) and extended structural-differential models were applied. North America, Australia and Europe had the largest shares of countries with positive effects. Coal and firewood had the largest shares in the countries. The top five countries that showed positive structural effect (P) were: USA (16×10^6), Canada (7×10^6), Japan (7×10^6), Finland (6×10^6) and France (5×10^6). The top 5 countries with a positive differential effect were: Myanmar (38×10^6), China (36×10^6), Ghana (20×10^6), Ethiopia (20×10^6), Congo (18×10^6). In the period 2000-2020, 29 countries had specialized comparative advantage (SCV), 51 countries had unskilled comparative advantage (VCNE), 39 countries had unskilled comparative advantage (DCNE), and 48 countries had specialized competitive disadvantage (DCE). The increase in oil, gas and electricity prices encouraged the consumption of PFE. The hybrid industries (oil/gas/pellet) increased the consumption of forest biomass in the period 2000-2020. The dynamics of PFE consumption in the world was motivated by the increase in demand in more competitive and specialized regions.

Keywords: Bioenergy, Shift-share, Competitiveness.

5.1. INTRODUÇÃO

O uso de produtos florestais para energia (PFE) tem ganhado cada vez mais interesse por sua capacidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis. A bioenergia está entre as principais fontes renováveis do mundo. A queima direta de biomassa é uma técnica promissora para fornecer calor e energia no setor industrial, na agricultura e nas residências, substituindo caldeiras com fornos a óleo e gás (DEBONI *et al.*, 2019). De acordo com *World Bioenergy Association* (WBA), mediante a bioenergia, foram produzidos no mundo cerca de 6.890 TWh de energia elétrica.

A circularidade e o uso de recursos biológicos renováveis, como a biomassa vegetal, são os principais elementos da bioenergia (SHERWOOD, 2020). A redução do uso de combustíveis fósseis, a reciclagem de materiais e a recuperação de resíduos florestais para a obtenção de produtos energéticos, são aspectos essenciais para a economia circular. Este modelo econômico oferece alternativas inovadoras para resolver os principais desafios socioeconômicos e ambientais da agenda até 2030 (ACEVEDO *et al.*, 2020).

A *Food and Agriculture Organization* - FAO (2020) afirma que o mercado global de biocombustíveis sólidos até 2030 deve atingir 129,6 milhões de toneladas. A crescente demanda por combustíveis renováveis e as mudanças para uma economia circular devem continuar sendo os principais impulsionadores do setor bioenergético. Em 2019, 1,9 bilhões de m³ de combustível de madeira foram produzidos globalmente. Os continentes africano e americano tiveram a maior parte da produção com uma contribuição de 36% e 37%, respectivamente (WBA, 2020).

A distribuição dos fatores de produção no espaço não é homogênea, os países tendem a possuir características que as diferenciam em relação ao potencial energético. O método estrutural-diferencial ou *shift-share* ajuda a responder essa questão, ao decompor os componentes do crescimento e apontar os responsáveis pela dinâmica produtiva regional. Esse método é relevante, pois proporciona identificar os determinantes do desenvolvimento econômico (SIMÕES, 2005; HADDAD e ANDRADE, 1989). Este estudo foi usado para descrever o crescimento econômico diferenciado de uma região em termos do seu potencial bioenergético.

Análises da dinâmica e expansão produtiva utilizam indicadores para verificação da realidade socioeconômica de determinado país, bem como testar e validar as teorias explicativas destes fenômenos. Os países com maior extensão territorial e intensivos em recursos naturais têm potencial para dispor de vantagens na produção de PFE e ter maior participação no

mercado. Contudo, os países e as regiões estão mais bem preparadas para enfrentar desafios e aproveitar oportunidades quando investem na especialização e ampliação tecnológica na produção de PFE.

Baseadas nas ideias neoclássicas de análise do comércio internacional Heckscher-Ohlin (1970), o *shift-share* é um método analítico que se baseia na observação dos componentes de variação estrutural, diferencial e teórico. De acordo com Haddad e Andrade (1989), o modelo *shift-share* ou diferencial-estrutural é utilizado para descrever o crescimento econômico de um país em termos de sua estrutura produtiva, a fim de encontrar os fatores responsáveis pelo crescimento (ou queda) da produção. Este modelo tem sido utilizado com sucesso na literatura, a exemplo de Patrick (1972) um dos pioneiros na aplicação desse método, onde analisou o processo de desenvolvimento agrícola do Nordeste do Brasil no período de 1948 a 1969.

Estudos do modelo *shift-share* no mercado internacional do setor florestal foram realizados por Balezentis et al. (2022) para explicar as mudanças na produção agrícola nos países da União Europeia (EU) e BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), Marin e Vona, (2021) para avaliar os impactos de aumentos nos preços da energia no desempenho socioeconômico e ambiental dos estabelecimentos industriais franceses no período de 1997 a 2015. Tendo em vista a importância do segmento de PFE para o mercado internacional, este trabalho analisou a dinâmica e expansão (*shift-share*) do mercado global de produtos florestais para energia entre 2000 a 2020.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1. Objeto de estudo

Os dados foram obtidos do site da FAO, no período de 2000 a 2020. Os produtos florestais para energia (PFE) foram constituídos pela lenha – Le [metro cúbico (m³)], carvão vegetal – CV [toneladas (t)], cavaco de madeira – CM [metro cúbico (m³)], dos resíduos de madeira – RM [metro cúbico (m³)], dos *pellets* - Pe [toneladas (t)], e dos outros aglomerados (briquetes) – OA [toneladas (t)].

Para uniformizar as unidades de medida dos PFE para m³ foram utilizados a conversão pela densidade média de 350 kg/m³ para o carvão vegetal (PROTÁSIO *et al.*, 2021; ZUBAIRU; GANA, 2014), de 725 kg/m³ de *pellets* (RABIER *et al.*, 2006; TUMULURU, 2018) e de 1100 kg/m³ dos briquetes (BRAMMER; LAUER; BRIDGWATER, 2006).

Utilizou-se a Taxa de Crescimento Geométrico (TGC), para observar as alterações (ganhos e perdas) nos países entre 2000 e 2020. De acordo com Cuenca e Dompieri (2017) é expressa em porcentagem anual (% a.a.) pela Equação 1.

$$TGC = \left(\sqrt[n]{\frac{V_t}{V_0}} - 1 \right) * 100 \quad (1)$$

Em que,

V_t = produção do produto florestal para energia no último ano;

V_0 = produção do produto florestal para energia no ano inicial;

n = variação temporal da produção (expresso em anos totais).

5.2.2. Modelo Estrutural-Diferencial (*Shift Share*)

A produção foi a variável básica do modelo estrutural-diferencial (*shift-share*). A Equação 2 apresenta a variação real da produção do setor i na região (país) j ($E_{ij}^t - E_{ij}^0$), como sendo igual ao componente regional ($E_{ij}^0 e$), adicionados os componentes estrutural $E_{ij}^0(e_i - e)$ e diferencial $E_{ij}^0(e_{ij} - e_i)$.

$$(E_{ij}^t - E_{ij}^0) = (E_{ij}^0 e) + E_{ij}^0(e_i - e) + E_{ij}^0(e_{ij} - e_i) \quad (2)$$

Onde,

E_{ij}^0 = Produção inicial do setor i no país j ;

E_{ij}^t = Produção final do setor i no país j ;

e = Taxa de crescimento da produção de PFE total no mundo;

e_i = Taxa de crescimento de PFE por setor;

e_{ij} = Taxa de crescimento da produção de PFE no setor i do país j .

Segundo Souza (1996), se a variação real da produção do setor i na região j for superior ao componente regional, isto significa que a produção do setor i da região j cresceu mais que a média global e que existem elementos dinâmicos internos (componente diferencial) ou externos (componente estrutural) atuando no país de forma positiva.

5.2.3. Modelo Estrutural-Diferencial Ampliado

Para o uso da ponderação das taxas de crescimento em consideração as mudanças ocorridas dentro da estrutura das variáveis durante o período de observação, Esteban-Marquillas (1972) e Herzog e Olsen (1977) sugeriram ajustes na fórmula do método estrutural definida pela Equação 3:

onde,

$(E_{ij}^0 - E_{ij}^t)$ = Variação real;

$E_{ij}^0 e$ = Componente regional;

$E_{ij}^0(e_i - e) =$ Componente estrutural;

$E_{ij}^{0*}(e_{ij} - e_i) =$ Componente diferencial (D');

$(E_{ij}^0 - E_{ij}^{0*})(e_{ij} - e_i) =$ Efeito alocativo.

Herzog e Olsen (1977) classificam as vantagens e desvantagem competitivas, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Classificação do efeito alocação.

Descrição	Efeito Alocação	Especialização ($E_{ij}^0 > E_{ij}^{0*}$)	Vantagem competitiva ($e_{ij} > e_i$)
Desvantagem competitiva especializada	-	+	-
Desvantagem competitiva não especializada	+	-	-
Vantagem competitiva não especializada	-	-	+
Vantagem competitiva especializada	+	+	+

Fonte: Herzog e Olsen (1977).

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1. Evolução da produção de PFE no mundo (2000-2020)

A Figura 5.1 reflete o crescimento na produção de PFE no mundo em 2000, 2010 e 2020. Os resultados apresentaram 36 países com desempenho superior à média global, em 2000, ou seja, 17,19% do total dos países. Em 2020, 42 países analisados na pesquisa estiveram acima da média global, representando 21,31% do total de países. Conforme seus resultados, China, Brasil e Etiópia são os principais países que se fortaleceram tecnicamente na produção ao longo dos anos, com 1,3%, 0,8% e 1,4% de crescimento, respectivamente, contra os 0,7% da média global para o período 2000-2020. Em valores absolutos, tanto a Ásia quanto as Américas Anglo-Saxônica, Central e do Sul, que sediam os principais centros florestais do mundo, foram as que mais contribuíram para o crescimento absoluto da produção de PFE, demonstrando forte tendência à concentração da dinâmica regional.

O período 2000-2020 foi marcado por um crescimento da produção de PFE a uma taxa de 0,9% a.a., representando um crescimento absoluto de 414 milhões de m³, conforme mostra a Tabela 5.2. As categorias de PFE que apresentaram maiores taxas de crescimento na produção foram: resíduos de madeira e carvão vegetal, com 4,4% e 1,9% respectivamente, no período 2000-2020. Com relação à variação absoluta, as categorias de PFE apresentaram contribuições de resíduos de madeira (135 x10⁶ m³) e carvão vegetal (48 x10⁶ m³), ressaltando a importância desses setores na produção mundial. A lenha bruta apresentou, taxa de crescimento de 0,4% a.a., 149 x10⁶ de m³, em valores absolutos. O cavaco de madeira, com taxa de crescimento de 0,8% a.a., refletiu o fortalecimento do consumo de PFE no mundo e o crescimento do mercado

global. Os resultados espelham a dinâmica particular dos países emergentes, influenciada por setores que utilizam os PFE como combustível em aquecedores, lareiras, churrasqueiras e fogões a lenha, além de abastecer o setor industrial.

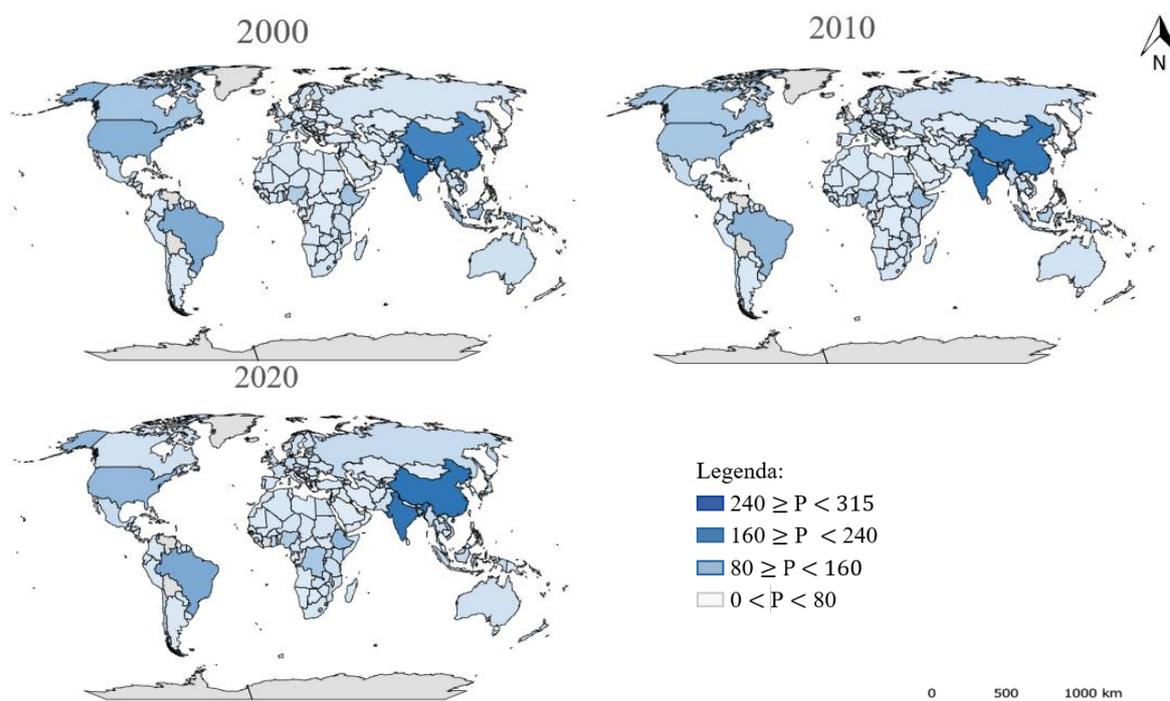


Figura 5.1. Distribuição espacial da produção dos PFE no mundo, em milhões de m³, para 2000, 2010 e 2020.

Fonte: FAO (2020).

Tabela 5.2. Variação da produção de PFE, percentual e absoluta, por categorias no mundo, de 2000, 2010 e 2020.

Setor/Categoria	Produção (m ³)			Variação
	2000	2010	2020	TGC
Lenha	1,8 x10 ⁹	1,86 x10 ⁹	1,94 x10 ⁹	0,4%
Resíduos de madeira	0,10 x10 ⁹	0,21 x10 ⁹	0,23 x10 ⁹	4,4%
<i>Pellets</i> de madeira	-	-	0,05 x10 ⁹	-
Carvão vegetal	0,10 x10 ⁹	0,13 x10 ⁹	0,15 x10 ⁹	1,9%
Cavaco de madeira	0,23 x10 ⁹	0,27 x10 ⁹	0,28 x10 ⁹	0,8%
Outros aglomerados	-	-	0,006 x10 ⁹	-
Total	2,23 x10⁹	2,47 x10⁹	2,66 x10⁹	0,9%

TGC – Taxa geométrica de crescimento.

Fonte: FAO (2020).

5.3.2. Método Estrutural-Diferencial Simples

A Figura 5.2 sintetiza os principais resultados obtidos com a aplicação do método *shift-share* (efeito diferencial) e apresenta informações em relação ao efeito (ou variação) estrutural (ou proporcional). No que se refere ao efeito estrutural (P), 55 países obtiveram valores

positivos, 137 países obtiveram valores negativos e 13 países não apresentaram desempenho para o componente estrutural (P). O valor positivo deriva da composição industrial nacional, refletindo a existência de setores que, globalmente, são mais dinâmicos, em relação ao conjunto da economia mundial de PFE. Os países que apresentaram efeito estrutural (P) negativo refletiram crescimento produtivo, pautado em setores/produtos que foram lentos, em nível global.

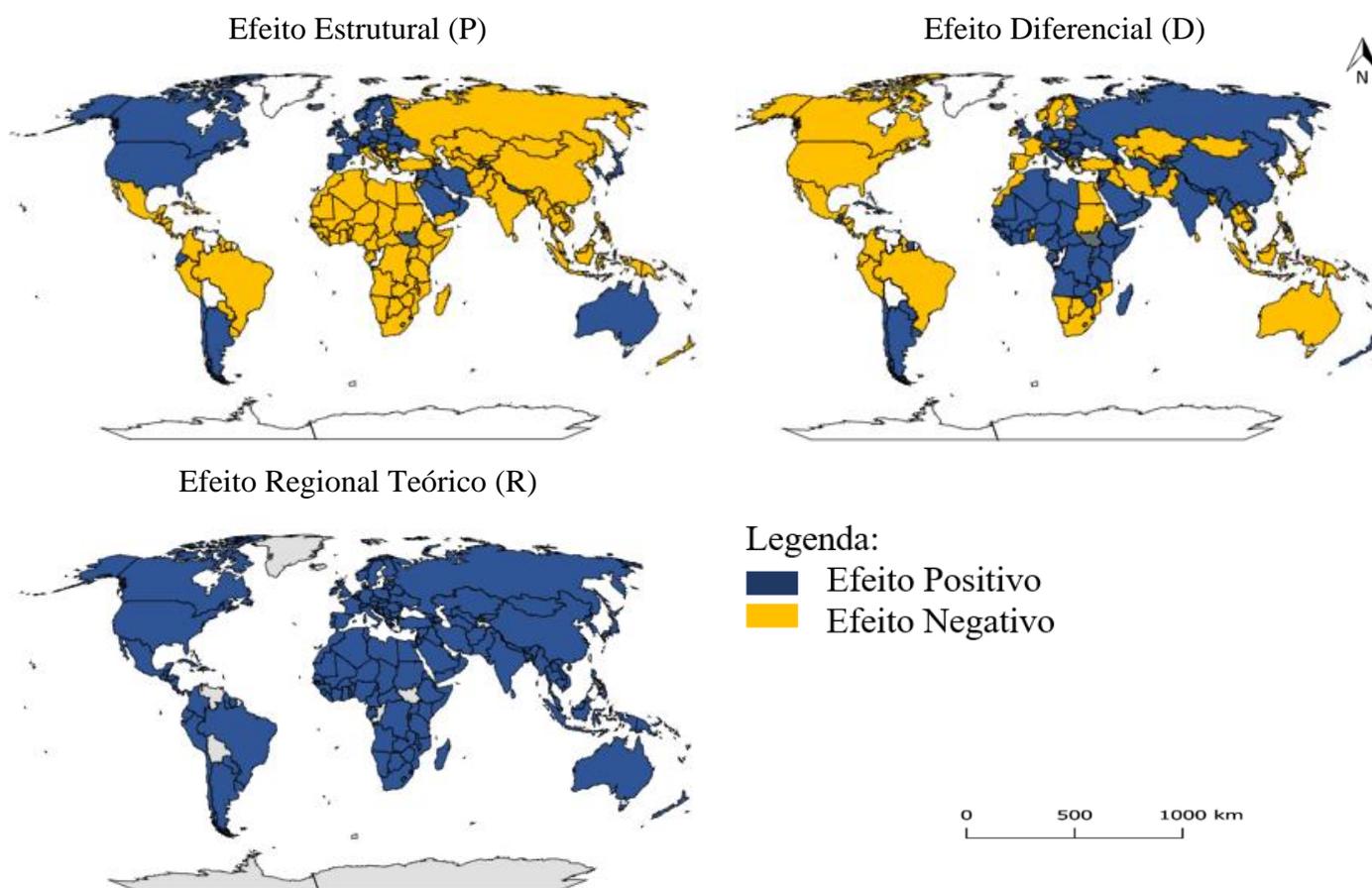


Figura 5.2. Distribuição espacial do efeito estrutural (P), diferencial (D) e regional teórico (R) no mundo entre 2000-2020.

Fonte: Os autores (2022).

Os resultados positivos no efeito estrutural estão principalmente distribuídos nos continentes da América do Norte, Austrália e Europa. O carvão e a lenha tiveram as maiores participações nos países. Os setores que foram tiveram dinamicidade no período 2000-2020, foram o carvão vegetal e os resíduos de madeira, ou seja, a taxa de crescimento da produção nestes foi maior que a taxa global (somatório de todos os setores).

O cavaco de madeira e a lenha tiveram o setor lento, apesar de a lenha ter sido representativa na maioria dos países. Como ocorreram diferenças setoriais e regionais no

crescimento produtivo entre dois períodos, as diferenças podem ser causadas pela existência de setores mais dinâmicos ou menos dinâmicos na composição da estrutura produtiva de um país (GONÇALVES JUNIOR; GALETE, 2010).

Os cinco principais países que apresentaram efeito estrutural (P) positivos foram: EUA ($16,51 \times 10^6$), Canadá ($7,51 \times 10^6$), Japão ($7,44 \times 10^6$), Finlândia ($6,69 \times 10^6$) e França ($5,37 \times 10^6$). Os resultados demonstram que estes países se especializaram em setores de PFE dinâmicos e apresentaram elevadas taxas de crescimento nacional (acima da média global). No período de 2010-2020, o Japão expandiu a inserção de instalações de fornecimento de energia a base de calor, forneceu subsídios para o desenvolvimento de infraestrutura e isenção de impostos para combustível renovável. Esse país apoia a indústria energética a descarbonizar e alcançar a metas globais de redução de CO₂ em 50% até 2050 (GOH *et al.*, 2020).

O aumento da produção e do uso da bioenergia esteve entre as principais prioridades da política energética na Finlândia desde a primeira crise energética em 1973 (HELYNEN, 2004; SAARELA, 2019). Desse modo, as reformas nas condições institucionais, legais e produtivas foram relevantes na política de energia renovável e bioenergia. Os mercados energéticos foram reformados durante as décadas de 2000-2020. No período de 2000-2010, o Canadá assumiu vários compromissos para redução de emissões (PELLEY *et al.*, 2009).

Os resultados ainda apontam os países que apresentaram valores negativos como, Índia ($-29,36 \times 10^6$), China ($-13,51 \times 10^6$), Brasil ($-9,66 \times 10^6$), Indonésia ($-8,83 \times 10^6$) e Etiópia ($-7,39 \times 10^6$). A variação estrutural (P) dos setores não dinâmicos foi superior aos valores positivos dos setores considerados dinâmicos. Outro fator que pode ter influenciado os resultados foi o desempenho de setores que cresceram a taxas médias inferiores à taxa média global.

No período de 2000-2020, o Brasil forneceu o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), contratando energia elétrica por fontes renováveis, contudo apresentou a necessidade de expandir em outros setores de PFE, tendo em vista seu potencial florestal (CARSTENS; CUNHA, 2019).

Os resultados sugerem, ao efeito estrutural (P), que a parcela da variação esteve associada a fatores externos (câmbio, juros, crescimento mundial, etc.), influenciando a composição industrial do país. O aumento nos preços de petróleo, gás e eletricidade, incentivou os consumidores privados a consumirem energia por fontes renováveis, aquecendo a demanda por bioenergia de base florestal. Na mesma medida, as indústrias híbridas (óleo/gás/biomassa) elevaram o consumo de PFE no mundo de acordo com a *European Biomass Association – AEBIOM* (2017).

Para o efeito diferencial (D), 102 países obtiveram valores positivos, 90 países obtiveram valores negativos e 13 países tiveram resultados sem desempenho. Os cinco principais países com efeito diferencial positivo foram: Myanmar ($38,25 \times 10^6$), China ($36,30 \times 10^6$), Gana ($20,45 \times 10^6$), Etiópia ($20,18 \times 10^6$), Congo ($18,70 \times 10^6$). O componente diferencial (interno) indicou o montante positivo da taxa de crescimento das categorias de PFE, porque foi maior que a média global do mesmo setor, do contrário, o efeito diferencial indicou o montante negativo. Além disso, o manejo adequado, como a colheita regular, bem como a possível substituição do extrativismo para silvicultura é considerado vital para a produção de PFE (GOH *et al.*, 2020). Os cinco principais países com efeito diferencial negativo foram: Canadá ($-92,00 \times 10^6$), Estados Unidos ($-55,94 \times 10^6$), Indonésia ($-55,68 \times 10^6$), Brasil ($-27,35 \times 10^6$) e França ($-23,46 \times 10^6$).

Condições climáticas muito úmidas e falta de mão-de-obra dificultaram a exploração madeireira em algumas regiões ou países. A oferta de subprodutos utilizados para a produção de PFE foi, portanto, menor nesses países (*European Biomass Association - AEBIOM*, 2017). Para regiões de clima quente, o efeito foi negativo devido à produção de setores de PFE não dinâmicos, como a lenha, por serem superiores à produção de PFE dinâmicos, como carvão vegetal e cavaco de madeira.

O efeito diferencial (D) esteve associado à parcela da variação na produção, e aos fatores internos (infraestrutura, capital humano, etc.), com especialização nacional em determinados setores do mercado de PFE. A análise indicou quais foram os países que cresceram nos setores de PFE, refletindo, assim, vantagens quanto à sua localização. Portanto, a ação de forças, tais como variação nos custos dos transportes, estímulos fiscais, diferenças de preços relativos de insumos entre regiões, contribuíram para o peso desse efeito. Os resultados positivos do efeito diferencial estão associados aos setores estratégicos de cada região, impulsionados principalmente pelo aquecimento da demanda nacional na produção de energia.

O crescimento regional teórico relata o que ocorreria se os países crescessem a taxa de crescimento do total de produção global, no mesmo período, influenciado por fatores nacionais e globais. Conforme Souza (2009), os fatores nacionais são gerados pelas peculiaridades internas, que proporcionam vantagens locais para determinados setores. Já, os fatores globais são determinados pelo fato de existirem na economia das atividades que globalmente apresentam dinamismo.

5.3.3. Método Estrutural-Diferencial Ampliado

A Figura 5.3 apresenta a distribuição espacial do efeito alocação no período de 2000-2020. Os resultados apresentaram efeito alocativo positivo para 76 países no mundo. O top cinco de países com valores positivos enfrentaram um processo de expansão das atividades produtivas bioenergéticas, com destaque para Romênia ($1.711,71 \times 10^6$), Cazaquistão ($9.688,14 \times 10^6$), Mianmar ($480,75 \times 10^6$), Reino Unido ($176,52 \times 10^6$), Eswatini ($99,31 \times 10^6$). Em linhas gerais, isso significa estruturas produtivas especializadas em setores dinâmicos. Os resultados apresentaram efeito negativo para 115 países no mundo. Já o Top 5 países com valores negativos foram Colômbia ($-595,00 \times 10^6$), Japão ($-443,16 \times 10^6$), China ($-332,36 \times 10^6$), Nepal ($-82,23 \times 10^6$), Bulgária ($-63,78 \times 10^6$). Uma possível explicação para essa tendência é o fato de que estes países se especializaram em setores lentos (não dinâmicos).

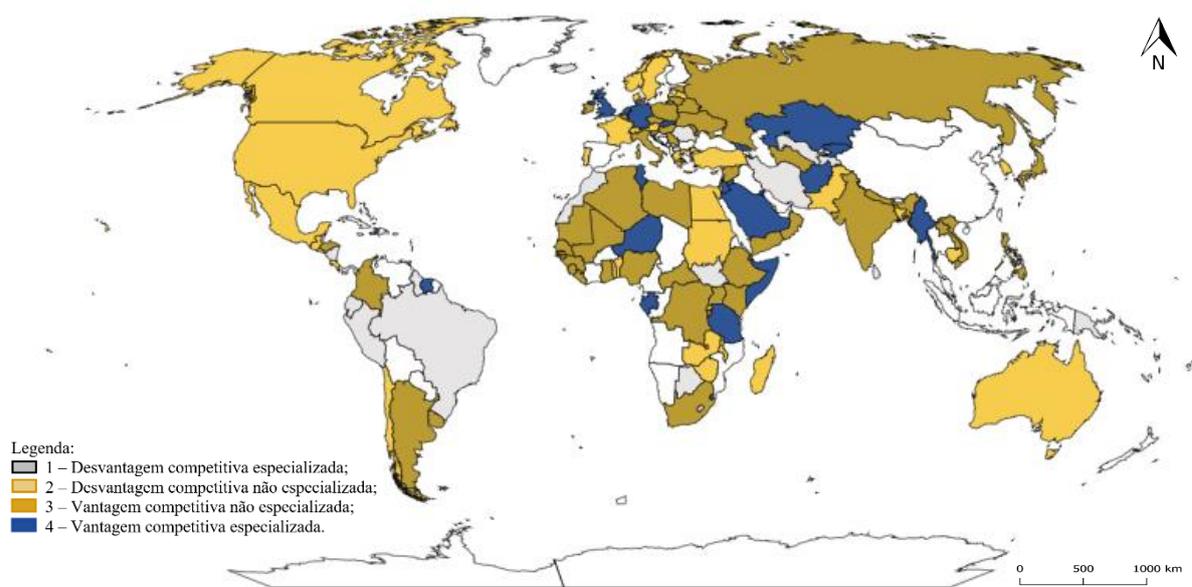


Figura 5.3. Distribuição do efeito alocativo (A) dos países produtores de PFE no mundo, de 2000-2020.

Fonte: Os autores (2022).

A análise do efeito alocação se completa com a análise dos sinais (positivo e negativo), indicando a existência de vantagem/desvantagem competitiva, bem como especialização/não especialização. Os produtos florestais como carvão vegetal, cavaco de madeira e a lenha foram setores que possuem efeito alocativo positivo em países com vantagem competitiva especializada (VCE). De 2000-2020, 29 países apresentaram VCE, isso implica que, o mercado bioenergético cresceu acima da média global nestes países e expandiram seus produtos ao longo das últimas duas décadas. No mesmo período, 51 países que apresentaram Vantagem

comparativa não especializada (VCNE), comprovaram a competitividade no mercado de bioenergia, porém a especialização em categorias de PFE não foi em setores dinâmicos.

Por outro lado, identifica-se que 39 países que apresentaram desvantagem competitiva não especializada (DCNE) onde estão relacionadas principalmente as categorias especializadas de PFE. Embora o setor apresente maior participação na composição do PIB no país, foi marcado pelo seu baixo dinamismo. Nesses países avaliados, a concorrência é quase nula, o que desestimula os investimentos e a busca por competitividade. No mesmo contexto, 48 países avaliados apresentaram como características de desvantagem competitiva especializada (DCE), onde especializaram ao longo do período em setores não dinâmicos ou setores com taxa de crescimento abaixo da média global. 38 países apresentaram efeito alocativo negativo, embora tenham sido especializados e competitivos.

Souza *et al.* (2017) sugerem que países com vantagens competitivas, incluíram em suas prioridades, investimentos em tecnologia, extensão rural e inovações que possibilitaram crescimento em infraestrutura e promoção de preços estáveis para incentivar a produção e uso local de culturas que fornecessem energia e biocapacidade. Sarkodie (2021) analisou os impulsionadores socioeconômicos e descobriu que a expansão da biocapacidade nos países teve melhoria no desempenho ecológico. A mudança climática é um fenômeno externo que tem impacto direto nas atividades, destacando as mudanças que afeta o ciclo de crescimento das culturas agrícolas e florestais (NUNES; MATIAS, 2020). Portanto, foi revelado que a eficiência alocativa e eficiência produtiva aos países com VCE devem-se à concorrência dos PFE.

A Tabela 5.3 apresentou a análise das categorias especializadas pelos 10 países em destaque como maiores produtores de PFE, no subperíodo de 2000-2010. Os países como China, Brasil, EUA, e Indonésia apresentaram até 2011 atividades em quatro categorias de PFE como: lenha, resíduos de madeira, carvão vegetal e cavaco de madeira. A partir de 2012 foram registrados dados de participação na produção de categoria de PFE como: *Pellets* de madeira e outros aglomerados. Ao longo do período, a Etiópia manteve sua produção em 4 categorias. Índia, Congo e Nigéria, apesar de apresentarem produção em apenas duas categorias, estão entre os principais produtores mundiais de PFE. A especialização destes países no setor permitiu que eles se tornassem grandes *players* do mercado bioenergético global.

A Figura 5.4 demonstrou o efeito setorial (especialização) em que determinados países apresentaram resultados positivos além de possuir, uma estrutura produtiva composta por setores considerados dinâmicos ou líderes no âmbito global. Os países que subsidiam diretamente os produtores de matérias-primas de biomassa são os que tiveram maiores propensões de crescimento na produção de PFE. A exemplo dos EUA, que subsidiou o

Programa de Assistência à Cultura de Biomassa (BCAP), e estimulou o desenvolvimento regional da bioenergia. No entanto, também foram levantadas críticas, sobre a possibilidade de intensificar a competição de matérias-primas entre PF e PFE (JIANG et al., 2019). Os países que apresentaram resultados negativos possuíram setores pouco dinâmicos. Verificou-se que 89 países se mostraram especializados e 116 países tiveram o efeito inverso. Foi possível observar, então, que para o total de setores analisados, os países com efeito positivo obtiveram ganhos na composição setorial, ampliando sua especialização.

Tabela 5.3. Setores com vantagem competitiva especializada, dos 10 países em destaque como maiores produtores de produtos florestais para energia de 2000-2020.

Número de atividades	Países	Setores com vantagem competitiva especializada
6	China	Lenha/Resíduos de madeira/ <i>Pellets</i> de madeira/Carvão vegetal/Lascas de madeira/Outros aglomerados
6	Brasil	Lenha/Resíduos de madeira/ <i>Pellets</i> de madeira/Carvão vegetal/Lascas de madeira/Outros aglomerados
6	Estados Unidos	Lenha/Resíduos de madeira/ <i>Pellets</i> de madeira/Carvão vegetal/Lascas de madeira/Outros aglomerados
6	Indonésia	Lenha/Resíduos de madeira/ <i>Pellets</i> de madeira/Carvão vegetal/Lascas de madeira/Outros aglomerados
4	Etiópia	Lenha/Resíduos de madeira/Carvão vegetal/Lascas de madeira
2	Índia	Carvão vegetal/Lenha
2	Congo	Lenha/Carvão vegetal
2	Nigéria	Lenha/Carvão vegetal
2	Gana	Lenha/Carvão vegetal
2	Uganda	Lenha/Carvão vegetal

Fonte: Os autores (2022).

O carvão vegetal ($0,02 \times 10^6$) apresentou entre as categorias de PFE's especializado ao longo do período de 2000-2020. De maneira geral, o desempenho desta categoria está associado ao processo de desconcentração industrial. Na maioria dos países da África Subsaariana, a urbanização resultou no ganho de importância relativa do carvão vegetal, enquanto a lenha diminuiu. O carvão vegetal é o principal combustível de cozinha para a maioria das famílias urbanas nessas nações (MAKONESE; IFEGBESAN; RAMPEDI, 2018). Em relação à América Latina, existe um domínio de mercado significativo em termos de volume, pois a maioria das regiões usa carvão vegetal como combustível primário para cozinhar e outras aplicações industriais, o que também despertou investimentos em toda a região.

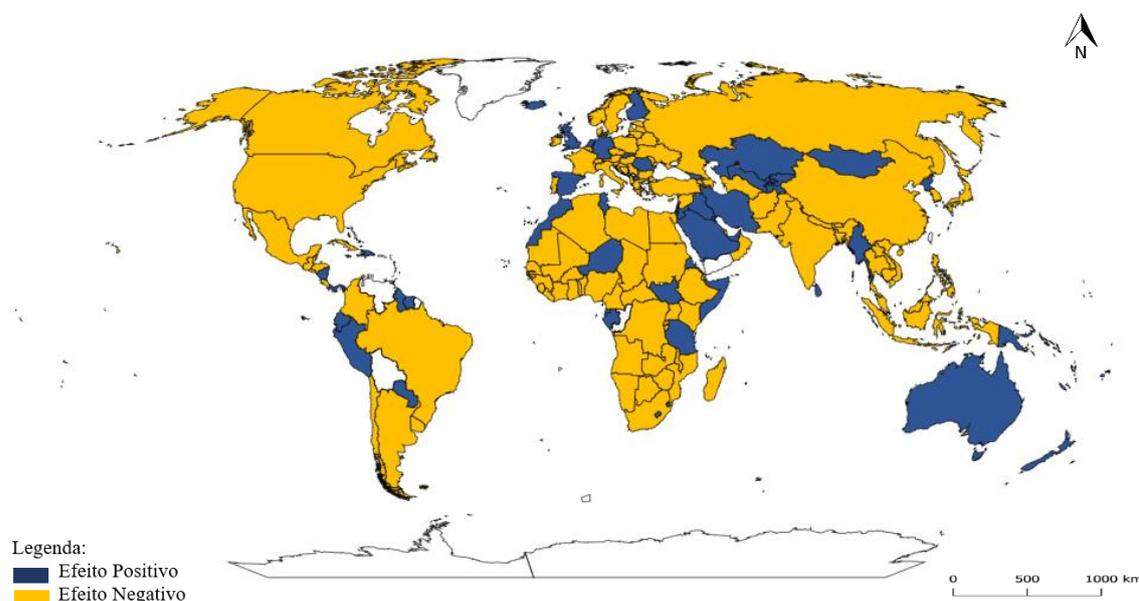


Figura 5.4. Distribuição espacial do efeito especialização no mundo, de 2000-2020.
Fonte: Os autores (2022).

Na Europa e na América do Norte, milhões de pessoas adaptaram alimentos grelhados e cozinham com frequência por um longo período. As regulamentações governamentais impulsionaram o mercado de carvão em toda a região. No caso da área, o Ásia-Pacífico tem a maior produção de carvão na China e na Indonésia. O mercado das categorias de PFE como, cavaco de madeira ($-0,68 \times 10^6$), lenha ($-0,62 \times 10^6$) e resíduos de madeira ($-0,85 \times 10^6$), apresentou efeito de especialização negativa. Os cinco países com maior efeito positivo na especialização foram: Islândia (2.800×10^6), Tanzânia (1.100×10^6), Eswatini (940×10^6), Coreia do Sul (630×10^6) e Níger (590×10^6). Assim, países que foram aprimorados na categoria de PFE dinâmicos como carvão tiveram valores positivos. A política deles tem suas raízes teóricas no modelo de transição energética (DOGGART *et al.*, 2020). Países como: Índia (-1.900×10^6), EUA (-1.300×10^6), Etiópia (-950×10^6), Indonésia (-910×10^6) e Nigéria (-680×10^6), obtiveram efeito de especialização negativa, pois se focaram em categorias não dinâmicos como a lenha e lasca de madeira.

A Figura 5.5 apresenta o efeito competitivo no período 2000-2020. Verificou-se que 105 países se mostraram especializados e 100 países não foram especializados. Quatro setores registraram competitividade (efeito positivo) no âmbito global: carvão vegetal (741), cavaco de madeira (1.297), lenha (986) e resíduos de madeira (1.137). Desse modo, os resultados revelam que a ampliação no mercado de PFE possibilitou contribuir com a transição energética em

países competitivos. As principais aplicações do combustível estão associadas a indústrias metalúrgicas, aquecimento, filtração, (caso do carvão vegetal) e uso doméstico.

Ethier (1972), ao se basear-se na teoria de Heckscher-Ohlin, que os países tendem a especializar seus esforços para a produção dos bens que são abundantes. Os territórios em que o capital é relativamente abundante e o trabalho relativamente escasso, tendem a exportar capital intensivos.

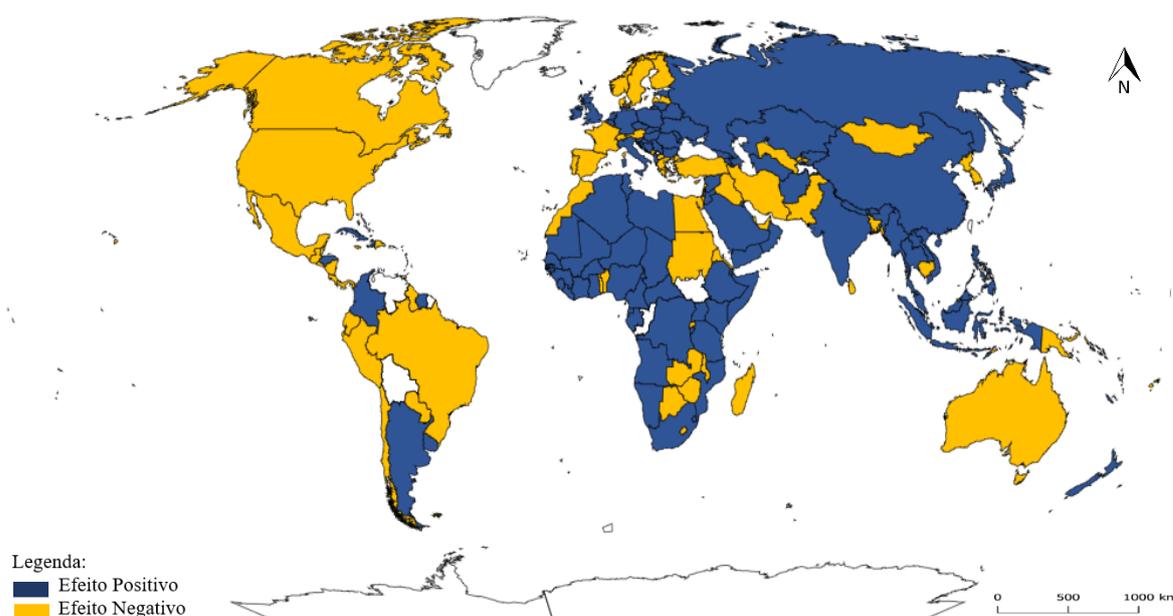


Figura 5.5. Distribuição espacial do efeito competitividade no mundo, de 2000-2020.
Fonte: Os autores (2022).

Por isso, são necessárias políticas e desenvolvimento tecnológico nas regiões em que não foram competitivos, dado a necessidade de alocação, transporte, e assistência diversa para a mão de obra envolvida nessas atividades. Os setores que registraram efeito competitivo negativo mostram que o país apresentou características que prejudicaram o seu desempenho, não existindo vantagens locais. Além disso, os principais países que apresentaram efeito competitivo negativo e cresceram abaixo da média mundial foram: Maurícia, Grécia, Coreia do Sul, Nicarágua, França e Canadá.

Alguns países foram relativamente dotados de capital (recursos naturais). Assim, os que possuem recursos naturais abundantes foram capazes de produzir PFE de forma relativamente barata, exportando-os puderam compensar na balança comercial as importações de outros bens e serviços intensivos, conforme o modelo econômico Heckscher-Ohlin. Onde, os países tendem

a direcionar seus esforços para a produção de bens que são abundantes, ou seja, o país deve produzir aquilo que tem mais fartura (ETHIER, 1972).

5.4. CONCLUSÃO

O aumento nos preços de petróleo, gás e eletricidade, bem como, a busca em cumprir com as metas globais, motivou os consumidores privados a produção e distribuição de PFE no mundo. As indústrias híbridas (óleo/gás/biomassa) elevaram o consumo de produto florestal no período de 2000-2020.

A América do Norte, Austrália e Europa apresentaram importantes participações estratégicas no mercado de PFE, pois apresentaram efeito positivo na análise estrutural e diferencial. O carvão e a lenha tiveram as maiores participações em produção no mundo. Os cinco principais países que apresentaram efeito estrutural (P) positivos foram: EUA (16×10^6), Canadá (7×10^6), Japão (7×10^6), Finlândia (6×10^6) e França (5×10^6).

Os cinco principais países com efeito diferencial positivo foram: Myanmar (38×10^6), China (36×10^6), Gana (20×10^6), Etiópia (20×10^6), Congo (18×10^6). No período de 2000-2020, 29 países apresentaram vantagem comparativa especializada (VCE), 51 países apresentaram vantagem comparativa não especializada (VCNE), 39 países apresentaram desvantagem não especializada (DCNE) e 48 países apresentaram desvantagem competitiva especializada (DCE).

Podemos concluir então que o papel do comércio da bioeconomia de base florestal impulsiona a produção e o emprego no mundo na extração de madeira e na fabricação de produtos para fins energéticos. Setores que utilizam subprodutos da serralheria como matéria-prima, a exemplo dos resíduos de madeira, têm fortalecido o compromisso dos países em busca do desenvolvimento sustentável. Logo, este trabalho identificou a necessidade de trabalhos futuros para avaliar instalações integradas de processamento de madeira no mundo, incluindo serração, fabricação de compensados e produção de energia e avaliara necessidades de investimento em produção de produtos para fins energéticos.

5.5. REFERÊNCIAS

ACEVEDO, M. et al. The management of agricultural waste biomass in the framework of circular economy and bioeconomy: An opportunity for greenhouse agriculture in Southeast Spain. *Agronomy*, v. 10, n. 4, 2020.

BALEZENTIS, T. et al. Disentangling the sources of dynamics in the agricultural output of the BRIICS and EU countries: The ecological footprint perspective with Shapley value

- decomposition. **Journal of Cleaner Production**, v. 346, p. 131198, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622008290>>.
- CARSTENS, D. D. dos S.; CUNHA, S. K. da. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, v. 125, n. October 2018, p. 396–404, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.063>>.
- CUENCA, M. A. G.; DOMPIERI, M. H. G. Dinâmica espacial da canavicultura e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 47, n. 4, p. 91-106, 2017.
- DOGGART, N. et al. The influence of energy policy on charcoal consumption in urban households in Tanzania. **Energy for Sustainable Development**, v. 57, p. 200–213, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.06.002>>.
- DEBONI, T. L. et al. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. *Renewable Energy*, v. 135, p. 1291–1302, 2019.
- ETHIER, W. Non-traded goods and the Heckscher–Ohlin model. **International Economic Review**. 13, 132–147. 1972.
- ESTEBAN-MARQUILLAS, J.M. Shift-share analysis revisited. **Regional and Urban Economics**, v. 2, n. 3, p. 249-261, 1972.
- EUROPEAN BIOMASS ASSOCIATION (AEBIOM). European Bioenergy Outlook. EU Raport 2017. p. 264, 2017. Disponível em: <www.aebiom.org>.
- FAO and the Ministry of Energy of Zambia. 2020. *Sustainable bioenergy potential in Zambia – An integrated bioenergy and food security assessment*. **Environment and Natural Resources Management**. Working Papers No. 84. Rome.
- GOH, C. S. et al. Rethinking sustainable bioenergy development in Japan: decentralised system supported by local forestry biomass. **Sustainability Science**, v. 15, n. 5, p. 1461–1471, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11625-019-00734-4>>.
- HADDAD, P.R., ANDRADE, T.A. Método de análise diferencial estrutural. In: HADDAD, P.R. (org.). *Economia Regional [Teorias e Métodos de Análise]*. Fortaleza: Banco Nordeste do Brasil, 1989, p.249-286.
- HERZOG, H. W.; OLSEN, R. J. Shift-share analysis revisited: the allocation effect and the stability of regional structure, a reply. **Journal of Regional Science**, v. 17, n. 3, p.441-454, 1977.
- HELYNEN, S. Bioenergy policy in Finland. **Energy for Sustainable Development**, v. 8, n. 1, p. 36–46, 2004. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60389-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60389-0)>.
- JIANG, W. et al. The Impact of the Biomass Crop Assistance Program on the United States Forest Products Market: An Application of the Global Forest Products Model. **FORESTS**, v. 10, n. 3, 2019.
- POPP, J. *et al.* The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 559–578, 2014.
- MARIN, G.; VONA, F. The impact of energy prices on socioeconomic and environmental performance: Evidence from French manufacturing establishments, 1997–2015. *European Economic Review*, v. 135, p. 103739, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014292121000921>>.
- PATRICK, G.F. **Desenvolvimento agrícola do Nordeste**. Rio de Janeiro: IPEA, 1972.
- MAKONESE, T.; IFEGBESAN, A. P.; RAMPEDI, I. T. Household cooking fuel use patterns and determinants across southern Africa: Evidence from the demographic and health survey data. **Energy and Environment**, v. 29, n. 1, p. 29–48, 2018.
- WBA, W. B. A. Global bioenergy statistics. **World Bioenergy Association**. p. 1–64, 2020.
- SARKODIE, S. A. Environmental performance, biocapacity, carbon & ecological footprint of nations: Drivers, trends and mitigation options. **Science of The Total Environment**, v. 751, p. 141912, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720354413>>.

- SAARELA, S. R. From pure science to participatory knowledge production? Researchers' perceptions on science-policy interface in bioenergy policy. **Science and Public Policy**, v. 46, n. 1, p. 81–90, 2019.
- SOUZA, N. R. Regiões-chave na integração econômica regional. *Análise Econômica*, Porto Alegre: UFRGS/Faculdade de Ciências, v.14, n.25/26, p.16-24, mar./set. 1996.
- SOUZA, N. J. *Desenvolvimento Regional*. São Paulo: Atlas, 2009.
- SOUZA, G. M. et al. The role of bioenergy in a climate-changing world. **Environmental Development**, v. 23, p. 57–64, 2017. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464516302755>>.
- SHERWOOD, J. The significance of biomass in a circular economy. **Bioresource Technology**, v. 300, 2020.

6. ARTIGO 5 – COMPETITIVIDADE DOS PRODUTOS FLORESTAIS PARA ENERGIA NO MERCADO INTERNACIONAL

RESUMO

Neste artigo analisou a competitividade internacional das exportações dos produtos florestais para energia (PFE), de 1990 a 2020. Utilizou-se os indicadores de competitividade do comércio, *Market Share* (MS), Vantagem Comparativa Revelada (VCR), Taxa de Cobertura (TC) e Índice de Competitividade (IC), a fim de determinar a competitividade das exportações dos produtos florestais para energia (PFE) no mundo. Os resultados mostraram competitividade nas exportações entre os países, indicando que, de 1990 a 2020, os países se especializaram na produção de PFE. Os países que apresentaram principalmente VCR forte foram: Vietnã, Austrália e Letônia. O país com VCR moderada foi o Chile, que variou de forte a fraco. Estados Unidos, Rússia e Polônia, obtiveram VCR fraco. Apresentaram VCR não expressivo: Canadá, Alemanha e Indonésia. Entre as categorias de PFE, o cavaco de madeira foi competitivo, no período de 1990 a 2020, com valor médio de 0,64. Os *pellets* de madeira, resíduos de madeira, lenha, carvão vegetal e outros aglomerados, demonstraram VCR médios de 0.29, 0.13, 0.09, 0.11, 0.03, respectivamente. Com base nos índices internacionais de competitividade (MS, VCR, TC, IC), este estudo construiu uma análise do mercado de PFE abrangente. Por fim, os combustíveis de madeira continuam sendo uma importante fonte de energia renovável, contribuindo com a economia circular.

Palavras-chave: Bioeconomia florestal, Indicadores de Competitividade, Produto florestal para Energia.

ARTICLE 5 – COMPETITIVENESS OF FOREST PRODUCTS FOR ENERGY IN THE INTERNATIONAL MARKET

ABSTRACT

In this article, we analyzed the international competitiveness of exports of forest products for energy (PFE), from 1990 to 2020. The indicators of trade competitiveness, Market Share (MS), Revealed Comparative Advantage (VCR), Coverage Rate (TC) were used) and Competitiveness Index (CI), in order to determine the competitiveness of exports of forest products for energy (PFE) in the world. The results showed competitiveness in exports between countries, indicating that, from 1990 to 2020, countries specialized in the production of PFE. The countries that showed mostly strong VCR were: Vietnam, Australia and Latvia. The country with moderate VCR was Chile, which ranged from strong to weak. United States, Russia and Poland had weak VCR. They showed non-expressive VCR: Canada, Germany and Indonesia. Among the categories of PFE, the wood chip was competitive, in the period from 1990 to 2020, with an average value of 0.64. Wood pellets, wood residues, firewood, charcoal and other agglomerates showed average VCR of 0.29, 0.13, 0.09, 0.11, 0.03, respectively. Based on international competitiveness indices (MS, VCR, TC, IC), this study built a comprehensive PEF market analysis. Finally, wood fuels remain an important source of renewable energy, contributing to the circular economy.

Keywords: Forest Bioeconomy, Competitiveness Indicators, Forest Product for Energy.

6.1. INTRODUÇÃO

Em Cancún, no México, foi realizada a 16ª Conferência das Partes (COP), em 2010, com a criação do Fundo Verde do Clima, para administrar a contribuição financeira dos países desenvolvidos. Os produtos de madeira colhida, utilizados como bioenergia, foram reconhecidos como reservatório de carbono durante a 17ª Conferência das Partes (COP) 2011 em Durban (DWIVEDI *et al.*, 2016; *Food and Agriculture Organization - FAO*, 2017; TOSCANO *et al.*, 2019). A elevação do preço dos combustíveis fósseis nos últimos anos, bem como, a crescente preocupação mundial em mitigar os impactos ambientais, vem movimentando a pesquisa e a utilização de energias alternativas e renováveis no cenário mundial (RIDING *et al.*, 2015; SHERWOOD, 2020).

A bioenergia florestal contribui para a mitigação das mudanças climáticas e se tornou um mercado energético promissor. O uso mundial de *pellets* de madeira como fornecedor de energia renovável aumentou acentuadamente. Mais de 27 milhões de toneladas de *pellets* de madeira foram consumidos na Europa em 2018, sendo que mais de 45% deles para fins industriais. No entanto, nem todos os *pellets* consumidos na Europa são produzidos por países europeus, aproximadamente um terço é importado dos Estados Unidos e Canadá (CALDERÓN *et al.*, 2019).

O comércio internacional de produtos florestais para energia (PFE) tem-se elevado ao longo dos anos, passando de US\$ 8,82 bilhões em 2015 para US\$ 11,71 bilhões em 2020 (FAO, 2020). Os produtos energéticos de base florestal destacam-se no mercado global e possuem volume nas exportações, tornando-se um dos setores mais dinâmicos e de forte inserção na economia global. De acordo com a *International Renewable Energy Agency – IRENA* (2019), cerca de três quartos do uso de energia renovável mundial provêm da bioenergia e consiste no uso tradicional de biomassa (SHERWOOD, 2020; TRUONG; GUSTAVSSON; SATHRE, 2016).

A competitividade é definida como a capacidade do país formular e implementar estratégias concorrenciais que lhe permitam obter e manter a longo prazo uma posição sustentável no mercado. Consistindo, então, em dois principais objetivos: i) aumentar o nível nacional de riqueza e renda de um país e ii) considerar formas de melhorar a posição de desempenho competitivo de um país no que diz respeito às importações e exportações (BUCKLEY *et al.*, 1988; DURAND *et al.*, 1987). Os países que buscam entender quais são

suas vantagens comparativas, obtêm benefícios competitivos no comércio internacional (AHMAD *et al.*, 2021).

O modelo econômico Heckscher-Ohlin (1970) define que os países tendem a centralizar seus esforços para a produção dos bens que são abundantes (ETHIER, 1972). Balassa (1965) segue a teoria clássica do comércio internacional de David Ricardo e usa o índice Vantagem Comparativa Revelada (VCR), uma medida do nível de competição ou vantagem comparativa de um país. O VCR é um dos métodos mais utilizados para análise de competitividade de mercado, pois fornece um indicador da estrutura relativa das ações de determinada *commodity*. Portanto, o VCR permite identificar transações de comércios existentes (ERSEN, 2021).

Os padrões de comércio de um país levam à especialização da produção de mercadorias e importações de outras. Portanto, cada país deve se especializar na produção e exportação da *commodity* que é relativamente mais eficiente e usá-la em troca de mercadorias com custos relativamente maiores (RUBIN e RONDINEL, 2004). São adotados Índices de: Competitividade (IC), Participação de Mercado (*Market Share*), Taxa de Cobertura (TC) e Vantagem Comparativa Revelada (VCR) para avaliar a competitividade internacional (MAKSYMETS *et al.*, 2016; JAMBOR *et al.*, 2016; GUAN *et al.*, 2019).

Estudos de mercado e análises regionais têm recomendado testes que aplicam a concentração de mercado ao setor florestal. No cenário internacional, Rundassa *et al.* (2019) observaram as vantagens comparativas da indústria da Etiópia no período de 2007 a 2016. Ahmad *et al.* (2021) analisaram a competitividade das exportações de produtos agricultáveis no Paquistão para o período de 2001 a 2018; Soares e Silva (2013) verificaram a competitividade brasileira no comércio internacional de produtos extrativos vegetais, de 1990 a 2010. Han *et al.* (2009) avaliaram a competitividade global da indústria chinesa de produtos de base florestal. Quéno *et al.* (2019) investigaram os aspectos técnicos da produção de *pellets* de madeira.

Algumas pesquisas usaram indicadores de competitividade global dos produtos florestais. Souza *et al.* (2018) analisaram a competitividade da madeira tropical brasileira no mercado mundial, conforme o índice de vantagem comparativa revelada (VCR) e a participação de mercado (MS). Maksymets *et al.* (2016) utilizaram um índice de competitividade relativa entre países para medir mudanças na competitividade global das indústrias de produtos florestais. Parobek *et al.* (2016) apresentaram indicadores de competitividade (VCR, MS, TC) para avaliar a competitividade dos países da Europa Central indicados no mercado de produtos florestais da União Europeia (UE).

Em busca de compreender a competitividade global dos produtos florestais para energia, este trabalho analisou a competitividade internacional dos países exportadores de PFE entre os anos de 1990 a 2020.

6.2. MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1. Objeto de estudo

Os dados para medir a vantagem comparativa e competitividade das exportações mundiais de PFE foram obtidos do site da *Food and Agriculture Organization* (FAO), no período de 1990 a 2020. Assim, os produtos florestais para energia (PFE) foram constituídos pela lenha – Le, carvão vegetal – CV, cavaco de madeira (cavaco) – CM, dos resíduos de madeira – RM, dos *pellets* – Pe, e dos outros aglomerados (briquetes) – OA.

Os dez maiores países exportadores foram selecionados com ano base 2020, em bilhões de dólares americanos (US\$ 10⁹), os dez primeiros no *Ranking* e o número de nações participantes das exportações para os anos de 1990 a 2020. Para estimar os ganhos e perdas nas exportações mundiais de PFE, a taxa de crescimento geométrico (TGC) sugerida por Cuenca e Dompieri (2017) e expressa em porcentagem anual (% a.a.) foi utilizada de acordo com a Equação 1.

$$TGC = \left(\sqrt[n]{\frac{V_t}{V_0}} - 1 \right) * 100 \quad (1)$$

Em que,

TCG = Taxa de crescimento geométrico;

V_t = exportações de PFE para o último ano;

V_0 = exportações de PFE para o ano inicial;

n = variação temporal das exportações (expresso em anos).

6.2.2. Market Share

A vantagem comparativa pode ser medida pela quota de mercado para identificar vantagem em termos de tamanho e grau de especialização no mercado. Quota de mercado é a porcentagem ou proporção do total do mercado, ou mercado disponível segmento a ser capturado por um país. O índice de market share (MS) está exposto na Equação 2:

$$MS_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_{iw}} \quad (2)$$

onde,

MS_{ij} = *Market share*;

X = exportação do produto i do país j ;

X_{ij} = exportação do PFE para o país j ;
 X_{iw} = exportações mundiais de PFE.

6.2.3. Índice de vantagem comparativa revelada (VCR)

O VCR (Equação 3) foi desenvolvido por Balassa (1965), que mede a competitividade e o desempenho das exportações de PFE de um dado produto e o desempenho comercial do país no mercado mundial.

$$VCR = \frac{(X_{ij}/X_i)}{(X_{wj}/X_w)} \quad (3)$$

onde,

X_{ij} = valor das exportações de PFE j pelo país i no período;

X_i = valor das exportações totais de produtos florestais pelo país i ;

X_{wj} = valor das exportações de PFE j no mundo;

X_w = valor das exportações de produtos florestais no mundo.

Para a classificação, utilizou-se a proposta de Hinloopen e Van Marrewijk (2001), o VCR pode ser classificado em: não expressivo ($0 < VCR \leq 1$); fraca ($1 < VCR \leq 2$); média ($2 < VCR \leq 4$) e forte ($4 < VCR$).

6.2.4. Taxa de Cobertura (TC)

A taxa de cobertura (TC) mede a proporção das despesas de importação pagas pela receita de exportação. Para complementar a análise do índice de VCR, foi calculada a Taxa de Cobertura (TC), obtida conforme Equação 4:

$$TC = \frac{X_t}{M_t} \quad (4)$$

onde,

TC = Taxa de cobertura;

X_t = Exportações em valor de PFE no período t ;

M_t = Importações em valor de PFE no período t .

O indicador propõe que $TC \geq 1$, o produto contribui para o superávit comercial de determinada região ou país, quando for $TC < 1$, o produto tem déficit na balança comercial. A interação dos índices VCR e TC pode ser considerada pela presente análise como pontos fracos e fortes de uma economia (MAKSYMETS; LÖNNSTEDT, 2016).

6.2.5. Índice de Competitividade (IC)

Tem-se argumentado que o índice VCR é tendencioso, pois as importações são ignoradas, especialmente quando o tamanho do país é relevante (GREENAWAY; MILNER,

1993). Portanto, como indicador relativo, a competitividade comercial indica se o país J possui exportações ou importações líquidas, reduzindo os efeitos distorcidos das flutuações macroeconômicas como a inflação. O IC está representado na Equação 05.

$$IC_{ij} = \frac{X_{ij} - M_{ij}}{X_{ij} + M_{ij}} \quad (5)$$

Thanh et al. (2019), classificam o índice como: forte ($0,8 < IC \leq 1$); média ($0,5 < IC \leq 0,8$); não expressivo ($IC \leq 0,5$). Quando o índice estiver próximo de 1, mais forte é a competitividade internacional do PFE, do contrário, não expressa competitividade.

6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1. Conjuntura da exportação no comércio de PFE no mundo

A Figura 6.1 apresenta o valor bruto acumulado da exportação e importação dos 5 principais países e do resto do mundo. As exportações de PFE foram US\$ 1,5 bilhões de dólares, em 1990, para US\$ 11,7 bilhões em 2020, um aumento médio de 6% ao ano. A demanda intensiva de PFE por alguns países como Japão, China, Reino Unido, Dinamarca e Coreia do Sul, bem como, a expansão florestal, exercem influência sobre o mercado bioenergético global. As análises indicam que, de 1990 a 2020, os países que se especializaram na produção de PFE obtiveram vantagens competitivas no mercado de PFE.

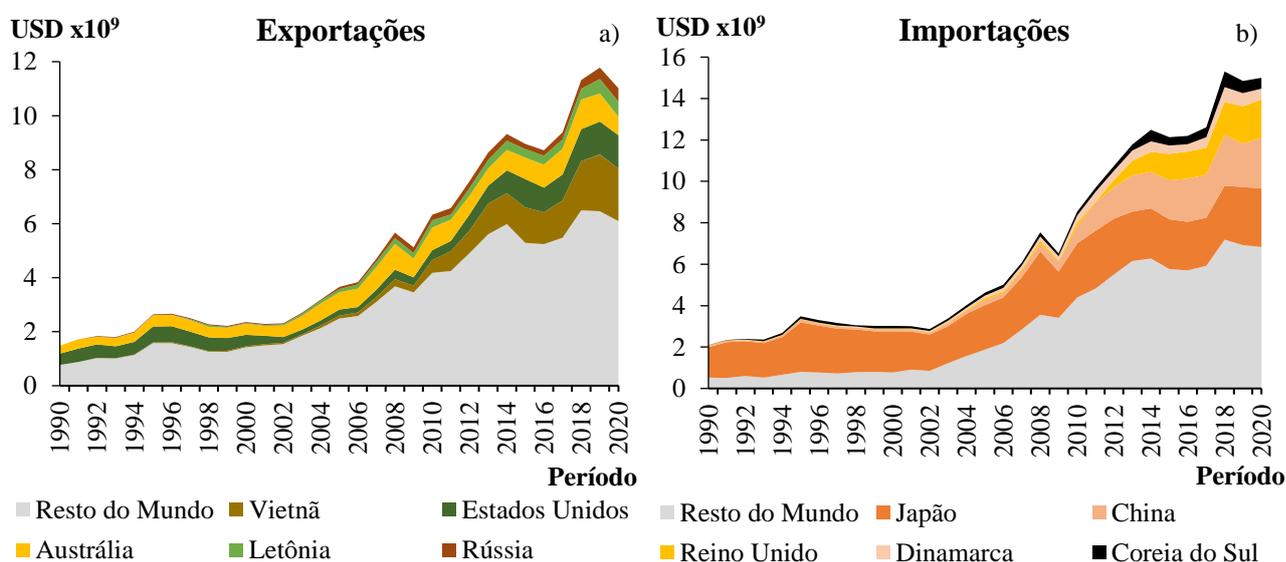


Figura 6.1. Evolução do top 5 de países (base 2020) exportadores (a) e importadores (b) de produtos florestais para energia, de 1990 a 2020.

Fonte: FAO (2022).

Inicialmente, em 1990, apenas 40 países participavam do comércio de exportação de PFE. Ao longo dos anos outros países entraram no mercado global, o que contribuiu para elevar

a competitividade. Atualmente, cerca de 175 países estão inseridos no mercado de PFE. Simione et al. (2017) observaram que a silvicultura ampliou sua participação no valor da produção primária florestal frente ao extrativismo vegetal no Brasil. A participação do PFE no Produto Interno Bruto (PIB) teve destaque nos países como: Tchêquia (7,2%), Estônia (12,8%), Letônia (11,7%), Lituânia (9,7%) e Polônia (5,4%) (GORDEEV, 2020). A Figura 6.2 representa o valor bruto acumulado da exportação e importação das categorias de PFE no mundo no período de 1990 a 2020.

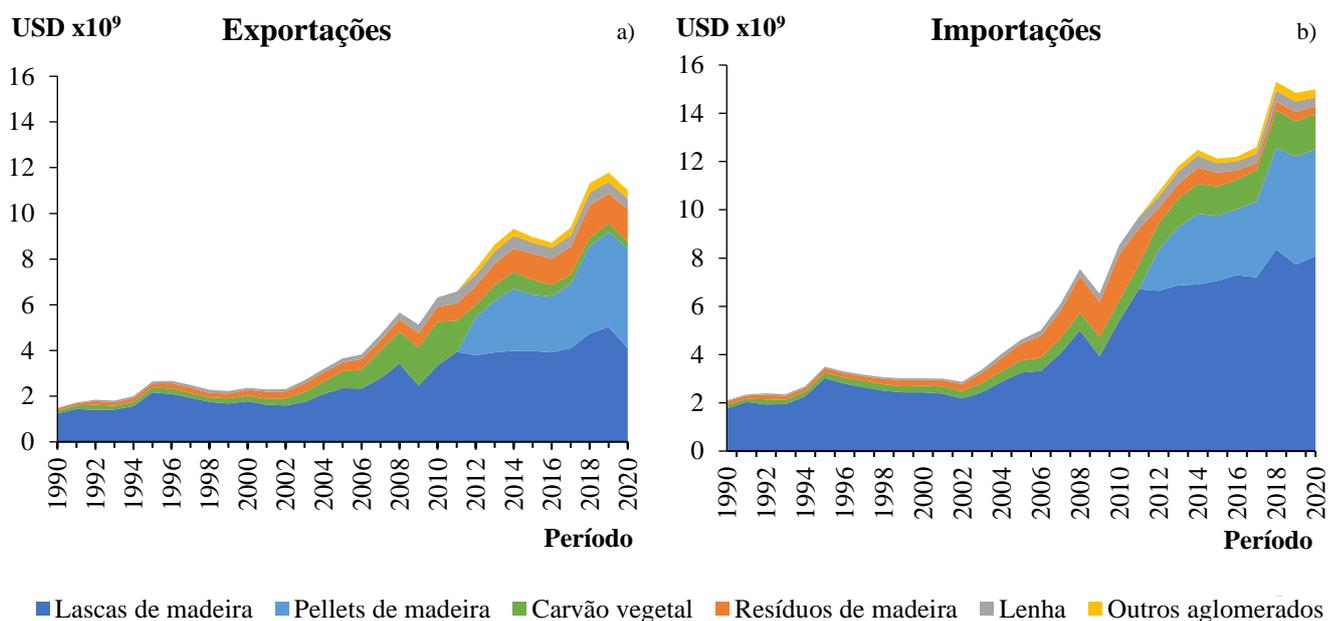


Figura 6.2. Evolução das exportações (a) e importações (b) de produtos florestais para energia, de 1990 a 2020.

Fonte: FAO (2022).

No período 1990-2000, observou-se crescimento no quantitativo de países especializados em PFE. Wang et al. (2020) analisaram que o consumo de PFE está relacionado ao desenvolvimento humano nos países e afirmam que o uso de energia de biomassa aumentou o crescimento econômico das nações. O carvão vegetal foi a categoria de PFE que mais teve competitividade entre os países, foram 154 países, seguida dos resíduos de madeira, cavaco de madeira, lenha, outros aglomerados e *pellets* de madeira, respectivamente com 128, 120, 88, 87, 77 países. Bichele e Telles (2021) afirmam que neste período, as lenhas foram derivadas a partir do extrativismo e silvicultura, utilizados em países emergentes como o Brasil.

O carvão vegetal, em 1990, correspondeu a 89,17 milhões de dólares, enquanto, em 2020, foi 1,3 bilhão, um volume de crescimento de 9% ao ano. O aumento significativo da

exportação de PFE foi resultado da expansão da cultura florestal no mundo, principalmente com espécies exóticas de rápido crescimento (SANQUETTA *et al.*, 2018), bem como, a alta demanda dos países emergentes (NYARKO *et al.*, 2021).

Os resultados indicam que evolução da exportação de PFE, foi maior ao longo do período de 2000 a 2010. Em 2000, a exportação de PFE foi de US\$ 2,20 bilhões de dólares e em 2010 foram cerca de US\$ 6,3 bilhões, representando um aumento de 11% a.a. Nesse período, o preço pago por m³ de PFE aumentou. No Brasil, a madeira utilizada para energia foi, principalmente, utilizada em indústrias consumidoras de lenha (COELHO JUNIOR *et al.*, 2018). O potencial da bioenergia tem sido examinado por outros estudos, a exemplo de Hakkarainen *et al.* (2019), onde constaram que a implementação de plantas industriais híbridas de bioenergia já está em andamento em vários setores na Finlândia, Áustria, Alemanha e Dinamarca, mas a maioria deles esteve focada em aplicações de aquecimento doméstico.

A sazonalidade climática foi relatada como um fator significativo na demanda dos PFE, possibilitando segurança energética em épocas de estiagem (LIU, *et al.* 2020; UDALI, *et al.* 2021). Assim, a silvicultura pode ter uma contribuição valiosa para o desenvolvimento em substituição de espécies florestais nativas. A exportação de PFE da silvicultura se expandiu e, ao mesmo tempo, a produção do extrativismo (áreas primárias) foi drasticamente reduzida em países emergentes (BICHEL; TELLES, 2021). Porém, para que isso se consolide, é preciso que se reflita sobre os diversos cenários de implantação de culturas energéticas no mundo.

O cultivo de florestas energéticas em terras marginais (MEHMOOD *et al.*, 2017), o uso de sistemas integrados de produção agrícola (LENZ *et al.*, 2019) e planos de manejo sustentável (SANTOS *et al.*, 2013), tornam-se alternativas promissoras. Outras estratégias envolvem o uso de biomassa agrícola-florestal e industrial em sua forma natural, prensada em densos *pellets* ou briquetes ou após conversão termoquímica por gaseificação, pirólise, liquefação, carbonização e torrefação (BONASSA *et al.*, 2018).

6.3.2. Vantagem comparativa dos *players* no setor bioenergético mundial

Os 10 principais *players* em exportação do comércio de PFE em 2020 foram: Vietnã, Estados Unidos, Austrália, Letônia, Rússia, Canadá, Chile, Alemanha, Indonésia e Polônia, enquanto o Brasil ocupou no *Ranking* a 17^o posição. A região do leste europeu demonstrou-se competitiva no comércio de produtos florestais. Entre os *players* no mercado de PFE, os países que apresentaram em 2020 VCR>1 foram: Vietnã, Estados Unidos, Austrália, Letônia, Rússia, Chile e Polônia. Os países que apresentaram VCR<1 em 2020 foram: Canadá, Alemanha e

Indonésia. A Tabela 6.1 apresenta a vantagem comparativa do top 10 de países em relação ao Brasil (17°).

Tabela 6.1. Evolução da vantagem comparativa revelada dos Top 10 países exportadores e o Brasil para 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020.

Países	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	TGC
Vietnã	-	34,8	61,5	49,3	29,5	20,9	14,7	-3,4%
EUA	2,0	1,8	1,7	0,7	0,6	1,1	1,1	-2,2%
Austrália	59,2	39,8	42,4	28,9	19,3	11,6	9,9	-5,8%
Letônia	-	1,6	3,5	8,6	10,2	7,9	7,8	6,6%
Rússia	-	0,3	0,8	0,7	1,0	0,7	1,1	4,9%
Canadá	0,6	0,3	0,3	0,4	0,7	0,4	0,5	-0,3%
Chile	8,9	5,5	4,4	3,1	2,7	1,4	1,5	-5,9%
Alemanha	0,9	0,6	0,4	0,4	0,6	0,4	0,3	-3,3%
Indonésia	1,0	0,6	0,5	0,9	0,6	1,0	0,7	-1,6%
Polônia	0,0	1,6	1,4	1,4	1,6	1,5	1,4	-0,5%
Brasil	0,03	0,6	1,0	1,0	0,4	0,4	0,3	-2,4%

Obs. Forte Moderado Fraco Não expressivo. TGC = Taxa Geométrica de Crescimento
Fonte: Os autores (2022).

Os países que apresentaram VCR forte foram o Vietnã e a Austrália no período de 1990-2020. O Chile manteve o VCR forte até os anos 2000, posteriormente foi enfraquecendo sua vantagem comparativa, chegando em 2020 com VCR fraco (1,5). Tais países foram expressivos nas exportações PFE, se tornando competitivos no mercado. A Letônia foi o país que teve maior taxa de crescimento, no período de 1995-2020, com taxa de 6,6% a.a. Ela iniciou com VCR fraco, manteve o crescimento, apresentando VCR moderado, fortaleceu o mercado local neste setor, e se tornou competitivo com VCR forte, em 2020 (Tabela 6.1).

Os Estados Unidos se manteve com VCR fraco ao longo do período, com taxa de -2,2% a.a. A redução na taxa reflete o período da inserção de novos países no mercado, tornando-se cada vez mais competitivo globalmente. Países como: Rússia, Canadá, Alemanha e Brasil resultaram em VCR não expressivo, em alguns momentos VCR fraco, ao longo do período analisado, contudo, apenas a Rússia teve taxa de crescimento positivo de 4,9% a.a (Tabela 6.1).

O Vietnã no período de 1995-2020 apresentou VCR forte, mesmo apresentando taxa de -3,4% a.a (Tabela 6.1). Esse foi o país onde o cooperativismo se destacou e conseguiu progredir, transformando o setor PFE numa grande fonte de divisas para o país. O Vietnã lidera o mundo no que diz respeito ao aumento em plantações florestais para energia (PHAM *et al.*, 2012). No período de 1990-2020, o país conseguiu elevar suas exportações de PFE, chegando a gerar

aproximadamente US\$ 2,03 bilhões em 2020. Entre as categorias de PFE que teve maior participação foram: cavaco de madeira e *pellets* de madeira. De acordo com Trang *et al.* (2015) tais produtos são provenientes das plantações florestais, enquanto o fornecimento de madeira de florestas nativas tem diminuído no mundo (QUANG *et al.*, 2017).

Os Estados Unidos apresentou VCR fraco (Tabela 6.1), no entanto, como potência mundial, representou o maior produtor de *pellets* de madeira e o segundo maior exportador de PFE (atrás apenas do Vietnã). Tiveram um crescimento médio na produção de 7% a.a. O maior período de crescimento foi entre os anos de, 2002-2011, com média de crescimento de 12% a.a., porém desde 2018 tem se mantido estável. Os países que dispõem de desenvolvimento tecnológico, estrutura e logística para enviar seus produtos ao mundo tendem a ser competitivos (BIOMASSA BR, 2016).

A Polônia está no setor bioenergético entre os maiores exportadores de cavaco de madeira da Europa Central dos últimos 50 anos. É importante ressaltar também que, as empresas polonesas oferecem cavaco de madeira ecológica como energia para defumar alimentos, de acordo com a *European Comission* (2020). As empresas de cavaco de madeira abasteceram mais de 5.000 empresas de alimentos com mais de 100 milhões de toneladas de produtos. As indústrias de carnes, peixes, laticínios e frutas são os principais consumidores de PFE na Polônia. Embora a Polônia tenha demonstrado crescimento de PFE nos últimos anos, obteve VCR fraco, com valores variando de 1,4 a 1,6 (Tabela 6.1). No entanto, o resultado está em acordo com os achados de Gordeev (2020).

Gordeev (2020) observou que países como: França, Brasil, México, Espanha e Tailândia, tiveram VCR não expressivo. Os resultados de Dieter e Englert (2007) e Gordeev (2020) mostram que Rússia, Malásia, Canadá, Estados Unidos, Finlândia e Polônia apresentaram especialização comercial em madeira bruta, dado que exibiram $VCR > 1$, podendo deduzir que o comportamento da competitividade de PFE nestes países, deve-se ao potencial de madeira bruta. A comparação dos índices VCR reflete a importância de usar dados de exportação e importação, sendo considerável para explorar a competitividade dos Países.

Outros fatores, além do potencial de madeira bruta, foram a iniciativa e, o compromisso com as metas globais relacionada ao meio ambiente. A preocupação com os recursos naturais estava apenas em passos lentos, mas foi a conferência de Estocolmo que trouxe uma perspectiva quanto ao estado do clima (BRUNNÉE, 2009). Uma breve comparação com a análise realizada por Dieter e Englert (2007) mostra que, a posição dos *players* é bastante competitiva no mercado mundial de PFE.

Entre as categorias de PFE, a principal foi: o cavaco de madeira, embora tenha obtido encolhimento no período de 1990 a 2020. O maior pico foi em 1991, com 0,83 e menor valor em 2020, com 0,41. Os demais produtos, como: *Pellets* de Madeira, Resíduos de Madeira, Lenha, Carvão Vegetal e Outros Aglomerados, demonstraram desvantagem comparativa, $VCR < 1$. A Figura 6.3 apresenta a vantagem comparativa revelada dos 5 maiores exportadores e por categoria de PFE, de 1990 a 2020.

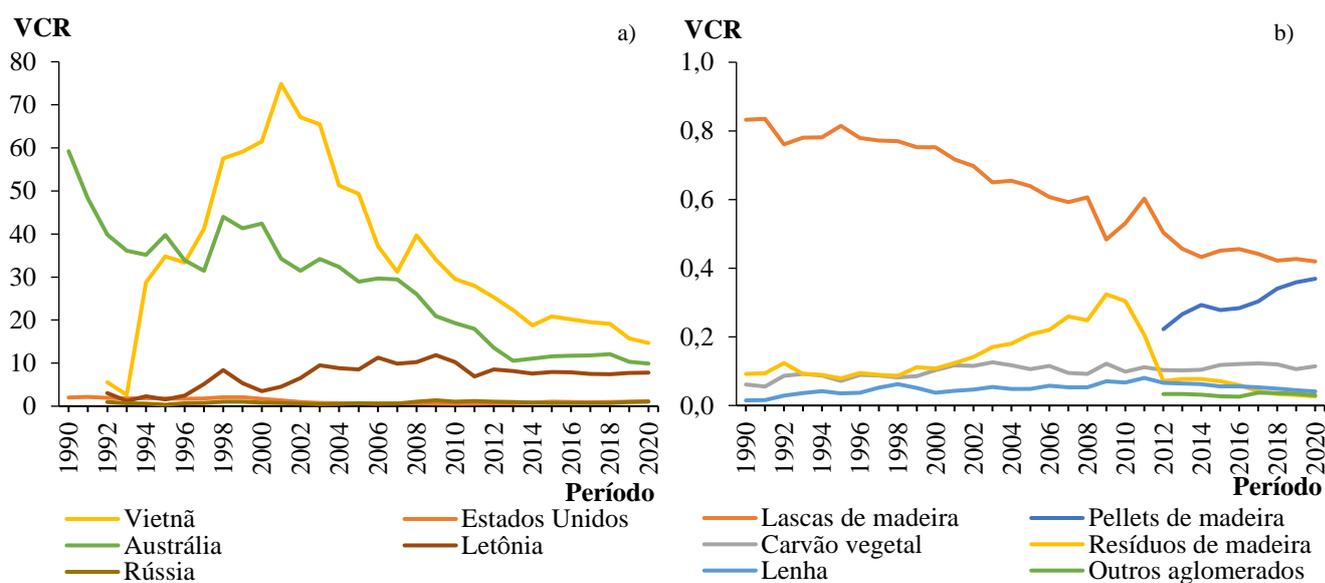


Figura 6.3. Evolução da vantagem comparativa revelada dos Top5 países (base 2020) (a) exportadores e por categoria de PFE (b), de 1990 a 2020.

Fonte: Os autores (2022).

6.3.3. Taxa de Cobertura

A Tabela 6.2 representa a taxa de cobertura dos principais exportadores mundiais de PFE e o Brasil. Os elevados valores das taxas de cobertura verificados em alguns períodos deveram-se, particularmente, à independência comercial dos países em relação ao mercado externo. Os resultados indicaram que, no período de 1990-2020, o $TC > 1$ foi constante no top 10 de países e no Brasil, sendo de grande relevância deste setor para o superávit comercial. A demanda e a oferta são modeladas de acordo com os valores relativos de importações, exportações e despesas ou produção. Especificamente, a demanda por importações de PFE depende da renda real do país e do preço relativo das mercadorias importadas, enquanto a demanda pelas exportações de um país depende da renda externa e do preço relativo das importações no exterior.

Tabela 6.2. Evolução da taxa de cobertura do top 10 de países e do Brasil para 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020.

Países	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	TGC
Vietnã	-	5258,6	0,0	3187,7	12,6	203,1	334,3	-10,4%
EUA	7,2	6,0	5,1	1,3	2,4	6,1	5,5	-0,9%
Austrália	455,3	1223,5	380,9	196,5	178,8	70,9	60,4	-6,5%
Letônia	-	0,0	303,7	89,4	72,4	12,7	5,4	-18,3%
Rússia	-	0,0	150,9	53,1	41,7	29,1	38,2	-6,6%
Canadá	11,6	2,0	1,5	2,3	2,9	2,4	3,3	-4,1%
Chile	0,0	1494,1	897,4	66,3	34,8	18,0	24,6	-15,2%
Alemanha	1,0	1,8	1,3	1,3	1,1	0,9	1,5	1,1%
Indonésia	0,0	1387,0	158,2	271,1	12,4	348,3	2,7	-22,1%
Polônia	0,0	21,8	18,5	3,3	2,8	2,3	2,5	-8,4%
Brasil	0,0	85,8	145,3	84,5	9,0	15,6	17,2	-6,2%

Obs. ■ Forte ■ Fraco. TGC = Taxa Geométrica de Crescimento.

Fonte: Os autores (2022).

No subperíodo de 1990-2000, os países como os Estados Unidos, Austrália, Canadá e Alemanha apresentaram TC forte ($TC > 1$), o que contribuiu para o superávit comercial, indicando que nesses países as exportações de PFE excederam as importações do comércio florestal. Os países como Vietnã, Letônia, Rússia, Chile, Indonésia, Polônia e Brasil, apresentaram TC forte, embora tenham apresentado em alguns anos TC fraco. O Vietnã e a Indonésia nesse período foram os que apresentaram a maior média com 1.473 e 1.368, respectivamente. Tais resultados propõem que as exportações de PFE foram maiores que a importações no setor florestal, conquanto em alguns anos, não havia exportações, ou não superaram as importações do setor. Casos como o Vietnã (1900-1992; 1999-2000), Rússia (1990-1991, 1995-1998), Letônia (1990-1991, 1994-1997) e Indonésia (1990 e 1991) conforme a Figura 6.4 (a).

Os resultados revelam a expansão dos países voltados para uma energia mais limpa e consciente, a qual está articulada à construção do pensamento e de práticas ambientais. Conforme Almeida *et al.* (2008) afirmam, a partir da década de 1990, os princípios e as práticas bioenergéticas vinculados ao campo ambiental, emergem de forma visível e disseminada por meio da luta e conquistas ecológicas. Na década de 2001 a 2010, os países se fortaleceram nas exportações mundiais de PFE. O top dez de países apresenta TC forte, se estabilizando no mercado global. O Vietnã e a Indonésia apresentaram maiores médias de TC, sendo 1.118 e 661 respectivamente. Compreende-se que políticas de fechamento das florestas naturais (extrativista) e a ampliação de florestas plantadas tendem a aumentar as exportações dos produtos florestais (THANH VAN *et al.*, 2021).

As principais diferenças entre os indicadores é que o índice de Balassa se baseia apenas em dados de exportação, ao contrário da TC e IC. A lenha e outros aglomerados apresentaram TC forte em alguns períodos, revelando a competitividade destes segmentos na cadeia bioenergética e seu livre mercado nas exportações mundiais. Os resíduos de madeira apresentaram TC forte nos anos de 1991-1997, 2000-2005 e 2013-2018, no ano de 2020 apresentou TC fraco. Assim, os resultados sugerem que a grande contribuição destes índices é determinada pelas exportações mundiais que superaram as importações no setor. Os *pellets* de madeira, carvão vegetal e o cavaco de madeira, apresentaram TC fraco ao longo do período analisado 1990-2020.

Além disso, os baixos valores na taxa de cobertura em alguns períodos deveram-se, particularmente, a elevações nas importações superando as exportações globais destes setores no mercado de PFE, como exposto na Figura 6.4 (b). Conforme o compromisso dos países para atingir a redução de suas emissões de CO₂ até 2030 e alcançar a neutralidade de carbono até 2060. Sarkodie (2021) avaliou os impulsionadores socioeconômicos do desempenho ambiental e descobriu que a expansão da biocapacidade das nações tem um efeito de melhoria no desempenho ecológico. Os principais países de desempenho ambiental incluem Austrália, Brasil, China, Alemanha, Índia, Japão, Rússia e Estados Unidos. O consumo de PFE aumentou no mercado energético e contribuiu para o cumprimento dos metas globais na mudança climática (HUANG; ZHAI, 2021).

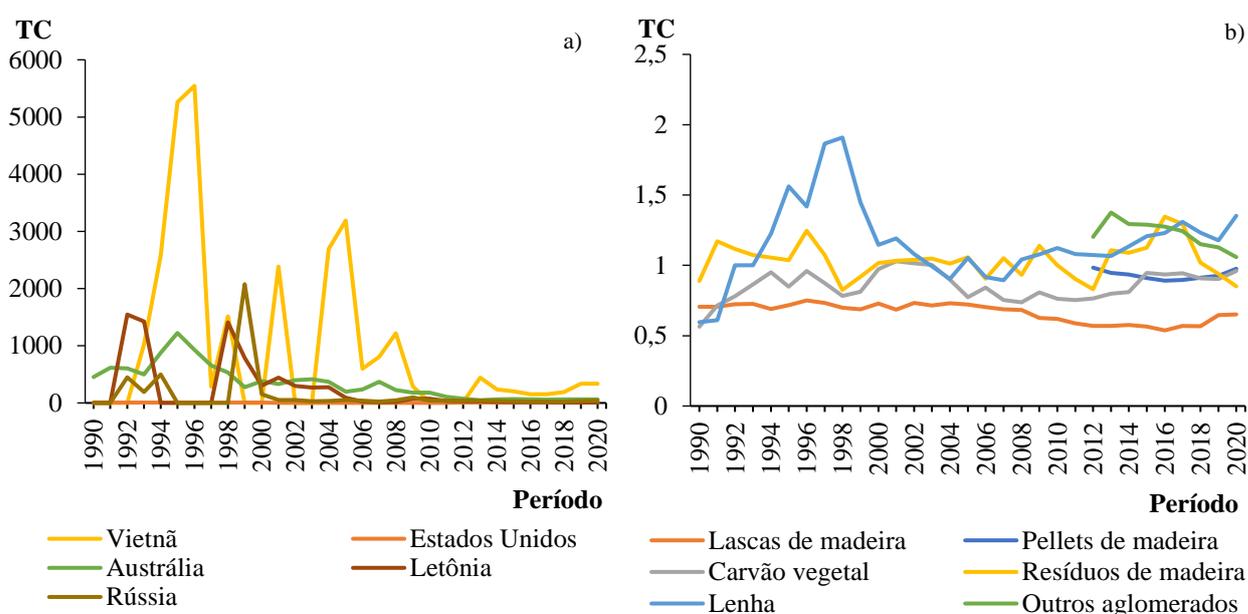


Figura 6.4. Evolução da taxa de cobertura dos Top 5 países(base 2020) (a) exportadores e por categoria de PFE (b), de 1990 a 2020.

Fonte: Os autores (2022).

6.3.4. Índice de Competitividade do mercado de PFE

O estudo usou a combinação do índice de competitividade como uma abordagem para investigar a competitividade do comércio internacional do mercado de PFE entre os principais países exportadores. A Tabela 6.3 representa a evolução do top 10 de países e do Brasil, na competitividade comercial de PFE.

Tabela 6.3. Evolução do índice de competitividade do top 10 de países e do Brasil para 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020.

Países	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	TGC
Vietnã	-	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,0%
EUA	0,8	0,7	0,7	0,1	0,4	0,7	0,7	-0,3%
Austrália	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-0,1%
Letônia	-	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,7	-1,5%
Rússia	-	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	-0,2%
Canadá	0,8	0,3	0,2	0,4	0,5	0,4	0,5	-1,5%
Chile	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	-0,3%
Alemanha	0,02	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	7,1%
Indonésia	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	0,5	-2,6%
Polônia	0,0	0,9	0,9	0,5	0,5	0,4	0,4	-3,0%
Brasil	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,9	0,9	-0,4%

Obs. ■ Forte ■ Moderado ■ Não expressivo. TGC = Taxa Geométrica de Crescimento

Fonte: Os autores (2022).

Os resultados revelam que os países aumentaram sua competitividade global de PFE desde a última década, embora a Alemanha no período em análise não apresentou vantagem competitiva ($IC \leq 0,5$) (Tabela 6.3). Vietnã, Austrália, Rússia e Chile apresentaram excelente vantagem competitiva ($0,8 < IC \leq 1$). Ainda que Canadá, Indonésia, Polônia e Brasil apresentam $IC > 0$, indica que a produtividade da *commodity* (PFE) destes países foi maior do que a média mundial, mas não apresentaram excelente competitividade, em toda série temporal. Canadá (2006), Alemanha (2011 a 2018), Polônia (2011 e 2012) exibiram $IC < 0$, ou seja, a produtividade desses países foi inferior ao nível médio mundial e não tiveram vantagem competitiva nos anos mencionados (Tabela 6.3).

Souza *et al.* (2017) sugerem que os países que tiveram vantagens competitivas, incluíram em suas prioridades investimentos em tecnologia, extensão rural e inovações, as quais geram capacidade, infraestrutura e promoção de preços estáveis para incentivar a produção e uso local de culturas que fornecessem alimentos e energia, bem como outros serviços.

Thanh *et al.* (2019) confirmam que o processamento de madeira do Vietnã vem aumentando sua competitividade global tornando um dos principais *players* do mercado energético. No entanto, a taxa de crescimento da competitividade internacional do Vietnã

desacelerou de 2008 a 2020. Essas descobertas são apoiadas por Thanh *et al.* (2019), Hieu *et al.* (2010) e Hieu *et al.* (2011), que identificaram que o Vietnã tem vantagem comparativa na exportação de produtos florestais. A Figura 6.5 apresenta a evolução do índice de competitividade do top 5 de países e (base 2020) (a) exportadores e por categoria de PFE (b), de 1990 a 2020.

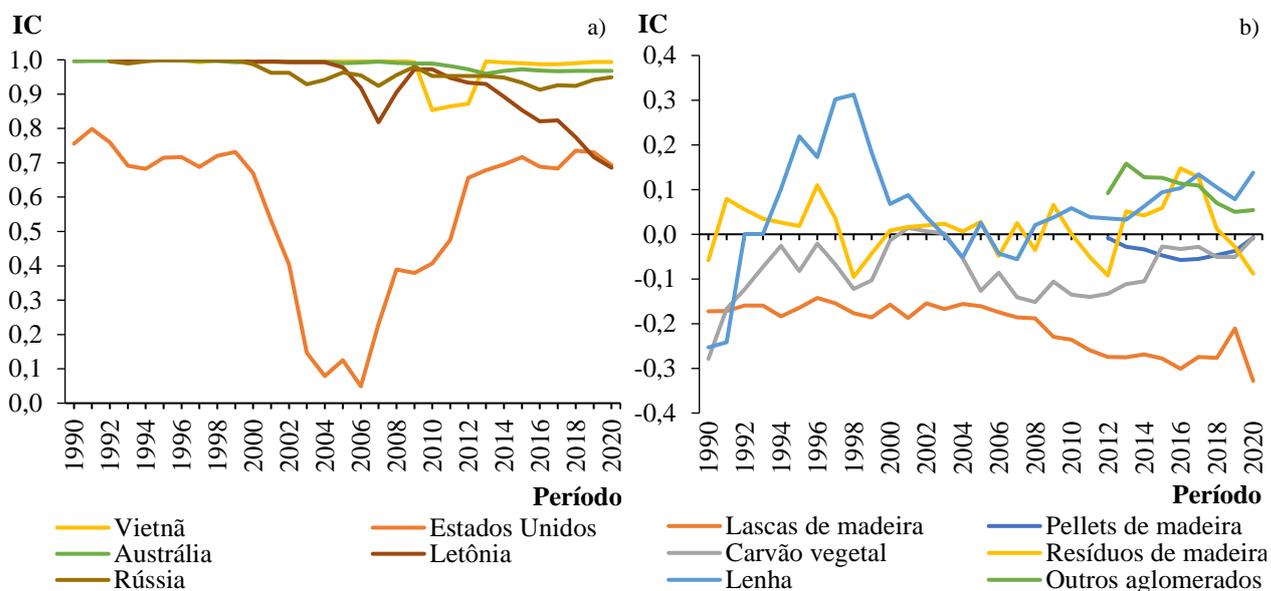


Figura 6.5. Evolução do índice de competitividade do top 5 de países (base 2020) (a) exportadores e por categoria de PFE (b), de 1990 a 2020.

Fonte: Os autores (2022).

6.4. CONCLUSÃO

Os indicadores de competitividade revelam a importância de avaliar o mercado de PFE no mundo. Portanto, o trabalho conclui que os principais *players* do comércio de PFE em 2020 foram: Vietnã, Austrália, Letônia, Rússia, Canadá, Chile, Alemanha, Indonésia e Polônia.

O PFE mostrou ter sólidas possibilidades de expansão comercial no mundo. Entre os *players* do mercado de PFE, os países com vantagens comparativas foram: Vietnã, Estados Unidos, Austrália, Letônia, Rússia, Chile e Polônia.

Os *pellets* de madeira, o carvão vegetal e o cavaco de madeira mostraram-se competitivos entre as categorias de PFE ao longo do período de 1990 a 2020. Os países que apresentaram maiores competitividades durante a análise foram: Vietnã, Estados Unidos, Austrália, Letônia e Rússia.

Assim, os Estados Unidos, Austrália, Canadá e Alemanha obtiveram uma taxa de cobertura forte. Tais países foram expressivos nas exportações PFE, se tornando especializados

no mercado. A Letônia teve a maior taxa de crescimento, no período de 1990 a 2020. Com base no índice internacional de competitividade, este estudo construiu uma análise de competitividade do mercado de PFE abrangente. Os combustíveis de madeira derivados de produtos florestais continuam sendo uma importante fonte de energia renovável, potencialmente neutra em carbono, contribuindo com a economia circular.

6.5. REFERÊNCIAS

- AHMAD, B. et al. Analyzing export competitiveness of major fruits and vegetables of pakistan: An application of revealed comparative advantage indices. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 58, n. 2, p. 719–730, 2021.
- ALMEIDA et al. Educação Ambiental: Temas, teorias e práticas. Porto Alegre, num. 6, vol.4, jan/dez. SENAC Departamento Nacional, Rio de Janeiro, 2008.
- BALASSA, B. Trade Liberalization and “revealed” Comparative Advantage. The Manchester School of Economic and Social Studies, 1965.
- BICHEL, A.; TELLES, T. S. Spatial dynamics of firewood and charcoal production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, p. 127714, 1 set. 2021.
- BIOMASSA BR - Revista Brasileira de Biomassa e Energia. vol.6, nr. 27, set/out. 2016. Disponível em:<<https://www.revistabiomassabr.com/>>.
- BUCKLEY, P. J.; PASS, C. L.; PRESCOTT, K. Measures of international competitiveness: A critical survey. *J. Mark. Manag.* 1988, 4, 175–200.
- BRUNNÉE, J. The Stockholm Declaration and the Structure and Processes of International Environmental Law (July 22, 2009). The future of ocean regime building: essays in tribute to douglas m. johnston, Aldo Chircop, **Ted McDorman**, eds., pp. 41-62, Kluwer Law, 2008.
- CALDERÓN, C.; GAUTHIER, G.; JOSSART, J. M. Bioenergy europe statistical report 2019 - key finding. 2019.
- CARVALHO, G. R; LEITE, B. L. J; SIQUEIRA, K. B.; RODRIGUES, L. B. O comércio internacional de leite em pó. In: LEITE, J. L. B. et al. (Ed.). Comércio Internacional de Lácteos. 2. ed. rev. e ampl. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2009.
- COELHO JUNIOR, L.M.; MARTINS, K.L.C.; ALMEIDA PINTO, P.A.L.; SILVA, M.V.B. Spatial distribution of firewood production in northeastern Brazil (1994-2013). 2018. *Rev. Arvore* 42, 1–10. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000400002>.
- CUENCA, M. A. G.; DOMPIERI, M. H. G. Dinâmica espacial da canavicultura e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 47, n. 4, p. 91-106, 2017.
- DIETER, M.; ENGLERT, H. Competitiveness in the global forest industry sector: an empirical study with special emphasis on Germany. **European Journal of Forest Research**, v. 126, n. 3, p. 401–412, 11 jun. 2007. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10342-006-0159-x>>.
- DWIVEDI, P. et al. Efficacy of carbon and bioenergy markets in mitigating carbon emissions on reforested lands: A case study from Southern United States. **Forest Policy and Economics**, v. 67, p. 1–9, 2016.
- DURAND, M.; GIORNO, C. Indicators of international competitiveness: Conceptual aspects and evaluation. *OECD Econ. Stud.* 1987, 9, 147–182.
- ERSEN, N. Assessment of global competitiveness of non-wood forest products: The case of Turkey. *Baltic Forestry*, v. 26, n. 2, p. 1–8, 2021.

- ETHIER, W. Non-traded goods and the Heckscher–Ohlin model. *International Economic Review* 13, 132–147. 1972.
- EUROPEAN COMMISSION. Enterprise europeu network. A Polish company offers high-quality eco wood chips for smoking food to trade intermediaries in European countries. Disponível em: < <https://een.ec.europa.eu/partners/polish-company-offers-high-quality-eco-wood-chips-smoking-food-trade-intermediaries> > Acessado em 05 de outubro de 2021.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. Sustainable woodfuel for food security Sustainable wood fuel for food security A Smart choice: green renewable and affordable. Rome, 2020.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome, 2020. doi:<https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- GORDEEV, R. Comparative advantages of Russian forest products on the global market. **Forest Policy and Economics**, v. 119, p. 102286, 1 out. 2020.
- GREENAWAY, D.; MILNER, C. Trade and Industrial Policy in Developing Countries: A Manual of Policy Analysis, Part IV Evaluating Comparative Advantage. The Macmillan. Press. esp. 181–208. 1993.
- GUAN, Z.; XU, Y.; JIANG, H.; JIANG, G. International competitiveness of Chinese textile and clothing industry—A diamond model approach. *J. Chin. Econ. Foreign Trade Stud.* 2019, 12, 2–19.
- HAKKARAINEN, E.; HANNULA, I.; VAKKILAINEN, E. Bioenergy RES hybrids – assessment of status in Finland, Austria, Germany, and Denmark. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 13, n. 6, p. 1402–1416, 2019.
- HAN, X.; WEN, Y.; KANT, S. The global competitiveness of the Chinese wooden furniture industry. **Forest Policy and Economics**, v. 11, n. 8, p. 561–569, 2009.
- HINLOOPEN, J.; VAN MARREWIJK, C. On the empirical distribution of the balassa index. *Review of World Economics/Weltwirtschaftliches Archiv.* 2001.137(1): 1–35.
- HIEU, P.S.; THUY, V.H.; THUAN, P.D. Main characteristics of statistical data and the statistical system for wood and wood-processing products in Vietnam. *Small Scale For.* 2010, 10, 185–198.
- HIEU, P.; HARRISON, S.; LAMB, D. A spatial equilibrium analysis of policy for the forestry and wood-processing industries in northern Vietnam. **Mod. Econ.** 2011, 2, 90–106.
- HUANG, M. T.; ZHAI, P. M. Achieving Paris Agreement temperature goals requires carbon neutrality by middle century with far-reaching transitions in the whole society. **Advances in Climate Change Research**, v. 12, n. 2, p. 281–286, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.03.004>>.
- IRENA. World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2019.
- JAMBOR, A.; BABU, S. Competitiveness: Definitions, theories and measurement. In *Competitiveness of Global Agriculture*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016.
- MAKSYMETS, O.; LÖNNSTEDT, L. International competitiveness: A case study of American, Swedish, and Ukrainian forest industries. *Int. Trade J.* 2016, 30, 159–176.
- NYARKO, I. et al. Socio-Economic Analysis of Wood Charcoal Production as a Significant Output of **Forest Bioeconomy in Africa**. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/f12050568>>.
- PAROBEK, J.; PALUS, H.; LOUCANOVÁ, E.; KALAMÁROVÁ, M.; GLAVONIC, B. Competitiveness of central European countries in the EU forest products market with the emphasis on Slovakia. *Acta Fac. Xylogologiae Zvolen Res. Publica Slovaca* 2016, 58, 125–136.
- PHAM, T. T.; MOELIONO, M.; NGUYEN, T. H.; NGUYEN, H. T.; VU, T. H. The Context

- of REDD+ in Vietnam: Drivers, Agents and Institutions. CIFOR Occasional Paper, 2012, 75.
- QUÉNO, L. R. M. et al. Aspectos técnicos da produção de pellets de madeira. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1478–1489, 2019. Doi: <https://doi.org/10.5902/1980509820606>.
- QUANG, N. V.; PHUC, T. X.; QUYEN, N. T.; CAM, C. T. Linkage between Timber Processing Enterprises and Afforestation Households: Improving the Value Chain of the Timber Industry; Forest Trends: Hanoi, Vietnam, 2017.
- RIDING, M. J. et al. Harmonising conflicts between science, regulation, perception and environmental impact: The case of soil conditioners from bioenergy. **Environment International**, v. 75, p. 52–67, 2015.
- RUNDASSA, M. W.; AZENE, D. K.; BERHAN, E. Comparative advantage of Ethiopian textile and apparel industry. **Research Journal of Textile and Apparel**, v. 23, n. 3, p. 244–256, 2019.
- RUBIN, L.S.; RONDINEL, R. Vantagens Comparativas e Orientação das exportações: estudo de caso do café, do fumo e da soja no período 1989-2001. Rila – **Revista de Integração Latino-americana**. Santa Maria: UFSM, v.1, nº1, p.143-161, 2004.
- SARKODIE, S. A. Environmental performance, biocapacity, carbon & ecological footprint of nations: Drivers, trends and mitigation options. **Science of The Total Environment**, v. 751, p. 141912, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720354413>.
- SANQUETTA et al. Dynamics of carbon and CO2 removals by Brazilian forest plantations during 1990–2016. **Carbon Bal. Manag.**, 13 (2018), p. 20, 10.1186/s13021-018-0106-4
- SOARES, N. S.; SILVA, M. L. Competitividade Brasileira no Comércio Internacional de Produtos Extrativos Vegetais. **Rev. Econ. NE, Fortaleza**, v. 44, n. 4, p. 879-893, out-dez. 2013
- SOUZA, G. M. et al. The role of bioenergy in a climate-changing world. **Environmental Development**, v. 23, p. 57–64, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464516302755>.
- SOUZA, S.N.D.; ANGELO, H.; ALMEIDA, A.N.D.; SOUZA, Á.N.D.; PAULA, M.F.D. Competitiveness of Brazilian tropical wood on the international market. **Floresta Ambiente** 2018, 25.
- SHERWOOD, J. The significance of biomass in a circular economy. **Bioresource Technology**, v. 300, 2020.
- TOSCANO, G. et al. Engineered solid biofuel from herbaceous biomass mixed with inorganic additives. **Fuel**, v. 256, 2019.
- THANH, T. et al. Evaluating the International Competitiveness of Vietnam Wood Processing Industry by Combining the Variation Coefficient and the Entropy Method. 2019. Disponível em: www.mdpi.com/journal/forests.
- THANH VAN, N. et al. Contradictory impact of the natural forest closing policy and sanitary-phytosanitary measures on the export of non-timber forest products: a case study of Vietnam. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 51, n. 1, p. 49–58, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0106>.
- TRUONG, N. L.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Primary energy and climate change effects of forest residues and fossil coal for electricity production with and without carbon capture and storage. European Biomass Conference and Exhibition Proceedings. **Anais.ETA-Florence Renewable Energies**, 2016.
- TRANG, N. T. T.; THUY, P. M. Assist the Association in Undertaking a Strategic Research on the Development of the Wood Processing Industry; Vietnam Chamber of Commerce and Industry: Hanoi, Vietnam, 2015.
- WANG, Z.; BUI, Q.; ZHANG, B. The relationship between biomass energy consumption and

human development: Empirical evidence from BRICS countries. **Energy**, v. 194, p. 116906, 2020. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054422030013X>>.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou contribuições relevantes para os países com interesse no mercado de PFE. As principais contribuições foram as análises da concentração, competitividade e dinâmica do mercado mundial da bioenergia florestal no contexto da economia circular. Atingindo, assim, os objetivos de realizar uma revisão sistemática por meio de uma análise bibliométrica, analisar a concentração, dinâmica e as vantagens comparativas dos países no mercado de PFE no mundo.

Há evidências de que os amplos indicadores de concentração são importantes para dar os primeiros passos em análises de mercado, porém dificilmente possa nos fornece quais são as principais variáveis que influenciou no mercado de PFE, dando oportunidade para análise de dinâmica espacial verificar os principais componentes que influenciaram no mercado florestal global.

No primeiro artigo, a revisão sistemática por meio da bibliometria possibilitou demonstrar que as pesquisas de alto impacto (≥ 1) começaram em 2003. O número de publicações relacionadas à bioenergia e à economia circular aumentou significativamente entre 2018 e 2020. Além disso, percebeu-se que os Estados Unidos foi o que mais contribuiu, respondendo por 16% das publicações. Os periódicos mais relevantes na amostra são *Energies*, *Energy e Sustainability*. Design regenerativo, economia de desempenho e ecologia industrial são os principais fundamentos teóricos do estudo e da economia circular mencionados pelos autores.

No segundo artigo, na análise da ecoeficiência do PFE verificou-se que as técnicas modernas classificadas pelo Promethee II, o *pellet* de madeira apresentou fluxo líquido de 0,17. A tecnologia moderna classificou o carvão como preferível com fluxo líquido de 0,21. Onde, superou todas as alternativas na análise, e recebeu o maior fluxo líquido entre as alternativas. No terceiro, a análise de concentração revelou que o PFE responde por 2,4 bilhões de metros cúbicos da produção mundial de energia. A lenha, cavaco e resíduos de madeira são principalmente produzidos na China, Índia, Brasil e Estados Unidos. Os índices CR(4) e CR(8) foram moderadamente elevados nas primeiras décadas (1961-1981) e diminuíram nas últimas décadas (1990-2020), elevando a competição do mercado, tais resultados confirmados pelos índices de *HHI*, *G*, *E'* e *CCI*.

O quarto artigo possibilitou analisar a dinâmica espacial e identificou que os 5 principais países que apresentaram efeito estrutural (P) positivos foram: EUA, Canadá, Japão, Finlândia

e França. Os 5 principais países com efeito diferencial positivo foram: Myanmar, China, Gana, Etiópia, Congo. No período de 2000-2020, 29 países apresentaram vantagem comparativa especializada (VCE), 51 países que apresentaram vantagem comparativa não especializada (VCNE), 39 países apresentaram desvantagem não especializada (DCNE) e 48 países apresentaram desvantagem competitiva especializada (DCE).

O quinto artigo, na análise da competitividade internacional de PFE, mostrou que de 1990 a 2020, os países se especializaram na produção de PFE. Os países com os melhores desempenhos competitivos foram: Vietnã, Austrália e Letônia. Assim, percebeu-se que o país com média competitividade foi o Chile, variando de forte a fraco. Além disso, que os cavacos de madeira são altamente competitivos, com média de 0,64 entre 1990 e 2020. Os VCRs médios para pellets de madeira, cavacos de madeira, lenha, carvão e outros aglomerados foram 0.29, 0.13, 0.09, 0.11, 0.03, respectivamente.

Neste contexto, revelou-se a importância econômica do mercado dos PFE no mundo, sendo pouco explorado, devido às suas limitações, relatadas neste trabalho, verifica-se a relevância deste estudo sobre na literatura científica, sobre o mercado do PFE, corroborando com aqueles que são os tomadores de decisões estratégicas.

A produção de bioenergia à base de madeira e seus derivados é um tema oportuno de grande interesse para a sociedade, representa uma opção energética adequada e segura, à transição para a economia circular, como uma visão de uma sociedade sustentável, exigindo maior responsabilidade pela produção sustentável de biomassa e pela recuperação do valor comercial dos produtos no final da vida útil.

REFERÊNCIAS

- ABASIAN, F.; RÖNNQVIST, M.; OUHIMMOU, M. Forest bioenergy network *design* under market uncertainty. *Energy*, v. 188, 2019.
- ABT, K. L.; ABT, R. C.; GALIK, C. Effect of bioenergy demands and supply response on markets, carbon, and land use. *Forest Science*, v. 58, n. 5, p. 523–539, 2012.
- ACEVEDO, D. M. et al. The management of agricultural waste biomass in the framework of circular economy and bioeconomy: An opportunity for greenhouse agriculture in Southeast Spain. *Agronomy*, v. 10, n. 4, 2020.
- AGROICONE. Oportunidades Para Florestas Energéticas Na Geração De Energia No Brasil Agroicone Julho 2015 Tema Código Florestal Projeto Oportunidades Para Florestas Energéticas Na Geração De Bioenergia. 2015.
- AGUILAR, A.; TWARDOWSKI, T.; WOHLGEMUTH, R. Bioeconomy for Sustainable Development. *Biotechnology journal*, v. 14, n. 8, SI, 2019.
- AHMAD, B. et al. Analyzing export competitiveness of major fruits and vegetables of pakistan: An application of revealed comparative advantage indices. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, v. 58, n. 2, p. 719–730, 2021.
- AHMADI, L.; KANNANGARA, M.; BENSEBAA, F. Cost-effectiveness of small scale biomass supply chain and bioenergy production systems in carbon credit markets: A life cycle perspective. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 37, 2020.
- AIE, Agência Internacional de Energia. Roteiro de Tecnologia. Entregando Bioenergia Sustentável. OCDE/AIE, Paris , 2017.
- ALAVI-BORAZJANI, S. A.; CAPELA, I.; TARELHO, L. A. C. Valorization of biomass ash in biogas technology: Opportunities and challenges. *Energy Reports*, v. 6, p. 472–476, 2020.
- ALMEIDA et al. Educação Ambiental: Temas, teorias e práticas. Porto Alegre, num. 6, vol.4, jan/dez. SENAC Departamento Nacional, Rio de Janeiro, 2008.
- ALTMAN, I. et al. Market Development of Biomass Industries. *Agribusiness*, v. 29, n. 4, p. 486–496, 2013.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.
- ASADA, R. et al. Bioeconomic transition?: Projecting consumption-based biomass and fossil material flows to 2050. *Journal Of Industrial Ecology*.
- ATTARD, J. et al. Mapping and analysis of biomass supply chains in Andalusia and the Republic of Ireland. *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 11, 2020.
- BAILIS, R. et al. Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. *Energy for Sustainable Development, Special Issue on Charcoal*, v. 17, n. 2, p. 189–200, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082612000774>>.
- BAIN, J. Industrial organization. New York: J. Wiley, 1959. 274 p.
- BALASSA, B. Trade Liberalization and “revealed” Comparative Advantage. The Manchester School of Economic and Social Studies, 1965.
- BALEZENTIS, T. et al. Disentangling the sources of dynamics in the agricultural output of the BRICS and EU countries: The ecological footprint perspective with Shapley value decomposition. *Journal of Cleaner Production*, v. 346, p. 131198, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622008290>>.
- BARJOVEANU, G. et al. Life cycle assessment of polyphenols extraction processes from waste biomass. *Scientific reports*, v. 10, n. 1, 2020a.

- BARKER, S. N. Gasification and pyrolysis - Routes to competitive electricity production from biomass in the UK. *Energy conversion and management*, v. 37, n. 6–8, p. 861–866, 1996.
- BASSO, S. Análise do carvão vegetal para uso doméstico. p. 1–43, 2017.
- BEHZADIAN, M. et al. *PROMETHEE*: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, v. 200, n. 1, p. 198–215, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>>.
- BEZERRA, M. C. DA C.; GOHR, C. F.; MORIOKA, S. N. Organizational capabilities towards corporate sustainability benefits: A systematic literature review and an integrative framework proposal. *Journal of Cleaner Production*, v. 247, 2020.
- BIANCO, L.; PORISIENSI, S. From linear to circular economy in Ferriere Nord: Ladle slag and Biomass case studies [Trasformazione da lineare a circolare del processo EAF. Esperienza in Ferriere Nord SpA: Il caso della scoria siviera e dei carboni]. *Metallurgia Italiana*, v. 108, n. 10, p. 1–26, 2016.
- BICHEL, A.; TELLES, T. S. Spatial dynamics of firewood and charcoal production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 313, p. 127714, 1 set. 2021.
- BIOMASSA BR - Revista Brasileira de Biomassa e Energia. vol.6, nr. 27, set/out. 2016. Disponível em:<<https://www.revistabiomassabr.com/>>.
- BOCKEN, N. M. P.; DE PAUW, I.; BAKKER, C.; VAN DER GRINTEN, B. Product *design* and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.
- BOCKEN, Nancy MP et al. Product *design* and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.
- BONFANTE, A. et al. Supporting local farming communities and crop production resilience to climate change through giant reed (*Arundo donax* L.) cultivation: An Italian case study. *Science of The Total Environment*, v. 601–602, p. 603–613, 1 dez. 2017. Boston: Houghton Mifflin, 1990. 270 p.
- BÖRJESSON, M. et al. Bioenergy futures in Sweden - system effects of CO2 reduction and fossil fuel phase-out policies. *Bioenergy*, v. 7, n. 5, p. 1118–1135, 2015.
- BOYLE, G. Renewable energy: power for a sustainable future. Open University (3a.). p. 1–3, 2012.
- BRAMMER, J. G.; LAUER, M.; BRIDGWATER, A. V. Opportunities for biomass-derived “bio-oil” in European heat and power markets. *Energy Policy*, v. 34, n. 17, p. 2871–2880, 2006.
- BRAND, M. A. et al. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, v. 41, n. 99, p. 401–410, 2013.
- BRANS, J. P.; CHEVALIER, A.; KUNSCH, P.; MACHARIS, C.; SCHWANINGER, M. Combining multicriteria decision aid and system dynamics for the control of socio-economic processes. *European Journal of Operational Research*. Res. 109, 428–441. 1998.
- BRANS, J. P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects : The *PROMETHEE* method. *European Journal of Operational Research*, v. 24, p. 228–238, 1986.
- BRANS, N.; VINKE, P.H. A preference *Ranking* organization method: the *PROMETHEE* method for multiple criteria decision making. *Manag. Sci.* 31 (6), 647–656. 1985.
- BRITO, J. O. Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. *Estudos Avançados*, v. 4, n. 9, p. 221–227, ago. 1990. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141990000200011&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 14 mar. 2022.

- BRUNNÉE, J. The Stockholm Declaration and the Structure and Processes of International Environmental Law (July 22, 2009). The future of ocean regime building: essays in tribute to douglas m. johnston, Aldo Chircop, Ted McDorman, eds., pp. 41-62, Kluwer Law, 2008.
- BRYNGEMARK, E. Bioenergy versus forest conservation: a partial equilibrium analysis of the Swedish forest raw materials market. *Scandinavian Journal of Forest Research*, v. 35, n. 7, p. 367–382, 2020.
- BRYNGEMARK, E. The Competition for Forest Raw Materials in the Presence of Increased Bioenergy Demand : Partial Equilibrium Analysis of the Swedish Case. Disponível em: <<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-72540>>. 2019.
- BUCKLEY, P. J.; PASS, C. L.; PRESCOTT, K. Measures of international competitiveness: A critical survey. *J. Mark. Manag.* 1988, 4, 175–200.
- BUONOCORE, E. et al. Indicators of environmental performance to assess wood-based bioenergy production: A case study in Northern Italy. *Journal of Cleaner Production*, v. 221, n. 2019, p. 242–248, 2019.
- BUSU, M. A Market Concentration Analysis of the Biomass Sector in Romania. *Resources*, v. 9, n. 6, p. 64, 29 maio 2020.
- BYWATER, I.; SCOTT, K.; ARNOUX, L. COMPETITIVE POWER-GENERATION FROM BIOMASS. *Renewable energy*, v. 5, n. 5–8, p. 849–851, 1994.
- BOYLE, G. Renewable energy: power for a sustainable future. Open University (3a.). p. 1–3, 2012.
- BYWATER, I.; SCOTT, K.; ARNOUX, L. COMPETITIVE POWER-GENERATION FROM BIOMASS. *Renewable energy*, v. 5, n. 5–8, p. 849–851, 1994.
- CALDERÓN, C.; GAUTHIER, G.; JOSSART, J. M. Bioenergy europe statistical report 2019 - key finding. 2019.
- CARRICONDO ANTON, J. M. et al. Reduction of Phosphorous from Wastewater Through Adsorption Processes Reusing Wood and Straw Ash Produced in Bioenergy Facilities. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 231, n. 3, 2020.
- CARSTENS, D. D. dos S.; CUNHA, S. K. da. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. *Energy Policy*, v. 125, n. October 2018, p. 396–404, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.063>>.
- CARVALHO, D. E. et al. QUALIDADE ENERGÉTICA DE CAVACOS DE Pinus spp. Em diferentes condições de armazenamento. *Energia na Agricultura, Botucatu*, v. 35, n. 2, p. 236-245, abril-junho, 2020, v. 1, n. 9, p. 1–10, 2020.
- CARVALHO, D. E. et al. Qualidade energética de cavacos de pinus spp. em diferentes condições de armazenamento. *Energia na Agricultura, Botucatu*, v. 35, n. 2, p. 236-245, abril-junho, 2020, v. 1, n. 9, p. 1–10, 2020.
- CARVALHO, G. R.; LEITE, B. L. J.; SIQUEIRA, K. B.; RODRIGUES, L. B. O comércio internacional de leite em pó. In: LEITE, J. L. B. et al. (Ed.). *Comércio Internacional de Lácteos*. 2. ed. rev. e ampl. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2009.
- CASSON MORENO, V. et al. Techno-economic and environmental sustainability of biomass waste conversion based on thermocatalytic reforming. *Waste Management*, v. 101, p. 106–115, 2020.
- CASTRO AMPESE, L. et al. Macaúba’s world scenario: a bibliometric analysis. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13399-021-01376-2>>.
- CHENG, W. et al. Compras Públicas Verdes , conceitos ausentes e tendências futuras e Uma revisão crítica. 2017.
- CHEUNG, S. O.; LEVINA, B.; NIU, Y. Concentration analysis of new private residential units market in Hong Kong. *Construction Economics and Building*, v. 17, n. 2, p. 1–23, 2017.

- CHUDY, R. P. et al. Effects on forest products markets of second-generation biofuel production based on biomass from boreal forests: a case study from Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, v. 34, n. 3, p. 218–227, 2019.
- CHUDY, R. P. et al. Effects on forest products markets of second-generation biofuel production based on biomass from boreal forests: a case study from Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, v. 34, n. 3, p. 218–227, 2019.
- COELHO JUNIOR, L. M. et al. Concentration and Spatial Clustering of Forest-Based Thermoelectric Plants in Brazil. *IEEE ACCESS*, v. 8, p. 221932–221941, 2020.
- COELHO JUNIOR, L. M. et al. Regional Concentration of The Gross Production Value of Firewood in Paraíba. *FLORESTA E AMBIENTE*, v. 26, n. 3, 2019.
- COELHO JUNIOR, L. M.; REZENDE, J. L. P.; ÁVILA, E. S.; OLIVEIRA, A. D.; BORGES, L. A. C. Analysis of the Brazilian cellulose industry concentration (1998 a 2007). *Cerne, Lavras*, v.16, n.2, abr.-jun. 2010.
- COELHO JUNIOR, L. M.; SANTOS JUNIOR, E. P.; NUNES, A. M. M.; SOUZA, Á. N.D.; BORGES, L. A. C.; SIMIONI, F. J. "Concentration and Clusters of Black Liquor Thermoelectric Plants in Brazil," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, não. 12, pp. 2122-2129, dez. 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9480155.
- COELHO JUNIOR, L.M.; MARTINS, K.L.C.; ALMEIDA PINTO, P.A.L.; SILVA, M.V.B.Spatial distribution of firewood production in northeastern Brazil (1994-2013). 2018. *Rev. Arvore* 42, 1–10. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000400002>.
- COELHO, L. M.; DE REZENDE, J. L. P.; DE OLIVEIRA, A. D. Concentração Das Exportações Mundiais De Produtos Florestais. *Ciencia Florestal*, v. 23, n. 4, p. 691–701, 2013.
- COSTA, M. et al. The “INNOVARE” project: Innovative plants for distributed poly-generation by residual biomass. *Energies*, v. 13, n. 15, 2020.
- CUENCA, M. A. G.; DOMPIERI, M. H. G. Dinâmica espacial da canavicultura e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 47, n. 4, p. 91-106, 2017.
- DANSO-BOATENG, E.; ACHAW, O. and biofuel production from biomass using thermochemical conversions *technBioenergyologies — a review*. v. 10, n. June, p. 585–647, 2022.
- DEBONI, T. L. et al. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. *Renewable Energy*, v. 135, p. 1291–1302, 2019.
- DEBONI, T. L. et al. Models for estimating the price of forest biomass used as an energy source: A Brazilian case. *Energy Policy*, v. 127, n. 2090, p. 382–391, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.021>>.
- DELGADO-GARCIA, R. et al. Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomasas de reducido poder calorífico. *Dyna (Spain)*, v. 83, n. 199, p. 183–190, 2016.
- DI BITONTO, L. et al. Residual Mexican biomasses for bioenergy and fine chemical production: correlation between composition and specific applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020.
- DIBDIAKOVA, J.; WANG, L.; LI, H. Characterization of Ashes from *Pinus Sylvestris* forest Biomass. *Energy Procedia, Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015)*, v. 75, p. 186–191, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215010577>>.
- DIETER, M.; ENGLERT, H. Competitiveness in the global forest industry sector: an empirical study with special emphasis on Germany. *European Journal of Forest Research*, v.

- 126, n. 3, p. 401–412, 11 jun. 2007. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10342-006-0159-x>>.
- DOGGART, N. et al. The influence of energy policy on charcoal consumption in urban households in Tanzania. *Energy for Sustainable Development*, v. 57, p. 200–213, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.06.002>>.
- DOMINGUES, M. A. et al. Mapeamento da ciência com o pacote R Bibliometrix: Uma aplicação no estudo de empreendedorismo acadêmico. *Anais do 9th ISTI - International Symposium on Technological Innovation*, v. Vol.9/n.1, p. 287–294, 2018.
- DUKES, C. C.; BAKER, S. A.; GREENE, W. D. In-wood grinding and screening of forest residues for biomass feedstock applications. *Biomass and Bioenergy*, v. 54, p. 18–26, 2013.
- DUQUE-ACEVEDO, M. et al. The management of agricultural waste biomass in the framework of circular economy and bioeconomy: An opportunity for greenhouse agriculture in Southeast Spain. *Agronomy*, v. 10, n. 4, 2020.
- DURAND, M.; GIORNO, C. Indicators of international competitiveness: Conceptual aspects and evaluation. *OECD Econ. Stud.* 1987, 9, 147–182.
- DWIVEDI, P. et al. Efficacy of carbon and bioenergy markets in mitigating carbon emissions on reforested lands: A case study from Southern United States. *Forest Policy and Economics*, v. 67, p. 1–9, 2016.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Circular Economy Overview. 2015. Disponível online: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy> (acessado em 21 de novembro de 2021).
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Toronto: circular economy procurement implementation plan and framework, 2019.
- ENVIRONMENTAL INVESTIGATION AGENCY (EIA). Stealing the Last Forest: Austria's largest timber company, land rights, and corruption in Romania food and agriculture organization of the united. 2015.
- ERICSSON, K. et al. Bioenergy policy and market development in Finland and Sweden. *Energy policy*, v. 32, n. 15, p. 1707–1721, 2004.
- ERSEN, N. Assessment of global competitiveness of non-wood forest products: The case of Turkey. *Baltic Forestry*, v. 26, n. 2, p. 1–8, 2021.
- ETHIER, W. Non-traded goods and the Heckscher–Ohlin model. *International Economic Review*. 13, 132–147. 1972.
- EUROPEAN BIOMASS ASSOCIATION (AEBIOM). European Bioenergy Outlook. EU Raport 2017. p. 264, 2017. Disponível em: <www.aebiom.org>.
- EUROPEAN COMMISSION. Enterprise europeu network. A Polish company offers high-quality eco wood chips for smoking food to trade intermediaries in European countries. Disponível em: <<https://een.ec.europa.eu/partners/polish-company-offers-high-quality-eco-wood-chips-smoking-food-trade-intermediaries>> Acessado em 05 de outubro de 2021.
- FEIJÓ, C.A. et al. Concentração industrial e produtividade do trabalho na indústria de transformação nos anos 90: evidências empíricas. *Economia*, v.4, n.1, p.19-52, 2003.
- FERRARI, G. et al. Bibliometric Analysis of Trends in Biomass for Bioenergy Research. 2020. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/energies>.
- FERREIRA-SANTOS, P. et al. Green and Sustainable Valorization of Bioactive Phenolic Compounds from Pinus By-Products. *Molecules*, v. 25, n. 12, jun. 2020.
- FLAK, J. Technologies for Sustainable Biomass Supply-Overview of Market Offering. *Agronomy-basel*, v. 10, n. 6, jun. 2020.
- FOLSLAND BOLKESJØ, T.; TRØMBORG, E.; SOLBERG, B. Bioenergy from the forest sector: Economic potential and interactions with timber and forest products markets in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, v. 21, n. 2, p. 175–185, 2006a.

- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome, 2020. doi:<https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. Sustainable woodfuel for food security Sustainable wood fuel for food security A Smart choice: green renewable and affordable. Rome, 2020.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Forest Products Definitions General terms FAOSTAT-Forestry JOINT FOREST SECTOR QUESTIONNAIRE Item code Item Code Definition. 1994.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Ministry of Energy of Zambia. Sustainable bioenergy potential in Zambia – An integrated bioenergy and food security assessment. Environment and Natural Resources Management Working Papers No. 84. Rome. 2020.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Sustainable wood fuel for food security A Smart choice: green renewable and affordable. 2017.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Bioenergy and Food Security Rapid Appraisal (BEFS RA). Food and Agriculture Organisation, v. 45, n. 46, p. 1–44, 2014.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Global Forest Resources Assessment 2015 How are the world's forests changing? Rome: FAO, 2015.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Sustainable woodfuel for food security. Sustainable wood fuel for food security A Smart choice: green renewable and affordable, p. 34, 2017.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAO Statistics Division. Rome, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 10 dez. 2021.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAO. Sustainable woodfuel for food security. Sustainable wood fuel for food security A Smart choice: green renewable and affordable, p. 34, 2017.
- GARFIELD, E. Journal impact factor: a brief review. CMAJ. 1999; 161(8):979-80.
- GEISENDORF, S.; PIETRULLA, F.. The circular economy and circular economic concepts a literature analysis and redefinition. Thunderbird International Business Review, 2017.
- GEISSDOERFER, M.; MORIOKA, S. N.; DE CARVALHO, M. M; Evans, S. Modelos de negócios e cadeias de abastecimento para a economia circular. J. Clean. Prod. 2018, 190, 712–721.
- GENDEK, A.; ANISZEWSKA, M.; CHWEDORUK, K. Bulk density of forest energy chips. Ann. Warsaw Univ. Life Sci. – SGGW, Agricult., v. 67, p. 101–111, 2016.
- GERNANDT, D. S.; PÉREZ-DE LA ROSA, J. A. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. Revista Mexicana de Biodiversidad, v. 85, p. 126–133, 2014.
- GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, v. 114, p. 11–32, 15 fev. 2016
- GINI, C. Variabilità e mutabilità (1912). In: PIZETTI, E.; SALVEMINI, T. (Ed.). Reprinted in memorie di metodologica statistica. Rome: Libreria Eredi Virgilio Veschi, 1955.
- GOH, C. S. et al. Rethinking sustainable bioenergy development in Japan: decentralised system supported by local forestry biomass. Sustainability Science, v. 15, n. 5, p. 1461–1471, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11625-019-00734-4>>.

- GÓMEZ-CALVET, R.; CONESA, D.; GÓMEZ-CALVET, E. A.R. Tortosa-Ausina. On the dynamics of eco-efficiency performance in the European Union. *Comput. Oper. Res.*, 66 (2016), pp. 336-350. Doi: 10.1016/j.cor.2015.07.018
- GONÇALVES, R. *International political economy: theoretical foundations and international relations in Brazil*. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 319.2005.
- GORDEEV, R. Comparative advantages of Russian forest products on the global market. *Forest Policy and Economics*, v. 119, p. 102286, 1 out. 2020.
- GREENAWAY, D.; MILNER, C. *Trade and Industrial Policy in Developing Countries: A Manual of Policy Analysis, Part IV Evaluating Comparative Advantage*. The Macmillan. Press. esp. 181–208. 1993.
- GUAN, Z.; XU, Y.; JIANG, H.; JIANG, G. International competitiveness of Chinese textile and clothing industry—A diamond model approach. *J. Chin. Econ. Foreign Trade Stud.* 2019, 12, 2–19.
- GUEST, G. et al. Life cycle assessment of biomass-based combined heat and power plants: Centralized versus decentralized deployment strategies. *Journal of Industrial Ecology*, v. 15, n. 6, p. 908–921, 2011b.
- GUO, M., SONG, W., BUHAIN, J., 2015. Bioenergia e biocombustíveis: história, status e perspectiva. *Renovar. Sustentar. Energia Rev.* 42, 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>.
- GUSTAVSSON, L.; MADLENER, R. CO2 mitigation costs of large-scale bioenergy technologies in competitive electricity markets. *Energy*, v. 28, n. 14, p. 1405–1425, nov. 2003.
- HADDAD, P.R. (org.). *Economia Regional [Teorias e Métodos de Análise]*. Fortaleza: Banco Nordeste do Brasil, 1989, p.249-286.
- HAGUENAUER, L. Competitividade: conceitos e medidas: uma resenha da bibliografia recente com ênfase no caso brasileiro. *Revista Economia Contemporânea*. vol.16, n.1, pp. 146-176, 2012.
- HAKKARAINEN, E.; HANNULA, I.; VAKKILAINEN, E. Bioenergy RES hybrids – assessment of status in Finland, Austria, Germany, and Denmark. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 13, n. 6, p. 1402–1416, 2019.
- 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, p. 201–209, 2018.
- HALIM, S. A.; SWITHEBANK, J. Characterisation of Malaysian wood *pellets* and rubberwood using slow pyrolysis and microwave technology. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 122, p. 64–75, 2016.
- HAN, X.; WEN, Y.; KANT, S. The global competitiveness of the Chinese wooden furniture industry. *Forest Policy and Economics*, v. 11, n. 8, p. 561–569, 2009.
- HÄNNINEN, R. et al. Complexity of Assessing Future Forest Bioenergy Markets—Review of Bioenergy Potential Estimates in the European Union. *Current Forestry Reports*, v. 4, n. 1, p. 13–22, 2018.
- HAVLICKOVA, K. et al. Modelling of biomass prices for bio-energy market in the Czech Republic. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 19, n. 9, p. 1946–1956, 2011.
- HAWKEN, Paul; Lovins, Amory B.; Lovins, L. Hunter. *Capitalismo natural*. Editora Cultrix, 2002.
- HEIMANN, J.P.D. et al. Concentração de mercado de molduras (frame) importadas pelos Estados Unidos, período de 2005 a 2009. *Cerne*, v.21, n.1, p.59-65, 2015.
- HELYNEN, S. Bioenergy policy in Finland. *Energy for Sustainable Development*, v. 8, n. 1, p. 36–46, 2004. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60389-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60389-0)>.

- HERFINDAHL, O. C. Concentration in the Steel Industry. 1950. 175 f. Thesis (Ph.D.) - Columbia University, New York, 1950.
- HERZOG, H. W.; OLSEN, R. J. Shift-share analysis revisited: the allocation effect and HIEU, P.; HARRISON, S.; LAMB, D. A. spatial equilibrium analysis of policy for the forestry and wood-processing industries in northern Vietnam. *Mod. Econ.* 2011, 2, 90–106.
- HIEU, P.S.; THUY, V.H.; THUAN, P.D. Main characteristics of statistical data and the statistical system for wood and wood-processing products in Vietnam. *Small Scale For.* 2010, 10, 185–198.
- HINLOOPEN, J.; VAN MARREWIK, C. On the empirical distribution of the balassa index. *Review of World Economics/Weltwirtschaftliches Archiv.* 2001.137(1): 1–35.
- HIRSCHMAN, A. O. National power and the structure of foreign trade. Berkley: University of California, 1945. 172 p. HIRSCHMAN, A. O. The paternity of an index. *The American Economic Review*, Pittsburgh, v. 54, n. 5, p 761-762, Sept. 1964
- HOLZINGER, H. *The Circular Economy in the European Union*. Cham: Springer International Publishing, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-50239-3>>.
- HORVARTH, J. Suggestion for a Comprehensive Measure of Concentration. *Southern Economic Journal*, 36, 446-452 (1970).
- HUANG, M. T.; ZHAI, P. M. Achieving Paris Agreement temperature goals requires carbon neutrality by middle century with far-reaching transitions in the whole society. *Advances in Climate Change Research*, v. 12, n. 2, p. 281–286, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.03.004>>.
- HUANG, M. T.; ZHAI, P. M. Achieving Paris Agreement temperature goals requires carbon neutrality by middle century with far-reaching transitions in the whole society. *Advances in Climate Change Research*, v. 12, n. 2, p. 281–286, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.03.004>>.
- HYDE, K.; MAIER, H. R.; COLBY, C. Incorporating uncertainty in the *Promethee* mcda method. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, cited By 81, v. 12, n. 4–5, p. 245–259, 2003. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33746512815&doi=10.1002%2Fmcd.361&partnerID=40&md5=1d7b97a477e32a16dbb39942f3c51a3a>>.
- IBÁ, I. B. DE Á. Relatório 2019 Report 2019. Relatório, p. 1–80, 2019.
- INCE, P. J. et al. Modeling future U.S. forest sector market and trade impacts of expansion in wood energy consumption. *Journal of Forest Economics*, v. 17, n. 2, p. 142–156, 2011.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – PEVS*. Rio de Janeiro, 2017.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *Tracking the Progress of Clean Energy 2016. Energy Technology Perspectives 2016 Excerpt*. AIE Entry to the Ministry of Clean Energy. International Energy Agency, Paris, France.
- IRENA. *Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers*. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_Global_Trade_Hydrogen_2022.pdf>
- IRENA. *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2019.
- JAMBOR, A.; BABU, S. *Competitiveness: Definitions, theories and measurement*. In *Competitiveness of Global Agriculture*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016.

- JEFFERS, R. F.; JACOBSON, J. J.; SEARCY, E. M. Dynamic analysis of policy drivers for bioenergy commodity markets. *Energy Policy*, v. 52, p. 249–263, 2013.
- JESUS, M. S. et al. Energy characterization of different species of Eucalyptus. *Floresta*, v. 47, n. 1, p. 11–16, 2017.
- JIANG, W. et al. The impact of the biomass crop assistance program on the united states forest products market: An application of the global forest products model. *Forests*, v. 10, n. 3, 2019.
- JORDAN, M. et al. Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach. *Energy*, v. 189, 2019a.
- JÜRGENS, I.; SCHLAMADINGER, B.; GOMEZ, P. Bioenergy and the CDM in the emerging market for carbon credits. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 11, n. 5–6, p. 1051–1081, 2006.
- KAIRYTE, A. et al. Fire Suppression and Thermal Behavior of Biobased Rigid Polyurethane Foam Filled with Biomass Incineration Waste Ash. *Polymers*, v. 12, n. 3, mar. 2020.
- KAIRYTE, A. et al. Fire suppression and thermal behavior of biobased rigid polyurethane foam filled with biomass incinerationwaste ash. *Polymers*, v. 12, n. 3, 2020.
- KARKANIA, V.; FANARA, E.; ZABANIOTOU, A. Review of sustainable biomass *pellets* production - A study for agricultural residues *pellets*' market in Greece. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 3, p. 1426–1436, 2012.
- KARTTUNEN, K. et al. Impact of forest management decision making on forest biomass supply in regional level of Finland. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings. Anais...ETA-Florence Renewable Energies, 2016* Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019661906&partnerID=40&md5=b7b612ea61da2842f9e9cb332d7c139d>>
- KITCHENHAM, B. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. *IEEJ Transactions on Industry Applications*, v. 126, n. 5, p. 589–598, 2007.
- KLINE, K. L. et al. Effects of Production of Woody *Pellets* in the Southeastern United States on the Sustainable Development Goals. *Sustainability*, v. 13, n. 2, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/821>>.
- KONG, J.; RÖNNQVIST, M.; FRISK, M. Using mixed integer programming models to synchronously determine production levels and market prices in an integrated market for roundwood and forest biomass. *Annals of Operations Research*, v. 232, n. 1, p. 179–199, 2015.
- KOZAK, S.; WIERZBOWSKA, A. Banking Market Concentration and Bank Efficiency. Evidence from Southern, Eastern and Central Europe. *South East European Journal of Economics and Business*. 2021;16(1): 38-52. <https://doi.org/10.2478/jeb-2021-0004>
- LAMERS, P. et al. Biomass market dynamics supporting the large-scale deployment of high-octane fuel production in the United States. *Global Change Biology Bioenergy*, v. 10, n. 7, p. 460–472, jul. 2018.
- LEE, D. H. Econometric assessment of bioenergy development. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 45, p. 27701–27717, 2017.
- LERCHE, N. et al. Using methods of Multi-Criteria Decision Making to provide decision support concerning local bioenergy projects. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 68, 2019.
- LI, P. et al. A novel *PROMETHEE* method based on GRA-DEMATEL for PLTSs and its application in selecting renewable energies. *Information Sciences*, v. 589, p. 142–161, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025521013116>>.
- LI, T.; LI, A.; GUO, X. The sustainable development-oriented development and utilization of renewable energy industry——A comprehensive analysis of MCDM methods. *Energy*, v. 212, 2020.

- LIESKOVSKÝ, M. et al. Ash Content vs. the Economics of Using Wood Chips for Energy: Model Based on Data from Central Europe. *BioResources*, v. 12, n. 1, p. 1579–1592, 2017.
- LYBÆK, R. Discovering market opportunities for future CDM projects in Asia based on biomass combined heat and power production and supply of district heating. *Energy for Sustainable Development*, v. 12, n. 2, p. 34–48, 2008.
- MADLENER, R. Energy systems in transition : perspectives for the diffusion of small-scale wood pellet heating Leif Gustavsson and Krushna Mahapatra. v. 29, p. 327–347, 2005.
- MAKONESE, T.; IFEBESAN, A. P.; RAMPEDI, I. T. Household cooking fuel use patterns and determinants across southern Africa: Evidence from the demographic and health survey data. *Energy and Environment*, v. 29, n. 1, p. 29–48, 2018.
- MAKSYMETS, O.; LÖNNSTEDT, L. International competitiveness: A case study of American, Swedish, and Ukrainian forest industries. *Int. Trade J.* 2016, 30, 159–176.
- MANG, P.; REED, B. Regenerative Development and *Design*. *Encyclopedia Sustainability Science & Technology*, p. 8855 – 8879, 2012. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_303>
- MANNIELLO, C. et al. Planning the Flows of Residual Biomass Produced by Wineries for the Preservation of the Rural Landscape. *Sustainability*, v. 12, n. 3, 2020.
- MAO, G. et al. Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. *Science of The Total Environment*, v. 635, p. 1081–1090, 1 set. 2018.
- MARIN, G.; VONA, F. The impact of energy prices on socioeconomic and environmental performance: Evidence from French manufacturing establishments, 1997–2015. *European Economic Review*, v. 135, p. 103739, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014292121000921>>.
- MCCARTHY, A.; DELLINK R.; BIBAS R. “The Macroeconomics of the Circular Economy Transition: A Critical Review of Modelling Approaches”, OECD Environment Working Papers, No. 130, OECD Publishing, Paris, (2018). Doi: <http://dx.doi.org/10.1787/af983f9a-en>.
- MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. Paperback, 193 pag. April 2002. ISBN13: 9780865475878.
- MERTENS, A. et al. Context Matters-Using an Agent-Based Model to Investigate the Influence of Market Context on the Supply of Local Biomass for Anaerobic Digestion. *Bioenergy RESEARCH*, v. 9, n. 1, p. 132–145, mar. 2016.
- MODOLO, R. C. E. et al. Fly ash from biomass combustion as replacement raw material and its influence on the mortars durability. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 20, n. 2, p. 1006–1015, 2018a.
- MOHAMMADI, A. et al. Environmental performance of end-of-life handling alternatives for paper-and-pulp-mill sludge: Using digestate as a source of energy or for biochar production. *Energy*, v. 182, p. 594–605, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421931196X>>.
- MOISEYEV, A.; SOLBERG, B.; KALLIO, A. M. I. Wood biomass use for energy in Europe under different assumptions of coal, gas and CO2 emission prices and market conditions. *Journal of Forest Economics*, v. 19, n. 4, p. 432–449, 2013.
- MOLINA-MORENO, V. et al. The use of led technology and biomass to power public lighting in a local context: The case of baeza (Spain). *Energies*, v. 11, n. 7, 2018.
- MOLINER, C.; MARCHELLI, F.; ARATO, E. Current status of energy production from solid biomass in North-West Italy. *Energies*, v. 13, n. 17, 2020.
- MORANA, A. et al. Development of an energy biorefinery model for chestnut (*Castanea sativa* Mill.) shells. *Energies*, v. 10, n. 10, p. 1–14, 2017.

- MORENO, V. C. et al. Techno-economic and environmental sustainability of biomass waste conversion based on thermocatalytic reforming. *Waste management*, v. 101, p. 106–115, jan. 2020.
- MYLLYVIITA, T., ANTIKAINEN, R. AND LESKINEN, P. ‘Sustainability assessment tools –their comprehensiveness and utilisation in company-level sustainability assessments in Finland. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, Vol. 24, No. 3, pp.236–247, 2017.
- NABUURS, G. J. et al. By 2050 the mitigation effects of EU forests could nearly double through climate smart forestry. *Forests*, v. 8, n. 12, p. 1–14, 2017.
- NAM, N. H. et al. Physico-chemical characterization of forest and agricultural residues for energy conversion processes. *Vietnam Journal of Chemistry*, v. 58, n. 6, p. 735–741, 2020.
- NEPAL, P. et al. Projected Market Competition for Wood Biomass between Traditional Products and Energy: A Simulated Interaction of US Regional, National, and Global Forest Product Markets. *Forest Science*, v. 65, n. 1, p. 14–26, 2019.
- NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO A. M.; TRUGILHO P. F.; SILVA V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. *Pesqui Florest Bras* 31(68):319–330, 2011.
- NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O. Biomass Torrefaction as a Key Driver for the Sustainable Development and Decarbonization of Energy Production. *sustainability*, v. 12, n. 3, 2020. Organisation For Economic Co-Operation And Development (OECD) Market Concentration. DAF/COMP/WD (2018),46 OECD Publishing, Paris, 2018.
- NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O. Biomass torrefaction as a key driver for the sustainable development and decarbonization of energy production. *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 3, p. 1–9, 2020a.
- NUREK, T.; GENDEK, A.; ROMAN, K. Forest residues as a renewable source of energy: Elemental composition and physical properties. *BioResources*, v. 14, n. 1, p. 6–20, 2019.
- NYARKO, I. et al. Socio-Economic Analysis of Wood Charcoal Production as a Significant Output of Forest Bioeconomy in Africa. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/f12050568>>.
- OLIVEIRA, A. C. et al. Evaluation of different levels of thinning on properties of wood and charcoal from Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla. *Floresta*, v. 42, n. 1, p. 59–68, 2012.
- OLIVEIRA, G.S. et al. Concentração das exportações brasileiras de portas de madeira. *Scientia Agraria Paranaense*, v.16, n.4, p.490-494, 2017.
- OLOFSSON, J.; BORJESSON, P. Residual biomass as resource - Life-cycle environmental impact of wastes in circular resource systems. *Journal of cleaner production*, v. 196, p. 997–1006, 2018.
- p.441-454, 1977.
- PALMIERI, N. et al. Circular Economy Model: Insights from a Case Study in South Italy. *Sustainability*, v. 12, n. 8, 2020.
- PANOUTSOU, C. The role of sustainable biomass in the heat market sector for EU27. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 5, n. 4, p. 430–450, 2016.
- PAREDES-SANCHEZ, J. P. et al. Energy utilization for distributed thermal production in rural areas: A case study of a self-sustaining system in Spain. *Energy conversion and management*, v. 174, p. 1014–1023, 2018.
- PAREDES-SANCHEZ, J. P. et al. Evolution and perspectives of the bioenergy applications in Spain. *Journal of cleaner production*, v. 213, p. 553–568, mar. 2019.

- PAROBEK, J.; PALUS, H.; LOUCANOVÁ, E.; KALAMÁROVÁ, M.; GLAVONIC, B. Competitiveness of central European countries in the EU forest products market with the emphasis on Slovakia. *Acta Fac. Xylologiae Zvolen Res. Publica Slovaca* 2016, 58, 125–136.
- PATRICK, G.F. *Desenvolvimento agrícola do Nordeste*. Rio de Janeiro: IPEA, 1972.
- PAULI, Gunter A. *The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*. Paradigm Publications, 2010
- PEARCE, D. W.; TURNER, R. K. *Economics of Natural Resources and the Environment*. (1989). Hemel Hempstead, Harvester Wheatsheaf, London. Italian edition 1991 by Il Mulino, Bologna.
- PEREIRA, A. S. *Uso de Pellets De Madeira Para Energia: Pesquisa De Mercado*. p. 1–73, 2017.
- PHAM, T. T.; MOELIONO, M.; NGUYEN, T. H.; NGUYEN, H. T.; VU, T. H. *The Context of REDD+ in Vietnam: Drivers, Agents and Institutions*. CIFOR Occasional Paper, 2012, 75. Porto Alegre: UFRGS/Faculdade de Ciências, v.14, n.25/26, p.16-24, mar./set. 1996.
- POGGI, F.; FIRMINO, A.; AMADO, M. *Municipal clusters of bioenergy: A contribution to forest fire prevention [Clusters municipais de bioenergia: Um contributo para a prevenção de incêndios florestais]*. *Finisterra*, v. 53, n. 108, p. 39–52, 2018.
- POPP, J. et al. *The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 32, p. 559–578, 2014.
- POSSAS, M. L. *Estruturas de mercado em oligopólio: economia e planejamento*. 2. ed. São Paulo: Hucitec, 1999. p. 191.
- PRIETO-SANDOVAL, Vanessa; JACA, Carmen; ORMAZABAL, Marta. *Towards a consensus on the circular economy*. *Journal of Cleaner Production*, v. 179, p. 605-615, 2018
- PROTÁSIO, P. T. et al. *Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of Eucalyptus clones from Brazilian energy forests*. *Renewable Energy*, v. 164, p. 34–45, 2021.
- PJANIC, M.; VUKOVIĆ, B.; MIJIĆ, K. *Analysis of the market concentration of agricultural enterprises in AP Vojvodina*. 2018
- QUANG, N. V.; PHUC, T. X.; QUYEN, N. T.; CAM, C. T. *Linkage between Timber Processing Enterprises and Afforestation Households: Improving the Value Chain of the Timber Industry; Forest Trends: Hanoi, Vietnam*, 2017.
- QUÉNO, L. R. M. et al. *Aspectos técnicos da produção de pellets de madeira*. *Ciência Florestal*, v. 29, n. 3, p. 1478–1489, 2019. Doi: <https://doi.org/10.5902/1980509820606>.
- QUÉNO, L. R. M. *Produção de pellets de madeira no Brasil : estratégia, custo e risco do investimento*. Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais, p. 145, 2015.
- RABIER, F. et al. *Particle density determination of pellets and briquettes*. *Biomass and Bioenergy*, v. 30, n. 11, p. 954–963, 2006.
- RADIN, G.; MAIA, C. H. *Custo energético de lenha e cavaco de madeira para secagem de grãos em agroindústria*. 2014.
- REAP, J.; BAUMEISTER, D.; BRAS, B. *Holism, biomimicry and sustainable engineering*. In: *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2005. p. 423-431.
- REBOLLEDO-LEIVA, R. et al. *Coupling Material Flow Analysis and Network DEA for the evaluation of eco-efficiency and circularity on dairy farms*. *Sustainable Production and Consumption*, v. 31, p. 805–817, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922000768>>.
- REIS, F. C. M. A. *Universidade Federal De Minas Gerais Escola De Ciência Da Informação Programa De Pós-Graduação Em Ciência Da Informação*. 2015.

- RENDEIRO, G. et al. Analysis on the feasibility of biomass power plants adding to the electric power system - Economic, regulatory and market aspects - State of Para, Brazil. *Renewable energy*, v. 36, n. 6, p. 1678–1684, jun. 2011.
- RESENDE, M. Medidas de concentração industrial: uma resenha. *Revista Análise Econômica*, Porto Alegre, v. 12, n. 21, p. 24–33, jul./set. 1994.
- RESENDE, M.; BOFF, H. Concentração industrial. In: KUPFER, D.; HASENCLEVER, L. (Org.). *Economia industrial: fundamentos teóricos e práticas no Brasil*. Rio de Janeiro: Campus, 2002. p. 73–90.
- RIDING, M. J. et al. Harmonising conflicts between science, regulation, perception and environmental impact: The case of soil conditioners from bioenergy. *Environment International*, v. 75, p. 52–67, 2015.
- ROY, B. Modeling Comprehensive Preferences: Three Operational Approaches for Progressing beyond the Description Problematic. p. 237–267, 1996. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-2500-1_11>.
- RUBIN, L.S.; RONDINEL, R. Vantagens Comparativas e Orientação das exportações: estudo de caso do café, do fumo e da soja no período 1989–2001. *Rila – Revista de Integração Latino-americana*. Santa Maria: UFSM, v.1, nº1, p.143–161, 2004.
- RUDKE, A. R.; DE ANDRADE, C. J.; SALVADOR FERREIRA, S. R. *Kappaphycus alvarezii* macroalgae: An unexplored and valuable biomass for green biorefinery conversion. *Trends in food science & technology*, v. 103, p. 214–224, 2020.
- RUNDASSA, M. W.; AZENE, D. K.; BERHAN, E. Comparative advantage of Ethiopian textile and apparel industry. *Research Journal of Textile and Apparel*, v. 23, n. 3, p. 244–256, 2019.
- SAARELA, S. R. From pure science to participatory knowledge production? Researchers' perceptions on science-policy interface in bioenergy policy. *Science and Public Policy*, v. 46, n. 1, p. 81–90, 2019.
- SAGHAEI, M.; GHADERI, H.; SOLEIMANI, H. *Design* and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand. *Energy*, v. 197, 2020.
- SANQUETTA et al. Dynamics of carbon and CO₂ removals by Brazilian forest plantations during 1990–2016. *Carbon Bal. Manag.*, 13 (2018), p. 20, 10.1186/s13021-018-0106-4
- SARKODIE, S. A. Environmental performance, biocapacity, carbon & ecological footprint of nations: Drivers, trends and mitigation options. *Science of The Total Environment*, v. 751, p. 141912, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720354413>>.
- SCHIPFER, F. et al. The European wood *pellets* for heating market - Price developments, trade and market efficiency. *Energy*, v. 212, p. 118636, dez. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118636>>.
- SCHRÖDER, T. et al. Using *PROMETHEE* to assess bioenergy pathways. *Central European Journal of Operations Research*, v. 27, n. 2, p. 287–309, 2019.
- SCHWERZ, F. et al. Carbon stocks, partitioning, and wood composition in short-rotation forestry system under reduced planting spacing. *Annals of Forest Science*, v. 77, n. 3, 2020.
- SEHNEM, S. et al. Circular economy in the wine chain production: maturity, challenges, and lessons from an emerging economy perspective. *Production Planning and Control*, v. 31, n. 11–12, p. 1014–1034, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1695914>>.
- SHARMA, H. B.; SARMAH, A. K.; DUBEY, B. Hydrothermal carbonization of renewable waste biomass for solid biofuel production: A discussion on process mechanism, the influence of process parameters, environmental performance and fuel properties of hydrochar.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 123, p. 109761, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120300575>>.
- SHEETAL; KUMAR, R.; SHASHI. Export competitiveness and concentration analysis of major sugar economies with special reference to India. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*, v. 10, n. 5, p. 687–715, 2020.
- SHELDON, R. A. Biocatalysis and biomass conversion: Enabling a circular economy: Biocatalysis and Biomass Conversion. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 378, n. 2176, 2020.
- SHERWOOD, J. The significance of biomass in a circular economy. *Bioresource Technology*, v. 300, 2020.
- SIARUDIN, M.; INDRAJAYA, Y. Adaptação e produtividade de kaliandra para fonte de energia de biomassa. v. 415, p. 1–9, 2020.
- SILVA, R. C. P. DA et al. Resíduos sólidos: Tecnologias e Boas Práticas de Economia Circular. [s.l.: s.n.].
- SIMIONI, F. J. et al. Eco-efficiency in the transformation of forest biomass residues in electrical energy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 23, n. 5, p. 1443–1456, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10098-021-02039-6>>.
- SIMIONI, F. J. et al. Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. *Ciência Florestal*, Santa Maria., v. 27, n., p. 731–742, 2017.
- SINGH, R. N. Equilibrium moisture content of biomass briquettes. *Biomass and Bioenergy*, v. 26, n. 3, p. 251–253, 2004.
- SIROUS, R. et al. Mixed biomass pelleting potential for Portugal, step forward to circular use of biomass residues. *Energy reports*, v. 6, n. 1, p. 940–945, 2020.
- SOARES, H. C. C. et al. Analysis of the worldwide concentration of pellet imports (2012–2018). *Revista Arvore*, v. 45, p. 1–11, 2021.
- SOARES, N. S.; SILVA, M. L. Competitividade Brasileira no Comércio Internacional de Produtos Extrativos Vegetais. *Rev. Econ. NE, Fortaleza*, v. 44, n. 4, p. 879–893, out-dez. 2013
- SOARES, P.R.C. et al. Concentração e desigualdade nas importações norte-americanas de celulose. *Scientia Forestalis*, v.42, n.102, p.173-179, 2014.
- SOSA, A. et al. Managing the moisture content of wood biomass for the optimisation of Ireland's transport supply strategy to bioenergy markets and competing industries. *Energy*, v. 86, p. 354–368, 2015.
- SOUZA, G. M. et al. The role of bioenergy in a climate-changing world. *Environmental Development*, v. 23, p. 57–64, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464516302755>>.
- SOUZA, N. R. Regiões-chave na integração econômica regional. *Análise Econômica*, SOUZA, S.N.D.; ANGELO, H.; ALMEIDA, A.N.D.; SOUZA, Á.N.D.; PAULA, M.F.D. Competitiveness of Brazilian tropical wood on the international market. *Floresta Ambiente* 2018, 25.
- SPAMPINATO, G. et al. Carbon Sequestration by Cork Oak Forests and Raw Material to Built up Post Carbon City. (calabro, f and dellaspina, l and bevilacqua, c, ed.) new metropolitan perspectives: local knowledge and innovation dynamics towards territory attractiveness through the implementation of horizon/e2020/agenda2030, vol 2. anais...: smart innovation systems and technologies.gewerbestrasse 11, cham, ch-6330, switzerland: springer international publishing ag, 2019.
- SUSAETA, A. et al. Economics of intercropping loblolly pine and switchgrass for bioenergy markets in the southeastern United States. *Agroforestry Systems*, v. 86, n. 2, p. 287–298, 2012.

- SUSAETA, A.; LAL, P. Impacts of climate change and bioenergy markets on the profitability of slash pine pulpwood production in the Southeastern United States. *Forests*, v. 9, n. 10, 2018.
- TAURO, R. et al. The potential for sustainable biomass *pellets* in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable & sustainable energy reviews*, v. 82, n. 1, p. 380–389, 2018.
- TERRONES-SAETA, J. M. et al. Study of the incorporation of biomass bottom ashes in ceramic materials for the manufacture of bricks and evaluation of their leachates. *Materials*, v. 13, n. 9, 2020.
- THANH VAN, N. et al. Contradictory impact of the natural forest closing policy and sanitary–phytosanitary measures on the export of non-timber forest products: a case study of Vietnam. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 51, n. 1, p. 49–58, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0106>>.
- THANH, T. et al. Evaluating the International Competitiveness of Vietnam Wood Processing Industry by Combining the Variation Coefficient and the Entropy Method. 2019. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/forests>.
- the stability of regional structure, a reply. *Journal of Regional Science*, v. 17, n. 3,
- THEIL, H. *Economics and information theory*. Amsterdam: North-Holland, 1967. 488 p
- TORREIRO, Y. et al. The Role of Energy Valuation of Agroforestry Biomass on the Circular Economy. *Energies*, v. 13, n. 10, 2020a.
- TOSCANO, G. et al. Engineered solid biofuel from herbaceous biomass mixed with inorganic additives. *Fuel*, v. 256, nov. 2019.
- TOSCANO, G. et al. Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements. *Biomass and Bioenergy*, v. 56, n. 0, p. 317–322, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.05.012>>.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review* Introduction: the need for an evidence- informed approach. *British Journal of Management*, v. 14, p. 207–222, 2003.
- TRANG, N. T. T.; THUY, P. M. Assist the Association in Undertaking a Strategic Research on the Development of the Wood Processing Industry; Vietnam Chamber of Commerce and Industry: Hanoi, Vietnam, 2015.
- TRØMBORG, E.; SOLBERG, B. Forest sector impacts of the increased use of wood in energy production in Norway. *Forest Policy and Economics*, v. 12, n. 1, p. 39–47, 2010.
- TRUONG, N. L.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Primary energy and climate change effects of forest residues and fossil coal for electricity production with and without carbon capture and storage. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*. Anais...ETA-Florence Renewable Energies, 2016. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019689438&partnerID=40&md5=6b6f04b58e193aa8122671793899273b>>
- TRUONG, N. L.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Primary energy and climate change effects of forest residues and fossil coal for electricity production with and without carbon capture and storage. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*. Anais.ETA-Florence Renewable Energies, 2016.
- TUMULURU, J. S. Effect of pellet die diameter on density and durability of *pellets* made from high moisture woody and herbaceous biomass. *Carbon Resources Conversion*, v. 1, n. 1, p. 44–54, 2018.
- TZENG, G. H.; HUANG, J.J. *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*. CRC Press, Taylor and Francis Group, A Chapman & Hall Book, Boca Raton. 2011.

- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE (UNFCCC). Glasgow Climate Pact., 2021. v. 2. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf>>.
- VASKALIS, I. et al. Towards Circular Economy Solutions for The Management of Rice Processing Residues to Bioenergy via Gasification. *Sustainability*, v. 11, n. 22, nov. 2019.
- VASKALIS, I. et al. Towards Circular Economy Solutions for The Management of Rice Processing Residues to Bioenergy via Gasification. *Sustainability*, v. 11, n. 22, nov. 2019.
- VENN, F. The oil crisis. *The Oil Crisis 1–220* (Taylor and Francis, 2016).
doi:10.4324/9781315840819
- VERFAILLIE, H.; BIDWELL, R. *Measuring Eco-Efficiency — a Guide to Reporting Company Performance*, 2000.
- VLACHOKOSTAS, C. et al. Decision Support System to Implement Units of Alternative Biowaste Treatment for Producing Bioenergy and Boosting Local Bioeconomy. *Energies*, v. 13, n. 9, 2020.
- WANG, Q.; WALTMAN, L. Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. *Journal of Informetrics*, v. 10, n. 2, p. 347–364, 2016.
- WANG, Z.; BUI, Q.; ZHANG, B. The relationship between biomass energy consumption and human development: Empirical evidence from BRICS countries. *Energy*, v. 194, p. 116906, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054422030013X>>.
- WBA, W. B. A. Global bioenergy statistics. World Bioenergy Association. p. 1–64, 2020.
- WHITTAKER, C. et al. Energy and greenhouse gas balance of the use of forest residues for bioenergy production in the UK. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 11, p. 4581–4594, 2011.
- WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. WBA. Global Bioenergy Statistics 2020 p. 1–64, 2020. Disponível em: <https://worldbioenergy.org/uploads/201210_WBA_GBS_2020.pdf>.
- WU, Y.; ZHANG, T.; YI, L. An Internal Type-2 Trapezoidal Fuzzy Sets-*PROMETHEE-II* based Investment Decision Framework of Compressed Air Energy Storage Project in China under the Perspective of Different Investors. *Journal of Energy Storage*, v. 30, 2020.
- YANG, Y. C. A comparative analysis of free trade zone policies in Taiwan and Korea based on a port hinterland perspective. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, v. 25, n. 2, p. 273–303, 2009. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S2092-5212\(09\)80006-0](http://dx.doi.org/10.1016/S2092-5212(09)80006-0)>.
- YAZDANI, M. G.; LIGOH, N.; ALI, M. H. Properties and environmental impact of available firewood in Brunei Darussalam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 476, n. 1, 2020.
- YONG, R. The circular economy in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 9, n. 2, p. 121–129, 2007.
- YULDASHEV, F. et al. Techno-economic analysis of plantation biomass production and small-scale wood pellet processing for bioenergy market. *International Wood Products Journal*, cited By 0, 2020. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090458090&doi=10.1080%2F20426445.2020.1816766&partnerID=40&md5=21942a53f7c80d45944d17ed170133be>>.
- YUMOU, W.; SHILONG, L. Market Concentration, Market Power, and Firm Growth of Construction Companies, *Advances in Civil Engineering*. vol. 2021, Artigo ID 9990846, 9 páginas, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9990846>
- ZABANIOTOU, A. *Redesigning a bioenergy sector in EU in the transition to circular waste-based Bioeconomy-A multidisciplinary review*. *Journal of cleaner production*, v. 177, p. 197–206, mar. 2018.

ZAJAC, G. et al. Chemical Characteristics of Biomass Ashes. *Energies*, v. 11, n. 11, p. 2885, 24 out. 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2885>>.

ZUBAIRU, A.; GANA, S. A. Production and Characterization of Briquette Charcoal by Carbonization of Agro-Waste. *Energy and Power*, v. 4, n. 2, p. 41–47, 2014.