

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E
SUSTENTABILIDADE**

**EFICIÊNCIA AMBIENTAL E PRODUTIVIDADE DAS INDÚSTRIAS
DE CELULOSE E PAPEL DO BRASIL**

GUSTAVO HENRIQUE SILVA NEVES

CAMPO GRANDE - MS

2020

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E
SUSTENTABILIDADE**

**EFICIÊNCIA AMBIENTAL E PRODUTIVIDADE DAS
INDÚSTRIAS DE CELULOSE E PAPEL DO BRASIL**

GUSTAVO HENRIQUE SILVA NEVES

Trabalho de Conclusão Final do Curso de Mestrado Profissional apresentado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração em Sustentabilidade.

Orientadora: Prof. Dra. Adriane Angélica Farias Santos Lopes de Queiroz

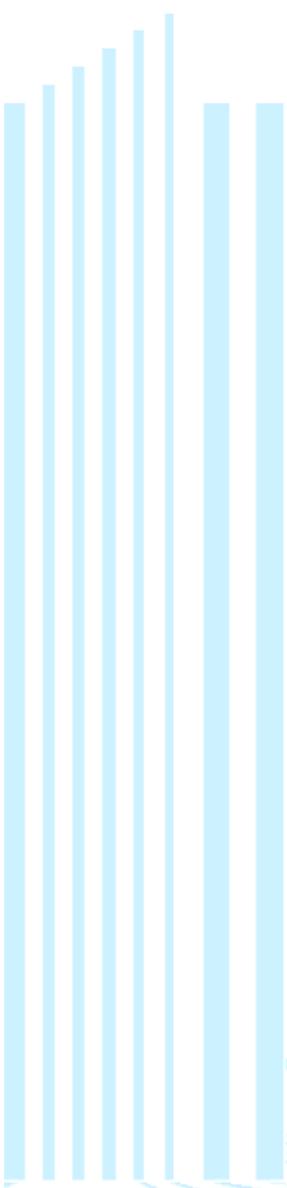
Coorientador: Prof. Dr. Willy Alves de Oliveira Soler

CAMPO GRANDE - MS

SETEMBRO / 2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

Redação final do Trabalho de Conclusão Final de Curso defendida por **Gustavo Henrique Silva Neves**, aprovada pela Comissão Julgadora em 30 de setembro de 2020, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.



Profa. Dra. Adriane Angélica Farias Santos Lopes de Queiroz
Orientadora
PPGEES/FAENG/UFMS

Prof. Dr. Willy Alves de Oliveira Soler
Coorientador
PPGEES/INMA/UFMS

Profa. Dra. Andréa Teresa Riccio Barbosa
Membro Titular
PPGEES/FAENG/UFMS

Profa. Dra. Fabrícia Gladys Fernandes da Silva Rossato
Membro Titular
FAENG/UFMS



AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me prover saúde, determinação e a serenidade necessária para superar cada obstáculo.

À Gabriela, minha esposa, pelo apoio, carinho e compreensão durante toda essa jornada.

Aos meus pais, Heliwaldo e Denise, que desde cedo me incentivaram na busca pelo conhecimento e priorizaram a minha formação.

À minha orientadora, Profa. Dra. Adriane, pela paciência e dedicação em todas as etapas da minha trajetória no programa de mestrado e que possibilitaram o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Willy, pelo apoio no desenvolvimento matemático e também pelas reuniões que em muito contribuíram no desenvolvimento e resultados alcançados nessa pesquisa.

Aos professores da UFMS, pelo conhecimento compartilhado ao longo das aulas e também fora delas.

Aos colegas de mestrado, pela cooperação nos trabalhos e apresentações.

A todas as demais pessoas que não cito nominalmente, mas que contribuíram de alguma forma na realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil.

EPÍGRAFE

*“Knowledge is the only instrument of production
that is not subject to diminishing returns”.*

John Maurice Clark

RESUMO

A produtividade constitui um dos aspectos fundamentais para a subsistência e competitividade das empresas. Para os setores industriais particularmente, em razão dos efeitos ambientais resultantes dos seus processos, observa-se uma mudança do modelo de produção, antes voltado para a maximização do volume produzido, para um no qual esse é integrado à estratégia de sustentabilidade. Nesse contexto, a eficiência ambiental pode ser utilizada para expressar os impactos ambientais decorrentes de um processo de produção. Para a compreensão desses aspectos em um dos principais setores da indústria de transformação nacional, foram selecionadas as indústrias de celulose e papel, em específico as unidades que possuem operações integradas para a produção desses dois produtos. Logo, com o objetivo investigar a relação entre a eficiência ambiental e a produtividade para essas indústrias, foram desenvolvidos nessa pesquisa três artigos científicos. Do primeiro foi identificada, através de uma revisão sistemática de literatura, a predominância de uma abordagem metodológica não paramétrica para expressar a relação entre estes dois aspectos, conhecida como Análise Envoltória de Dados (DEA). Pelo segundo artigo obteve-se, por meio de estatística multivariada, as variáveis mais relevantes que compõem o processo de produção dessas indústrias, considerando os seus efeitos ambientais. Para o terceiro artigo foi utilizado um modelo DEA em dois estágios com as variáveis selecionadas. Desse modo, com o primeiro estágio da DEA obteve-se o *benchmark* dessas indústrias, no qual foi identificada, para a maior parte das amostras, elevada eficiência na produção de celulose e papel. Para o segundo estágio por sua vez, com relação à eficiência ambiental, a influência dessas variáveis sobre a produtividade das indústrias analisadas indica uma relação positiva entre a redução dos efeitos ambientais com o aumento de produtividade, resultado que corrobora com grande parte da literatura sobre o tema. Essa pesquisa apresenta algumas limitações, sendo uma dessas o período utilizado para análise que é restrito ao ano de 2016. Dessa forma é sugerida para pesquisas futuras, a formação de uma base de dados com os anos subsequentes, de modo a possibilitar a análise da evolução da eficiência ambiental e produtividade para a identificação dos seus determinantes.

Palavras-chave: Análise Envoltória de Dados, Celulose e Papel, Eficiência Ambiental, Indústria, Produtividade.

ABSTRACT

Productivity is one of the major aspects for the subsistence and competitiveness of companies. For industrial sectors in special, due to the environmental effects resulting from their processes, there is a change in the production model, previously aimed at maximizing the volume produced to one in which it is integrated with the sustainability strategy. In this context, environmental efficiency can be employed to express the environmental impacts resulting from a production process. In order to understand these aspects in one of the main sectors of national processing industry, the pulp and paper industries were selected, specifically the units that have integrated operations for production of these two products. Therefore, in order to investigate the relation between environmental efficiency and productivity for these industries, three articles were developed in this research. From the first, it was identified through a systematic literature review, the predominance of a non-parametric approach to express the relation among these two aspects, known as Data Envelopment Analysis (DEA). For the second paper, the most relevant variables that comprise the production process of these industries, considering their environmental aspects were obtained using multivariate statistics. For the third, a two-stage DEA model was used with the selected variables. Thus, with the first stage of DEA, the benchmark of these industries was obtained, in which high efficiency in the production of pulp and paper was identified for most of the samples. For the second stage, with regard to environmental efficiency, the influence of these variables on the productivity of industries indicates a positive relation between the reduction of environmental effects and the increase in productivity, result that underpins most of literature on this subject. This research has some limitations, one of these is the period used for analysis, which is restricted for the year 2016. Therefore, it is suggested for future research, the formation of a dataset with subsequent years, in order to enable the evolution analysis of environmental efficiency and productivity for identification of its determinants.

Keywords: Data Envelopment Analysis, Pulp and Paper, Environmental Efficiency, Industry, Productivity.

LISTA DE FIGURAS

INTRODUÇÃO GERAL DA PESQUISA

Figura 1 – Aumento da temperatura da superfície terrestre a partir de 1850	17
Figura 2 – Potencial de redução de emissões setoriais no ano de 2030	17
Figura 3 – Cadeia produtiva do setor de produtos florestais	20
Figura 4 – Distribuição geográfica das empresas produtoras de celulose e papel	20
Figura 5 – Sinóptico dos procedimentos metodológicos.....	26

ARTIGO 1 – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA: EFICIÊNCIA AMBIENTAL E PRODUTIVIDADE NAS INDÚSTRIAS

Figura 1 – Diagrama de fluxo de informação da revisão sistemática de literatura	34
---	----

ARTIGO 2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS INDÚSTRIAS INTEGRADAS DE CELULOSE E PAPEL DO BRASIL: UMA ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS EM RELAÇÃO AOS IMPACTOS AMBIENTAIS ENVOLVIDOS

Figura 1 – Diagrama de fluxo de um processo químico de produção de celulose e papel.....	53
Figura 2 – Resumo dos procedimentos metodológicos adotados para a pesquisa.	61
Figura 3 – Matriz de correlação por pares de variáveis.....	64
Figura 4 – Gráfico das coordenadas das amostras para as duas dimensões principais	65
Figura 5 – Gráfico das coordenadas das variáveis para as duas dimensões principais	67
Figura 6 – Contribuição das variáveis na Dimensão 1	68
Figura 7 – Contribuição das variáveis na Dimensão 2	68

ARTIGO 3 – UMA ANÁLISE SOBRE A EFICIÊNCIA PRODUTIVA E AMBIENTAL DE ALGUMAS INDÚSTRIAS BRASILEIRAS DE CELULOSE E PAPEL

Figura 1 – Diagrama de fluxo com entradas e saídas selecionadas da produção de celulose e papel.	78
Figura 2 – Fronteira de eficiência e o conjunto de possibilidades de produção	80
Figura 3 – Conjunto de entradas e saídas processadas por uma DMUj	81
Figura 4 – Sinóptico dos procedimentos para análise de eficiência.	90

LISTA DE QUADROS

ARTIGO 1 – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA: EFICIÊNCIA AMBIENTAL E PRODUTIVIDADE NAS INDÚSTRIAS

Quadro 1 – Filtros nas bases de dados.....	35
Quadro 2 – Distribuição dos artigos e periódicos.....	37
Quadro 3 – Principais questões abordadas e abordagens de mensuração de eficiência.....	39
Quadro 4 – Variáveis dos Processos e Unidades de Tomada de Decisão.....	43

ARTIGO 2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS INDÚSTRIAS INTEGRADAS DE CELULOSE E PAPEL DO BRASIL: UMA ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS EM RELAÇÃO AOS IMPACTOS AMBIENTAIS ENVOLVIDOS

Quadro 1 – Entradas e saídas do processo químico kraft de celulose e papel branqueado.....	54
Quadro 2 – Variáveis coletadas por tipo.....	57
Quadro 3 – Procedimentos para determinação dos componentes principais.....	59

ARTIGO 3 – UMA ANÁLISE SOBRE A EFICIÊNCIA PRODUTIVA E AMBIENTAL DE ALGUMAS INDÚSTRIAS BRASILEIRAS DE CELULOSE E PAPEL

Quadro 1 – Publicações do setor de celulose e papel com uso da DEA.....	83
Quadro 2 – Modelo DEA-BCC na forma de multiplicadores com orientação para saída.....	86
Quadro 3 – Disposição das variáveis e orientação do modelo DEA-BCC.....	87
Quadro 4 – Variáveis do modelo de regressão.....	89
Quadro 5 – Resultados do modelo de regressão.....	92

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS INDÚSTRIAS INTEGRADAS DE CELULOSE E PAPEL DO BRASIL: UMA ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS EM RELAÇÃO AOS IMPACTOS AMBIENTAIS ENVOLVIDOS

Tabela 1 – Índices, médias e desvios-padrões das amostras na produção de celulose e papel	62
Tabela 2 – Distribuição normal dos índices das amostras com p-valor > 0,05	62
Tabela 3 – Intervalo com confiança de 95%	63
Tabela 4 – Autovalores e suas variâncias para as dimensões principais	64
Tabela 5 – Disposições das coordenadas de cada amostra para as dimensões principais	65
Tabela 6 – Percentual de contribuição das amostras para as dimensões principais	66
Tabela 7 – Disposições das coordenadas de cada variável para as dimensões principais	66

ARTIGO 3 – UMA ANÁLISE SOBRE A EFICIÊNCIA PRODUTIVA E AMBIENTAL DE ALGUMAS INDÚSTRIAS BRASILEIRAS DE CELULOSE E PAPEL

Tabela 1 – Resultados do modelo DEA-BCC orientado para saída	91
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABTCP	Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel
ACP	Análise de Componentes Principais
BCC	Modelo DEA de Banker, Charnes e Cooper (1984)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BRACELPA	Associação Brasileira de Celulose e Papel
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _{2e}	Dióxido de Carbono Equivalente
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DEPEC	Departamento de Pesquisa em Engenharia e Educação Continuada
DMU	<i>Decision Making Unit</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FIEP	Federação das Indústrias do Estado do Paraná
GEE	Gases do Efeito Estufa
GMLP	<i>Global Malmquist-Luenberger Productivity Index</i>
GRI	<i>Global Reporting Initiative</i>
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Intervalo de Confiança
IEA	<i>International Energy Agency</i>

IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LP	<i>Luenberger Productivity Indicator</i>
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Telecomunicações
ML	<i>Malmquist-Luenberger Index</i>
MLP	<i>Malmquist-Luenberger Productivity Index</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
PTF	Produtividade Total dos Fatores
RSL	Revisão Sistemática de Literatura
SJR	<i>Scimago Journal & Country Rank</i>
SDG	<i>Sustainable Development Goals</i>
SML	<i>Sequential Malmquist-Luenberger Productivity Index</i>
USEPA	<i>United Nations Environmental Protection Agency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Unidade de medida de temperatura em grau Celsius
R\$	Real Brasileiro
m ³	Unidade de medida de volume em metros cúbicos
MWh	Unidade de medida de energia em Megawatt-hora
t	Unidade de medida de massa em toneladas
US\$	Dólar dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO DA PESQUISA	15
1.1. A Indústria de Papel e Celulose.....	19
1.2. Estrutura da Dissertação	25
REFERÊNCIAS	26
ARTIGO 1 – EFICIÊNCIA AMBIENTAL E PRODUTIVIDADE NAS INDÚSTRIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	30
1. INTRODUÇÃO	33
2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	34
3. RESULTADOS	36
4. DISCUSSÃO	44
REFERÊNCIAS	45
ARTIGO 2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS INDÚSTRIAS INTEGRADAS DE CELULOSE E PAPEL DO BRASIL: UMA ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS EM RELAÇÃO AOS IMPACTOS AMBIENTAIS ENVOLVIDOS	47
1. INTRODUÇÃO	50
1.1. O Setor de Celulose e papel.....	50
1.2. Eficiência Ambiental e Produtividade na Indústria de Celulose e Papel	51
2. METODOLOGIA DE PESQUISA	53
2.1. Identificação Preliminar das Variáveis.....	53
2.2. Procedimento de Levantamento de Coleta de Dados	56
2.3. Estimativa de Distribuição.....	57
2.4. Método de Seleção de Variáveis	59
2.3.1 Análise de Componentes Principais (ACP)	59
3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	61
CONCLUSÕES	69

REFERÊNCIAS	70
ARTIGO 3 – ANÁLISE SOBRE A EFICIÊNCIA PRODUTIVA E AMBIENTAL DE INDÚSTRIAS BRASILEIRAS DE CELULOSE E PAPEL	74
1. INTRODUÇÃO	77
2. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA	81
2.1. Procedimento de Levantamento de Coleta de Dados	81
2.2. Seleção das DMUs	82
2.3. Seleção das Variáveis	82
2.4. Seleção do Modelo DEA	85
2.5. Método da Fronteira Invertida	87
2.6. Análise Estatística Multivariada Pós Eficiência	88
3. RESULTADOS	90
3.1. DEA Primeiro Estágio	90
3.2. DEA Segundo Estágio	92
3.2.1. Modelo de Regressão Linear Truncada	92
4. CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS	94
CONCLUSÃO GERAL DA PESQUISA.....	99

1. INTRODUÇÃO DA PESQUISA

A literatura revela que a produtividade na atividade laboral teve o seu maior avanço a partir do século XIX. Taylor foi um dos precursores a realizar um estudo detalhado de modo a mensurar a produtividade industrial, a partir das entradas dos processos, utilizando para isso a análise de tempo, movimentos e métodos para execução de atividades (DRUCKER, 1999).

Em sua pesquisa, denominada *Os Princípios do Gerenciamento Científico*, o autor propõe a sistematização do trabalho. Este estudo realizado por Taylor na produtividade da manufatura, denominado de “Era do Gerenciamento Científico” (1900 – 1923) constituiu a base do que hoje é conhecido como Engenharia Industrial (DAVENPORT e SHORT, 1990).

Outras teorias de distintas escolas da administração de produção sucederam “A Era do Gerenciamento Científico”, as quais foram influenciadas por aspectos históricos, econômicos e tecnológicos de cada período. Nessa sequência cronológica, Barley e Kunda (1992) explicam que “A Era das Relações Humanas” (1925 – 1955), teve como questão central o estabelecimento de direitos e a melhoria das condições de trabalho.

Subsequentemente “A Era do Racionalismo” (1955 – 1980), por sua vez, teve o seu foco no desenvolvimento do planejamento e controle de produção com o uso técnicas de pesquisa operacional. A partir de 1980, inicia-se uma nova onda voltada para a “Cultura Organizacional e Qualidade”.

Nas pesquisas iniciais sobre produtividade das indústrias, identificou-se que o conjunto de fatores de entrada, cuja saída fornece o volume de produção físico constituem uma função de produção. Assim, identificou-se que cada fator de entrada possuía um determinado nível de influência nas saídas geradas, (COBB e DOUGLAS, 1928). Logo, a combinação dos fatores de entrada que permite a maior saída dentre o conjunto de possibilidades de produção, constitui uma fronteira de produção (AIGNER e CHU, 1968).

Dessa forma, a identificação dos fatores que influenciam no nível de produtividade das indústrias tornou-se objeto de estudo em uma série de pesquisas, tendo como exemplos, Sveikauskas (1981), que investigou os multifatores de crescimento de produtividade, Acemoglu e Zilibotti (2001) que estudaram as diferenças na Produtividade Total dos Fatores (PTF) entre países, Datta *et al.* (2005) que relacionaram a eficiência dos sistemas de recursos humanos com a produtividade das indústrias de manufatura, entre outros diversos autores.

A PTF, segundo Coelli *et al.* (2005) consiste na mensuração da produtividade de uma empresa que é obtida pela razão entre as saídas produzidas e suas entradas utilizadas. De acordo com os autores, a PTF é uma medida que engloba todos os aspectos da produtividade, com ressalva ao uso de medidas de produtividade parciais como representação da PTF, uma vez que estas podem retornar resultados incompatíveis para esta aplicação.

Concordando com Coelli *et al.* (2005), Syverson (2011), explica que a utilização de fatores isolados ao invés do PTF para mensuração da produtividade é afetada pelas demais entradas que não foram contempladas nestes fatores isolados. Ademais, a utilização de diferentes variáveis de entrada impede uma comparação confiável quanto aos níveis de produtividade entre produtos, serviços, empresas, dentre outros.

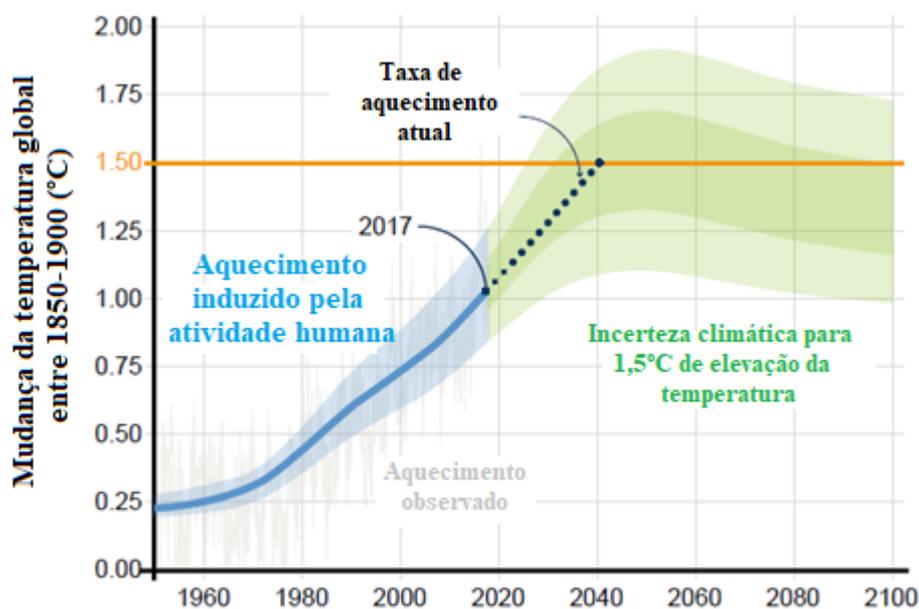
Por outro lado, o equilíbrio da produtividade das indústrias com a sua eficiência no uso dos recursos ambientais tem se tornado uma preocupação cada vez maior por parte dos pesquisadores, governos e empresas, sobretudo devido aos resultados indesejados que são gerados ao longo dos processos de produção e seus reflexos sobre o meio ambiente (IEA, 2018; IPCC, 2018; SDG, 2018).

Dentre os resultados indesejáveis, a Agência Internacional de Energia (IEA, 2018), por exemplo, alerta sobre a necessidade de redução das emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEE), uma vez que ações não efetivas para minimização, podem levar a danos irreversíveis ao meio ambiente.

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2018), no ano de 2017 foi registrado um aumento de aproximadamente 1,0 °C da temperatura da superfície da Terra em comparação ao período pré-industrial. Tal evolução da temperatura causada pela intervenção humana e a sua projeção para as próximas décadas é mostrada na Figura 1.

De modo a evitar que esse aquecimento atinja proporções ainda mais severas, a reversão desse prognóstico requer ações coordenadas em nível global. Uma das principais ações nesse âmbito é o Acordo de Paris (2015), que prevê a cooperação de 174 países membros e União Europeia, reconhecendo a mudança nos padrões de consumo e produção, como fatores cruciais, para mitigação das mudanças climáticas. Os países membros disponibilizam periodicamente as informações em seus relatórios acerca das contribuições que foram determinadas para cada país integrante, de modo a comprovar o cumprimento dos objetivos estabelecidos no acordo.

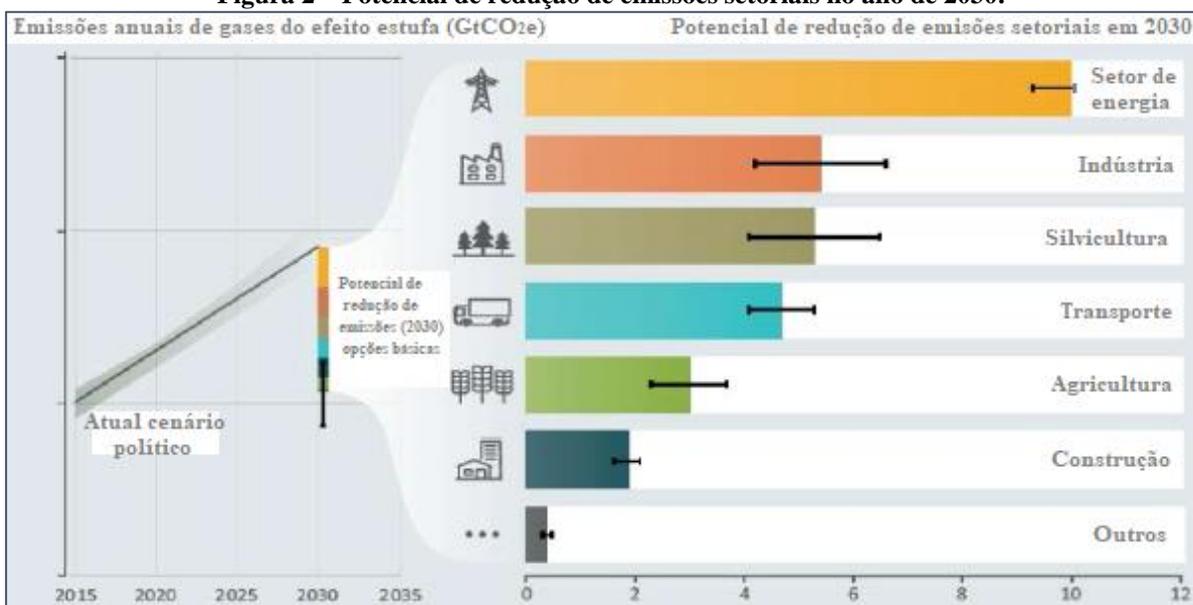
Figura 1 – Aumento da temperatura da superfície terrestre a partir de 1850.



Fonte: Adaptado de IPCC. Framing and Context (2018), p.82

Nesse sentido, o Relatório de Lacunas de Emissões de 2018, mostra que a um custo inferior a US\$ 100,00 por tonelada de dióxido de carbono (CO₂) é possível, em 2030, alcançar as metas de redução de carbono, firmadas no Acordo de Paris (2015), explorando o potencial de redução de diversos setores da economia. Logo, na Figura 2 é mostrado que o setor industrial é um dos que possuem maior potencial de redução de emissões de GEE.

Figura 2 – Potencial de redução de emissões setoriais no ano de 2030.



Fonte: Adaptado de *Emissions Gap Report* (dez,2018), p.15.

De modo a combater as mudanças climáticas causadas pelas emissões de GEE, a IEA (2018), apresentou a projeção de um cenário de eficiência global, no qual é assumida a hipótese de adoção de políticas que favoreçam a implementação no mercado de todas as medidas de eficiência energética, que incluem a expansão do uso de energias renováveis e formas alternativas de geração de energia.

De acordo com Relatório de Eficiência Energética do IEA (2018), a redução dos GEE e da poluição do ar, tem como outros benefícios, a melhora na segurança no fornecimento de energia e o aumento do poder de compra das famílias, este último, em decorrência da redução das despesas com pagamentos de contas de fornecimento de energia. Com isso, a identificação dos setores com maior potencial de redução, como no industrial, é fundamental para que as ações tomadas proporcionem resultados aplicáveis em grande escala.

As emissões de GEE, contudo, são apenas uma das variáveis que agem em sentido oposto à sustentabilidade, comprometendo assim a habilidade das futuras gerações atenderem às suas necessidades (BLIZZARD e KLOTZ, 2012). Nesse sentido, observa-se uma crescente preocupação quanto aos efeitos ambientais resultantes de produção por parte dos pesquisadores, governos e empresas.

Desse modo, a eficiência ambiental tem sido utilizada na literatura, principalmente para expressar a relação entre os impactos ambientais e a concepção de um produto, serviço ou resultado econômico, conforme explicado por Mazzanti e Zobolli (2009), Chang *et al.* (2013) e Xie *et al.* (2014). Outros termos também são encontrados com para expressar relação análoga, como a ecoeficiência. De acordo com Zang *et al.* (2008), esta possui um papel importante na elucidação de como a atividade econômica está associada à natureza dos bens e serviços fornecidos.

Dessa forma, a transição para uma economia sustentável em nível global depende do desempenho, motivação e ambição das empresas (ELKINGTON, 1997). Concordando com o autor, Sanches *et al.* (2017) ressaltam a importância que as ações sustentáveis possuem sobre os negócios, bem como a necessidade de mecanismos para mensuração que possibilitem a compreensão dos benefícios que são obtidos pelas empresas por meio destas ações.

Porter e Linde (1995) sugerem que os princípios utilizados nos programas de gestão da qualidade sejam estendidos às ações para redução da poluição a fim de que sejam detectadas falhas de projeto ou de processo, promovendo assim, o uso mais eficiente das entradas de recursos e a minimização ou eliminação de atividades secundárias ou que apresentem algum risco envolvido.

Wagner (2005), por sua vez, expõe que as empresas que possuem estratégias ambientais corporativas de prevenção da poluição, apresentaram uma relação entre o desempenho ambiental e econômico mais positiva, tornando as melhorias na sustentabilidade corporativa mais prováveis. Para Zhou *et al.* (2016), a melhora do desempenho ambiental das empresas pode proporcionar melhor performance financeira e potenciais benefícios aos seus acionistas.

Logo, a análise dos efeitos ambientais em seus processos produtivos industriais pode revelar oportunidades para o aumento da sua eficiência e potencial de aumento de produtividade.

1.1. A Indústria de Celulose e Papel

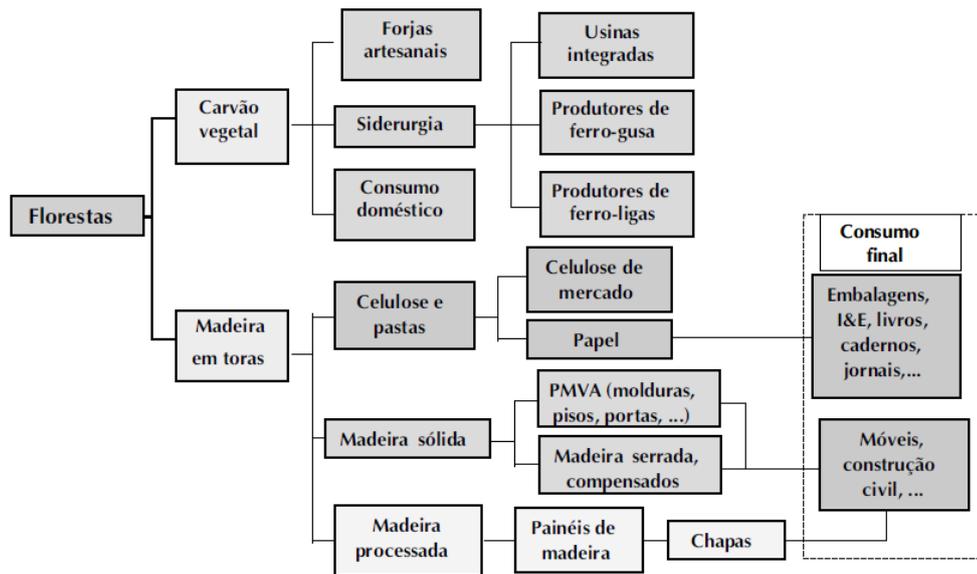
A indústria de celulose e papel é um setor de grande relevância na economia mundial que atua positivamente na balança comercial dos países que possuem unidades para a sua produção (ROSSATO, F. *et al.* 2018).

A sua ampla cadeia produtiva tem a utilização dos seus insumos destinada fundamentalmente para a geração de energia térmica e elétrica para o segmento industrial, obtenção de produtos intermediários e de consumo final.

De acordo com a Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA, 2012), as florestas plantadas representam uma abundante fonte de pesquisas relacionadas ao futuro da humanidade e também um recurso fundamental para atendimento às demandas associadas ao crescimento populacional.

De toda a área de árvores plantadas no ano de 2016, de acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2017) a maior parte é pertencente ao segmento de celulose e papel com 34%, enquanto outros 29% são de empresas que comercializam a madeira *in natura* e 14% das indústrias siderúrgicas para a produção de carvão vegetal. Os investidores financeiros, o segmento de painéis de madeiras e pisos laminados, produtos sólidos de madeira também compõem o conjunto dos principais proprietários de árvores plantadas no país. Na Figura 3 é apresentada a cadeia produtiva do setor de produtos florestais.

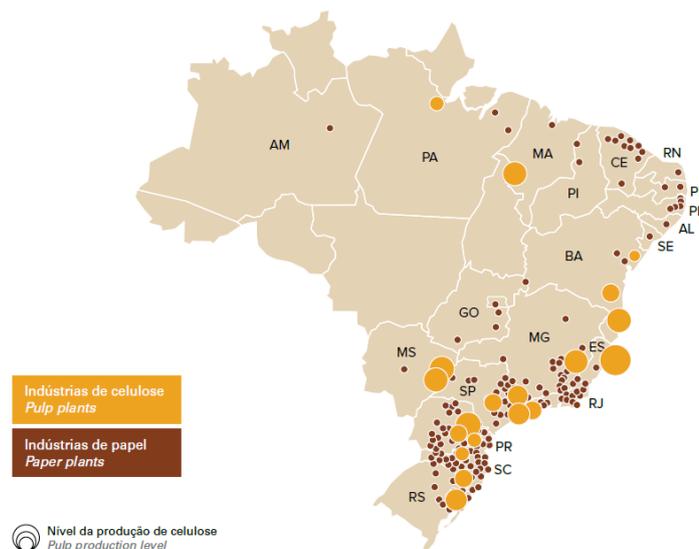
Figura 3 – Cadeia produtiva do setor de produtos florestais.



Fonte: DORES *et al.* (2006), p.109

De acordo com o Departamento de Pesquisa em Engenharia e Educação Continuada (DEPEC/BRADESCO, 2019), existem 71 empresas do segmento de celulose e 295 para a produção de papel, das quais a maior parte concentra-se próximo dos maiores mercados consumidores nas regiões Sul e Sudeste. A sua distribuição no território nacional é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Distribuição geográfica das empresas produtoras de celulose e papel.



Fonte: IBÁ (2017), p.43 a partir de dados da Pöyry (2016).

Diferente de outros mercados, segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC, 2018), o segmento de celulose possui elevado nível de desenvolvimento tecnológico e capacidade de processamento dos recursos florestais plantados, além de constante investimento em tecnologia. Também se destaca a necessidade de intensivo capital, escala mínima de eficiência produtiva elevada e seu comportamento cíclico de preços além de grandes fornecedores de máquinas e equipamentos em nível mundial (DORES *et al.*, 2006).

De acordo com o IBÁ (2017), no ano de 2016 o Brasil passou a ocupar a segunda posição em produção de celulose com 18,8 milhões de toneladas. Em relação à quantidade exportada, o país é um dos líderes mundiais no segmento, sendo, de acordo com a Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP, 2016), em 2015 o país com a maior quantidade exportada, totalizando 10,6 milhões de toneladas, o que representa 62% de toda a sua produção, seguido do Canadá com 9,3 milhões de toneladas e dos Estados Unidos com 7 milhões de toneladas.

Da Hora (2017), elucida que a celulose de mercado é caracterizada quase como uma *commodity*, e apesar das diferenças entre as fibras utilizadas, um dos fatores de vantagem competitiva na concorrência mundial do segmento é dada pelo seu custo de fabricação, condição a qual o Brasil ocupa a primeira posição no mercado mundial.

Por outro lado, o preço médio da tonelada de celulose exportada definido pelo mercado internacional, está sujeito a outros fatores além do custo de fabricação, como a variação do dólar, a variação da economia mundial e o volume de estoque (FIEP, 2016). Por conseguinte, o Brasil ocupa a décima posição no preço por tonelada exportada.

Para a produção, são utilizados dois tipos de celulose, caracterizados pelo comprimento das suas fibras que podem ser curtas ou longas. A sua aplicação varia de acordo com o tipo e finalidade do papel produzido. A pasta de alto rendimento por sua vez também é utilizada para a produção de papel e pode ser obtida de ambos os tipos de fibra.

A celulose de fibra curta possui fibras entre 0,5 e 2 milímetros de comprimento e é originária em sua maior parte do eucalipto. Seu uso é voltado para a fabricação de papéis de imprimir, escrever, especiais e para fins sanitários. A celulose de fibra longa é originária do pinus e sua utilização é voltada para a produção de papéis que requerem maior resistência, como embalagens e jornais, por exemplo (IBÁ, 2019).

O Brasil é o maior produtor mundial de celulose de fibra curta de eucalipto o qual é favorecido pelo clima adequado ao seu plantio (DEPEC/BRADESCO, 2019). A utilização da

fibra curta de eucalipto é predominante no país. Como referência, dos 18,8 milhões de toneladas de celulose produzidas em 2016, 16,2 milhões de toneladas são originárias do eucalipto, enquanto 2,1 milhões de pinus e 0,5 milhões são produzidas são de pastas de alto rendimento (IBÁ, 2017).

Quanto a destinação das fibras, parte dos produtores possuem unidades integradas do processo de fabricação de celulose com o de papel, enquanto outra parte, conhecida como celulose de mercado é produzida em uma unidade e vendida para outras empresas para a produção de papel em suas unidades industriais (DORES *et al.*, 2006).

No segmento de produção de papel, a demanda regional menos concentrada, amplo portfólio de produtos e grande número de consumidores, são algumas das características que o diferem do segmento de celulose. Outras características da indústria de papel estão na atuação de empresas de médio porte com preços cíclicos e que acompanham os da celulose (FIEP, 2016). O portfólio de produtos da indústria de papel é agrupado em seis categorias, que incluem o papel imprensa utilizado para a fabricação de jornais, papel para imprimir e escrever, papel ondulado para confecção de embalagens, papel-cartão, papéis para fins sanitários e os papéis para fins especiais.

Em relação à sua produção, somando todas as categorias, em 2016 segundo o IBÁ (2017), o Brasil obteve a oitava posição com 8 milhões de toneladas. No cenário mundial, entre os anos de 2005 e 2015 houve um aumento de aproximadamente 10%. Em 2015 foram produzidas 405 milhões de toneladas e a projeção para o atendimento do crescimento da demanda para o ano de 2030 é que sejam produzidas 467 milhões de toneladas (FIEP, 2016).

Além do crescimento da demanda registrado na última década, identificam-se também mudanças significativas em relação ao tipo de papel consumido, estas influenciadas pelo uso de mídias digitais pelos consumidores e crescimento de economias emergentes. Com estas mudanças, Vidal e Da Hora (2012) revelam que entre o ano 2000 e 2010 a redução mundial do percentual de demanda dos papéis de imprimir e escrever, e por outro lado o aumento do consumo do papel imprensa, o de papel ondulado e de fins sanitários.

Diferentemente da celulose, a produção de papel no Brasil possui apenas 2,5% de participação na produção mundial (DA HORA, 2017). Sua produção é essencialmente voltada para o atendimento da demanda doméstica e que de acordo com o DEPEC/BRADESCO (2019), segue praticamente no mesmo patamar de 2014, reflexo da desaceleração econômica e da expansão do uso de veículos digitais.

Dentre os principais fatores que explicam a pequena participação do Brasil na produção

mundial de papel, Da Hora (2017) destaca alguns aspectos que impactam no seu nível de competitividade, que incluem a infraestrutura logística nacional, a complexidade e tamanho da carga tributária, os custos energéticos e químicos, a estrutura organizacional deficiente e a estrutura de produção fragmentada com pátio de elevada idade tecnológica.

Apesar da importância do setor de celulose e papel, cabe, por outro lado, fazer um contraponto com os efeitos ambientais resultantes dos seus processos de produção, que incluem o intensivo uso madeira, água, energia, além das saídas de emissões geradas para a obtenção dos seus produtos.

O consumo de energia no setor de celulose e papel, por exemplo, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017) correspondeu por aproximadamente 5% de toda a energia do país, ocupando assim o 3º maior consumo de energia na indústria em 2016. Por outro lado, de acordo com o MCTIC (2018), no Brasil as empresas de celulose são predominantemente autossuficientes na geração de energia. Parte dessas atua colaborando com o sistema energético nacional, exportando a energia excedente.

O consumo de água, segundo Kramer *et al.* (2009) é uma entrada das entradas críticas do processo de fabricação de celulose, cuja a redução do seu consumo segundo os autores, além da preservação do recurso, também pode gerar economia de energia nas etapas que envolvem o aquecimento, tratamento e bombeamento da água.

Quanto às saídas no processo *kraft* de produção de celulose, que é o processo químico de fabricação mais utilizado atualmente, Francis, Towers e Browne (2002) revelam que para cada tonelada de celulose seca ao ar são gerados 35 m³ de efluentes. Além desses, os autores destacam que em seu tratamento faz-se necessário a remoção do excesso de calor através de torres de resfriamento e a utilização de energia elétrica para aeração e bombeamento.

Quanto às emissões GEE, de acordo com Kramer *et al.* (2009), nas unidades de celulose e papel estão associadas principalmente com queima de combustíveis, seguida pela geração externa de vapor e eletricidade para consumo nas unidades. As emissões de GEE não relacionadas à geração de energia e vapor também incluem as reações químicas do tratamento de efluentes.

De modo a compreender o efeito das variáveis indesejáveis dos processos de produção, Elkington (1997), destaca que os problemas associados aos potenciais riscos ambientais se refletem na necessidade crescente de novas métricas para mensuração dos seus impactos, que incluem o consumo de energia, consumo de água, potencial de emissões poluentes, geração de resíduo, danos e riscos ambientais, entre outras.

Nesse sentido, segundo o MCTIC (2017), para as unidades de produção de celulose e papel, a desagregação setorial para a análise de fatores como o consumo de energia e emissões torna-se importante na identificação da eficiência das ações tomadas para a redução das emissões nessas unidades. Dessa forma, é necessária uma análise meticulosa desses entre outros fatores envolvidos ao longo do processo de produção nas unidades industriais, sobre a ótica da produtividade e eficiência ambiental. Somado a esses aspectos, também é fundamental que essa desagregação entre as unidades seja efetuada para tal análise.

Logo, as unidades de produção de celulose e papel são divididas essencialmente em duas configurações: unidades integradas e não integradas. As unidades integradas são aquelas em que o papel é produzido por meio de um processo integrado no qual a celulose fornecida é produzida na mesma unidade industrial. As unidades não integradas, por outro lado requerem que a celulose seja fornecida de uma fonte externa para a produção do papel.

Reforçando a importância da desagregação entre essas unidades, Boyd e McClelland (1999) explicam que algumas das principais diferenças estão nos diferentes recursos utilizados e saídas indesejáveis que são geradas pelos seus processos de produção. Tal diferenciação, segundo Bajpai (2012) também é evidenciada em sua infraestrutura, e possui reflexos no volume de recursos e saídas indesejáveis geradas, como na utilização de sistemas auxiliares em comum nas unidades integradas, e que incluem a produção de vapor, geração de energia e tratamento de efluentes. As unidades não integradas, em contrapartida, necessitam menos espaço, e demandam menor consumo de energia e água.

Explicados a importância do setor de celulose e papel, os recursos e impactos ambientais resultantes dos seus processos, a demanda pelos seus produtos, assim como a necessidade da análise segmentada de suas unidades industriais, foi observado na literatura consultada que a produção científica com foco em eficiência ambiental e produtividade, sobretudo para as unidades integradas, constitui um campo de estudo pouco explorado no Brasil.

De forma a contribuir no desenvolvimento científico e aumento desse entendimento acerca das unidades com produção integrada de celulose e papel, é apresentada nessa pesquisa a seguinte pergunta central: Qual a relação existente entre a eficiência ambiental das indústrias integradas de celulose e papel do Brasil e a sua produtividade?

Para responder a essa pergunta, tem-se o seguinte objetivo geral para esta pesquisa: Investigar a relação existente entre a eficiência ambiental e a produtividade das indústrias integradas de celulose e papel no Brasil. Este, por sua vez, será obtido a partir do atendimento aos seguintes objetivos específicos, que são:

- Compreender o panorama de produtividade e uso de recursos ambientais das indústrias;
- Identificar as principais variáveis do processo de produção das indústrias integradas de celulose e papel do Brasil;
- Mensurar a eficiência ambiental e produtividade das indústrias integradas de celulose e papel do Brasil.

1.2. Estrutura da Dissertação

Para atender aos objetivos propostos e responder à pergunta de pesquisa, a estrutura deste trabalho é composta por uma coletânea de três artigos científicos.

O primeiro, publicado na Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental¹, trata-se de uma Revisão Sistemática de Literatura, no qual obteve-se o panorama das publicações acerca da eficiência ambiental e produtividade nas indústrias, na qual foi identificada a abordagem metodológica predominante, sendo assim utilizada para atendimento aos objetivos específicos 1 e 3.

No segundo artigo, submetido à Revista Desafio Online², foi realizada a análise dos componentes principais, cuja determinação das variáveis das indústrias integradas celulose e papel atendem aos objetivos específicos 2 e 3.

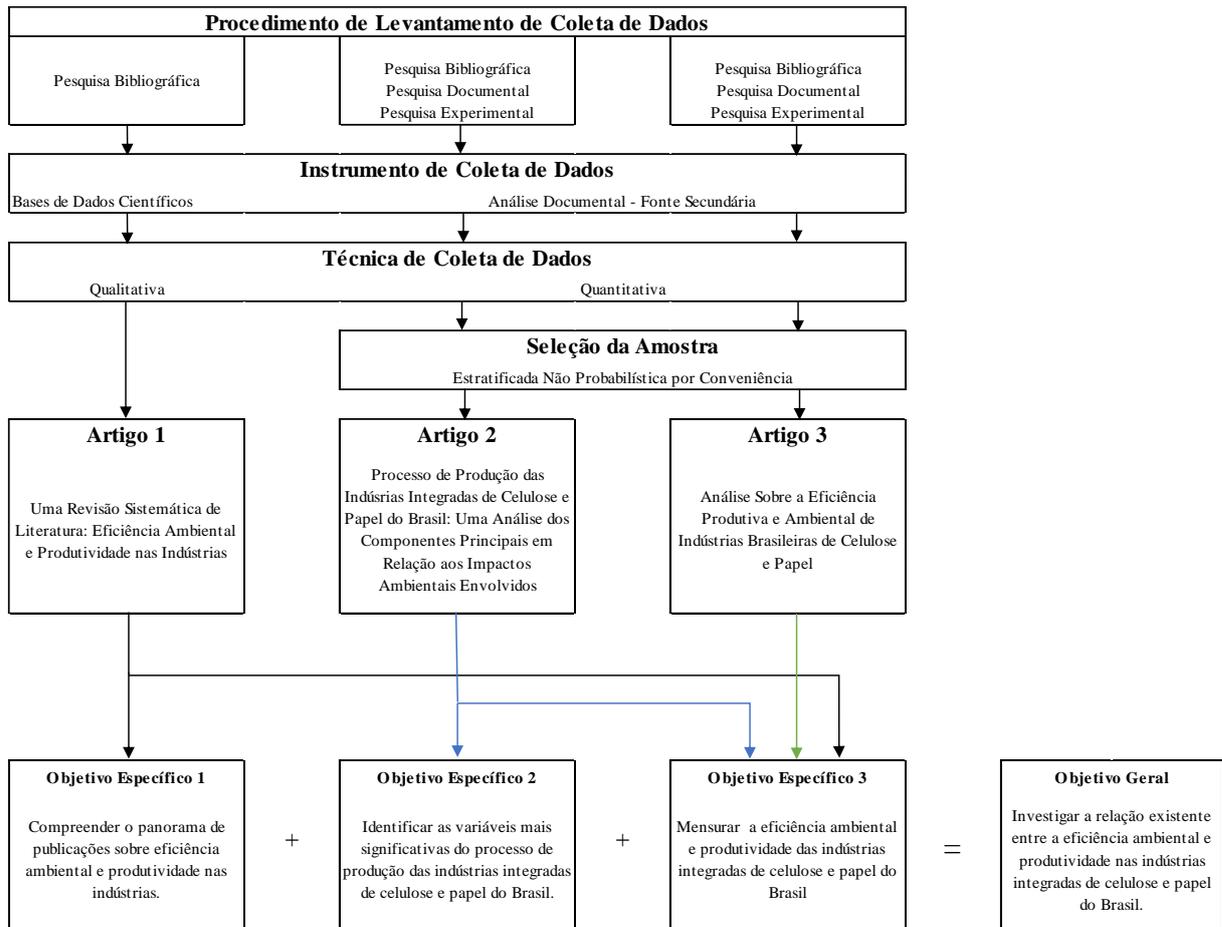
No terceiro, é obtido o *benchmark* eficiência em termos de produtividade das indústrias selecionadas e a eficiência ambiental com os seus determinantes, atendendo assim ao objetivo específico 3. Na Figura 5 é mostrado um sinóptico dos procedimentos metodológicos e a organização dos artigos para o atendimento aos objetivos específicos e geral da pesquisa.

Subsequente aos três artigos científicos, é apresentada a conclusão geral do trabalho, na qual são discorridos os principais resultados, as suas limitações e recomendações para a realização de pesquisas futuras.

¹ ISSN 2238-8753

² ISSN 2317-949X

Figura 5 – Sinóptico dos procedimentos metodológicos



Fonte: O Autor (2020)

REFERÊNCIAS

ACMOGLU, D.; ZILIBOTTI, F. Productivity Differences. **The Quarterly Journal of Economics**, 2001.

AIGNER, D. J.; CHU, S. F.; On Estimating The Industry Production Function. **American Economic Association**, v.58, n.4, p.826-839, 1968.

BAJPAI, P. Brief Description of the Pulp and Paper Making Process. **Biotechnology For Pulp And Paper Processing**, Springer. USA, p.7-14, 2012.

BARLEY, S.; KUNDA, G. Design and Devotion. Surges of Rational and Normative Ideologies of Control in Managerial Discourse. 1992.

BLIZZARD, J; KLOTZ, L. A Framework for Sustainable Whole Systems Design. **Design Studies**, v.33, n.5, p.456-479, 2012.

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel. Oportunidade e Desafios da Indústria Brasileira de Celulose e Papel no Caminho da Sustentabilidade. **Confederação Nacional da Indústria**, 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados. **Segmento Celulose e Papel**. 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/105176754/PRODUTO+4_Vpublicacao.pdf/f48424df-30ef-464e-ac90-e30d97f41936> Acessado em: 24.Abr.2019.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2017**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2017>>. Acessado em: 18 out. 2019.

CHANG, Y.; ZHANG, N.; DANAQ, D.; ZHANG, N. Environmental Efficiency Analysis of Transportation System in China: A Non-Radial DEA Approach. **Energy Policy**, v.58, p. 277-283, 2013.

COBB, C. W.; DOUGLAS, P. H. A Theory of Production. **The American Economic Review**.1928.

COELLI, T. J.; RAO, D. S. P.; O'DONELL, C. J.; BATTESE, G. E. An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis. **Springer**, 2th edition, p. 1-9. 2005.

DATTA, D. K.; GUTHRIE, J. P.; WRIGHT, P. M. Human Resource Management and Labor Productivity: Does Industry Matter? **Academy of Management Journal**, v.48, n.1, p.135-145. 2005.

DAVENPORT, T.; SHORT, J. The New Industrial Engineering: Information Technology and Business Process Redesign. **Center for Information Systems Research**, Sloan School of Management. 1990.

DEPEC/BRADESCO – Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos do BRADESCO. **Papel e Celulose**, jan. 2019. Disponível em: <https://www.economiaemdia.com.br/BradescoEconomiaEmDia/static_files/pdf/pt/monitores/setorial/infset_papel_e_celulose.pdf>

DORES, A. M. B. das; CHAGAS, F. B. das; MATTOS, R. L. G. de; GONÇALVES, R. M. **Papel e Celulose**. Panorama Setorial: Setor Florestal, Celulose e Papel. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Rio de Janeiro, p. 109 - 134. 2006.

DRUCKER, P. Knowledge-Worker Productivity: The Biggest Challenge. **California Review Management**, v.41, n.2, p.79 – 94, 1999.

ELKINGTON, J. Cannibals with Forks the Triple Bottom Line of 21st Century Business. **Oxford, UK Capstone Publishing Limited**, 1997. 402 pp.

FIEP. Panorama setorial: **indústria de celulose, papel, embalagens e artefatos de papel**: Paraná 2016 / Federação das Indústrias do Estado do Paraná e Sindicato das Indústrias de Papel, Celulose e Pasta de Madeira para Papel, Papelão e de Artefatos de Papel e Papelão do

Estado do Paraná. Curitiba: FIEP, 2016. Disponível em < [http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/papel_digital\[75083\].pdf](http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/papel_digital[75083].pdf)> Acessado em: 27 jun.2019.

FRANCIS, D.; TOWERS, M.; BROWNE, T. **Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry – An Energy Benchmarking Perspective**. Pulp and Paper Research Institute of Canada. 2002.

DA HORA, A. **Panorama Setorial**. BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONOMICO E SOCIAL – BNDES. Rio de Janeiro, p.80-91. 2017.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁVORES. **Relatório 2017**. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/pdf/iba-relatorioanual2017.pdf>>. Acessado em: 21 mai. 2018.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Market Report Series: **Energy Efficiency 2018**, OECD/IEA, Paris. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2369?fileName=Market_Report_Series_Energy_Efficiency_2018.pdf>. Acessado em 25 out. 2018.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. **Framing and Context**. Eds. DELMOTTE, M, *et al.* In Press, 2018.

MAZZANTI, M.; ZOBOLI, R. Environmental Efficiency and Labour Productivity: Trade-Off or Joint Dynamics? A Theoretical Investigation and Empirical Evidence from Italy Using NAMEA. **Ecological Economics**, v.68, n.4, p. 1182-1194, 2009.

KRAMER, K.; MASANET, E.; XU, T.; WORREL, E. **Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry**. University of California. 2009.

PORTER, M.; LINDE, C. Green and Competitive: Ending the Stalemate. **Harvard Business Review**, v.73, n.5, 1995.

ROSSATO, F. G. F. S. *et al.* Comparison of revealed comparative advantage indexes with application to trade tendencies of cellulose production from planted forests in Brazil, Canada, China, Sweden, Finland and United States. **Forest Policy and Economics**, v.97, p.59-66. 2018.

SANCHES, A.; DE QUEIROZ, A.; PEREIRA, L. Organizational Performance and Adoption of Sustainable Practices in the Agribusiness Industry: An Analysis of Multimodal Load Terminals. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v.7, n.2, p.248-263, Mai./Ago. 2018.

SVEIKAUSKAS, L. Technological Inputs and Multifactor Productivity Growth. **The Review of Economics and Statistics**, v.63, n.2, p.275-282. 1981.

SYVERSON, C. What determines productivity? **Journal of Economic Literature**, v.49, n.2, p.326-365. 2011.

UNITED NATIONS. Conference of the Parties. **Framework Convention on Climate Change**, 2015.

UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Goals Report** – SDG 2018. Disponível em:

<<https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2018/TheSustainableDevelopmentGoalsReport2018-EN.pdf>>. Acessado em: 05 jun. 2019.

VIDAL, A.; DA HORA, A. **A Indústria de Papel e Celulose**. Banco Nacional de BNDES – Desenvolvimento Econômico e Social. Rio de Janeiro, p.333-381, 2012.

WAGNER, M. How to reconcile environmental and economical performance to improve corporate social responsibility: corporate environmental strategies in the European paper industry. **Journal of Environmental Management**, v.76, n.2, p. 105-118, 2005.

XIE, B.; SHANG, L.; YANG, S.; YI, B. Dynamic environmental efficiency evaluation of electric power industries: Evidence from OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) and BRIC (Brazil, Russia, India and China) countries. **Energy**, v. 4, p.147-157, 2014.

ZANG, B.; BI, J.; FAN, Z.; YUAN, Z.; GE, J. Eco-Efficiency Analysis of Industrial System in China: A Data Envelopment Analysis Approach. **Ecological Economics**, v.68, p.306-316, 2008.

ZHOU, P.; POH, K.; ANG, B. Handbook of Operations Analytics Using Data Envelopment Analysis, **International Series in Operations Research & Management Science**. Springer, v. 239, p. 31-49, 2016.

ARTIGO 1 – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA: EFICIÊNCIA AMBIENTAL E PRODUTIVIDADE NAS INDÚSTRIAS

Artigo apresentado no Simpósio Mundial de Sustentabilidade – Conferência Bridge 2019, em Florianópolis e publicado na Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v.1, p.888-904, fev. 2020. O conteúdo apresentado é uma versão atualizada do artigo, no qual foram incluídas as considerações da banca de defesa de dissertação de mestrado.

UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA: EFICIÊNCIA AMBIENTAL E PRODUTIVIDADE NAS INDÚSTRIAS

RESUMO

O impacto da atividade humana sobre o meio ambiente tem mostrado prognósticos preocupantes, principalmente em relação às mudanças climáticas e que requerem a adoção de medidas de mitigação e redução em ritmo superior ao que é feito hoje. Nesse sentido, a inovação no uso de programação matemática para a mensuração da eficiência em setores de intensivo uso de recursos ambientais, como nas indústrias, pode revelar novas possibilidades de análise que auxiliem governos e indústrias em direção ao desenvolvimento sustentável. Desse modo, com o objetivo de compreender o panorama das publicações sobre eficiência ambiental e produtividade nas indústrias, foi realizada uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL). Por meio desta RSL, foram identificados os principais setores pesquisados, as variáveis ambientais, as variáveis de produção e as principais abordagens metodológicas utilizadas para mensuração da eficiência ambiental nas indústrias. Os resultados encontrados com o uso das abordagens de mensuração de eficiência ambiental revelam o seu suporte no desenvolvimento de políticas ambientais mais adequadas, auxiliando à compreensão da evolução no comportamento das variáveis ambientais e no fornecimento de informações que auxiliem a tomada de decisões mais assertivas por governos e indústrias.

Palavras-chave: Eficiência Ambiental, Produtividade, Indústria.

A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW: ENVIRONMENTAL EFFICIENCY AND PRODUCTIVITY IN INDUSTRIES

ABSTRACT

The impact from human activity on the environment has shown worrying predictions, especially in relation to climate change, which requires the adoption of mitigation and reduction measures at a higher rate than today. Therefore, innovation in the use of mathematical programming to measure efficiency in resource-intensive sectors, such as industries, may reveal new possibilities for analysis that support governments and industries towards sustainable development. In this way, in order to understand the panorama of publications on environmental efficiency and productivity in industries, it was performed a Systematic Literature Review (SLR). Through this SLR, it was identified the main surveyed sectors, the environmental variables, the production variables and the main methodological approaches used to measure the environmental efficiency in industries. The results found with the use of environmental efficiency measurement approaches show their support in the development of more suitable environmental policies, supporting to understand the evolution on the behavior of environmental variables and provide information to support more assertive decision-making by governments and industries.

Keywords: Environmental Efficiency, Productivity, Industry.

1. INTRODUÇÃO

A literatura revela o crescimento de estudos referentes ao equilíbrio da produtividade das indústrias com a eficiência ambiental, em particular devido aos resultados indesejados gerados ao longo dos processos de produção. Dentre os efeitos principais destes resultados indesejados, estão as mudanças climáticas como a principal preocupação ambiental atual.

Segundo Chang et al. (2013) o aquecimento global é uma das questões mais desafiadoras que a humanidade enfrenta, devido à complexidade dos processos e ao desenvolvimento de soluções abrangentes e de longo prazo. Munisamy e Arabi (2014), por sua vez, destacam que as indústrias têm alinhado esforços para serem socialmente responsáveis e eficientes em termos de padrões de consumo e poluição ao invés de apenas economicamente eficientes.

Nesse sentido, a análise dos recursos ambientais utilizados pelas indústrias e as saídas geradas além do seu produto final, revela-se um importante campo de pesquisa. Assim, o uso de técnicas para a mensuração de eficiência que possibilitem a análise conjunta de variáveis ambientais em setores de intensivo uso de recursos naturais compõem uma importante ferramenta para as indústrias, auxiliando-as nas tomadas de decisão nas modificações em seus processos produtivos e na adoção de políticas ambientais mais assertivas por governos em direção ao desenvolvimento sustentável.

Desse modo, com o objetivo de compreender o panorama dos estudos que envolvem a eficiência ambiental nas indústrias e a produtividade, foi realizada uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL), na qual, as seguintes *strings* de busca foram selecionadas: eficiência ambiental, produtividade e indústria.

De acordo com Kitchenham (2004), a RSL é uma forma de estudo secundária que visa identificar, avaliar e interpretar todas as pesquisas significativas disponíveis que se referem a uma determinada questão de pesquisa, área temática ou fenômeno de interesse. O mesmo autor destaca que uma revisão sistemática deve ser realizada de acordo com alguma estratégia predefinida.

Dessa forma, os procedimentos adotados, desde a definição das bases de dados até os critérios de elegibilidade, devem ser detalhadamente planejados e descritos. Após essa seção introdutória, as demais seções estão elencadas da seguinte forma neste artigo: A seção 2 descreve os métodos e os critérios de seleção de dados. A seção 3 exibe os resultados. A seção 4 apresenta as conclusões deste estudo.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

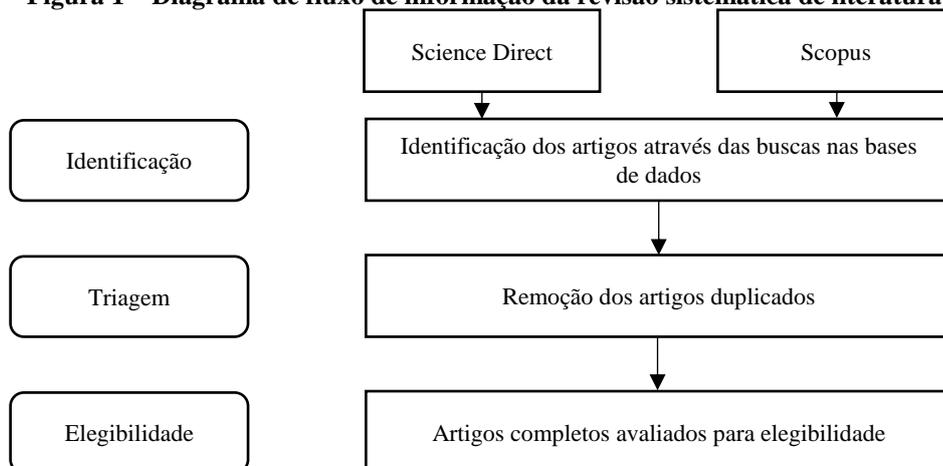
A fim de garantir a qualidade científica e minimizar o risco de parcialidade, a elaboração do estudo e análise desta revisão segue a base do PRISMA, realizado por Moher *et al.* (2009). Segundo os autores, uma revisão sistemática é uma revisão de uma questão claramente formulada que usa métodos sistemáticos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar criticamente pesquisas relevantes além de coletar e analisar dados dos estudos incluídos na revisão.

A estrutura de RSL proposta por Moher *et al.* (2009) consiste fundamentalmente das seções título, resumo, introdução, métodos, resultados e discussão. Nesta RSL, estas seções propostas pelos autores são contempladas nesta pesquisa.

Para proceder à seleção das bases de dados e realizar a pesquisa bibliográfica, essa seleção foi estabelecida de acordo com os seguintes critérios: relevância na comunidade acadêmica, as opções de tratamento dos resultados de busca nas bases de dados, a relação entre as *strings* de busca e o conteúdo das bases de dados.

Foram utilizadas as bases de dados *Science Direct* e *Scopus*. A consulta às bases foi realizada em novembro de 2018 via acesso remoto CAFE CAPES. Esta opção permite acesso ao conteúdo assinado disponível para professores e acadêmicos da UFMS nas duas bases de dados utilizadas. Selecionadas as bases de dados, o fluxo de informações desta RSL foi realizado conforme a Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de fluxo de informação da revisão sistemática de literatura



Fonte: O Autor (2020)

Nas bases de dados *Science Direct e Scopus*, foram utilizados filtros de pesquisa com o ano de publicação, o idioma, o tipo de documento, os termos exibidos em palavras-chave, o resumo e o título, dos quais foram encontrados 144 resultados, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Filtros nas bases de dados.

Bases de Dados	Strings	Filtros	Resultados
Science Direct	Environmental Efficiency AND Productivity AND Industry	Tipo de Documento: Artigo	118
		Ano de Publicação: Até 2017	
		Título, Resumo ou Palavras-chave: Environmental Efficiency AND Productivity AND Industry	
Scopus	"Environmental Efficiency" AND Productivity AND Industry	Tipo de Documento: Artigo	26
		Ano de Publicação: Até 2017	
		Título, Resumo ou Palavras-chave: Environmental Efficiency AND Productivity AND Industry	

Fonte: O Autor (2020)

Após esta etapa, o resumo das informações dos artigos foi exportado em um arquivo no formato bibtext para um computador. Em seguida, estes arquivos foram importados para o *software StArt*³, o qual foi desenvolvido para o suporte na elaboração de revisões sistemáticas. Com o uso deste *software*, na segunda etapa foram identificados também as publicações duplicadas, totalizando quinze nas duas bases de dados. A terceira etapa, denominada elegibilidade, consistiu na seleção de artigos que foram utilizados na revisão sistemática de acordo com a adoção dos critérios de inclusão e exclusão os quais são descritos a seguir:

Critérios de inclusão:

- Presença de todas as *strings* de pesquisa e termos com significado próximo, dos quais incluem *environment efficiency* e *eco-efficiency*;
- Argumentação conceitual sobre o tema;
- Convergência com os objetivos da pesquisa.

Critérios de exclusão:

- Artigos que não possuem correspondência com as *strings* de pesquisa.

Utilizando estes critérios de elegibilidade, foram selecionados treze artigos nesta RSL, cujo os resultados encontrados são apresentados na seção 3.

³ *Software* desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de *Software* da UFSCar.

3. RESULTADOS

Dentre os resultados que compreendem a distribuição das treze publicações selecionadas, estão a sua relevância à comunidade científica, os segmentos industriais pesquisados, países onde foram concentradas as pesquisas, as abordagens metodológicas de mensuração de eficiência utilizadas além as variáveis utilizadas.

a. Relevância dos Periódicos e Artigos

Para compreender a relevância dos periódicos para a comunidade científica, cujos trabalhos selecionados foram publicados, fez-se uso das classificações *Quartile Score* e *Scientific Journal Rankings* (SJR), ambas obtidas do site *Scimago Journal & Country Rank*.

O Quartile Score é uma classificação baseada no Fator de Impacto (IF), que fornece a categorização em quartis dos assuntos para todos os periódicos, de acordo com o seu nível de relevância. O SJR, por sua vez, de acordo com o *Scimago Journal & Country Rank*, é uma medida de influência científica dos periódicos que considera tanto o número de citações recebidas por um periódico quanto a importância ou prestígio dos periódicos de onde provêm tais citações. De acordo com o *Scimago Journal & Country Rank*, o resultado do SJR mostra uma média ponderada das citações no ano selecionado e os três anteriores. Nesta pesquisa, foram selecionados os resultados do Quartile Score e SJR, referentes ao ano de 2017 para todas as publicações.

Para identificar a relevância de cada artigo, aplicou-se o Índice de Impacto do Artigo (A_{IF}). Segundo Carvalho e Lopes (2013), o (A_{IF}) é calculado com base no número de vezes que o artigo foi citado (A_{TC}) e no fator de impacto do periódico, no qual foi adotado para esta pesquisa o *SJR* do ano de 2017, do site *Scimago Journal & Country Rank*. O uso da (A_{IF}) possibilita que a análise inclua a relevância da revista e da publicação simultaneamente. Esse índice é obtido conforme cálculo a seguir.

$$A_{IF} = A_{TC} \times (SJR + 1)$$

O Quadro 2 mostra a distribuição dos artigos selecionados com os respectivos autores, periódicos, Quartile Score, *SJR*, A_{IF} e A_{TC} .

Quadro 2 – Distribuição dos artigos e periódicos.

Autor Ano	Periódico	Título	A_{TC}	SJR	SJR Ranking	A_{IF}
Mazzanti et al. (2009)	Ecological Economics	Environmental efficiency and labour productivity: Trade-off or joint dynamics? A theoretical investigation and empirical evidence from Italy using NAMEA	44	1,657	21°	116,9
Chang et al. (2013)	Energy Policy	Environmental efficiency analysis of transportation system in China: A non-radial DEA approach	116	1,994	5°	347,3
Falavigna et al. (2013)	Agricultural Systems	Environmental efficiency, productivity and public funds in italian agricultural industry: The case of italian agricultural funds	15	1,156	30°	32,3
Xie et al. (2014)	Energy	Dynamic environmental efficiency evaluation of electric power industries: Evidence from OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) and BRIC (Brazil, Russia, India and China) countries	45	1,990	6°	134,6
Molinos-Senante et al. (2015)	Environmental Science & Policy	The impact of privatization approaches on the productivity growth of the water industry: A case study of Chile	21	1,661	16°	55,9
Munisamy et al. (2015)	Journal of Cleaner Production	Eco-efficiency change in power plants: using a slacks-based measure for the meta-frontier MalmquistLuenberger productivity index	36	1,467	21°	88,8
Emrouznejad et al. (2016)	Energy	A framework for measuring global MalmquistLuenberger productivity index with CO ₂ emissions on Chinese manufacturing industries	19	1,990	6°	56,8
Continua...						

Autor Ano	Periódico	Título	A_{TC}	SJR	SJR Ranking	A_{IF}
Kang et al. (2016)	Journal of Cleaner Production	Energy and environment efficiency of industry and its productivity effect	16	1,467	21°	39,5
Liu et al. (2016)	Journal of Cleaner Production	Evaluating the sustainability impact of consolidation policy in China's coal mining industry: a data envelopment analysis	14	1,467	21°	34,5
Shao et al. (2016)	Journal of Cleaner Production	Productivity growth and environmental efficiency of the nonferrous metals industry: an empirical study of China	6	1,467	21°	14,8
You et al. (2016)	Journal of Cleaner Production	The eco-efficiency of pulp and paper industry in China: an assessment based on slacks-based measure and Malmquist-Luenberger index	33	1,467	21°	81,4
Manello (2017)	European Journal of Operational Research	Productivity growth, environmental regulation and win-win opportunities: The case of chemical industry in Italy and Germany	2	2,437	11°	6,9
Yang et al. (2017)	Journal of Cleaner Production	Do exogenous shocks better leverage the benefits of technological change in the staged elimination of differential environmental regulations? Evidence from China's cement industry before and after the 2008 Great Sichuan Earthquake	2	1,467	21°	4,9

Fonte: O Autor (2020)

Os resultados do *Quartile Score* e do *SJR* revelam que todos os periódicos em que os artigos selecionados foram publicados, são relevantes para a comunidade científica em seus campos de pesquisa. O resultado do *Quartile Score* mostra para todos os periódicos a

classificação Q1, que é a mais elevada entre os quartis. O SJR revela o bom posicionamento destes periódicos em suas áreas, ocupando entre a 5ª e 30ª posições no ranking mundial.

b. Organização dos Estudos sobre Eficiência Ambiental e Produtividade

Inicialmente, as publicações selecionadas foram organizadas em relação aos seguintes aspectos: o campo de pesquisa, o país, a dimensão geográfica da pesquisa, as principais questões abordadas, a abordagem metodológica e a utilização de medida de séries temporais. O resumo desses dados foi organizado com base no trabalho de Enrouznejad e Yang (2016) e são apresentados na Quadro 3.

Quadro 3 – Principais questões abordadas e abordagens de mensuração de eficiência

Autor Ano	Campo de pesquisa	País	Dimensão	Principais questões abordadas	Abordagem Metodológica			Medida de séries temporais
					Medida de Eficiência			
					Tipo	Orientação	Modelo	
Mazzanti et al. (2009)	Filiais (Geral)	Itália	País	Verificar a relação entre eficiência ambiental e produtividade no trabalho	Não especificado	Não especificado	LSDV	Painel – NAMEA
Chang et al. (2013)	Transporte	China	Província	Eficiência ambiental da indústria de transporte da China	Não radial	Não orientado	DEA - SBM (modificado)	Não
Falavigna et al. (2013)	Indústria Agrícola	Itália	Província	Eficiência ambiental, produtividade e fundos públicos na indústria agrícola italiana	Radial	Saída	DEA - DODF	Índice MLP
Xie et al. (2014)	Indústria de Energia Elétrica	OECD e BRIC	País	Avaliação dinâmica da eficiência ambiental de indústrias de energia elétrica	Não radial	Não orientado	DEA - SBM	Painel
Molinos-Senante et al. (2015)	Distribuição de Água	Chile	País	Crescimento de produtividade no setor de distribuição de água	Não radial	Não orientado	DEA	Índice LP
Munisamy et al. (2015)	Usinas termoeletricas	Iran	País	Mudança de ecoeficiência em usinas de geração de energia	Não especificado	Não orientado	DEA - SBM (modificado)	Índice MLP
Continua...								

Autor Ano	Campo de pesquisa	País	Dimensão	Principais questões abordadas	Abordagem Metodológica			Medida de séries temporais
					Medida de Eficiência			
					Tipo	Orientação	Modelo	
Liu et al. (2016)	Indústria Carvoeira	China	Província	Avaliar a eficiência da política de consolidação na indústria de carvão da China.	Não radial	Não orientado	DEA - RAM	Painel
Shao et al. (2016)	Indústria de Metais não Ferrosos	China	Província	Crescimento de produtividade e eficiência ambiental da indústria de metais não ferrosos	Não especificado	Saída	Não especificado	Índices MP e MLP
You et al. (2016)	Indústria de Celulose e Papel	China	Província	Ecoeficiência da indústria de celulose e papel na China	Não radial	Não orientado	DEA - SBM	Índice ML
Manello (2017)	Indústria Química	Alema nha e Itália	País	Analisar a eficiência econômica e ambiental na indústria química.	Não radial	Saída	DEA - DODF	Índice SML
Yang et al. (2017)	Indústria de Cimento	China	Província	Mudança tecnológica, produtividade e eficiência ambiental	Radial	Saída	DDF	Painel

Fonte: O Autor (2020)

c. Campo de Pesquisa

Quanto ao campo de pesquisa, os resultados desta RSL revelam a elevada heterogeneidade dos setores da indústria que foram encontrados nos artigos, indicando que as *strings* selecionadas compreendem uma ampla gama de setores ao invés de um grupo limitado de indústrias que possuem a eficiência ambiental e produtividade como uma questão central.

Apesar da heterogeneidade dos setores industriais encontrados, seis dos treze trabalhos possuem o foco em indústrias com intensivo consumo e geração de energia, como as indústrias de transformação, carvão, usinas térmicas, metais não-ferrosos, cimento, celulose e papel. Ademais, esses setores também são responsáveis por grande parte das emissões provenientes da geração de energia e do consumo em seus processos produtivos.

Em relação a estes segmentos com intensivo uso de energia presentes nesta RSL, Shao e Wang (2016), por exemplo, afirmam que a maior parte da produção de metais não-ferrosos enfrenta desafios que impedem o desenvolvimento mais sustentável do setor, o que inclui, o elevado consumo de energia e de emissões de poluentes. Munisamy e Arabi (2014), por sua vez, destacam que indústrias do setor de geração de energia desempenham um papel econômico e ecológico crítico. No mesmo artigo, os autores revelam que no Irã, a indústria de geração de energia contribuiu com 33% das emissões de CO₂ do país.

d. Dimensão Geográfica de Pesquisa

A dimensão geográfica desta pesquisa mostra que as publicações selecionadas estão concentradas em nível de província e de país, exceto Xie et al. (2014) e Manello (2017), cujas publicações abrangeram mais de uma nação. Na China, em específico, todas os artigos foram realizados em nível de província, dos quais a maior parte é focado em estabelecer uma comparação da evolução entre as províncias com o objetivo de analisar os fatores determinantes para uma produção limpa nessas indústrias. Os demais artigos de outras regiões, exceto Falavigna et al. (2013), compreendem os estudos em nível de país.

Parte dos autores, tanto nas pesquisas em nível de província como de país, destacam a relação direta entre políticas ou regulamentações, eficiência nas indústrias e seus benefícios operacionais e ambientais. Liu et al. (2016), por exemplo, afirma que a regulação orientada para o mercado pode reduzir o impacto negativo da sua reestruturação sobre a eficiência operacional e assim, alcançar uma maior eficiência unificada, tanto em seus aspectos operacionais quanto ambientais.

e. Principais Questões Abordadas

A ligação entre eficiência ambiental e produtividade foi a questão mais abordada nesses artigos, assim como os fatores que determinam o seu aumento ou redução. Nesse sentido, Mazzanti et al. (2008), afirma em sua pesquisa, que abrangeu 29 setores na Itália, que para a maioria das categorias de emissões atmosféricas, há uma relação positiva entre produtividade do trabalho e eficiência ambiental.

Molinos-Senante et al. (2015), por sua vez, elucidam os desafios da implementação de reformas de privatização na indústria da água e seu efeito na produtividade. Dentre as

abordagens utilizadas em sua pesquisa, a que contemplou a eficiência ambiental, auxiliou na identificação dos fatores determinantes para o aumento de produtividade.

Yang et al. (2017), investigaram os benefícios financeiros e ambientais da modernização tecnológica, examinando melhorias na produtividade e no desempenho ambiental. Nesta pesquisa, verificou-se que a modernização das máquinas pode proporcionar uma economia significativa em relação à poluição, sem gerar obstáculos em sua eficiência produtiva.

f. Abordagens Metodológicas de Mensuração

Nesta RSL, dentre as abordagens metodológicas utilizadas pelos autores, foi identificado que a Análise Envoltória de Dados (DEA) é a principal adotada para a mensuração da eficiência ambiental e produtividade. Das trezes publicações selecionadas, onze utilizaram a DEA. Segundo Chang et al. (2013) a DEA é utilizada para identificar o *benchmarking* entre as Unidades de Tomada de Decisão (DMUs), que neste caso são representadas pelas indústrias, e formam uma fronteira de eficiência. No entanto, nesta RSL apenas um estudo foi desenvolvido com o uso do modelo pioneiro da DEA, desenvolvido por Charnes et al. (1978).

Onze estudos adotaram alguma variação do modelo clássico da DEA para medir a eficiência ambiental. A principal razão dessa adoção ocorre devido ao modelo precursor desenvolvido por Charnes et al. (1978) não ter sido desenvolvido especificamente para o uso de variáveis ambientais.

O modelo da DEA descrito acima é orientado para saídas, nas quais objetiva-se maximizar as variáveis de saída, fornecendo uma medida de eficiência relativa para cada DMU. No entanto, quando utilizado para a análise de eficiência com o uso de variáveis ambientais nas indústrias, muitas vezes não é desejável maximizar todos os resultados, devido às características dessas variáveis que muitas vezes estão associadas às emissões e demais saídas do processo, além do produto final, também conhecidas como variáveis indesejáveis.

Portanto, parte dos autores fizeram uso de variações da DEA, para modelar as entradas e saídas de acordo com as características do processo e das variáveis desejáveis e indesejáveis obtidas.

Na coluna de medida de séries temporais preenchidas como “não”, foram utilizados dados de seção cruzada, nas quais têm-se que apenas uma seção na linha do tempo é analisada para medir a eficiência de cada DMU. Os dados do painel permitem a avaliação longitudinal,

uma vez que nestes é possível analisar a evolução da eficiência em diferentes pontos. O GMLP, ML, SML, MLP são variações dos índices Produtividade de Malmquist (MP) e Produtividade de Luendberger (LP). Esses índices também permitem a medição da eficiência em diferentes pontos, além de considerarem o efeito da evolução da tecnologia ao longo do tempo, de modo assim, evitar distorções nos resultados da DEA.

Dentre as variáveis identificadas para as indústrias nesta RSL, o capital, o trabalho e o consumo de energia são as principais entradas em comum dos processos. Ademais, o valor agregado e a geração de energia são as principais saídas desejáveis, enquanto as emissões de CO₂ e de efluentes são as principais saídas indesejáveis em comum, conforme mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Variáveis dos Processos e Unidades de Tomada de Decisão.

Autor Ano	Campo de Pesquisa	País	Entradas	Saídas	DMUs	Quantidade
Mazzanti et al. (2009)	Filiais (Geral)	Itália	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não especificado
Chang et al. (2013)	Transporte	China	Capital, trabalho, energia	Valor agregado, emissões de CO ₂	Indústrias de meio de transporte de cada província	30
Falavigna et al. (2013)	Indústria Agrícola	Itália	Superfícies cultivadas	Quantidade de produção, quantidade de emissões	Províncias italianas	102
Xie et al. (2014)	Indústria de Energia Elétrica	OECD e BRIC	Trabalho, capacidade instalada, combustível e entrada nuclear	Geração de energia, emissões de carbono	Sistemas de energia na OECD e BRIC	26
Molinos-Senante et al. (2015)	Distribuição de Água	Chile	Custos de operação, trabalho, extensão da rede	Água distribuída, consumidores que possuem serviço de tratamento de efluentes	Plantas de tratamento de efluentes	60
Munisamy et al. (2015)	Usinas termoelétricas	Iran	Capacidade efetiva, consumo de combustível	Emissões de SO ₂ , NO _x , CO _x e energia gerada	Usinas termoelétricas iranianas	48
Emrouznejad et al. (2016)	Indústria de Manufatura	China	Ativo, trabalho, consumo de energia	Valor bruto da produção industrial, emissões de CO ₂	Indústrias de manufatura	29
Continua...						

Autor Ano	Campo de Pesquisa	País	Entradas	Saídas	DMUs	Quantidade
Kang et al. (2016)	Indústria (Geral)	Coréia do Sul	Consumo de energia, proporção de concentração das seis principais fontes de energia, entrada não energética	Soma das saídas intermediárias das indústrias, emissões de CO ₂	Indústrias Coreanas	154
Liu et al. (2016)	Indústria Carvoeira	China	Trabalho, capital, energia	Carvão, água residual, gás residual, resíduos sólidos	Indústrias de mineração de carvão	Não especificado
Shao et al. (2016)	Indústria de Metais não Ferrosos	China	Consumo energético da indústria, total de ativos	Valor de saída, receita de vendas, emissões de CO ₂	Regiões de indústrias de metais não ferrosos	27
You et al. (2016)	Indústria de Celulose e Papel	China	Consumo de água	Emissões de efluentes, demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio amoniacal (N-NH ₃), valor total de produção industrial	Indústrias de celulose e papel de cada província	16
Manello (2017)	Indústria Química	Alemanha e Itália	Ativos, bens intermediários, custos de mão de obra	Faturamento, índice de impacto ambiental	Empresas químicas	Não especificado
Yang et al. (2017)	Indústria de Cimento	China	Número de empregados, valor líquido dos ativos fixados na moeda RMB, consumo de calcário, total de vendas na moeda RMB	Emissões de SO ₂ em toneladas, emissões de poeira em toneladas, emissões de CO ₂ do processo de produção de cimento, produção de clínquer em toneladas, eletricidade comprada	Indústrias de cimento na província de Sichuan	54

Fonte: O Autor (2020)

4. DISCUSSÃO

Esta RSL buscou a ampliação do entendimento da organização dos estudos sobre eficiência ambiental nas indústrias e a influência nos resultados de produtividade. Verificou-se que a eficiência e produtividade ambiental constituem um amplo campo de estudos, uma vez que cada pesquisa possuiu como temática distintos setores industriais, em especial os de intensivo consumo e geração de energia.

A maior parte dos artigos foram publicados entre os anos de 2013 e 2017, em especial na China e Europa, o que indica que as *strings* escolhidas são parte de um problema global atual e que envolve economias em diferentes estágios de desenvolvimento. Além disso, todos os

artigos foram publicados em periódicos com alta relevância para a comunidade científica em seus campo de pesquisa. Os resultados desta RSL ainda revelam que a relação entre eficiência ambiental e produtividade pode fornecer resultados positivos em ambas as esferas além de subsidiar a tomada de decisão e a adoção de políticas ambientais mais realistas.

As abordagens metodológicas identificadas nesta pesquisa, revelam que a DEA é a principal abordagem aplicada nos artigos selecionados, o que reforça que a sua flexibilidade permite uma ampla gama de aplicações envolvendo o uso de diversas variáveis em segmentos industriais distintos. Nesta RSL, dos treze artigos, onze utilizaram a abordagem da DEA, o que mostra a sua utilização bem-sucedida em fornecer uma medida relativa de eficiência.

Contudo, a utilização de variáveis ambientais frequentemente revela a existência de saída desejáveis e indesejáveis, fator que requer uma seleção criteriosa do modelo de variação da DEA mais apropriado para que não sejam obtidas distorções nos resultados encontrados.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul e ao CNPQ pelo suporte à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

CARVALHO, M.; FLEURY, A.; LOPES, A. An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): contributions and trends. **Technological Forecasting & Social Change**, v.80, n.7, p.1418-1437, 2013.

CHANG, Y.; ZHANG, N.; DANAQ, D.; ZANG, N. Environmental efficiency analysis of transportation system in China: A non-radial DEA approach. **Energy Policy**, v. 58, p.277-283, 2013.

EMROUZNEJAD, A.; YANG, G. A framework for measuring global Malmquist–Luenberger productivity index with CO₂ emissions on Chinese manufacturing industries. **Energy**, v. 115, p.840-856, 2016.

FALAVIGNA, G.; MANELLO, A.; PAVONE, S. Environmental efficiency, productivity and public funds: The case of the Italian agricultural industry **Agricultural Systems**, v. 121, p.73-80, 2013.

KANG, D.; LEE, D. Energy and environment efficiency of industry and its productivity effect. **Journal Of Cleaner Production**, v. 135, p.184-193, 2016.

KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Joint Technical Report**, Keele University, Staffordshire, UK, 2004.

LIU, J.; LIU, H.; YAO, X.; LIU, Y. Evaluating the sustainability impact of consolidation policy in China's coal mining industry: a data envelopment analysis, **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2969-2976, 2016.

MANELLO, A. Productivity growth, environmental regulation and win–win opportunities: The case of chemical industry in Italy and Germany. **European Journal Of Operational Research**, v. 262, n.2, p. 733-743, 2017.

MAZZANRI, M.; ZOBOLI, R. Environmental efficiency and labour productivity: Trade-off or joint dynamics? A theoretical investigation and empirical evidence from Italy using NAREA. **Ecological Economics**, v.68, n.4, p.1182-1194, 2009.

MOHER, D.; LIBERATI, A. TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **Annals of Internal Medicine**, v. 151, n. 4, p.264-270, 2009.

MOLINOS, M.; SALA, R. The impact of privatization approaches on the productivity growth of the water industry: A case study of Chile. **Environmental Science & Policy**, v.50, p.166-179, 2015.

MUNISAMY, S.; ARABI, B. Eco-efficiency change in power plants: using a slacks-based measure for the meta-frontier Malmquist–Luenberger productivity index. **Journal Of Cleaner Production**, v.105, p.218-232, 2015.

SCIMAGO JOURNAL & COUNTRY RANK. **Scimago Lab**. Disponível em: <<https://www.scimagojr.com/>>. Acesso em: 21/09/2018.

SHAO, Y.; WANG, S. Productivity growth and environmental efficiency of the nonferrous metals industry: an empirical study of China. **Journal Of Cleaner Production**, v.137, p.1663-1671, 2016.

XIE, B.; SHANG, L.; YANG, S.; YI, B. Dynamic environmental efficiency evaluation of electric power industries: Evidence from OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) and BRIC (Brazil, Russia, India and China) countries. **Energy**, v.74, p.147-157, 2014.

YANG, Q. KANEKO, K.; FUJII, H.; YOSHIBA, Y. Do exogenous shocks better leverage the benefits of technological change in the staged elimination of differential environmental regulations? Evidence from China's cement industry before and after the 2008 Great Sichuan Earthquake. **Journal Of Cleaner Production**, v.164, p.1167-1179, 2017.

YU, C.; SHI, L.; WANG, Y.; CHANG, Y.; CHENG, B. The eco-efficiency of pulp and paper industry in China: an assessment based on slacks-based measure and Malmquist–Luenberger index. **Journal Of Cleaner Production**, v.127, p. 511-521, 2016.

**ARTIGO 2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS INDÚSTRIAS
INTEGRADAS DE CELULOSE E PAPEL DO BRASIL: UMA ANÁLISE
DOS COMPONENTES PRINCIPAIS EM RELAÇÃO AOS IMPACTOS
AMBIENTAIS ENVOLVIDOS**

Artigo submetido no mês de junho de 2020 à Revista Desafio Online. A versão apresentada é posterior à submetida à revista e poderá ser atualizada por ainda se encontrar em processo de revisão por pares.

PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS INDÚSTRIAS INTEGRADAS DE CELULOSE E PAPEL DO BRASIL: UMA ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS EM RELAÇÃO AOS IMPACTOS AMBIENTAIS ENVOLVIDOS

RESUMO

Para compreender os fatores que influenciam a eficiência ambiental e a produtividade de um processo industrial, é importante inicialmente, a realização de uma análise detalhada das variáveis envolvidas, de modo que a seleção abranja aquelas de maior relevância para o estudo. Sob essa abordagem, esse artigo trata das indústrias integradas de celulose e papel no Brasil com o objetivo de determinar as variáveis mais significativas do seu processo de produção, considerando os recursos ambientais e os seus impactos. Para isso foi realizada uma seleção preliminar a partir do referencial teórico, em que foram obtidas as seguintes variáveis com os respectivos dados coletados: número de trabalhadores, consumo de madeira, água, energia, emissões de CO₂ equivalente e volume de produção. Para determinar as variáveis de maior relevância nesse processo de produção foi utilizada a técnica de Análise de Componentes Principais (ACP), cujos resultados revelaram que duas componentes principais explicam a maior parte da variância do conjunto de dados. A respeito dessas componentes, foi observado que as seis variáveis selecionadas para o estudo possuíam contribuição significativa, o que evidencia a importância da incorporação dos aspectos ambientais nesse processo de produção e o alinhamento entre a seleção obtida pelo referencial teórico e os resultados com o uso da técnica ACP.

Palavras-chave: Indústrias de celulose e papel, Produtividade, Eficiência ambiental, Análise de componentes principais.

PRODUCTION PROCESS OF BRAZILIAN INTEGRATED PULP AND PAPER INDUSTRIES: PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS WITH RESPECT TO THE GENERATED ENVIRONMENTAL IMPACT

ABSTRACT

In order to understand the factors that influence environmental efficiency and productivity of an industrial process, it is important, at first, to undertake a detailed analysis of variables involved, so that selection covers those of greater relevance for the research. Under this approach, this paper covers the Brazilian integrated pulp and paper industries with the aim of determining the most significant variables of their production process, considering the environmental resources and impacts. In this regard, it was carried out a preliminary selection based on the theoretical framework, in which the following variables were obtained and the respective data collected: number of employees, consumption of wood, water and energy, CO₂ equivalent emissions and production volume. In order to determine the most relevant variables of this production process, it was applied the Principal Component Analysis Technique (PCA), whose results revealed that two principal components explain most of the variance from data set. With respect to these components, it was noted that the six variables selected in this study presented significant contribution, which shows the importance of incorporating environmental aspects in this production process and the alignment between the selection through the theoretical framework and the results with the use of PCA technique

Keywords: Pulp and paper industries, Productivity, Environmental efficiency, Principal component analysis.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Setor de Celulose e Papel

O setor de celulose e papel do Brasil é um dos principais segmentos da indústria de transformação e um dos líderes mundiais de produção. Com importância significativa na economia brasileira, esse setor é responsável pela geração de empregos diretos e indiretos em todas as regiões brasileiras. Conforme a Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP, 2019), o setor é composto por 220 empresas, com operações em 18 estados do território nacional, sendo responsável pela geração de 128 mil empregos diretos e outros 640 mil empregos indiretos. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2017), suas atividades geraram no país mais de R\$ 70 bilhões em 2016.

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2020), no ano de 2016 o Brasil produziu aproximadamente 19 milhões de toneladas de celulose, quantidade que o coloca como o segundo maior produtor mundial e o primeiro em quantidade exportada, com 71% da sua produção destinada ao mercado externo. Para a produção de papel, o país produziu aproximadamente 10 milhões de toneladas, quantidade que o coloca em oitava colocação, com sua maior parcela da produção destinada ao atendimento da demanda interna.

Como um dos líderes mundiais do setor de celulose e papel, algumas das características da indústria nacional que a colocam em vantagem competitiva em relação aos demais *players* mundiais são: *know-how* na elaboração de celulose de fibra curta a partir do eucalipto, disponibilidade de terras para a formação de florestas plantadas e condições edafoclimáticas⁴ favoráveis para a formação de base florestal de alto rendimento (SPEROTTO, 2016).

Em relação às projeções de demanda pelos produtos do setor de celulose e papel, até o ano de 2030, o consumo mundial de fibras deve crescer a uma taxa de 1,1 % ao ano, do qual, dentre os fatores que o explicam, identifica-se o aumento do poder aquisitivo de regiões em desenvolvimento, manifestado pela mudança de hábitos de consumo e higiene (ABTCP, 2016). Segundo a Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP, 2016), no panorama nacional, a projeção de crescimento do consumo é ainda maior, com estimativa 2,5 % ao ano, o que indica um incremento de 62 milhões de toneladas produzidas em 2030.

⁴ Relativas ao solo e ao clima.

Apesar do cenário favorável, especialmente no tocante à produção de celulose de mercado, é necessário fazer alguns contrapontos com relação à pressão sobre os recursos ambientais e os efeitos resultantes da produção nas suas unidades industriais.

Alguns dos recursos ambientais utilizados para a produção de celulose, como o consumo de madeira, de acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2008), a depender do processo, pode variar de 1,60 a 3,96 toneladas para a produção de uma tonelada de celulose. O consumo de água, por sua vez, pode chegar a 60 metros cúbicos por tonelada de papel produzido, sendo um dos segmentos com maior consumo, ocupando a terceira posição em retirada de água limpa, atrás apenas das indústrias siderúrgica e química (THOMPSON, 2001).

Outro aspecto inerente do setor de celulose e papel é o seu intenso uso de energia. Segundo Henriques (2010), praticamente todas as etapas do processo de produção de celulose e papel apresentam elevada intensidade energética, com consumos específicos variáveis a depender do processo empregado e das características finais do produto.

Dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), revelam a participação no consumo pelo setor de celulose e papel em, aproximadamente 5% de toda a energia produzida no Brasil. Parte significativa desta é utilizada na forma de energia térmica, que é a maior fonte de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) geradas pelas indústrias de celulose e papel (DA HORA, 2017). Por outro lado, de acordo com a Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA, 2012), observa-se o crescente consumo de fontes renováveis como a biomassa e de subprodutos para utilização em caldeiras e cogeração.

De modo a limitar os impactos ambientais resultantes da produção, em especial àqueles que possuem efeito sobre o aquecimento global, a Agência Internacional de Energia (IEA, 2017), revela que o setor de celulose e papel deve ter o seu aumento na utilização de energia limitado a 0,1% ao ano e a redução de emissões de CO₂ a uma taxa de 1,7% ao ano, para atendimento da meta de neutralidade de emissões firmadas no Acordo de Paris (2015). No entanto, com as tecnologias atuais os resultados indicam que a utilização de energia cresce a uma taxa de 0,2% ao ano e as emissões de CO₂ a uma taxa de 0,9%.

1.2. Eficiência Ambiental e Produtividade na Indústria de Celulose e Papel

Aos efeitos ambientais resultantes de um processo de produção, tem-se entre as principais definições na literatura, o termo eficiência ambiental. Embora a sua definição possa

apresentar distinções, é utilizada comumente para expressar a relação entre os recursos ambientais e seus impactos para a obtenção de um produto ou resultado econômico, conforme explicado por Mazzanti e Zoboli (2009), Chang *et al.* (2013), Falavigna *et al.* (2013) e Xie *et al.* (2014).

Nesse sentido, a incorporação das variáveis que evidenciam a pressão sobre o meio ambiente em um processo de produção, constituem uma forma de abordagem da análise de produtividade de uma indústria. O uso dessa abordagem por Boyd e McClelland (1999), na qual foram utilizadas as emissões geradas em indústrias de celulose e papel na análise da sua produtividade, foi identificado um potencial ganho dessa com a redução das suas emissões, quando não submetido às regulamentações ambientais.

Para as indústrias canadenses de celulose e papel, Hailu e Veeman (2001) identificaram que a inclusão dos poluentes na análise da produtividade em séries temporais, foram obtidos resultados sensivelmente superiores ao da análise tradicional de produtividade nessas indústrias, fator que evidencia a minimização das emissões geradas pelos processos de produção ao longo do período observado. Para Yu *et al.* (2016), a inclusão das emissões de poluentes na análise de produtividade também revelaram o avanço de parte das indústrias chinesas de celulose e papel na minimização dos impactos ambientais.

De modo semelhante, diversos autores identificaram uma relação predominantemente positiva entre o aumento da produtividade com a redução dos impactos ambientais no setores industriais, conforme pode ser observado nos estudos de Porter e Linde (1995), Mazzanti e Zoboli (2009), Falavigna *et al.* (2013) e Kang e Lee (2016).

Nesse sentido, Neves *et al.* (2020) realizaram uma revisão sistemática de literatura para traçar o panorama de publicações acerca da eficiência ambiental e produtividade nas indústrias, pela qual também foi evidenciada uma relação em sua maior parte positiva entre esses dois fatores.

Para compreender essa relação entre a produtividade nas indústrias e os seus efeitos ambientais, identificar os aspectos que influenciam tal relação é uma etapa crucial nesse desenvolvimento. Logo, o uso de um método de seleção de variáveis pode auxiliar na identificação daquelas de maior relevância, de modo a revelar aquelas que possuem papel preponderante face ao conjunto inicial de variáveis observadas. Para compreender esses aspectos em um segmento dos principais segmentos da indústria nacional, foi selecionado o setor de celulose e papel, em específico as suas indústrias integradas do Brasil que são aquelas em que é produzido papel a partir da celulose em uma mesma planta industrial.

Para essas, não foi identificado um estudo anterior que tenha realizado a seleção das suas variáveis com objetivo similar. Deste modo, foi proposta nessa pesquisa uma análise estatística multivariada com o objetivo de identificar as variáveis mais significativas do processo de produção para essas indústrias nacionais, considerando os efeitos ambientais envolvidos.

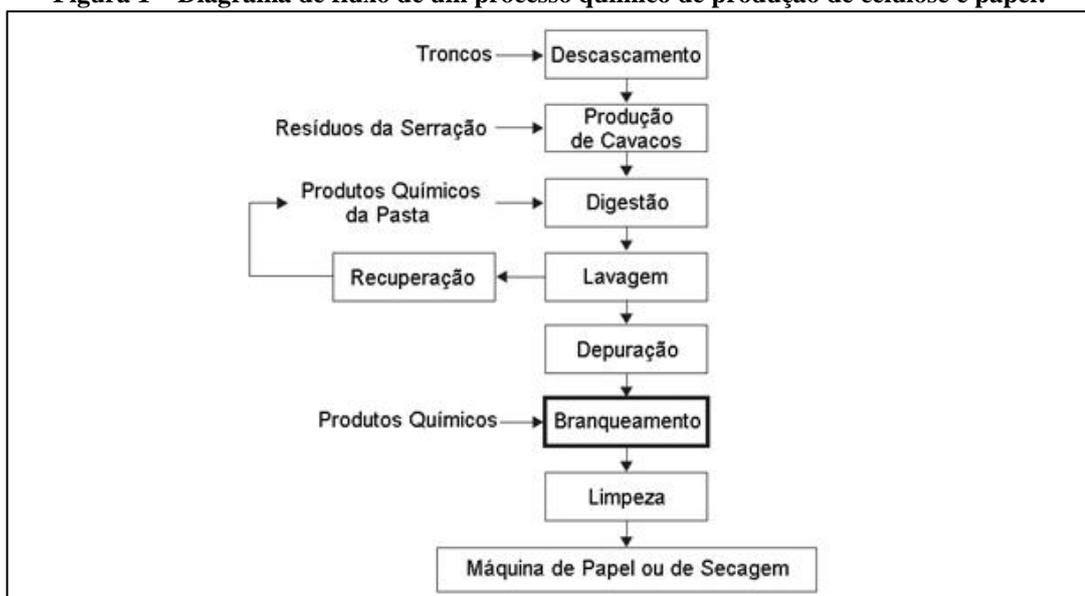
2. METODOLOGIA DE PESQUISA

2.1. Identificação Preliminar das Variáveis

Para a produção de celulose e papel, dentre os processos químicos, o processo conhecido como *kraft* é o mais utilizado pela indústria devido as suas vantagens na recuperação química e na resistência conferida à celulose. No processo químico, a lignina e os outros materiais são dissolvidos, permitindo que as fibras se unam no processo de produção de papel por meio da formação de ligações de hidrogênio entre as superfícies celulósicas (BAJPAI, 2010).

Logo, algumas das principais etapas desse processo de produção, conforme apresentado na Figura 1 a seguir são: preparação e manuseio da matéria prima, produção de celulose química, recuperação química, branqueamento, limpeza e envio para formação de papel.

Figura 1 – Diagrama de fluxo de um processo químico de produção de celulose e papel.



Fonte: Adaptado de Bajpai (2010), p. 15

A análise da eficiência ambiental e produtividade, para um determinado processo ou segmento industrial, como o de celulose e papel, depende inicialmente de uma seleção adequada das variáveis de produção e ambientais assim como as emissões geradas, de modo que as variáveis selecionadas para a análise correspondam à aquelas que possuem maior influência sobre os resultados de produção e seus efeitos ambientais. Nessa perspectiva, Senra *et al.* (2007) elucidam que a análise prévia dos possíveis conjuntos de variáveis é uma etapa imprescindível e que deve preceder a definição do método de seleção.

Desse modo, Coelli *et al.* (2005) explica que em processos de nível empresarial, usualmente o conjunto de variáveis de entrada pode ser classificado em cinco categorias, que são: o trabalho, o capital, a energia, os materiais e os serviços adquiridos. As saídas, por sua vez, sobretudo para bens de consumo, são expressadas pela quantidade produzida, podendo ser única ou de caráter múltiplo.

Essa forma de classificação das variáveis também pode ser identificada em algumas etapas do processo de produção de celulose e papel. Para elucidar as variáveis envolvidas, suas saídas geradas e também os impactos ambientais presentes ao longo de um processo de produção de celulose e papel, a seguir, no Quadro 1 são apresentadas algumas das principais do processo químico denominado *Kraft* para produção de celulose e papel branqueado.

Quadro 1 – Entradas e saídas do processo químico *kraft* de celulose e papel branqueado.

Etapa do Processo	Entrada de Material	Saída do Processo	Principais Saídas de Poluentes	Meio Contaminante
Preparação do Fornecimento de Fibra	Troncos de madeira Cavaco Serragem	Cavacos	poeira, grãos, fibra e casca	Sólido
			demanda bioquímica de oxigênio sólidos suspensos	Água
Processo Kraft de Celulose	Fornecimento de cavacos	Lícor negro (para o sistema de recuperação química) e celulose (processo de branqueamento)	resinas, ácidos graxos	Sólido
			cor	Água
			demanda bioquímica de oxigênio	
			demanda química de oxigênio	
			compostos organo-halogenados adsorvíveis	
			compostos orgânicos voláteis	Ar
compostos orgânicos voláteis				
				Continua...

Etapa do Processo	Entrada de Material	Saída do Processo	Principais Saídas de Poluentes	Meio Contaminante
Processo Kraft de Celulose	Compostos químicos para cozimento: sulfeto de sódio (Na ₂ S), NaOH, licor branco (a partir a recuperação de compostos químicos)	Lícor negro (para o sistema de recuperação química) e celulose (processo de branqueamento)	compostos reduzidos de enxofre compostos organoclorados	Ar
Branqueamento	Celulose química	Celulose branqueada	lignina dissolvida e carboidratos	Água
	Cloro elementar (Cl ₂), compostos que contém cloro		Cor	
			Hipoclorito (HClO, NaOCl, Ca(OCl) ₂), dióxido de cloro (ClO ₂)	
compostos orgânicos de cloro	compostos orgânicos voláteis	Ar e Água		
Fabricação de Papel	Aditivos, polpa branqueada ou não branqueada	Papel e papel cartão	resíduos particulados componentes orgânicos pigmentos inorgânicos demanda química de oxigênio Acetona	Água
Instalações de Tratamento de Efluentes	Efluentes do processo	Efluente tratado	Lodo	Sólido
			compostos orgânicos voláteis	Água
			demanda bioquímica de oxigênio	
			sólidos suspensos	
			demanda química de oxigênio	
			Cor	
			Clorofenóis	
dissulfeto de carbono				
compostos orgânicos voláteis				
Caldeira de Força	Carvão, madeira	Energia	cinzas residuais	Sólido
			SO ₂ , NO _x , cinzas volantes, partículas grossas	Ar
Sistema de Recuperação Química				
Evaporadores	Lícor negro	Lícor negro concentrado	compostos de enxofre reduzidos	Ar
			compostos orgânicos voláteis	Água
			demanda bioquímica de oxigênio	
Caldeira de Recuperação	Lícor negro concentrado	Fundido	partículas finas, dióxido de enxofre	Ar
		Energia	compostos de enxofre reduzidos	
Recaustização	Fundido	Lícor branco regenerado	Borras	Sólido
		Lama de cal	resíduo sólido de lodo	Água
Calcinação	Lama de cal	Cal	partículas finas e grossas	Ar

Fonte: USEPA – United States Environmental Protection Agency (1995), pp.43-45.

Em pesquisas sobre a produtividade e os efeitos ambientais em indústrias de celulose e papel, como desenvolvido por Boyd e McClelland (1999), Callens e Tyteca (1999), Hailu e Veeman (2001) e Blomberg *et al.* (2012), também foram identificadas a adoção dessa forma de classificação proposta por Coelli, somadas às emissões geradas, para as quais verificou-se maior recorrência dos seguintes conjuntos de variáveis para mostrar esta relação:

- Consumo de fibras;
- Consumo de água;
- Consumo de eletricidade;
- Número de trabalhadores;
- Volume de produção de celulose e papel;
- Volume de emissões de poluentes.

2.2. Procedimento de Levantamento de Coleta de Dados

Após o levantamento preliminar dos conjuntos de variáveis, na sequência, para o procedimento de coleta de dados desses conjuntos nas indústrias integradas de celulose e papel do Brasil, foram consultados os relatórios de sustentabilidade, o plano de manejo e o relatório do investidor que são disponibilizados nos sítios das empresas. Também foram consultadas revistas técnicas, artigos científicos, relatórios de instituições e associações do setor, dados de relatórios e planilhas disponibilizadas em sítios oficiais do Governo Federal, como a EPE, o Banco de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE).

Foi selecionado o de 2016 para a sua coleta devido a maior homogeneidade dos dados encontrados nos relatórios das empresas e de suas unidades integradas para produção de celulose e papel. Esta homogeneidade, que foi identificada a partir do ano de 2014 é resultado principalmente da adesão das empresas às diretrizes da quarta versão do *Global Reporting Initiative* (GRI) na publicação dos seus relatórios de sustentabilidade, conforme identificado pela análise dos relatórios anuais disponibilizados nos sítios das empresas entre os anos de 2014 e 2018. Contudo, cabe ressaltar que a GRI admite certa flexibilização na forma de apresentação dos relatórios, o que pode ocasionar distintas formas de apresentação dos dados e comprometer a realização de uma análise comparativa entre empresas, motivo esse o qual restringiu a seleção ao ano de 2016.

Das 21 indústrias integradas para produção de celulose e papel que foram identificadas em operação no Brasil, a disponibilidade de dados para uma amostra 8 indústrias permitiu uma comparação fidedigna alinhada ao objetivo proposto, o que correspondeu a aproximadamente 40% da população. O volume de produção dessa amostra, comparado com o total produzido de acordo com o relatório da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2020), representou aproximadamente 20% de toda a produção nacional do setor. Para as oito amostras selecionadas, os dados das seguintes variáveis foram coletados a partir do conjunto inicial, conforme mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Variáveis coletadas por tipo.

Tipo	Variável
Materiais	Consumo de Madeira (m ³)
	Consumo de Água (m ³)
Energia	Consumo de Energia (MWh)
Trabalho	Número de Trabalhadores
Saídas Geradas	Produção de Celulose e Papel (t)
	Emissões (tCO ₂ e)

Fonte: Dados da pesquisa

2.3. Estimativa de Distribuição

Foi observado que a utilização dos dados brutos para as variáveis consideradas pode implicar em uma análise estatística inapropriada (em virtude, especificamente, da caracterização desproporcional dos Intervalos de Confiança obtidos) devido à existência de elevada variabilidade nos níveis de produção das indústrias que compõem a amostra. Em outras palavras, a amostra considerada foi composta por indústrias de diferentes portes e capacidades produtivas tornando incomparáveis os valores brutos obtidos para algumas variáveis por diferentes indústrias. Dessa forma, foi proposta a definição de cinco índices onde as variáveis consumo de madeira, de água e de energia, número de trabalhadores e volume de emissão de CO₂ considerados, referem-se à produção fixa de uma tonelada de celulose e papel.

A partir destes índices, a confecção da análise passa pela construção de intervalos de confiança (IC). Para o cálculo deste IC, pressupõe-se que as variáveis utilizadas seguem o modelo de distribuição normal. De modo a identificar essa hipótese de distribuição nos índices utilizados, fez-se a verificação por meio de um método analítico, denominado teste de

normalidade de Shapiro-Wilk. Os parâmetros e equação para o cálculo e a formulação das hipóteses para os resultados são mostrados a seguir. Logo, para a Equação 1 observa-se:

n : Tamanho da amostra;

a_n : Coeficientes tabulados para uma amostra de tamanho n ;

X_i : Valores de uma amostra de tamanho n , com (X_1, X_2, \dots, X_n) ;

\bar{X} : Média amostral;

α : Nível de significância do teste.

Em que,

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} \times (X_{(n-i+1)} - X_{(i)}) & \text{se } n \text{ é par} \\ \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-i+1} \times (X_{(n-i+1)} - X_{(i)}) & \text{se } n \text{ é ímpar} \end{cases} \quad (1)$$

Com,

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (X_{(i)} - \bar{X})^2} \quad (2)$$

Do qual é tomada a decisão entre as seguintes hipóteses para p-valor obtido de W em relação ao nível de significância fixado:

Hipótese H_0 : A amostra segue uma distribuição normal, se p-valor $\geq \alpha$;

Hipótese H_1 : A amostra não segue uma distribuição normal, se p-valor $< \alpha$.

Sendo aceita a hipótese do modelo de distribuição normal H_0 , a seguir, são apresentados os parâmetros utilizados para a determinação dos IC's.

n : Tamanho da amostra;

X : Amostra obtida a partir de uma variável aleatória Y, com (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) ;

$\mu = \bar{X}$: Média amostral;

s : Desvio padrão da amostra;

γ : Confiança (probabilidade pré-fixada), com $(0 < \gamma < 1)$;

Z_γ : Probabilidade da distribuição normal padrão.

Com o intervalo de confiança expresso por:

$$IC(\mu, \gamma) = \left[\bar{X} - z_{\gamma/2} \times \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{X} + z_{\gamma/2} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \right] \quad (3)$$

2.4. Método de Seleção de Variáveis

Estabelecidos os IC's para um determinado nível de significância pré-fixado, a etapa seguinte consiste na seleção das variáveis mais significativas do processo de produção das indústrias de celulose e papel a partir do conjunto inicial das variáveis coletadas. A seguir, é apresentado o procedimento para a determinação dessas variáveis.

2.3.1 Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística que objetiva a redução da dimensionalidade do conjunto em análise, que é expressa pela variância da matriz de dados por uma combinação linear ponderada das variáveis. Cada componente principal obtido a partir desta combinação linear é ordenado em valores decrescentes de variância (NATARAJA e JOHNSON, 2011).

Se a maior parte da variância encontrada estiver atribuída a um pequeno número de componentes, e que geralmente representam entre 80 a 90 % de toda a variância, a sua substituição em relação ao conjunto de componentes utilizados inicialmente, não ocasionará uma perda significativa decorrente da redução da sua dimensionalidade (ADLER e GOLANY, 2001).

Para isso, Zhu (1998) elucida que a determinação dos componentes principais pode ser obtida conforme procedimento mostrado no Quadro 3.

Quadro 3 – Procedimentos para determinação dos componentes principais.

1ª Etapa: Calcular a média dos vetores da amostra e a matriz de covariância		
<i>D</i> : Matriz com os dados de entrada e saída para um conjunto de amostras;	$\bar{d} = (\bar{d}_1, \dots, \bar{d}_p)_{1 \times p}$	(4)
\bar{d} : Média ou vetor médio dos dados para cada coluna da matriz;		
Continua...		

<p>\bar{d}_k: Média dos dados de uma coluna da matriz;</p> <p>d_k^j: Dados de uma entrada ou saída para uma amostra j;</p> <p>n: Número de dados para uma entrada ou saída;</p> <p>S: Matriz de covariância.</p>	$\bar{d}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_k^j \left(= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ir}^j \right) \quad (5)$ $S = (S_{kq})_{p \times p} = \frac{1}{n-1} (D - \bar{d})^T (D - \bar{d}) \quad (6)$	
2ª Etapa: Calcular a matriz de correlação		
<p>R: Matriz de correlação;</p> <p>$C_{1/\sqrt{S_{kk}}}$: Matriz diagonal cujo elemento k da diagonal é igual a $1/\sqrt{S_{kk}}$, para $i = 1, \dots, p$.</p> <p>S: Matriz de covariância.</p>	$R = C_{1/\sqrt{S_{kk}}} \times S \times C_{1/\sqrt{S_{kk}}} \quad (7)$	
3ª Etapa: Calcular os autovalores e autovetores		
<p>R: Matriz de correlação;</p> <p>I_p: Matriz identidade;</p> <p>λ_k: Autovalor ou componente principal (raiz do polinômio característico), com $k = 1, \dots, p$.</p> <p>l_q^k: Autovetores de cada amostra que compõe o conjunto de componentes principais PC_k, com (l_1^k, \dots, l_p^k) e $k = 1, \dots, p$;</p> <p>\hat{d}_q^j: Dados normalizados de uma entrada ou saída para a amostra j.</p> <p>PC_k: Coordenadas dos componentes principais de cada amostra, com $k = 1, \dots, p$ e $q = 1, \dots, p$;</p>	$ R - \lambda_k I_p = 0 \quad (8)$ $PC_k = \sum_{q=1}^p l_q^k \hat{d}_q^j \quad (9)$	
4ª Etapa: Selecionar os componentes principais		
<p>C_M: Somatória da contribuição de cada componente principal λ_M em relação à soma de todos os componentes, com $k = 1, \dots, P$.</p> <p>w_k: Contribuição de um componente principal λ_k em relação à soma de todos os componentes.</p> <p>z: Coordenadas de um componente principal k, com $k = 1, \dots, P$.</p>	$C_M = \sum_{k=1}^M \lambda_k / \sum_{k=1}^P \lambda_k = \sum_{k=1}^M \lambda_k / P \quad (10)$ $z = \sum_{k=1}^M w_k PC_k \quad (11)$	

Fonte: Adaptado de Zhu (1998), p.53

Para a realização dos cálculos, utilizou-se o software RStudio® v.1.2.5001, (RStudio Team, 2019).

Na Figura 2 é mostrado o resumo dos procedimentos metodológicos e as principais etapas apresentadas nesta seção.

Figura 2 – Resumo dos procedimentos metodológicos adotados para a pesquisa.



Fonte: O Autor (2020)

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Tabela 1, são exibidos os índices referentes à produção de celulose e papel, obtidos a partir das variáveis coletadas do número de trabalhadores, consumo de madeira, água e energia e volume de emissões de CO₂ equivalente, consideradas para a produção fixa de uma tonelada de celulose e papel com as respectivas médias e desvios-padrões.

Tabela 1 – Índices, médias e desvios-padrões das amostras na produção de celulose e papel.

Amostra	Número de Trabalhadores	Consumo de Madeira (m ³)	Consumo de Água (m ³)	Consumo de Energia (MWh)	Emissões (tCO ₂ e)
1	0,002532	1,204104	17,430000	0,592618	0,106149
2	0,001098	3,595254	34,185927	0,659444	0,222104
3	0,001630	3,500000	57,416540	0,609167	0,155178
4	0,002959	3,448276	52,532232	0,609167	0,173037
5	0,003994	3,776893	40,010000	0,617539	0,261067
6	0,000891	3,502668	32,707217	0,642156	0,114891
7	0,002003	2,939472	40,170464	0,659444	0,357478
8	0,003292	4,642428	20,250590	0,749846	0,104774
\bar{X}	0,002300	3,326137	36,837871	0,642423	0,186835
s	0,001089	0,981040	13,973759	0,049901	0,089031

Fonte: Dados da pesquisa

A comparação entre os índices, inicialmente revela que as amostras possuem significativa amplitude, fator que evidencia a dissimetria entre as quantidades utilizadas de cada variável de entrada para obtenção da sua produção de celulose e papel. De modo análogo, os poluentes que são representados pelas emissões de CO₂ equivalente mostram significativa amplitude em relação às quantidades produzidas de celulose e papel para cada amostra.

Para um nível de significância $\alpha=0,05$ foi identificado pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk, que os índices obtidos a partir das variáveis coletadas referentes à produção fixa de uma tonelada de celulose e papel seguem um modelo de distribuição normal, com p-valor $> \alpha$. Os p-valores obtidos para cada índice são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição normal dos índices das amostras com p-valor $> 0,05$.

Teste de Normalidade Shapiro-Wilk	Índices Referentes à Produção de uma Tonelada de Celulose e Papel				
	Número de Trabalhadores	Consumo de Madeira (m ³)	Consumo de Água (m ³)	Consumo de Energia (MWh)	Emissões (tCO ₂ e)
p-valor	0,870600	0,066180	0,714400	0,081110	0,213300

Fonte: Dados da pesquisa

Aceita a hipótese H_0 , na qual a amostra possui um modelo de distribuição normal para um nível de significância $\alpha=0,05$, foram construídos os intervalos com confiança de 95%.

Para o número trabalhadores, obteve-se a maior amplitude dentre os índices, no qual observa-se maior influência das amostras 2 e 6, que possuem os menores valores para o

conjunto, evidenciando dessa forma um número significativamente menor de trabalhadores para a obtenção do produto final em relação às demais amostras.

O índice formado pelo consumo de madeira (m^3), tem nas amostras 1 e 8 aquelas que tiveram maior influência na amplitude do intervalo. Para a amostra 1 tem-se a menor quantidade de insumo por quantidade de celulose e papel produzida; para a amostra 8 por outro lado, identificou-se a maior quantidade para a produção de celulose e papel.

Para o consumo de água (m^3), a elevada variabilidade dos índices de cada amostra em relação à média, revela que para as amostras que foram selecionadas não foi observada uma proporcionalidade em comum quanto aos níveis desse consumo na produção de celulose e papel.

Já no índice formado pelo consumo de energia (MWh), foi obtida a menor variabilidade dentre os intervalos, sendo unicamente a amostra 8 que se manteve mais distante da tendência central, a qual registrou o maior consumo de energia para a produção de celulose e papel dentre as amostras.

O índice formado pelas emissões (tCO_2e), por sua vez, tem nas amostras 7 e 8 os valores com maior influência na amplitude deste intervalo. Neste, para a amostra 8, obteve-se a menor quantidade de emissões por quantidade de celulose e papel produzida; para a amostra 7, por outro lado, foi identificada a maior quantidade de emissões para a produção. Na Tabela 3 são mostrados os intervalos com confiança de 95% para os índices utilizados.

Tabela 3 – Intervalo com confiança de 95%.

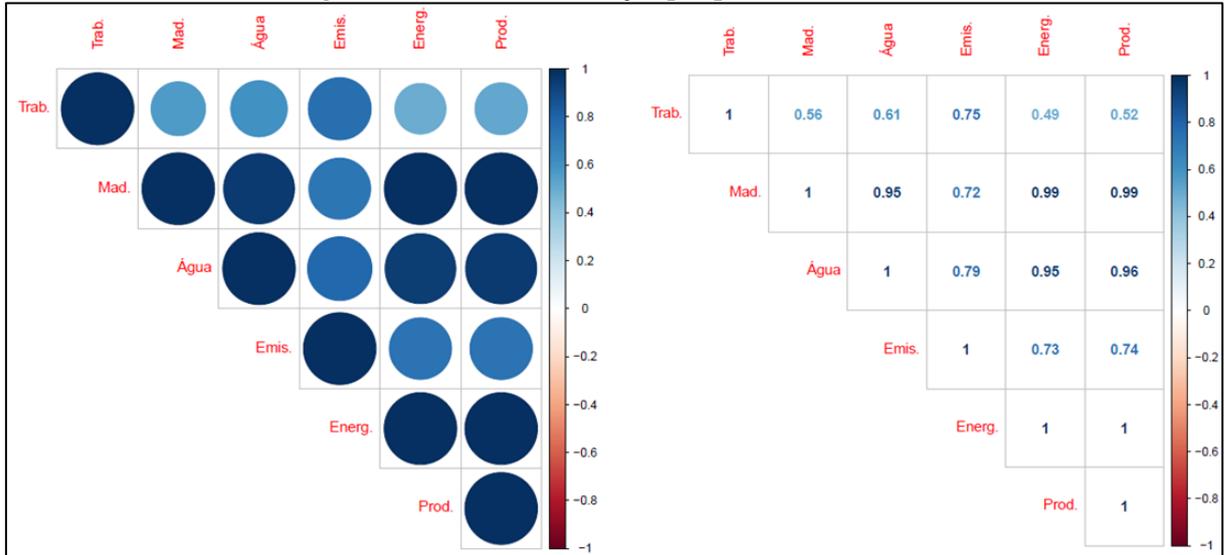
Limites do Intervalo	Índices Referentes à Produção de uma Tonelada de Celulose e Papel				
	Número de Trabalhadores	Consumo de Madeira (m^3)	Consumo de Água (m^3)	Consumo de Energia (MWh)	Emissões (tCO_2e)
Inferior	0,001545	2,646311	27,154550	0,607843	0,125139
Superior	0,003055	4,005963	46,521192	0,677002	0,248530

Fonte: Dados da pesquisa

Construídos os intervalos de confiança, com o uso das variáveis utilizadas para os cálculos dos índices, foi realizada a análise de componentes principais. Para isso, foi calculada a matriz de covariância e em seguida fez-se a multiplicação desta pela matriz diagonal, cujo resultado forneceu a matriz de correlação por pares. Dessa forma, obteve-se forte correlação entre todos os pares de variáveis, entretanto, os menores valores encontrados são referentes à correlação do variável número de trabalhadores em relação às demais variáveis. Os resultados dessa matriz de correlação são apresentados na Figura 3, na qual à esquerda é mostrado através

de conjunto de círculos para os quais as suas dimensões e tonalidades dizem respeito ao grau de relacionamento desses pares de variáveis, enquanto na matriz à direita são apresentados os respectivos valores numéricos e tonalidades para cada par.

Figura 3 – Matriz de correlação por pares de variáveis.



Fonte: Dados da pesquisa.

Pelo cálculo dos autovetores foram obtidas as raízes do polinômio característico para seis dimensões, das quais aproximadamente 95,6% de toda a sua variância pode ser representada por apenas duas dimensões, sendo assim a discussão dos resultados desta seção expressados em sua maior parte em relação a essas dimensões. Na Tabela 4 são mostrados os autovalores com as respectivas variâncias, sendo enumeradas as dimensões de acordo com a sua percentual contribuição na variância do conjunto.

Tabela 4 – Autovalores e suas variâncias para as dimensões principais.

Componentes da variância	Dimensões principais					
	1	2	3	4	5	6
Autovalores	4,974	0,763	0,204	0,055	0,004	0,000
Variância (%)	82,903	12,719	3,397	0,909	0,068	0,004
Variância acumulada (%)	82,903	95,622	99,019	99,928	99,996	100,000

As duas primeiras dimensões representam 95,62% da variância para o conjunto de componentes analisados.

Fonte: Dados da pesquisa.

Em relação à contribuição das amostras para as dimensões analisadas, conforme Tabela 6, obteve-se contribuição preponderante das amostras 1, 5 e 6, que representam aproximadamente 81% de toda a variância da Dimensão 1, enquanto as amostras 5 e 6 representam aproximadamente 92% da variância para a Dimensão 2.

Tabela 6 – Percentual de contribuição das amostras para as dimensões principais.

Amostra	Percentual de contribuição nas dimensões principais					
	1	2	3	4	5	6
1	20,82545801	0,22754019	0,7506322	5,7921687	39,08875139	20,3542806
2	0,008524085	2,13422714	13,4047922	3,9872521	31,28648551	25,5907349
3	3,927715111	1,58919031	0,6484016	40,3308792	7,00180216	1,2777776
4	2,21132707	0,26875202	5,5001207	21,5585424	0,89430599	5,8914507
5	20,80214517	52,86849792	8,684692	0,7699998	0,06509703	3,1226519
6	39,3144336	39,05820625	2,9186129	0,8454742	4,33022594	0,7576721
7	0,414655904	3,77308359	60,4523229	0,1315504	6,37909546	15,1497645
8	12,49574105	0,08050259	7,6404255	26,5841331	10,95423652	27,8556677

Amostras com maior percentual de contribuição na Dimensão 1.

Amostras com maior percentual de contribuição na Dimensão 2.

Fonte: Dados da pesquisa

Na Tabela 7 são mostradas as coordenadas das variáveis da produção de celulose e papel em relação às dimensões principais. Assim, obteve-se para todas as variáveis, orientação predominante para as duas dimensões principais, sobretudo para a Dimensão 1, fator que evidencia para as variáveis selecionadas que as suas variâncias são atribuídas majoritariamente a essa dimensão.

Tabela 7 – Disposições das coordenadas de cada variável para as dimensões principais.

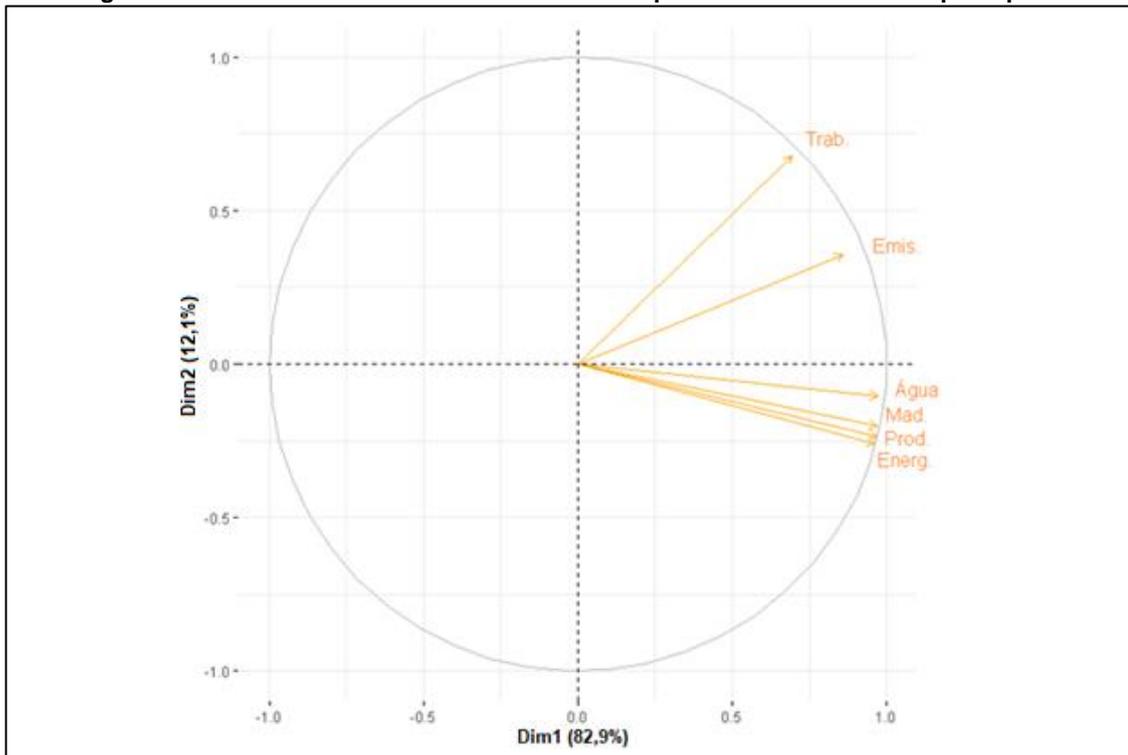
Variável	Coordenadas das dimensões principais					
	1	2	3	4	5	6
Número de trabalhadores	0,69431800	0,67907200	0,23747769	0,01818871	0,00753903	0,00061930
Consumo de madeira	0,97021020	-0,20287900	0,10422988	0,06454058	-0,04998787	-0,00203104
Consumo de água	0,97280260	-0,10280650	0,02225030	-0,20635889	-0,00238843	0,00103817
Emissões CO ₂ equivalente	0,85892950	0,35547440	-0,36794849	0,02107788	-0,00687660	-0,00063205
Consumo de energia	0,96291890	-0,25947160	0,00362355	0,07055276	0,01924116	0,01003152
Produção celulose e papel	0,96959790	-0,23733920	0,02567822	0,04069604	0,03400024	-0,00885526

As variáveis possuem orientação predominante para a Dimensão 1.

Fonte: Dados da pesquisa

Para as mesmas coordenadas referentes às Dimensões 1 e 2, é mostrada na Figura 5 a seguir, a sua representação gráfica, na qual observa-se que as coordenadas das variáveis possuem orientação predominante atribuída à Dimensão 1, que é justificada pela maior variância das variáveis selecionadas em relação às demais dimensões.

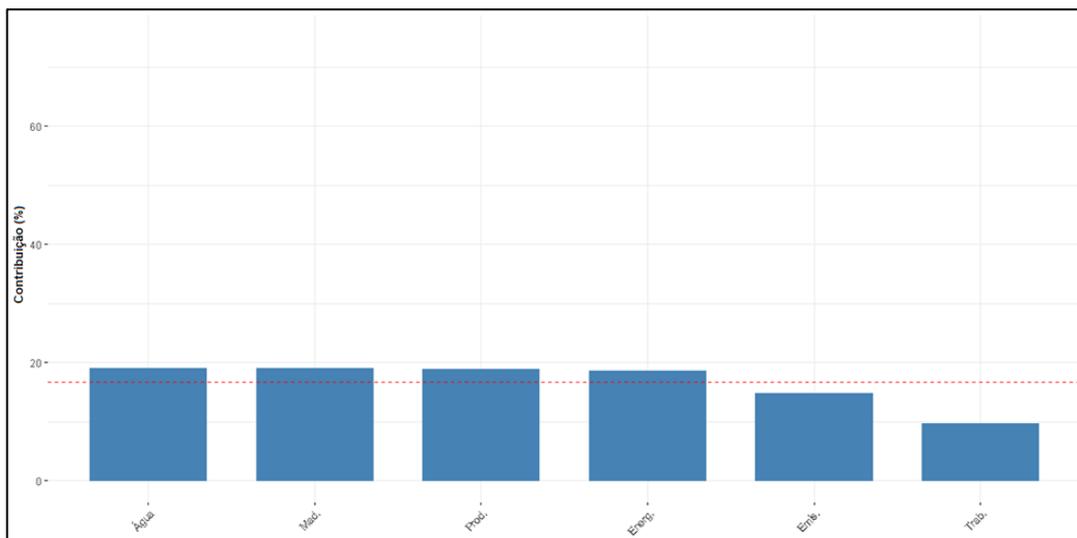
Figura 5 – Gráfico das coordenadas das variáveis para as duas dimensões principais.



Fonte: Dados da pesquisa

Quanto à contribuição de cada variável em relação às duas dimensões principais, pode-se identificar que os seus percentuais de contribuição para cada uma são de relevâncias distintas. Na Figura 6, é mostrada a contribuição de cada variável na Dimensão 1, para a qual pode ser identificado que os seus percentuais de contribuição possuem valores bastante próximos, com exceção da variável do número de trabalhadores que possui contribuição significativamente menor em relação às demais variáveis.

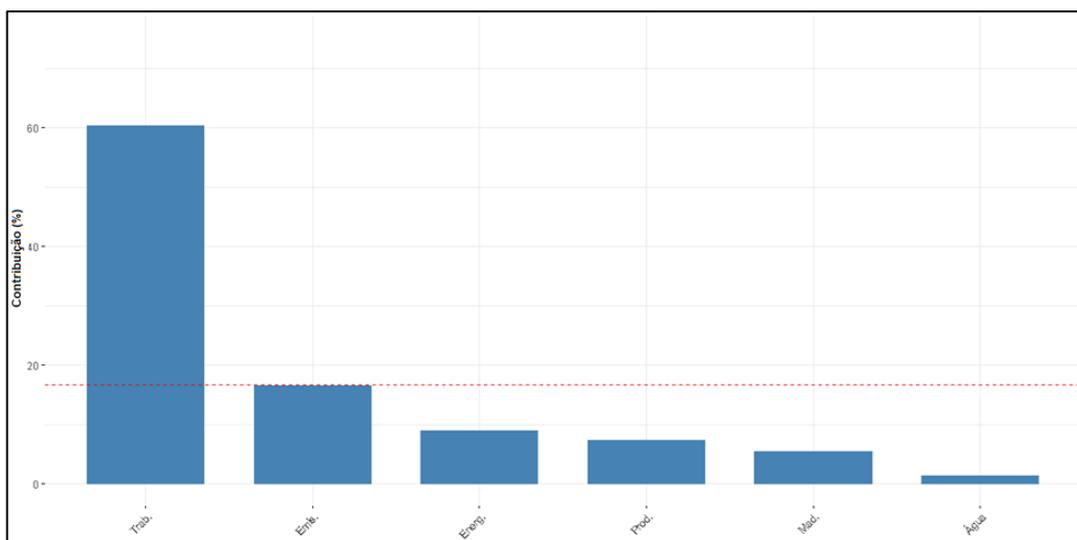
Figura 6 – Contribuição das variáveis na Dimensão 1.



Fonte: Dados da pesquisa

Para a Figura 7, por outro lado, observa-se que o percentual de contribuição na Dimensão 2 da variável do número de trabalhadores é superior à soma de todas as outras variáveis. Com exceção dessa e da variável de emissões de CO₂ equivalente, as demais apresentaram níveis de contribuição muito inferiores à distribuição média de contribuição de 16,67% por variável, conforme exibida pela linha pontilhada.

Figura 7 – Contribuição das variáveis na Dimensão 2.



Fonte: Dados da pesquisa

Esses resultados para as duas dimensões principais mostram significativa contribuição dessas variáveis, o que confirma a relevância da participação dos recursos ambientais, energia, emissões e demais variáveis selecionadas na análise do processo de produção de celulose e papel. Nesse sentido, nos trabalhos consultados como referencial teórico e que avaliaram a eficiência ambiental e a produtividade, observou-se sobretudo a utilização das variáveis de energia, emissões, trabalho e volume de produção, o que vêm de encontro aos achados dessa pesquisa, contudo, essa determinação através de um método analítico, é uma etapa por vezes não muito discutida.

CONCLUSÕES

Nesse estudo foram analisadas as indústrias integradas de celulose e papel do Brasil de forma a identificar as suas variáveis mais significativas, sendo aplicada para essa finalidade, a ACP como técnica de análise estatística multivariada.

Para isso, a partir do referencial teórico foram adotadas seis variáveis da produção de celulose e papel, das quais foram coletados os dados para oito indústrias integradas e feito o seu tratamento estatístico em que foi identificado que a amostra segue um modelo de distribuição normal. Contudo, pôde-se observar que as indústrias possuem capacidades distintas em relação à conversão das suas quantidades de entradas em saídas (volume de produção e emissões).

Com aplicação da técnica ACP, os resultados para variáveis das indústrias integradas, revelam que a redução do número de dimensões de seis para apenas duas, preservam elevado percentual da variância do conjunto, sendo 82,9% desta atribuído à Dimensão 1 e outros 12,7% para a Dimensão 2.

Em relação à contribuição das amostras, foi constatado que a 5 e 6 representam mais de 60% da variância para as duas dimensões principais, exercendo assim, maior influência sobre os resultados observados para as variáveis no estudo.

Para essas duas dimensões principais, obteve-se na seguinte ordem as variáveis com maior contribuição para o conjunto. Dimensão 1: o consumo de água, o consumo de madeira, a produção de celulose e papel, o consumo de energia, emissões de CO₂ equivalente e o número de trabalhadores, sendo para todas, exceto a última variável, identificados percentuais de contribuição próximos entre si. Dimensão 2: o número de trabalhadores, as emissões de CO₂ equivalente, a produção de celulose e papel, o consumo de madeira e o consumo de água, no

qual, observou-se, considerável disparidade entre os níveis de contribuição, sobretudo, para o as duas primeiras variáveis apresentadas em relação ao conjunto.

Dessa forma, pode-se concluir na seguinte ordem, que o consumo de água, consumo de madeira, volume de produção de celulose e papel e o consumo de energia são as variáveis que exercem maior influência em relação ao conjunto analisado, contudo, as variáveis de emissões de CO₂ equivalente e o número de trabalhadores também possuem relevante parcela de contribuição, o que revela que os recursos e efeitos ambientais que fizeram parte desse estudo são significativos e indissociáveis na compreensão do processo de produção de celulose e papel.

Com isso, os resultados com uso da técnica ACP para as variáveis selecionadas inicialmente pelo referencial teórico, revelam forte aderência entre as contribuições das variáveis para as duas dimensões principais com a literatura consultada, sendo possível concluir para o conjunto selecionado que todas as variáveis utilizadas possuem valores de variâncias significativos, sendo desse modo relevantes para o estudo da produção de celulose e papel e dos efeitos ambientais decorrentes das operações em indústrias integradas.

Logo, os níveis de significância obtidos para cada variável podem contribuir em pesquisas cuja abordagem se refira aos recursos e saídas envolvidas na produção de celulose e papel, como também auxiliar à tomada de decisão na implementação de medidas que visem a melhora da eficiência ambiental e produtividade nas indústrias do setor.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ABTCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. Mecanismos de incentivo à eficiência energética para economia de baixo carbono. **Guia Técnico - Eficiência energética na produção de celulose e papel**, 2011.

_____. **O Setor**. Disponível em < <https://www.abtcp.org.br/quem-somos/osetor/o-setor> >
Acessado em: 08 jun.2020.

ADLER, N.; GOLANY, B.; Evaluation of deregulated airline networks using data envelopment analysis combined with principal component analysis with an application to Western Europe. **European Journal of Operational Research**, v.132, p.260-273, 2001

Bajpai, P. Environmentally Friendly Production of Pulp and Paper. John Willey & Sons, BAJPAI, P. **Environmentally Friendly Production of Pulp and Paper**. John Willey & Sons, p. 8-44, 2010.

BLOMBERG, J.; HENRIKSSON, E.; LUNDMARK, R. Energy efficiency and policy in Swedish pulp and paper mills: a data envelopment analysis approach. **Energy Policy**, v. 43, p. 569-579, 2012.

BRACELPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. Oportunidade e Desafios da Indústria Brasileira de Celulose e Papel no Caminho da Sustentabilidade. **Confederação Nacional da Indústria**. Brasília, 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES – MCTIC & ONU MMEIO AMBIENTE. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706227/4ed_ESTIMATIVAS_ANUAIS_WE_B.pdf/a4376a93-c80e-4d9f-9ad2-1033649f9f93>. Acessado em: 29. out. 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO – MTE. Disponível em: <<http://www.mte.gov.br>>. Acessado em: 02. ago.2019.

BOYD, G.; MCCLELLAND, J. The Impact of Environmental Constraints on Productivity Improvement in Integrated Paper Plants. **Journal of Environmental Economics and Management**, p.121-142, 1999.

CALLENS, I.; TYTECA, D. towards Indicators of sustainable development for firms. A productivity efficiency perspective. **Ecological Economics**, v.28, p.41-53, 1999.

CHANG, Y.; ZHANG, N.; DANAQ, D.; ZHANG, N. Environmental efficiency analysis of transportation system in China: a non-radial DEA approach. **Energy Policy**, v.58, p. 277-283, 2013.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Celulose e Papel**, Série P+L, São Paulo, 2008.

COELLI, T. J.; RAO, D. S. P.; O'DONELL, C. J.; BATTESE, G. E. An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis. **Springer**, 2th edition, p. 1-9. 2005.

DA HORA, A. **Panorama Setorial**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Rio de Janeiro, p.80-91. 2017.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2017**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2017>>. Acessado em: 18 out. 2019.

FALAVIGNA, G.; MANELLO, A.; PAVONE, S. Environmental efficiency, productivity and public funds: The case of the Italian agricultural industry. **Agricultural Systems**, v. 121, p. 73-80, 2013.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Yearbook 2018 - **Forest Products - 2014-2018**. Rome, 2020.

FIEP. Panorama setorial: **indústria de celulose, papel, embalagens e artefatos de papel: Paraná 2016** / Federação das Indústrias do Estado do Paraná e Sindicato das Indústrias de Papel, Celulose e Pasta de Madeira para Papel, Papelão e de Artefatos de Papel e Papelão do Estado do Paraná. Curitiba: FIEP, 2016. Disponível em < [http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/papel_digital\[75083\].pdf](http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/papel_digital[75083].pdf)> Acessado em: 27 jun.2019.

HAILU, A.; VEEMAN, T. Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: an application to the Canadian pulp and paper industry. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 83, n°3, p.605-616, 2001.

HENRIQUES JR., M. F. **Potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa pelo uso de energia no setor industrial brasileiro**. 2010. 309 f. Tese (Doutorado em Ciências de Planejamento Energético) – Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

IBA – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2017**. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/pdf/iba-relatorioanual2017.pdf>>. Acessado em: 21 mai. 2018.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Clean Energy Progress. 2017**, OECD/IEA, Paris. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf>>. Acessado em 29 out. 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acessado em: 18 ago. 2019.

KANG, D.; LEE, D. Energy and environment efficiency of industry and its productivity effect. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p.184–193, 2016.

MAZZANTI, M.; ZOBOLI, R. Environmental efficiency and labour Productivity: trade-off or joint dynamics? A theoretical investigation and empirical evidence from Italy using NAMEA. **Ecological Economics**, v.68, n.4, p. 1182-1194, 2009.

NATARAJA, N.; JOHNSON, A. Guidelines for Using Variable Selection Techniques in Data Envelopment Analysis. **European Journal of Operational Research**, v.215, p.662-669, 2011.

NEVES, G.; DE QUEIROZ.; ADRIANE. OLIVEIRA, W.A. Uma Revisão Sistemática de Literatura: Eficiência Ambiental e Produtividade nas Indústrias. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v.1, p.888-904, fev. 2020.

PORTER, M.; LINDE, C. Green and competitive: ending the stalemate. *Harvard Business Review*, v.73, n.5, 1995.

RSTUDIO TEAM. **Software Rstudio**. Versão 1.2.5001. Disponível em: <<http://www.rstudio.com>>. Recuperado em 27 de set. 2019. [software]

SENRA, L.; NANCI, L.; MELLO, J.; MEZA, L. Estudo sobre Métodos de Seleção de Variáveis em DEA. **Pesquisa Operacional**, v.27, n.2, p.191-207, Mai./Ago. 2007.

SPEROTTO, Fernanda Queiroz. Celulose de mercado. **FEE Setorial**, Porto Alegre, n. 1, nov. 2016.

THOMPSON, G.; SWAIN, J.; Kay, M.; FOSTER, C.F. The Treatment of Pulp and Paper Mill Effluent: A Review. **Biosource Technology**, v.77, n.3, p.275-286, 2001.

UNITED NATIONS. Conference of the parties. **Framework Convention on Climate Change**. Paris, 2015.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA Office of Compliance Sector Notebook Project: Profile of the Pulp and Paper Industry. **United States Environmental Protection Agency Office of Enforcement and Compliance Assurance**. Washington, DC, USA.1995.

XIE, B.; SHANG, L.; YANG, S.; YI, B. Dynamic environmental efficiency evaluation of electric power industries: evidence from OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) and BRIC (Brazil, Russia, India and China) countries. **Energy**, v. 4, p.147-157, 2014.

YU, C.; SHI, L.; WANG, Y.; CHANG, Y.; CHENG, B. The Eco-Efficiency of Pulp and Paper Industry in China: An Assessment Based on Slacks-Based Measure and Malmquist–Luenberger Index. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p.511-521, 2016.

ZHU, J. Data envelopment analysis vs. principal component analysis: An illustrative study of economic performance of Chinese cities. **European Journal of Operational Research**, v.111, p.50-61, 1998.

**ARTIGO 3 – ANÁLISE SOBRE A EFICIÊNCIA PRODUTIVA E
AMBIENTAL DE INDÚSTRIAS BRASILEIRAS DE CELULOSE E
PAPEL**

O presente trabalho apresenta os resultados que constituem o fechamento da pesquisa, e que ainda serão submetidos para publicação em um periódico de divulgação científica.

ANÁLISE SOBRE A EFICIÊNCIA PRODUTIVA E AMBIENTAL DE INDÚSTRIAS BRASILEIRAS DE CELULOSE E PAPEL

RESUMO

O setor de celulose e papel é um dos principais segmentos industriais com significativa participação na balança comercial do Brasil. Do processo de produção nas unidades industriais, atenta-se à elevada quantidade de recursos naturais envolvidos, consumo de energia e emissões geradas. A eficiência na sua utilização, contudo, é essencial para a sua competitividade e desenvolvimento sustentável. Para avaliar tais aspectos no setor, essa pesquisa teve como objetivo mensurar a eficiência produtiva e ambiental por meio de uma análise comparativa, para a qual foi selecionado um conjunto de indústrias integradas de celulose e papel em operação no Brasil. Para tanto, foi selecionada a técnica de Análise Envoltória de Dados (DEA) em dois estágios, de modo a estabelecer para um conjunto de variáveis de produção um *ranking* de referência quanto aos valores de eficiência produtiva dessas indústrias. Para outro conjunto de variáveis de eficiência ambiental, que inclui os recursos ambientais, energia e emissões dos seus processos de produção, foi identificado como essas influenciam na sua produtividade. Os resultados mostram a predominância de indústrias com elevado nível de eficiência produtiva, sendo identificado o consumo de energia como a variável de influência preponderante da eficiência ambiental sobre a produtividade dessas indústrias.

Palavras-chave: Celulose e Papel, Indústria, Eficiência Ambiental, Produtividade, Análise Envoltória de Dados.

ANALYSIS ON THE PRODUCTIVITY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF BRAZILIAN PULP AND PAPER INDUSTRIES

ABSTRACT

The pulp and paper sector is one of the main segments of the industry and has a significant share in Brazil's trade balance. From the production process in industrial units, it must be considered the large amount of environmental resources involved, energy consumption and emissions generated. The efficiency in their use, however are essential for their competitiveness and sustainable development. In order to evaluate such aspects in the sector, this study aims to measure the productivity and environmental efficiency through a comparative analysis, for which it was selected a set of integrated pulp and paper industries existing in Brazil. For that, it was employed the two-stage Data Envelopment Analysis (DEA) technique to establish for a set of variables of production a reference ranking regarding the productive efficiency of these industries. For another set of environmental efficiency variables which includes environmental resources, energy and emissions from their production process, it was identified how they influence their productivity. The results show the predominance of industries with a high level of productive efficiency, where it was identified the energy consumption as the variable with major influence of environmental efficiency on the productivity of these industries.

Keywords: Pulp and Paper, Industry, Environmental Efficiency, Productivity, Data Envelopment Analysis.

1. INTRODUÇÃO

O setor de celulose e papel é responsável por significativa participação na economia, contribuindo para o desenvolvimento das regiões em que possuem unidades instaladas. De acordo com o Departamento de Pesquisa em Engenharia e Educação Continuada (DEPEC/BRADESCO, 2019), existiam até o ano de 2016, 71 unidades para a produção de celulose e outras 295 para a produção de papel, das quais a maior parte concentra-se próximo dos maiores mercados consumidores nas regiões sul e sudeste. A produção de ambos os produtos em uma mesma planta através de um processo integrado também é presente em parte das unidades indústrias.

O Relatório da Indústria Brasileira de Árvores publicado (IBÁ) publicado em 2017 mostra que as atividades do setor geraram R\$ 71,1 bilhões, representado 6,2% do Produto Interno Bruto industrial e 0,9% da arrecadação tributária, números que são resultantes sobretudo do volume produzido celulose e papel no país, que obteve em 2016 a segunda e oitava colocação mundial respectivamente.

Dentre os fatores que influenciam positivamente na produção nacional de celulose e papel, sobretudo destacam-se as condições climáticas e o solo brasileiro para que as indústrias mantenham preços competitivos (DORES *et al.*, 2006), (DA HORA, 2017). Segundo Ojala *et al.* (2013) e Rossato *et al.* (2018) ressalta-se também a importância que a produtividade das florestas plantadas no fornecimento de matéria-prima às indústrias possui para a sua competitividade.

Do processo de fabricação de celulose e papel, é evidenciado na literatura o intensivo uso de recursos naturais e as saídas indesejáveis geradas além dos seus produtos finais, o que revela necessidade de melhora em seu aproveitamento, face do crescimento de sua demanda. De acordo com a Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP, 2016), projeta-se crescimento de 1,1% no consumo mundial de fibras para produção de papel até o ano de 2030, sobretudo pelo aumento do poder aquisitivo em regiões em desenvolvimento, permitindo maior acesso a bens de consumo e higiene.

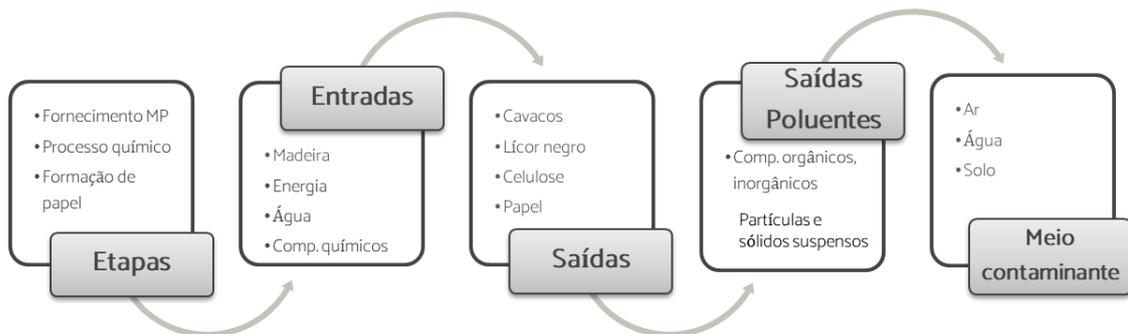
Em relação ao consumo de alguns dos principais recursos envolvidos em seu processo, o consumo de madeira, por exemplo, segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2008) pode chegar a aproximadamente 4 toneladas para a produção de uma tonelada de celulose. O consumo de energia, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2018), pode ter o seu consumo em forma de eletricidade por tonelada seca ao

ar superior a 1300 KWh e de 14 GJ de forma de vapor em unidades integradas de celulose e papel. Já o consumo específico de água pode alcançar 60m³ por tonelada produzida, a depender do tipo de papel (THOMPSON, 2001).

Com relação às saídas indesejáveis da sua produção, como as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), essas estão associadas principalmente com a queima de combustíveis fósseis e da geração de vapor e eletricidade por fontes externas para alimentação das unidades (KRAMER et al. 2009) e também a algumas etapas da sua produção, como na recuperação química no processo *kraft* de celulose (TRAN e VAKILLAINEN, 2016), que é o processo químico de produção de celulose mais utilizado mundialmente, devido à resistência conferida à celulose, eficiência na recuperação dos produtos químicos e obtenção de subprodutos que são utilizados por outras indústrias (FRACARO, 2012).

Na Figura 1 são mostradas as entradas, saídas intermediárias, saídas finais, emissões geradas e os meios contaminantes selecionados de um processo químico de produção de celulose e papel.

Figura 1 – Diagrama de fluxo com as entradas e saídas selecionadas da produção de celulose e papel.



Fonte: O Autor (2020)

Ações coordenadas em nível global têm sido promovidas para redução das emissões de GEE, como o acordo de Paris (2015) que objetiva fortalecer a responsabilidade global sobre as mudanças climáticas, estabelecer níveis de emissões e estratégias para limitar o aquecimento global. Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2017), embora seja identificada a redução do consumo de energia e emissões de CO₂ pelo setor, o aumento da demanda pelos seus produtos revela que esses resultados ainda são insuficientes para evitar que as mudanças climáticas não se tornem ainda mais críticas.

Esses fatores mostram a importância da compreensão do uso dos recursos e saídas produzidas, de modo a subsidiar medidas que possibilitem maior eficiência. Nesse sentido

Sanches *et al.* (2017) elucidam que as ações sustentáveis nas empresas requerem mecanismos de mensuração que permitam a compreensão dos benefícios obtidos.

Para expressar a relação entre os impactos ambientais e a produção de um produto, serviço ou resultado econômico utiliza-se o conceito de eficiência ambiental, contudo sua interpretação varia da aplicação de cada estudo, podendo representar, por exemplo, o conjunto de emissões por valor agregado (MAZZANTI e ZOBOLI, 2009) ou o consumo de energia e os respectivos efeitos ambientais (XIE *et al.*, 2014).

Definições, como a ecoeficiência também são utilizadas com o mesmo sentido, sendo explicada como a mensuração dos efeitos ecológicos resultantes da produção (MUNISAMY e ARABI, 2014), ou, por exemplo, para evidenciar a relação entre impacto ambiental e crescimento econômico (YU *et al.*, 2016).

Segundo Porter e Linde (1995), para as indústrias, identifica-se uma relação predominantemente positiva entre a redução desses impactos e a produtividade, relação também identificada por Mazzanti e Zoboli (2009), Falavigna *et al.* (2013), Kang e Lee (2016). Com isso, a abordagem de mensuração da eficiência no uso dos recursos naturais pode auxiliar na identificação de oportunidades para o seu melhor aproveitamento e redução de saídas indesejáveis.

De acordo com a Revisão Sistemática de Literatura apresentada na primeira etapa dessa pesquisa (NEVES *et al.*, 2020)⁵, a utilização da Análise Envoltória de Dados (DEA) apresenta elevada aceitação como metodologia dentre as publicações consultadas para mensurar a produtividade e a eficiência ambiental nas indústrias em setores com características similares. Tal resultado mostrou a relevância da DEA na compreensão desses dois fatores e também dos seus determinantes nos setores industriais abrangidos.

Fundamentada na programação linear essa metodologia permite simultaneamente a comparação entre empresas, serviços e outras unidades produtivas para obtenção da maior eficiência possível diante dos recursos disponíveis, que submetida às restrições especificadas (SARAFIDIS, 2002), estabelece um *benchmark* de eficiência dessas entidades (COOPER *et al.*, 2011), (MANELLO *et al.*, 2013), (KANG e LEE, 2016).

A DEA possui suas raízes no artigo seminal de Farrell (1957), que tinha o objetivo de desenvolver métodos para mensuração de eficiência melhores do que os existentes na época, o qual apresentou um modelo capaz de combinar múltiplas entradas e saídas, sem possuir

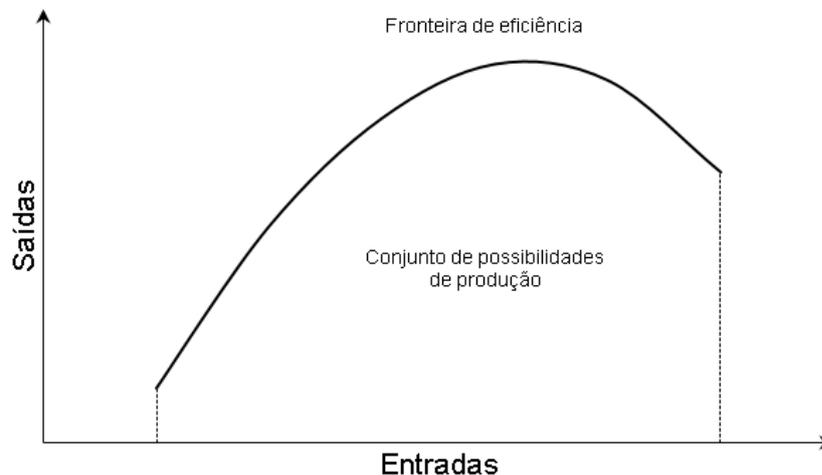
⁵ Publicação resultante da primeira etapa deste trabalho de pesquisa, apresentado no Artigo 1.

restrições quanto à segmentação de seu uso, sendo aplicável a qualquer organização produtiva (COOPER *et al.*, 2011).

Logo, essa metodologia busca fornecer para cada unidade produtiva em análise, a máxima relação entre as entradas e saídas produzidas em função da multiplicação dos seus pesos ponderados. Embora não esteja limitada a apenas um padrão, a forma mais usual em eficiência relativa é a sua variação entre 0 e 1, sendo a última a máxima eficiência possível para as Unidades de Tomada de Decisão (DMU) (CHARNES *et al.*, 1978).

De acordo com Liu *et al.* (2016), uma das principais características da DEA reside na sua flexibilidade de utilizar múltiplas entradas e saídas para compor uma medida de eficiência, sem a imposição do uso de informações de preços e custos para o seu cálculo. Um dos aspectos mais importantes da DEA é a contribuição que as informações que o *benchmark* composto pelo conjunto de DMUs pode fornecer para a melhora de desempenho de cada DMU (ZHU, 1998). Desse modo, os valores de eficiência para cada DMU compõe um conjunto de possibilidades de produção que formam um fronteira de eficiência relativa (BANKER *et al.* 1984), conforme Figura 2.

Figura 2 – Fronteira de eficiência e o conjunto de possibilidades de produção.



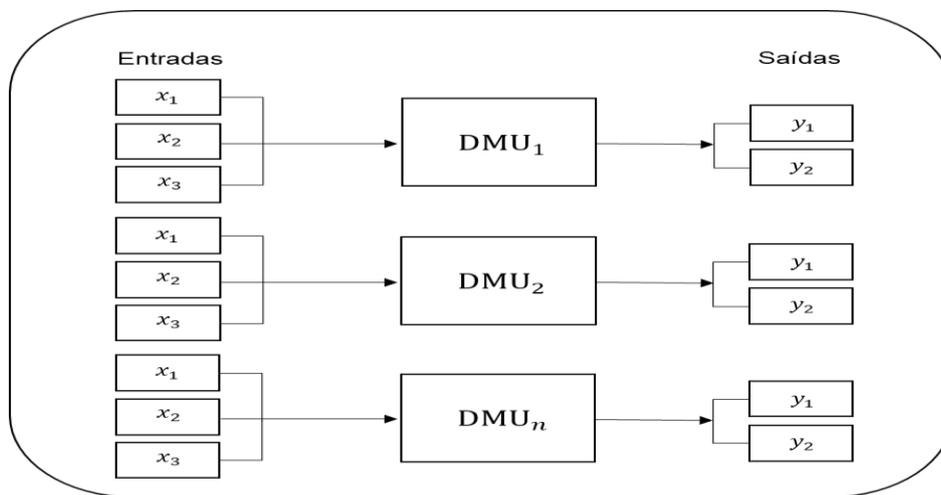
Fonte: Adaptado de Banker *et al.* (1984)

Para isso, é realizada a comparação de desempenho das DMUs as quais devem possuir características similares para uma comparação fidedigna (CALLENIS e TYTECA, 1999), como um grupo empresarial, um setor produtivo, de serviço, público, podendo ou não ter fins lucrativos (MARIANO *et al.*, 2006). Logo, a DEA pode ser utilizada, por exemplo, na avaliação do gerenciamento estratégico para melhorar a eficiência das DMUs que não estão

localizadas sobre a fronteira (ADLER e GOLANY,2001) ou como ferramenta de gestão nas organizações no auxílio à identificação de variáveis com desempenho insatisfatório (SARAFIDIS, 2002).

O conjunto de entradas de uma DMU e as suas saídas pode ser interpretado como entradas e saídas virtuais, cuja razão fornece uma medida de eficiência que é função dos multiplicadores (COOPER *et al.*, 2011). A sua representação para uma série de DMUs, tendo para o seu j -ésimo elemento, $j = 1, \dots, n$ é mostrada na Figura 3.

Figura 3 – Conjunto de entradas e saídas processadas por uma DMU_j .



Fonte: O Autor (2020)

2. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA

2.1. Procedimento de Levantamento de Coleta de Dados

Segundo o MCTIC (2017), a desagregação setorial é importante para a análise de consumo de energia, emissões e identificação da efetividade das ações tomadas para redução de intensidade de carbono gerado pelos processos dessas unidades.

As unidades de produção de celulose e papel podem ter operações separadas ou integradas. As unidades integradas são aquelas em que a celulose e o papel são produzidos na mesma unidade industrial. Nessas, a celulose produzida é utilizada para a produção de papel na mesma unidade. As unidades não integradas por outro lado, requerem que a celulose seja fornecida de uma fonte externa para a produção do papel.

Como vantagem, as unidades integradas utilizam os sistemas auxiliares em comum para

ambas as operações de celulose e papel, tais como vapor, geração de energia e tratamento de efluentes além de ter os custos reduzidos com transporte. As unidades não integradas em contrapartida, requerem menos espaço, energia e água do que as integradas (BAJPAI, 2012).

Considerando a importância que essa desagregação setorial pode promover para a análise de produtividade e eficiência ambiental, somada a reduzida quantidade de estudos sobre essa temática, em especial para as unidades que produzem papel e também celulose, foram selecionadas para a pesquisa as indústrias integradas de celulose e papel do Brasil.

Para o levantamento de coleta de dados dessas indústrias, foram utilizadas como fontes de pesquisa: relatórios de sustentabilidade, plano de manejo e do investidor que são disponibilizados publicamente pelas empresas de celulose e papel, além de revistas técnicas, trabalhos científicos, relatórios de instituições e associações do setor, dados de relatórios e planilhas disponibilizadas em sites oficiais do Governo Federal, como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), MME e o Ministério do Trabalho e Emprego (TEM).

Com isso, foi identificado partir do ano de 2014 para os relatórios de sustentabilidade, que é uma das principais fontes de coleta de dados, a padronização na apresentação das suas informações conforme diretrizes do *Global Reporting Initiative* (GRI), sendo observada para o ano de 2016 a maior quantidade de DMUs cujos dados seguem essa homogeneização e, portanto, selecionado também para coleta nas demais fontes consultadas.

2.2. Seleção das DMUs

Foram identificadas 21 indústrias integradas de celulose e papel em operação no Brasil. Devido a reduzida quantidade de indústrias pertencentes a esse subsegmento, foram selecionadas as unidades para as quais foi possível obter dados sobre a sua produção, uso de recursos naturais, energia e emissões para o ano de 2016, obtendo-se no total 8 DMUs, caracterizando assim, a amostra como não probabilística por conveniência.

2.3. Seleção das Variáveis

Quanto à classificação das variáveis em DEA, Coelli *et al.* (2005) sugerem a segregação das entradas em cinco tipos: trabalho, capital, energia, materiais e serviços adquiridos, sendo

os quatro primeiros identificados com maior frequência, e, as saídas, segundo os autores representam as quantidades produzidas, sendo também identificadas com frequência na pesquisa, as emissões geradas.

Essa segregação das entradas e saídas pode ser observada no Quadro 1, no qual foi realizado um levantamento das produções científicas específicas do setor de celulose e papel, cujas variáveis foram aplicadas na metodologia DEA.

Quadro 1 –Setor de celulose e papel com uso da DEA: estado da arte.

Autor	Artigo	Entradas	Saídas	Abordagem Metodológica
Boyd e McClelland (1999)	The Impact of Environmental Constraints on Productivity Improvement in Integrated Paper Plants	Capital, trabalho, materiais, combustíveis fósseis e eletricidade.	Produção, emissões de poluentes na atmosfera e na água.	Função Distância Análise Envoltória de Dados Análise Hiperbólica de Produção e Performance Ambiental.
Callens e Tyteca (1999)	Towards Indicators of Sustainable Development for Firms. A Productivity Efficiency Perspective.	Emissões de poluentes no ar e na água.	–	Análise Envoltória de Dados
		Trabalho, combustíveis fósseis, capital, emissões de poluentes na atmosfera.	Produção de kWh.	
		Produção de celulose.	Trabalho, combustíveis fósseis, fibra, água e poluentes particulados.	
		Taxa de desvio de resíduos.	Diferencial de custo de recuperação.	
Haiu e Veeman (2001)	Non-Parametric Productivity Analysis with Undesirable Outputs: An Application to the Canadian Pulp and Paper Industry	Energia, capital, trabalho e materiais.	Produção, demanda bioquímica de oxigênio, total de sólidos suspensos.	Análise Envoltória de Dados
Qinmin <i>et al.</i> (2011)	A Study on DEA of Resource Efficiencies of Forestry-Paper Firms in China	Coeficiente de entrada de equipamentos.	Margem de lucro bruto de vendas.	Análise Envoltória de Dados
		Coeficiente de inventário	Taxa de retorno sobre os recursos tangíveis.	
		Coeficiente de matéria-prima	Taxa de retorno sobre a proteção ambiental na entrada.	
		Taxa de equipamentos de proteção ambiental.	–	
		Coeficiente de entrada de capital.	Taxa de retorno sobre o capital de entrada.	
		Coeficiente de entrada no mercado.	Taxa de ativos intangíveis.	
		Coeficiente de gerenciamento.	Taxa de inovação tecnológica.	
		Coeficiente de influência do ambiente.	–	
		Capital de recursos humanos.	Toda a produtividade do trabalho.	

Continua...

Autor	Artigo	Entradas	Saídas	Abordagem Metodológica
Qinmin <i>et al.</i> (2011)	A Study on DEA of Resource Efficiencies of Forestry-Paper Firms in China	Média salarial.	Taxa de retorno sobre o investimento em recursos humanos.	Análise Envoltória de Dados
		Média de verba para educação.	Taxa de retorno de gerentes seniores.	
		Relação de salários de gerentes seniores	–	
		Coefficiente tangível de entrada	Margem de lucro bruto de vendas.	
		Coefficiente intangível de entrada.	Retorno sobre o total de ativos.	
		Coefficiente de entrada de pessoal.	Valor líquido dos ativos.	
		Coefficiente de proteção ambiental de entrada.	–	
Blomberg <i>et al.</i> (2012)	Energy Efficiency and Policy in Swedish Pulp and Paper Mills: A Data Envelopment Analysis Approach	Trabalho, eletricidade e petróleo.	Produção	Análise Envoltória de Dados
Cheng <i>et al.</i> (2016)	The eco-efficiency of pulp and paper industry in China: an assessment based on slacks-based measure and Malmquist-Luenberger index	Água	Valor da produção industrial, efluentes, demanda química de oxigênio, emissões totais de nitrogênio amoniacal.	Análise Envoltória de Dados Medida Baseada em Folgas Índice de Malmquist-Luenberger

Fonte: O Autor (2020)

Para a análise de eficiência ambiental e produtividade das indústrias do setor, foram utilizadas as variáveis cuja classificação incorpora os recursos utilizados no processo de produção de celulose e papel e suas saídas indesejáveis. Uma das etapas principais da pesquisa em DEA consiste na determinação das entradas e saídas que são significativas para a análise da eficiência relativa de um conjunto de DMUs (GOLANY e ROLL, 1989). Embora a seleção tenha sido inicialmente realizada com base na literatura, Nataraja e Johnson (2011), sugerem também a determinação das variáveis por meio de métodos estatísticos.

Seguida a classificação proposta por Coelli *et al.* (2005), foram coletados os dados das seguintes variáveis para as oito DMUs selecionadas: número de trabalhadores, consumo de madeira (m³), consumo de água (m³), consumo de energia (MWh), produção de celulose e papel (t) e emissões (tCO₂e). A partir dessas variáveis, conforme apresentado na segunda etapa dessa pesquisa, foi empregado o método estatístico de Análise de Componentes Principais (ACP), para determinação das variáveis mais relevantes na produção de celulose e papel, considerando os efeitos ambientais envolvidos, em que foi constatado que todas as variáveis selecionadas para o estudo possuem impacto significativo no processo de produção dessas indústrias, motivo pelo qual foram adotadas para a presente pesquisa.

2.4. Seleção do Modelo DEA

A metodologia da DEA possui uma grande variedade de modelos, muitos desenvolvidos a partir dos modelos clássicos de Charnes *et al.* (1978) e Banker *et al.* (1984). Nesse estudo, será utilizado o modelo BCC proposto por Banker *et al.* (1984) que fornece uma medida de eficiência técnica das DMUs, cujo retorno variável de escala busca àquela mais produtiva para cada DMU (GOLLANY e ROLL, 1989).

Com isso, a eficiência técnica compara cada DMU apenas com outras de escalas semelhantes, o que contribui para a formação de um *ranking* de eficiência mais realístico para o conjunto, uma vez que considera as distintas escalas em que cada DMU opera (MARIANO *et al.*, 2006).

Para o modelo BCC, de acordo com Cooper *et al.* (2011), um dado conjunto de n DMUs com DMU_j , $j = 1, 2, \dots, n$, produz as mesmas s saídas com quantidades y_{rj} ($r = 1, 2, \dots, s$), sendo utilizadas as mesmas m entradas com quantidades x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$) do qual obtemos a eficiência para uma DMU_o do problema primal (envoltória) em que temos função objetivo (1) submetidas às restrições (2),(3) e (4) conforme mostrado a seguir :

$$\text{Min } \theta_o - \varepsilon \left(\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\theta_o x_{io} = \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + s_i^- \quad (2)$$

$$y_{ro} = \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - s_r^+ \quad (3)$$

$$1 = \sum_{j=1}^n \lambda_j \quad (4)$$

$$0 \leq \lambda_j, s_i^-, s_r^+ \quad \forall i, r, j$$

Para cada problema de programação linear, é obtido um outro problema denominado problema dual, sendo a relação entre esses dois estabelecida a partir das seguintes propriedades:

1. Mudança da orientação da função objetivo voltada para minimização no primal para maximização no dual;
2. Vetor de recursos no primal torna-se gradiente do objetivo no dual;
3. Gradiente de objetivo no primal torna-se vetor de recursos no dual;

4. Número de restrições no primal corresponde ao número de variáveis no dual;
5. Número de variáveis no dual corresponde ao número de restrições no dual.

Dessa forma, é obtida a formulação do problema dual (multiplicador) para o modelo DEA-BCC, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Modelo DEA-BCC na forma de multiplicadores com orientação para saída.

<p>Parâmetros</p> <ul style="list-style-type: none"> • m: número de tipos de entradas; • s: número de tipos de saídas; • x_{ij}: quantidade da entrada i para a DMU_j; • y_{rj}: quantidade da saída r para a DMU_j; • x_{io}: quantidade da entrada i para a DMU_o em análise; • y_{ro}: quantidade da saída r para a DMU_o em análise; • z : <i>scores</i> de eficiência 	$\max z = \sum_{r=1}^s u_r y_{ro} + \mu_o \quad (5)$ <p>Sujeito a:</p> $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + \mu_o \leq 0 \quad (6)$ $\sum_{i=1}^m v_i x_{io} = 1 \quad (7)$ $u_r, v_i \geq 0, \mu_o \text{ irrestrita}$	
<p>Variáveis:</p> <ul style="list-style-type: none"> • v_i: pesos variáveis para a entrada i; • u_r: pesos variáveis para a saída r. • μ_o: coeficiente de retorno de escala. 		

Fonte: Adaptado de Banker *et al.* (1984), p.1085.

Para uso da DEA, é importante que a relação entre as quantidades de DMUs, entradas e de saídas estejam conforme determinadas condições para evitar problemas no seu uso. Tais condições podem ocorrer, segundo Coelli *et al.* (2005) e Senra *et al.* (2007), quando é utilizada uma reduzida amostra de DMUs com várias entradas e saídas, condição que influi inadequadamente no aumento de DMUs eficientes.

Por outro lado, a utilização de uma grande quantidade de DMUs, possibilita uma identificação mais precisa das relações entre e entradas e saídas, além de aumentar a probabilidade na identificação de DMUs que sejam eficientes para a formação da fronteira de eficiência (GOLANY e ROLL, 1989). Essa discrepância nos resultados em metodologias orientadas ocorre em razão do número de graus de liberdade, e, que na DEA ocorre devido a

sua orientação à eficiência relativa. Dessa forma, o número de graus de liberdade aumenta com a quantidade de DMUs e decresce com o número de entradas e saídas (COOPER *et al.* 2011).

As pesquisas acerca da disposição das quantidades para estabelecer a mínima que valide a utilização na DEA, mostram que não há uma única regra definida ou consenso na literatura, contudo, Golany e Roll (1989) *apud* Bowlin (1987) e Ali *et al.* (1988) e também Kao e Yang (1992) *apud* Thomas *et al.* (1986), sugerem que o número total de DMUs deve ser no mínimo duas vezes o de entradas e saídas utilizadas no modelo.

Seguindo essas referências, foi adotada a seguinte disposição para as variáveis do modelo DEA-BCC: entradas fixadas para as variáveis “número de trabalhadores” e “consumo de madeira” (m³) e como saída, a “quantidade produzida de celulose e papel” (t), conforme mostrado no Quadro 3:

Quadro 3 – Disposição das variáveis e orientação do modelo DEA-BCC

Nome	Variáveis de Entrada	Variável de Saída	Orientação
Modelo DEA-BCC	Número de Trabalhadores	Produção de Celulose e Papel (t)	Saída
	Consumo de Madeira (m ³)		

Fonte: O Autor (2020)

Para a implementação do modelo com as DMUs e variáveis selecionadas nas orientações definidas, foi utilizado o *software* MaxDEA v.8.3.

2.5. Método da Fronteira Invertida

Pelo *benchmark* formado a partir da DEA, pode-se obter mais de uma DMU eficiente. A literatura revela o uso de alguns métodos de desempate para as que possuem escore de eficiência igual a 1, como o método de fronteira invertida proposto por Leta *et al.* (2005) *apud* Meza *et al.* (2003) que utiliza a troca entre as variáveis de entrada com as de saída do modelo original da DEA, sendo mantida a sua orientação, obtendo-se assim os escores que formam uma fronteira ineficiente.

Dessa forma, a discriminação entre as DMUs eficientes é obtida através da média aritmética entre a eficiência em relação ao modelo original e de ineficiência em relação à fronteira invertida, cujo resultado fornece um índice composto de eficiência para cada DMU. A sua normalização é efetuada com a divisão de todos os valores pelo maior índice calculado,

conforme Equação (8), onde: z_j é a eficiência para a DMU_j; $z_j^{\text{invertida}}$ é a eficiência invertida para a DMU_j; IC_j é o índice composto de eficiência normalizado para a DMU_j.

$$IC_j = \frac{[z_j + (1 - z_j^{\text{invertida}})]/2}{\{\max [z_j + (1 - z_j^{\text{invertida}})]/2\}} \quad (8)$$

2.6. Análise Estatística Multivariada Pós Eficiência

A análise dos fatores que contribuem para os diferentes escores de eficiência se tornou um importante campo de pesquisa em DEA (COOPER *et al.* 2011). De acordo com Banker (1993), Coelli *et al.* (2005), Simar e Wilson (2007) esta análise é conhecida como o segundo estágio da DEA e consiste no tratamento estatístico da variação dos escores da eficiência relativa com o uso de variáveis exógenas às calculadas pelo modelo, de modo a explicar os fatores que podem afetar a sua eficiência.

Para isso, adotou-se nessa pesquisa o modelo de regressão linear em que a determinação da sua equação fornece uma relação causa-efeito, no qual as variáveis exógenas ao modelo DEA (denominadas variáveis independentes) explicam as variações dos escores de eficiência das DMUs, (denominadas variáveis dependentes). Como os resultados podem gerar escores de eficiência maiores do que 1 (COELLI *et al.* 2005), será utilizado o modelo de regressão linear truncada com intervalo entre 0 e 1.

Em razão da adoção do índice composto para discriminação dos escores eficiência das DMUs, esse também será aplicado no modelo de regressão proposto como variável dependente truncada. Na Equação (9) a seguir, é mostrada a notação do modelo de regressão, onde Y_i é o índice composto de eficiência normalizado (variável dependente), α é o Intercepto de Y , β_k são os Coeficientes das variáveis exógenas (variáveis independentes), X_k são as variáveis exógenas (variáveis independentes), i é número de variáveis dependentes, k é o número de variáveis independentes e ε o erro aleatório.

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (9)$$

Por meio dos coeficientes da equação de regressão e de sua probabilidade de significância foi possível analisar a influência de cada variável independente que compõe o

modelo de regressão sobre o índice composto de eficiência, cuja relação visa fornecer a eficiência ambiental nessa pesquisa.

Para o modelo de regressão linear truncada selecionou-se as seguintes variáveis obtidas pelo método ACP para representar os impactos ambientais decorrentes do consumo de recursos e saídas indesejáveis geradas, que são: o consumo de energia (MWh) e as emissões (tCO_{2e}). Em uma análise preliminar também foi incluída a variável de consumo de água (m³), porém não foi observada uma dependência linear significativa em relação aos escores eficiência do modelo DEA-BCC, sendo, portanto, descartado o seu uso no modelo.

No Quadro 4 a seguir são mostrados os dois estágios DEA e as variáveis que compõem o modelo de regressão linear truncada.

Quadro 4 – Variáveis do modelo de regressão.

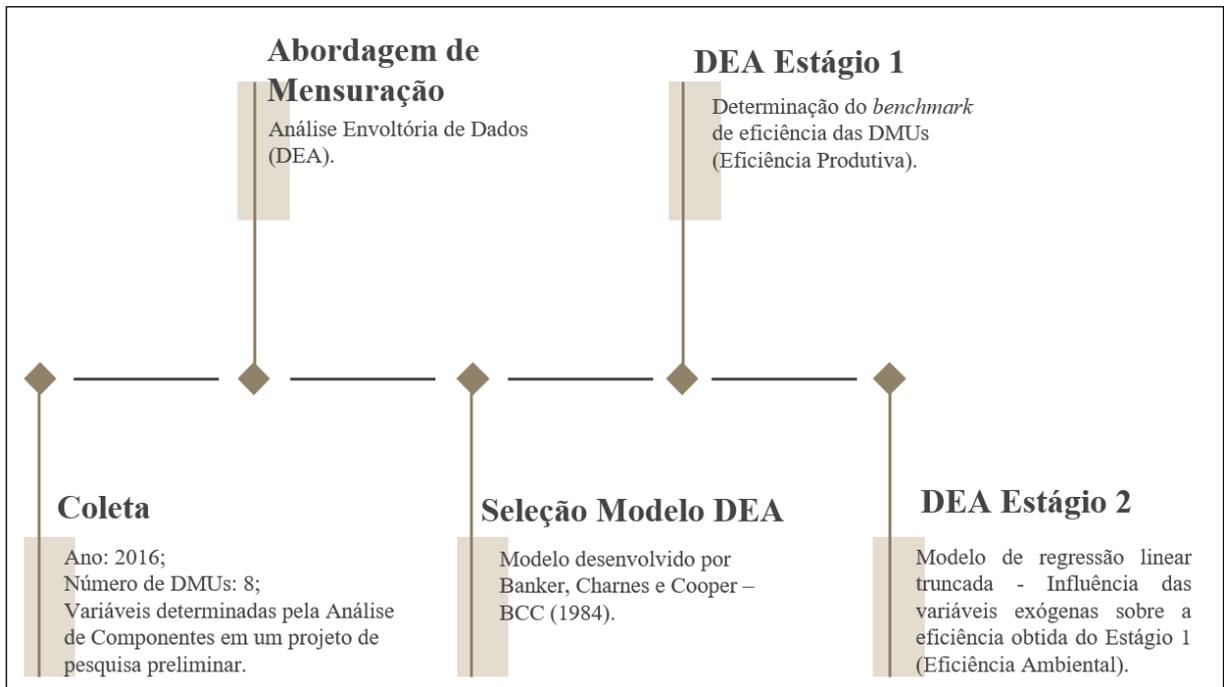
Método DEA em Dois Estágios		
Estágio 1 - DEA	Estágio 2 - Regressão Linear Truncada	
	Variáveis Dependentes	Variáveis Independentes
Modelo DEA-BCC	Escore de Eficiência do Modelo DEA-BCC	Consumo de Energia (MWh)
		Emissões (tCO _{2e})

Fonte: O Autor (2020)

Para o cálculo do modelo de regressão linear truncada utilizou-se o *software* Stata/MP 14.0.

O resumo dos procedimentos adotados para a análise de eficiência nesta seção é exibido na Figura 4:

Figura 4 – Sinóptico dos procedimentos para análise de eficiência.



Fonte: O Autor (2020)

3. RESULTADOS

Os resultados mostrados a seguir para os dois estágios da DEA foram obtidos com base nos dados coletados das oito indústrias integradas de celulose e papel selecionadas, cuja soma do volume produzido no ano de 2016 representou aproximadamente 20% de toda a produção nacional do setor. Esse percentual foi obtido através da comparação entre a soma da quantidade produzida pelas indústrias selecionadas com o valor total produzido no país conforme a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2020).

3.1. DEA Primeiro Estágio

Nesse modelo, a função objetivo com orientação para saída buscou maximizar a quantidade produzida de celulose e papel (t) para uma quantidade de entrada fixada de trabalhadores e consumo de madeira (m³). Os resultados de eficiência, eficiência invertida e o índice composto de eficiência normalizado com o *ranqueamento* da DMUs para esses escores são mostrados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Resultados do modelo DEA-BCC orientado para saída

DMUs	Eficiência	Eficiência Invertida	Índice Composto Normalizado	Benchmark
1	1,0000	0,7514	1,0000	1º
2	0,9790	0,9237	0,8452	2º
3	1,0000	1,0000	0,8009	4º
4	0,8219	0,8396	0,7866	5º
5	0,8488	0,8421	0,8063	3º
6	0,8851	1,0000	0,7089	6º
7	1,0000	1,0000	0,8009	4º
8	0,5803	1,0000	0,4647	7º
Média	0,8894	0,9196	0,7767	

Fonte: Dados da pesquisa

Como resultado do modelo DEA-BCC, obteve-se média de eficiência de 0,8894 com escores que variam de 0,5803 a 1, sendo identificadas no total três DMUs sobre a fronteira de eficiência, ou seja, obtiveram eficiência técnica igual a 1. Para o desempate dessas DMUs com o mesmo nível de eficiência e formação do *ranking*, calculou-se a eficiência para a fronteira invertida cujos valores foram utilizados para a obtenção do índice composto normalizado de todas as amostras.

Com isso, obteve-se média de eficiência inferior em relação à primeira análise, com 0,7767 e escores que variam de 0,4647 a 1, sendo observada melhor discriminação das DMUs, mantendo-se somente a DMU nº1 sobre a fronteira de eficiência. No entanto, persistiu o empate no *ranking* para a DMU nº3 e nº7 que resultou na 4º posição para ambas.

Tendo em vista as variáveis do modelo, dentre os aspectos que podem explicar o equilíbrio dos escores de eficiência na maior parte das DMUs, podemos citar a elevada competitividade da indústria nacional, sobretudo na produção de celulose (ABTCP, 2016). A essa competitividade, podem ser atribuídas algumas características comuns às indústrias, que são:

1. Elevado nível de desenvolvimento tecnológico de suas unidades, imensa capacidade de processamento dos recursos florestais plantados e constante investimento em tecnologia (MCTIC, 2017).
2. Contínuo investimento em capacitação profissional, cujo retorno entre outros aspectos, também prevê a melhora da produtividade do trabalho nas unidades industriais, conforme identificado nos relatórios de sustentabilidade das empresas que fizeram parte da pesquisa.

Logo, tais características também possuem contribuição significativa no aumento da capacidade de processamento e produtividade das indústrias em longo prazo. Conforme Funchal (2017), entre os anos de 2006 e 2016 a indústria nacional teve um crescimento de 80% na produção de celulose e 17% na produção de papel, enquanto para o número de trabalhadores no mesmo período, registrou-se um crescimento de 31% e 11% respectivamente.

3.2. DEA Segundo Estágio

No segundo estágio da DEA, foi analisada por meio do modelo de regressão, a influência do consumo de energia e emissões de CO₂ equivalente de cada DMU sobre o índice composto de eficiência obtido na produção de celulose e papel de cada DMU. Em razão das indústrias selecionadas possuírem portes e capacidades produtivas distintas, os valores brutos das variáveis independentes tornam inadequada a sua utilização no modelo de regressão. Com isso, foi proposta a definição de dois índices para as respectivas variáveis em que os valores considerados, referem-se à produção fixa de uma tonelada de celulose e papel.

3.2.1. Modelo de Regressão Linear Truncada

Para a Equação 10 abaixo, é exibido o modelo de regressão linear truncada, onde Y_i é o índice composto normalizado de eficiência obtido do primeiro estágio da DEA, α é o intercepto, $\beta_1 X_1$ é consumo de energia (MWh), $\beta_2 X_2$ são as emissões (tCO₂e) e ε o erro aleatório.

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (10)$$

No Quadro 5 são mostrados os resultados para um nível de significância de $p=0,05$.

Quadro 5 – Resultados do modelo de regressão.

Variável Dependente	Variáveis Independentes		
	Coeficientes		p-valor
Índice Composto Normalizado	β_1	-1,764201	0,000
	β_2	0,557116	0,005
p<0,05			
Prob>chi2 = 0,0000			

Fonte: Dados da pesquisa

O valor de $\text{Prob}>\chi^2=0,0000$ sugere que o modelo como um todo é significativo para a análise proposta, em outras palavras, o conjunto de variáveis independentes são capazes de explicar as variações na eficiência produtiva do conjunto de DMUs para o nível de significância adotado. Os resultados do modelo para as duas variáveis independentes são detalhados a seguir.

β_1 : Para o consumo de energia, pode-se observar que o p-valor resultou em 0,000 sendo nesse caso rejeitada a nula ($p<0,05$), o que sugere uma dependência linear entre esse consumo e o índice composto normalizado de eficiência. Sobre o seu coeficiente de regressão, foi identificada uma influência negativa sobre o índice composto.

β_2 : Em relação às emissões de CO₂ equivalente, obteve-se o p-valor de 0,005 e, podendo do mesmo modo ser rejeitada a hipótese nula ($p<0,05$), o que aponta para uma dependência linear entre as emissões e o índice composto normalizado de eficiência. Para o seu coeficiente de regressão, por sua vez, se constatou um efeito positivo sobre o índice composto.

4. CONCLUSÕES

Para as indústrias de celulose e papel do Brasil, a pesquisa com foco em produtividade e eficiência ambiental permitiu a compreensão da relevância do setor sobre os aspectos social, econômico e sobretudo o ambiental, na qual, foram elucidados os principais recursos e potenciais impactos gerados para a obtenção dos seus produtos. Assim, foi possível compreender a necessidade do aperfeiçoamento da dinâmica no uso dos recursos em seu processo de produção, de modo a subsidiar medidas que possam promover menor impacto ao meio ambiente e a manutenção da sua produtividade.

Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa consistiu em realizar uma análise comparativa da eficiência produtiva e ambiental das indústrias integradas de celulose e papel em operação no Brasil. Para isso foram coletados os dados das indústrias que possuem essa configuração de produção, sendo utilizado como ferramenta de análise o método DEA em dois estágios.

Do primeiro estágio, o modelo DEA-BCC forneceu os escores de eficiência produtiva para o conjunto de DMUs selecionado, nos quais se empregou o índice composto normalizado para desempate e determinação do *ranking*. Como resultado, obteve-se melhor discriminação dos escores de eficiência do conjunto, onde o melhor desempenho foi alcançado pela DMU nº1, localizada sobre a fronteira de eficiência. Para o conjunto de DMUs como um todo, identificou-se certo equilíbrio dos escores obtidos. Em vista das variáveis utilizadas, a elevada

competitividade observada está associada principalmente com as tecnologias adotadas que resultam na elevada capacidade de processamento e produtividade dessas indústrias.

Para o segundo estágio da DEA, a análise da eficiência ambiental com o modelo de regressão linear truncada, considerou os efeitos do consumo de energia e das emissões de CO₂ equivalente sobre o índice composto normalizado de eficiência. Dessa forma, pode-se observar que o consumo de energia possui efeito negativo e influência majoritária sobre a eficiência no modelo de regressão proposto. Para as emissões de CO₂ equivalente, por outro lado, foi identificada uma relação positiva com a eficiência na produção de celulose e papel.

Dessa forma, os resultados sugerem que o aumento da eficiência energética no processo de produção pode resultar em significativa melhora na eficiência produtiva dessas indústrias. Para as emissões de CO₂ equivalente, por sua vez, verificou-se o efeito positivo sobre a eficiência no modelo, embora de dimensão menor que o outro regressor, sinaliza a necessidade do desenvolvimento de tecnologias mais limpas e que não comprometam a sua produtividade.

Cabe ressaltar que os resultados se referem à produção nas unidades industriais, não sendo assim contabilizadas as compensações ambientais promovidas ao longo da cadeia de celulose e papel. Ademais, os resultados encontrados expressam unicamente a relação entre as DMUs compreendidas nessa pesquisa, não podendo dessa forma ser tomados como expressão do setor por inteiro.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. A Indústria de Celulose e Papel no Brasil. **Guia ABTCP Fornecedores & Fabricantes de Celulose e Papel**, 2016.

ADLER, N.; GOLANY, B.; Evaluation of deregulated airline networks using data envelopment analysis combined with principal component analysis with an application to Western Europe. **European Journal of Operational Research**, v.132, p.260-273, 2001.

BAJPAI, P. Brief Description of the Pulp and Paper Making Process. **Biotechnology For Pulp And Paper Processing**, Springer. USA, p.7-14, 2012.

BANKER, R.; CHARNES, A.; COOPER, W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, v.30, n.9, p.1078-109, 1984.

BANKER, R. D. Maximum Likelihood, Consistency and DEA: A statistical foundation. **Management Science**, v. 39, n. 10, p. 1265-1273, 1993.

BLOMBERG, J.; HENRIKSSON, E.; LUNDMARK, R. Energy efficiency and policy in Swedish pulp and paper mills: a data envelopment analysis approach. **Energy Policy**, v. 43, p. 569-579, 2012.

BOYD, G.; MCCLELLAND, J. The impact of environmental constraints on productivity improvement in integrated paper plants. **Journal of Environmental Economics and Management**, p.121-142, 1999.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 2017. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706227/4ed_ESTIMATIVAS_ANUAIS_WEB.pdf/a4376a93-c80e-4d9f-9ad2-1033649f9f93>. Acessado em: 29. out. 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados. **Segmento Celulose e Papel**. 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/105176754/PRODUTO+4_Vpublicacao.pdf/f48424df-30ef-464e-ac90-e30d97f41936>. Acessado em: 24. abr.2019.

CALLENS, I.; TYTECA, D. towards Indicators of sustainable development for firms. A productivity efficiency perspective. **Ecological Economics**, v.28, p.41-53, 1999.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Celulose e Papel**, Série P+L, São Paulo, 2008.

CHANG, Y.; ZHANG, N.; DANAQ, D.; ZHANG, N. Environmental efficiency analysis of transportation system in China: a non-radial DEA approach. **Energy Policy**, v.58, p. 277-283, 2013.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making Units. **European Journal of Operational Research**, v.2, n.4, p. 429-444, 1978.

COELLI, T. J.; RAO, D. S. P.; O'DONELL, C. J.; BATTESE, G. E. An introduction to efficiency and productivity analysis. **Springer**, 2th edition, p. 1-9. 2005.

COOPER, W. W.; SEINFORD, L. M.; ZHU, J. Handbook on data envelopment analysis. **Operations Research & Management Science**. Springer, v.164, n.2, p. 1-39, 2011.

Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos do Bradesco (DEPEC/BRADESCO). **Papel e Celulose**, jan. 2019. Disponível em: <https://www.economiaemdia.com.br/BradescoEconomiaEmDia/static_files/pdf/pt/monitores/setorial/infset_papel_e_celulose.pdf>. Acessado em: 03 mar.2020

DORES, A. M. B. das; CHAGAS, F. B. das; MATTOS, R. L. G. de; GONÇALVES, R. M. **Papel e Celulose**. Panorama setorial: setor florestal, celulose e papel. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Rio de Janeiro, p. 109 - 134. 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2017>>. Acessado em: 18 out. 2019.

FALAVIGNA, G.; MANELLO, A.; PAVONE, S. Environmental efficiency, productivity and public funds: The case of the Italian agricultural industry. **Agricultural Systems**, v. 121, p. 73-80, 2013.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Yearbook 2018 - **Forest Products - 2014-2018**. Rome, 2020.

FRACARO, G. P. M. **Eficiência Energética e Intensidade de Emissões no Setor de Papel e Celulose Brasileiro**. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2012. Disponível em: <<http://tede.unioeste.br/handle/tede/824>>. Acessado em: 7 nov. 2018.

GOLANY, B.; ROLL, Y. An Application Procedure for DEA. **International Journal of Management and Science**, v.17, n.3, p.237-250, 1989.

HAILU, A.; VEEMAN, T. Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: an application to the Canadian pulp and paper industry. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 83, nº3, p.605-616, 2001.

DA HORA, A. **Panorama Setorial**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Rio de Janeiro, p.80-91. 2017.

FUNCHAL, M. Produtividade na indústria de celulose e papel. **O Papel**, v. 74, n.10, p. 11-12, Jul. 2017.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2017**. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/pdf/iba-relatorioanual2017.pdf>>. Acessado em: 21 mai. 2018.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <www.ibge.gov.br> Acessado em: 05 nov. 2019.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Clean Energy Progress. 2017**, OECD/IEA, Paris. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf>>. Acessado em 29 out. 2018.

KANG, D.; LEE, D. Energy and environment efficiency of industry and its productivity effect. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p.184–193, 2016.

KAO, C.; YANG, Y. Reorganization of forest districts on efficiency measurement. **European Journal of Operations Research.**, v. 58, p. 356-62, 1992.

KRAMER, K.; MASANET, E.; XU, T.; WORREL, E. **Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry**. University of California. 2009.

LETA, F.; GOMES, E.; MELLO, J.; MEZA, L. Métodos de melhora de ordenação em DEA aplicados à avaliação estática de tornos mecânicos. **Investigação Operacional**, v.25, n.2, p.229-242, 2005.

LIU, H.; LIU, J.; LIU, Y.; LONG, X. Evaluating the sustainability impact of consolidation policy in China's coal mining industry: a data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**, v.112, 2969–2976, 2016.

MANELLO, A. Productivity growth, environmental regulation and win–win opportunities: the case of chemical industry in Italy and Germany. **European Journal of Operational Research**, v.262, n.2, p. 733-743, 2017.

MARIANO, E.; ALMEIDA, M.; REBELATTO, D.; Princípios básicos para uma proposta de ensino sobre análise envoltória de dados. **Anais do XXXIV COBENGE**, 2006.

MAZZANTI, M.; ZOBOLI, R. Environmental efficiency and labour Productivity: trade-off or joint dynamics? A theoretical investigation and empirical evidence from Italy using NAMEA. **Ecological Economics**, v.68, n.4, p. 1182-1194, 2009.

MUNISAMY, S.; ARABI, B. Eco-efficiency change in power plants: using a slacks-based measure for the meta-frontier Malmquist–Luenberger productivity index. **Journal of Cleaner Production**, v.105, p.218-232, 2015.

NATARAJA, N.; JOHNSON, A. Guidelines for using variable selection techniques in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v.215, p.662-669, 2011.

NEVES, G.; DE QUEIROZ, ADRIANE; OLIVEIRA, W.A. Uma Revisão Sistemática de Literatura: Eficiência Ambiental e Produtividade nas Indústrias. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v.1, p.888-904, fev. 2020.

OJALA, J., LAMBERG, J.-A.; PELTONIEMI, M.; SÄRKKÄ, T.; VOUTILAINEN, M. The global evolution of global paper industry². **O Papel**, v. 74, n.10, p. 51-54, Out. 2013.

PORTER, M.; LINDE, C. Green and competitive: ending the stalemate. *Harvard Business Review*, v.73, n.5, 1995.

QINMIN, F; XIAOQING, L; SHUANGLI, Z; YUFENG, Z. A Study on DEA of resource efficiencies of forestry-paper firms in China. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**, 2011.

ROSSATO, F.; SUSAETA, C., HIDALGO, G., DE ARAUJO, D., DE QUEIROZ, A. Comparison of revealed comparative advantage indexes with application to trade tendencies of cellulose production from planted forests in Brazil, Canada, China, Sweden, Finland and the United States. **Forest Policy and Economics**, v.97, p. 59-66, 2018.

SANCHES, A.; DE QUEIROZ, A.; PEREIRA, L. Organizational performance and adoption of sustainable practices in the agribusiness industry: an Analysis of multimodal load terminals. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v.7, n.2, p.248-263, Mai./Ago. 2018.

SARAFIDIS, V. An Assessment of comparative efficiency measurement techniques. **European Economics**. London, 2002. Disponível em: <<http://www.europeeconomics.com/download/eeeff.pdf>>. Acessado em: 16 out. 2018.

SENRA, L.; NANJI, L.; MELLO, J.; MEZA, L. Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA. **Pesquisa Operacional**, v.27, n.2, p.191-207, Mai./Ago. 2007.

SILVEIRA, J.; MEZA, L.; MELLO, J. Identificação de benchmarks e anti-benchmarks para companhias aéreas usando modelos DEA e fronteira invertida. **Produção**, v.22, n.4, p.788-795, Set./Dez. 2012.

SIMAR, L.; WILSON, P. Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes. **Journal of econometrics**, v.136, p. 31-64, 2007.

UNITED NATIONS. Conference of the parties. **Framework Convention on Climate Change**, 2015.

THOMPSON, G. et al. The Treatment of Pulp and Paper Mill Effluent: A Review. **Biosource Technology**, v.77, n.3, p.275-286. 2001

TRAN, H.; VAKILLAINEN, E. The kraft chemical recovery process. 2016.

XIE, B.; SHANG, L.; YANG, S.; YI, B. Dynamic environmental efficiency evaluation of electric power industries: evidence from OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) and BRIC (Brazil, Russia, India and China) countries. **Energy**, v. 4, p.147-157, 2014.

YU, C.; SHI, L.; WANG, Y.; CHANG, Y.; CHENG, B. The eco-efficiency of pulp and paper industry in China: an assessment based on slacks-based measure and Malmquist–Luenberger index. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p.511-521, 2016.

ZHU, J. Data envelopment analysis vs. principal component analysis: An illustrative study of economic performance of Chinese cities. **European Journal of Operational Research**, v.111, p.50-61, 1998.

CONCLUSÃO GERAL DA PESQUISA

A participação dos recursos naturais na produção em setores industriais bem como as suas saídas geradas e efeitos sobre o meio ambiente, evidenciaram a necessidade de mudança dos padrões de consumo e produção. Nesse sentido, destacaram-se os mecanismos de mensuração que auxiliam na compreensão dos benefícios das ações sustentáveis nos negócios, incluindo o volume de produção. Para a pesquisa, esses foram delineados com base na relação entre a eficiência ambiental e a produtividade industrial, sendo para isso desenvolvida uma coletânea de três artigos.

Dessa forma, inicialmente foi desenvolvido um artigo de revisão sistemática de literatura para o entendimento do panorama das publicações sobre eficiência ambiental e produtividade nas indústrias. Como resultado, foi evidenciada a utilização dessa abordagem para setores industriais diversos, fator que revela a importância de pesquisas que auxiliem na compreensão da relação entre esses dois aspectos. Quanto à metodologia aplicada, foi identificada a predominância do uso da técnica de Análise Envoltória de Dados (DEA).

No segundo artigo, sobre a ótica de eficiência ambiental e produtividade, foram selecionadas as indústrias integradas de celulose e papel do Brasil, no qual se procurou identificar as variáveis do seu processo de produção que são de fato relevantes para o estudo. Dessa forma, com o uso da técnica de Análise de Componentes Principais (ACP), obteve-se o conjunto de variáveis de maior significância, no qual as variáveis obtidas revelam o alinhamento entre o referencial teórico consultado com o resultado obtido via análise estatística.

Definidos a partir dos dois artigos, o objeto de pesquisa, suas principais variáveis e o método para sua mensuração, para o terceiro foi selecionado o modelo da DEA desenvolvido por Banker, Charnes e Cooper (BCC, 1984) associado a um modelo de regressão linear truncada (método DEA dois estágios), para mensurar a produtividade e eficiência ambiental das indústrias integradas, compondo assim o artigo final dessa pesquisa.

Para o primeiro estágio da DEA, foi utilizado um modelo de produção com função objetivo orientada para a saída, sendo para isso utilizado como entradas as variáveis do tipo trabalho e consumo de madeira, e como saída a produção de celulose e papel. Dessa forma, os resultados forneceram o *benchmark* de eficiência para a produtividade das indústrias selecionadas, sendo observado em maior parte, elevada habilidade dessas na conversão das suas entradas na produção de celulose e papel.

No segundo estágio, o modelo de regressão foi aplicado de modo obter a sua eficiência ambiental, no qual foi relacionada os escores de eficiência de produtividade com o consumo de energia e emissões. Desse modo, obteve-se que o consumo de energia possui influência negativa e preponderante, enquanto as emissões de CO₂ equivalente obtiveram influência positiva, porém de menor magnitude sobre a produtividade das indústrias analisadas.

Com isso, pode-se concluir que a relação entre a eficiência ambiental e produtividade das indústrias integradas do Brasil é em sua maior parte positiva para o conjunto selecionado, sendo possível observar por meio da análise do *benchmark* e do modelo de regressão uma tendência do aumento de produtividade dessas com a redução particularmente do consumo de energia ao longo do processo de produção.

A falta de dados homogeneizados e segregados por unidades de negócio para o segmento de celulose e papel, teve como consequência a limitação da quantidade de amostras e de variáveis utilizadas, sendo restritas ao ano de 2016, apesar de terem sido consultados dados relativos aos anos de 2014 à 2018.

Dentre os documentos consultados, cabe ressaltar que embora tenha sido observada certa padronização dos relatórios de sustentabilidade nos últimos anos, sobretudo em razão da adoção da sua apresentação conforme diretrizes do *Global Reporting Initiative (GRI)* em sua quarta versão, fator que auxilia no processo identificação e coleta de dados, ainda se trata de um processo incerto quanto a sua obtenção a depender do objetivo da pesquisa e variáveis envolvidas.

Isso se dá em razão da flexibilidade que a GRI prevê para o atendimento aos seus requisitos na apresentação dos dados no relatório de cada empresa e respectivas unidades de negócio, uma vez que possibilita distintas formas de apresentação, fator que pode inviabilizar uma análise comparativa dos dados coletados.

Contudo, através de um extenso trabalho de consulta às bases de dados, foi possível a coleta e realização de uma análise comparativa, considerando os aspectos produtivos e ambientais para uma quantidade significativa de unidades integradas de produção de celulose e papel. Tal realização constitui uma das principais contribuições em uma linha de pesquisa na qual ainda são poucos os estudos no país que consideram a desagregação setorial.

A relevância do setor sobre os aspectos ambiental, social e econômico no Brasil reforçaram a importância da realização de um estudo que abrangesse os recursos utilizados e saídas indesejáveis produzidas ao longo do seu processo. Com isso, foi possível observar que o aumento da sua produtividade e de sua eficiência ambiental estão diretamente relacionados com

a capacidade que essas indústrias possuem na conversão dos seus insumos em produtos. Nesse sentido, as tecnologias presentes nos processos de produção nas unidades industriais possuem papel preponderante nessa conversão, sendo importante elemento de competitividade além de contribuírem positivamente em direção ao desenvolvimento sustentável das operações setor.

Logo, o acompanhamento dos novos relatórios das empresas e demais publicações concernentes ao segmento pode contribuir na formação de uma base de dados mais robusta para a realização de novas pesquisas que auxiliem na melhor compreensão da sua produtividade, recursos e efeitos ambientais envolvidos de modo a promover o seu uso mais eficiente. A partir destas observações e formação de uma base de dados, como sugestão de pesquisa, pode ser realizada a análise da evolução da eficiência ambiental e produtividade para um número maior de indústrias e variáveis com a identificação dos seus determinantes, suas eventuais mudanças e fatores que a potencializam.

Quanto à abordagem metodológica para essa aplicação, é sugerida a análise de séries temporais com uso da metodologia DEA para calcular o índice de produtividade de Malmquist (DEA-MPI), no qual são consideradas as mudanças na eficiência técnica e no progresso tecnológico para as unidades produtivas analisadas ao longo do período especificado para estudo.