

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO – UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

GABRIEL LUIS VICTORINO SOUZA

AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE DE FABRICANTES DE CELULOSE E PAPEL
QUE ADOTARAM TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE CASOS
MÚLTIPLOS

São Paulo

2023

GABRIEL LUIS VICTORINO SOUZA

AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE DE FABRICANTES DE CELULOSE E PAPEL
QUE ADOTARAM TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE CASOS
MÚLTIPLOS

Tese de Doutorado apresentada ao
programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Produção da Universidade Nove de
Julho – UNINOVE, como requisito parcial
para obtenção do Título de Doutor em
Engenharia de Produção.

Prof. Luiz Fernando Rodrigues Pinto, Dr. –
Orientador

Prof. Geraldo Cardoso de Oliveira Neto,
Dr. – Coorientador

São Paulo

2023

Souza, Gabriel Luis Victorino.

Avaliação da circularidade de fabricantes de celulose e papel que adotaram tecnologias da indústria 4.0: estudo de casos múltiplos. / Gabriel Luis Victorino Souza. 2023.

121 f.

Tese (Doutorado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2023.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto.

Coorientador (a): Prof. Dr. Geraldo Cardoso de Oliveira Neto

1. Indústria 4.0. 2. Economia circular. 3. Setor de celulose e papel. 4. Avaliação da circularidade. 5. Índice de circularidade.

I. Rodrigues Pinto, Luiz Fernando. II. Oliveira Neto, Geraldo Cardoso de. III. Título

CDU 658.5



PARECER – EXAME DE DEFESA

Parecer da Comissão Examinadora designada para o exame de defesa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção a qual se submeteu o aluno Gabriel Luis Victorino Souza.

Tendo examinado o trabalho apresentado para obtenção do título de "Doutor em Engenharia de Produção", com Tese intitulada "AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE DE FABRICANTES DE CELULOSE E PAPEL QUE ADOTARAM INDÚSTRIA 4.0: ESTUDOS DE MÚLTIPLOS CASOS", a Comissão Examinadora considerou o trabalho:

(☒) **Aprovado** (☐) **Aprovado condicionalmente**
(☐) **Reprovado com direito a novo exame** (☐) **Reprovado**

EXAMINADORES

Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto - Uninove (Orientador)

Prof. Dr. Geraldo Cardoso de Oliveira Neto – FEI (Coorientador)

Prof. Dr. Roberto Rodrigues Leite – FMU (Membro Externo)

Roberto Rodrigues Leite

Assinado de forma digital por Roberto Rodrigues Leite
Dados: 2023.07.04 12:37:16 -03'00'

Prof. Dr. Ivanir Costa – UNINOVE (Membro Externo)

Prof. Dr. Walter Cardoso Satyro – UNINOVE (Membro Externo)

Prof. Dr. André Felipe Henriques Librantz – UNINOVE (Membro Interno)

São Paulo, 26 de junho de 2023

DEDICATÓRIA

Dedico à Deus, em nome do Senhor Jesus, pela preparação de todas as oportunidades em minha vida. Com a ajuda de Deus, foi possível superar todas as dificuldades que se levantaram e para continuar passo a passo diante de lutas e das perdas irreparáveis.

Aos meus Pais pelo amor, criação, educação, correção, incentivo, companheirismo, motivação, crenças, valores e tudo que recebi deles em minha vida.

À minha esposa e ao meu filho que sempre estiveram comigo, superando juntos todo e qualquer tipo de dificuldade no caminho da realização dos nossos sonhos.

Ao meu pai Sr. Luis e ao meu sogro Sr. Ubiratan, que partiram durante o curso dessa pesquisa e em poucos dias de diferença. Eles deixaram muita saudade, mas também deixaram o legado, os exemplos e ensinamentos. Agora descansam o sono dos justos e aguardam a volta de Jesus Cristo.

AGRADECIMENTOS

Dou graças a Deus, em nome do Senhor Jesus, pela vida, preparações, capacitação, coragem e condições de seguir em frente.

Aos meus pais Cleonice e Luis (*in memoriam*) por me ensinarem que com fé em Deus, humildade, honestidade e sabedoria eu poderia ir além do que pudesse imaginar.

À minha amada esposa Alcione e ao meu filho amado Lucas pela ajuda, compreensão, incentivo e por estarem juntos comigo em mais uma batalha.

Aos meus irmãos Maria Fernanda, Carolina, Guilherme e aos meus cunhados, que sempre estiveram orando por mim, para que eu pudesse vencer.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto, pela orientação, amizade, confiança e dicas no compartilhamento de tempo e experiência, para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Geraldo Cardoso de Oliveira Neto, pela amizade, motivação, orientação e parceria ao longo do desenvolvimento de tantos trabalhos, desde a época do mestrado.

Agradeço aos membros da comissão examinadora Prof. Dr. Ivanir Costa, Prof. Dr. Roberto Leite, Prof. Dr. Walter Satyro e Prof. Dr. André Librantz pelas contribuições valiosas na examinação do trabalho.

Aos demais Professores e Pesquisadores da Universidade Nove de Julho pelos conhecimentos transmitidos, em especial ao Prof. Dr. Athos Pacchini pelo apoio inicial.

Às amigas Valquíria Demarchi, Rosangela Melatto e Micheline Maia pela parceria, compreensão, conselhos e colaboração em tudo que desenvolvemos em conjunto.

Aos meus amigos Vanessa Cardoso, Ednilson, Robson Barbosa, André Moreira, Marcelo, Mykaele e Rodrigo Votto por todo apoio, conselhos e incentivo para conciliar a carreira profissional com as pesquisas acadêmicas.

Agradeço aos especialistas Eng. Daniel Gueter, Eng. Laline, Eng. Ivan Medeiros, Eng. Renato e MSc. Eng. Helena, por todo compartilhamento de experiência e conhecimento de tecnologias que envolvem a produção de celulose e papel.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por todo apoio em forma de bolsa de fomento.

A Universidade Nove de Julho pela disponibilização da bolsa de estudo ofertada para minha participação no Programa de Mestrado e Doutorado em Engenharia de Produção.

Por fim, os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente durante a elaboração desse trabalho.

“E Jesus disse-lhe: Se tu podes crer, tudo é possível ao que crê”.

Marcos 9:23

RESUMO

As indústrias do setor de celulose e papel sofrem pressão para redução de emissões, por estarem entre as mais intensivas em energia no mundo. Como a tecnologia de fabricação de celulose e papel evoluiu ao longo do tempo para atender as demandas, o uso de insumos foi intensificado, resultando em aumento dos impactos ambientais. Apesar disso, o setor destaca-se no desenvolvimento industrial e econômico global, e tem adotado estratégias para aliviar às preocupações dos seus impactos como respostas aos problemas enfrentados. Desse modo, práticas de economia circular têm sido adotadas para redução do uso de insumos, reciclagem e reuso de materiais descartados. Referente às tecnologias da indústria 4.0, o setor tem iniciado o processo de transformação digital, onde propostas para aplicação de controles preditivos de falhas e qualidade de produto, entre outros, têm sido testadas. Assim, como ambos os temas são vistos como paradigmas industriais, a investigação da relação entre práticas de economia circular e tecnologias da indústria 4.0 gera descobertas relevantes para o conhecimento. Sendo assim, o estudo teve como objetivo avaliar a circularidade de fabricantes de celulose e papel que adotaram tecnologias da indústria 4.0. Para tanto, o método de pesquisa adotado foi estudo de casos múltiplos em três grandes empresas líderes mundiais na fabricação de papel. Dessa maneira, para avaliação do índice de circularidade foi necessário comparar os resultados das avaliações dos impactos ambientais dos fatores de intensidade de massa nos momentos antes e após a adoção de tecnologias da indústria 4.0. Assim, com base nas reduções de insumos, foi feita avaliação econômica com retorno de investimento, indicando que essa pesquisa oferece aplicabilidade, por apresentar oportunidades econômicas e viabilidade de investimento em tecnologias da indústria 4.0. Referente ao meio ambiente, essa pesquisa reporta redução do uso de matéria-prima primária (fibras virgens) e potencialização do uso de matéria-prima secundária (fibras recicladas), além das reduções de amido, vapor e energia elétrica. Como contribuição teórica, esse estudo apresenta oportunidades que cobrem as lacunas identificadas, mostrando como a adoção de tecnologias da indústria 4.0 estimula a circularidade de recursos empregados na produção de celulose e papel. Assim, a aplicação das tecnologias da indústria 4.0 para o controle preditivo da qualidade de papel contribuem para um futuro verde, afetando positivamente o setor, uma vez que as oportunidades para o meio ambiente beneficiam diretamente a sociedade.

Palavras-chave: Indústria 4.0, economia circular, setor de celulose e papel, avaliação da circularidade, índice de circularidade.

ABSTRACT

The industries in the pulp and paper sector are under pressure to reduce emissions, as they are among the most energy intensive in the world. As pulp and paper manufacturing technology has evolved over time to meet demands, the use of inputs has intensified, resulting in increased environmental impacts. Despite this, the sector stands out in global industrial and economic development, and has adopted strategies to alleviate concerns about its impacts as responses to the problems faced. Thus, circular economy practices have been adopted to reduce the use of inputs, recycling and reusing discarded materials. Regarding industry 4.0 technologies, the sector has started the process of digital transformation, where proposals for the application of predictive controls of failures and product quality, among others, have been tested. So, as both themes are seen as industrial paradigms, the investigation of the relationship between circular economy practices and industry 4.0 technologies generates relevant discoveries for knowledge. Therefore, the study aimed to evaluate the circularity of pulp and paper manufacturers that adopted industry 4.0 technologies. For that, the adopted research method was a study of multiple cases in three large world leading companies in paper manufacturing. This way, in order to evaluate the circularity index, it was necessary to compare the results of the evaluations of the environmental impacts of the mass intensity factors before and after the adoption of industry 4.0 technologies. Then, based on input reductions, an economic assessment with return on investment was made, indicating that this research offers applicability, as it presents economic opportunities and investment feasibility in industry 4.0 technologies. Regarding the environment, this research reports a reduction in the use of primary raw materials (virgin fibers) and increased use of secondary raw materials (recycled fibers), in addition to reductions in starch, steam and electricity. As a theoretical contribution, this study presents opportunities that cover the identified gaps, showing how the adoption of industry 4.0 technologies stimulates the circularity of resources used in pulp and paper production. Therefore, the application of industry 4.0 technologies for predictive control of paper quality contributes to a green future, positively affecting the sector, since opportunities for the environment directly benefit society.

Keywords: Industry 4.0, circular economy, pulp and paper sector, circularity assessment, circularity index

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Infográfico Borboleta da Economia Circular.....	30
Figura 2: Fluxo da polpação Kraft.....	38
Figura 3: Layout da máquina de papel do tipo Fourdrinier.....	39
Figura 4: Principais partes da máquina para produção de papel embalagem.....	40
Figura 5: Evolução das publicações ao longo dos anos.....	44
Figura 6: Resultados do processo de inclusão dos artigos.....	45
Figura 7: Ano de publicação dos artigos incluídos na revisão sistemática.	46
Figura 8: Países dos artigos incluídos na revisão sistemática.	46
Figura 9: Métodos de pesquisa dos artigos incluídos na revisão sistemática.....	47
Figura 10: Modelo de revisão bibliométrica e sistemática.....	72
Figura 11: Bases incorporadas ao banco de dados da Scopus.....	73
Figura 12: Estrutura Metodológica da Pesquisa	75
Figura 13: Condução do estudo de casos múltiplos.	78
Figura 14: Estrutura do processo convencional.....	83
Figura 15: Arquitetura das tecnologias da indústria 4.0.....	84
Figura 16: Comparação dos índices de circularidade.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais processos de polpação de madeira.....	35
Tabela 2: Artigos por conjunto de palavras chaves.....	43
Tabela 3: Fatores de intensidade de massa (MIFs) usados no trabalho.....	81
Tabela 4: Balanço de massa Caso 1.....	88
Tabela 5: Avaliação do impacto ambiental do uso de sistema de controle convencional e digital – Caso 1.....	89
Tabela 6: Comparativo dos resultados de impacto por compartimento – Caso 1.	90
Tabela 7: Avaliação de circularidade - Caso 1.....	90
Tabela 8: Resultados econômicos devido tecnologias da I4.0 – Caso 1.	90
Tabela 9: Balanço de massa Caso 2.....	93
Tabela 10: Avaliação do impacto ambiental do uso de sistema de controle convencional e digital – Caso 2.....	93
Tabela 11: Comparativo dos resultados de impacto por compartimento – Caso 2.	94
Tabela 12: Avaliação de circularidade - Caso 2.....	94
Tabela 13: Resultados econômicos devido tecnologias da I4.0 – Caso 2.	95
Tabela 14: Balanço de massa Caso 3.....	97
Tabela 15: Avaliação do impacto ambiental do uso de sistema de controle convencional e digital – Caso 3.....	97
Tabela 16: Comparativo dos resultados de impacto por compartimento – Caso 3.	98
Tabela 17: Avaliação de circularidade – Caso 3.	98
Tabela 18: Resultados econômicos devido tecnologias da I4.0 – Caso 3	99
Tabela 19: Redução obtida a cada tonelada de papel produzida.	99
Tabela 20: Comparação da intensidade de massa unitária reduzida por tonelada de papel produzido.....	100
Tabela 21: Comparação unitária dos resultados econômicos.....	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Estratégias de circularidade para cadeia de produção.	32
Quadro 2: Tipos de papel e suas características.	41
Quadro 3: Relação entre produtos obtidos e processo de polpação.	42
Quadro 4: Locais e revistas das publicações incluídas na revisão sistemática.	47
Quadro 5: Tipos de produção dos quinze estudos da revisão sistemática.	48
Quadro 6: Relação entre tecnologias da I4.0 e EC no setor de celulose e papel.	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 PROBLEMA E QUESTÃO DE PESQUISA	15
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	17
1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA	17
1.5 JUSTIFICATIVAS	18
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1.1 Indústria 4.0.....	20
2.1.2 Economia circular	30
2.1.3 Relação entre Indústria 4.0 e Economia circular	33
2.1.4 Processo de produção de celulose e papel.....	34
2.1.5 Tipos de papel	40
2.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	42
2.3 REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE TECNOLOGIAS DA I4.0 NO SETOR DE CELULOSE E PAPEL RELACIONADA A EC	48
2.3.1 Abordagem geral da indústria 4.0 no setor de celulose e papel	50
2.3.2 Tecnologias da indústria 4.0 no setor de celulose e papel	56
2.3.3 Tecnologias da I4.0 para promoção da EC no setor de celulose e papel	60
2.3.4 Tecnologias da I4.0 relacionadas aos ganhos ambientais no setor de celulose e papel ..	63
2.3.5 Tecnologias da I4.0 relacionadas aos ganhos econômicos no setor de celulose e papel	67
2.3.6 Tecnologias da I4.0 relacionadas aos ganhos sociais no setor de celulose e papel	71
 3. METODOLOGIA DE PESQUISA	72
3.1 PROCEDIMENTO PARA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA	72
3.2 ESTRUTURA METODOLÓGICA DA PESQUISA	74
3.3 PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS	76
3.4 SELEÇÃO DE CASOS A SEREM INCLUÍDOS NA PESQUISA.....	79
3.5 PROCEDIMENTO PARA CÁLCULO DA CIRCULARIDADE	80
3.6 PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	81

4.	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASOS MÚLTIPLOS	82
4.1	EMPRESAS A, B e C - ESTRUTURA CONVENCIONAL DE OPERAÇÃO.....	82
4.2	EMPRESAS A, B e C – ARQUITETURA DAS TECNOLOGIAS I4.0 EMPREGADAS	84
4.3	CASO 1 – EMPRESA A.....	86
4.3.1	Avaliação da circularidade da adoção de tecnologias da I4.0 na Empresa A	88
4.3.2	Avaliação Econômica do Caso 1.....	90
4.4	CASO 2 – EMPRESA B	91
4.4.1	Avaliação da circularidade da adoção de tecnologias da I4.0 na Empresa B	92
4.4.2	Avaliação Econômica do Caso 2.....	94
4.5	CASO 3 – EMPRESA C	95
4.5.1	Avaliação da circularidade da adoção de tecnologias da I4.0 na Empresa C	96
4.5.2	Avaliação Econômica do Caso 3.....	99
4.6	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	99
5.	DISCUSSÕES.....	102
6.	CONCLUSÕES	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	APÊNDICE 1 - Formulário para levantamento dos dados gerais da empresa e produção.	119
	APÊNDICE 2 – Formulário para levantamento das tecnologias da I4.0 e práticas de EC	120

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o contexto onde a pesquisa está inserida, problema, questão e objetivos da pesquisa. Também são apresentados as delimitações do tema, justificativas do estudo e estrutura da tese.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os fabricantes de celulose e papel estão sob pressão ambiental e econômica para o desenvolvimento sustentável (LI *et al.*, 2019), devido esse setor estar entre as cinco indústrias mais intensivas em energia do mundo (DEL RIO *et al.*, 2022), que por consequência contribui para as emissões de gases de efeito estufa (GRIFFIN *et al.*, 2018). Isso porque, com a evolução da tecnologia de fabricação de celulose e papel, a prática moderna de fabricação utiliza grande quantidade de água e árvores como recursos e fonte de extração de polpa da madeira (JAIN; GUPTA, 2021). Logo, o uso dos recursos e matéria-prima (LI *et al.*, 2019), a redução de consumo de energia (TALEBJEDI *et al.*, 2022) e de emissões de carbono (ZHANG *et al.*, 2022) necessitam da adoção de estratégias para redução de impactos (ROYO *et al.*, 2021). Apesar dos aspectos econômicos, ambientais e sociais serem desafios constantes, esse setor é fundamental para o desenvolvimento industrial e econômico global (JAUHAR *et al.*, 2022). Em razão disso, o setor de celulose e papel tem buscado constantemente novas formas de redução de impactos e gestão de resíduos, devido às preocupações e políticas ambientais adotadas mundialmente (MUÑOZ *et al.*, 2021).

Nota-se também que práticas da economia circular (EC) têm sido adotadas como estratégias viáveis de redução de consumo e emissões pelo setor (LI; MA, 2015) e também para aumentar as taxas de reciclagem e reutilização de produtos e resíduos (MYLLYMÄKI *et al.*, 2020). Isso porque a EC visa a eliminação de resíduos e poluição, a circulação de produtos e materiais, e a regeneração da natureza, buscando energia e materiais renováveis (ELLEN MACARTHUR, 2023). Porém, para a EC criar oportunidades de novos negócios prósperos (SOPELANA *et al.*, 2021) é necessário estabelecer estrutura institucional, envolvimento das partes interessadas e técnicas de eliminação de resíduos (EZEUDU; EZEUDU, 2019). Assim, a EC no setor de celulose e papel é caracterizada pela integração de atividades econômicas (VIMAL *et al.*, 2022), utilização do lodo da fábrica de papel para produção de combustíveis (SALAMEH *et al.*, 2020; ALKASRAWI *et al.*, 2021), fibras

celulósicas descartadas para materiais de construção (TERRONES-SAETA *et al.*, 2020) e produção de tijolos (GOEL *et al.*, 2021), além do uso de resíduos de papel para produção de papel (SCHROTH *et al.*, 2022).

Paralelamente, o setor de celulose e papel tem iniciado o processo de transformação digital, com a introdução de tecnologias da indústria 4.0 (I4.0) (CLAUSER *et al.*, 2022) buscando o conceito de sistemas autônomos em ambiente de alta complexidade (BRETTEL *et al.*, 2014). Em vista disso, uma das características da I4.0 é o uso de avanços tecnológicos para integração de trabalhadores e máquinas em sistemas inteligentes de produção (PEREIRA; ROMERO, 2017), para aumentar a eficácia da produção, obtendo de forma ágil produtos personalizados (OZTEMEL; GURSEV, 2020). Em virtude disso, no setor de celulose e papel, a implementação das tecnologias da I4.0 requer métodos específicos (CABRERA *et al.*, 2022), superando as barreiras do uso de novas tecnologias para tomadas de decisão (RECHTIN *et al.*, 2019). Desse modo, as tecnologias da I4.0 podem evoluir os processos e equipamentos, com controles digitais em tempo real (CLAUSER *et al.*, 2022), para alcançar ganhos econômicos e ambientais (NADIM *et al.*, 2022). Além disso, a adoção de tecnologias da I4.0 no setor de celulose e papel tem potencial para EC para o desenvolvimento sustentável, melhorando a imagem da empresa (RODRIGUES *et al.*, 2022).

Os ganhos econômicos no setor de celulose e papel com a implementação de tecnologias da I4.0, como métodos de aprendizagem de máquina, podem evitar gastos com falhas de equipamentos (EL KOUJOK *et al.*, 2020; NADIM *et al.*, 2022) e propiciar produção sem interrupções (RODRIGUES *et al.*, 2022). Também, a adoção de métodos de inteligência artificial pode controlar o uso de matérias-primas de custos altos (RECHTIN *et al.*, 2020) e reduzir o consumo de energia elétrica (TALEBJEDI *et al.*, 2020). Também, as tecnologias da I4.0 podem melhorar a forma de planejamento da produção (TSAI; LAI, 2018) e a reputação da empresa no mercado (RODRIGUES *et al.*, 2022).

A adoção de tecnologias da I4.0 no setor de celulose e papel pode alcançar ganhos ambientais, com métodos de aprendizagem de máquina para evitar desperdícios de insumos industriais (EL KOUJOK *et al.*, 2020). Inclusive, modelos de negócios digitais podem aumentar a consciência ambiental (VIMAL *et al.*, 2022), contribuir para redução de emissões (PENNELLS *et al.*, 2022), dos riscos de vazamentos de produtos (NADIM *et al.*, 2022) e de desperdícios de energia elétrica (TALEBJEDI *et al.*, 2020).

No que diz respeito a relação entre I4.0 e EC no setor de celulose e papel, a presença das tecnologias da I4.0 pode contribuir na restauração de produtos químicos, uso de resíduos

para produção de vapor e energia elétrica (NADIM *et al.*, 2022), recuperação da energia térmica para sistemas de aquecimento (TALEBJEDI *et al.*, 2020). As tecnologias da I4.0 também podem impulsionar a valorização de resíduos de papel como matéria-prima (SCHROTH *et al.*, 2022), aproveitamento das cinzas residuais para uso em fabricas de cimento (TSAI; LAI, 2018), destinação do resíduo da fermentação da polpa para produção de bebidas destiladas (VIMAL *et al.*, 2022).

1.2 PROBLEMA E QUESTÃO DE PESQUISA

Estudos que apresentaram tecnologias da I4.0 isoladamente adotaram inteligência artificial no processo de polpação termomecânica (TALEBJEDI *et al.*, 2020) e na determinação da quantidade ótima de produção de papel (SU *et al.*, 2021), aprendizado de máquina para sistema preditivo em manutenção de equipamento (RODRIGUES *et al.*, 2022) e para gestão do tratamento de águas residuais (KUMAR *et al.*, 2023). Também foi identificado o uso de aprendizado de máquina e computação em nuvem para análise de morfologia de nanofibras de celulose (PENNELLS *et al.*, 2022) e inteligência artificial para seleção de peças reservas para produção em manufatura aditiva (CARDEAL *et al.*, 2023). Quanto aos estudos que tratam tecnologias da I4.0 de forma generalista foram identificados na produção de celulose e papel (TSAI; LAI, 2018), papel tissue (GANDOLFO; LUPI, 2021) e compartilhamento circular nos setores de celulose e papel, açúcar, bebidas alcoólicas e cimento (VIMAL *et al.*, 2022).

Referente aos estudos que envolvem sistemas autônomos, foram identificados: modelo preditivo na produção de papel, com oportunidades de ganhos ambientais, por redução anual do uso de 158.900 kg de produtos químicos e ganho econômico de \$500.000 (RECHTIN *et al.*, 2020); modelo para diagnóstico de falhas em tempo real, para redução do desperdício de energia elétrica e de vapor, devido a ocorrência de falhas inesperadas e evitar prejuízos financeiros (EL KOUJOK *et al.*, 2020); modelo de consumo de energia para redução do desperdício de energia elétrica e de vapor, para diminuir custos do uso demasiado de insumos (ZHANG *et al.*, 2021); modelo causal de falhas que propicia a produção de vapor e energia elétrica para consumo próprio, colaborando na redução de emissões de gases de efeito estufa (NADIM *et al.*, 2022); modelo para auxiliar o operador na tomada de decisão de ajustes de matéria-prima, com oportunidade de redução do uso de insumos, podendo diminuir 2 a 4% do consumo de energia total e reduzir custos decorrentes (SCHROTH *et al.*, 2022). Os estudos

de revisão de literatura reportaram que sistemas autônomos podem aprimorar o direcionamento de resíduos industriais para aproveitamento como matéria-prima por outras empresas. Desse modo, pode obter reduções de emissões, consumo de energia elétrica e redução de custos (CLAUSER *et al.*, 2022).

Apesar de terem sido identificados na literatura estudos no setor de celulose e papel, que apresentam as tecnologias da I4.0 relacionadas a EC, apenas 6 estudos reportaram proposta de aplicação de sistemas autônomos com essa abordagem (RECHTIN *et al.*, 2020; NADIM *et al.*, 2022; SCHROTH *et al.*, 2022). Notou-se também a ausência de qualquer estudo que abordasse as tecnologias da I4.0 de forma isolada, generalista ou autônoma apresentando relação com a EC por meio de cálculo de circularidade (RODRIGUES *et al.*, 2022; VIMAL *et al.*, 2022; SCHROTH *et al.*, 2022). Embora os aspectos econômicos tenham sido abordados em alguns estudos, nenhum estudo realizou cálculo de retorno do investimento, pois demonstraram indícios de ganhos financeiros, por potencial de evitar a ocorrência de determinado ônus. Além disso, outros estudos mensuram os ganhos econômicos utilizando análise de custos (RECHTIN *et al.*, 2020), estimativas de lucros (TSAI; LAI, 2018) e redução percentual de custos (CARDEAL *et al.*, 2023). No que se refere aos aspectos ambientais, nenhum estudo realizou avaliação de impacto ambiental por compartimento. Desse modo, todas as pesquisas analisadas indicaram ganhos ambientais, sendo observados indícios de ganhos (EL KOUJOK *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022). No tocante aos ganhos ambientais quantitativos, as pesquisas utilizaram estimativas de emissões de CO₂ (TSAI; LAI, 2018; CARDEAL *et al.*, 2023), comparações percentuais de redução de matéria-prima (GANDOLFO; LUPI, 2021; SCHROTH *et al.*, 2022), balanço de massa (RECHTIN *et al.*, 2020; SU *et al.*, 2021), previsão de carga do motor e de vapor gerado (TALEBJEDI *et al.*, 2020).

Dessa maneira, nas publicações de estudos no setor de celulose e papel referente a adoção de tecnologias de I4.0 relacionadas a EC foram identificadas lacunas que envolvem; apenas propostas de aplicações de sistemas autônomos; ausência de estimativa da circularidade nos estudos que relacionam as tecnologias da I4.0 com as práticas de EC; ausência de avaliação econômica com retorno de investimento; ausência de avaliação do impacto ambiental pela intensidade de massa por compartimento. Em face do exposto, as lacunas identificadas justificam a realização de estudos abrangentes, contribuindo para o desenvolvimento da seguinte questão de pesquisa: Como a adoção de tecnologias da indústria 4.0 estimula a circularidade de recursos empregados na produção de celulose e papel?

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

Para responder à questão de pesquisa levantada, o estudo teve como objetivo avaliar a circularidade de fabricantes de celulose e papel que adotaram tecnologias da I4.0. Desse modo, para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos três objetivos específicos:

- Identificar pesquisas que relacionam as tecnologias da I4.0 e práticas de EC no setor de celulose e papel;
- Identificar nas pesquisas selecionadas a forma como as tecnologias da I4.0 foram apresentadas, as práticas de EC, abordagens ambiental, econômica e social no contexto do setor de celulose e papel;
- Estudar, coletar e tratar os dados econômicos e ambientais de empresas do setor de celulose e papel que passaram pelo processo de implantação de tecnologias da I4.0.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Em muitos países, a indústria de celulose e papel é tida como o principal ramo econômico. Porém, o setor tem alto consumo de energia e por isso necessita de iniciativas que favoreçam a redução de consumo e de gases de efeito estufa (SOUALHI *et al.*, 2021). Desse modo, a adoção de tecnologias de I4.0 tem sido apresentada como estratégia para o setor ser menos intensivo em energia (ZHANG *et al.*, 2021). Assim, estudos tem apresentado relevância das tecnologias da I4.0 em modelos de EC (VIMAL *et al.*, 2022).

Apesar de haver no mercado opções disponíveis de soluções tecnológicas para migração do setor de manufatura para I4.0, a adoção de novas tecnologias cresce de forma desigual no setor. O principal motivo é a falta de conhecimento e fornecedor que entenda as necessidades da empresa, a fim de apresentar a solução adequada (CABRERA *et al.*, 2022). Dessa forma, neste estudo foi considerado a inclusão de empresas que estão passando pela transformação digital e adotaram tecnologias da I4.0, para investigar a ocorrência de ganhos ambientais e para EC.

Diante disso, como procedimento de avaliação da circularidade para esta pesquisa foi aplicada a proposta realizada por De Oliveira Neto *et al.* (2022) inicialmente realizado em estudo no setor têxtil. Portanto, a avaliação da circularidade apresentada neste trabalho foi conduzida com base nos estudos do setor de celulose e papel, em empresas que adotaram

tecnologias da I4.0 para aplicação autônoma. Em particular, foram consideradas empresas multinacionais, com unidades fabris em diversos países, porém especificamente foi considerado uma empresa da Áustria, outra da Espanha e outra da Alemanha.

1.5 JUSTIFICATIVAS

A indústria de celulose e papel é intensiva no consumo de energia e emissões (NADIM *et al.*, 2022). Apesar disso, a produção de celulose e papel utiliza matérias-primas renováveis, de origem de fonte sustentável e por ser reciclável, o papel contribui direta e indiretamente para a proteção ambiental e desenvolvimento sustentável (CEPI, 2023). No que se refere ao volume de produção, a indústria de celulose brasileira representa a 4ª maior do mundo, enquanto que o papel produzido no Brasil está na 9ª posição mundial dos fabricantes mundiais (ABTCP, 2023). Já a indústria europeia é líder mundial na produção de celulose, papel e papelão (CEPI, 2023). Outrossim, devido a capacidade atual, a produção mundial de papel tem perspectiva de aumento importante para os próximos anos até 2030, por isso, são necessárias estratégias para redução da intensidade e emissões da produção. Essas estratégias incluem esforços para incentivo à inovação em tecnologias que reduzem a quantidade de calor necessária para a secagem de celulose e papel (IEA, 2023).

Ante o exposto, a motivação para o desenvolvimento desse estudo é a identificação de fabricantes de papel que adotaram tecnologias da I4.0 e impulsionaram as práticas da EC, dada a necessidade de reduzir emissões e consumo de energia elétrica (ZHANG *et al.*, 2021). Ao realizar a pesquisa foi observado que a transformação digital está em fase inicial no setor, além de haver um número reduzido de trabalhos que relacionam tecnologias da I4.0 e EC. Assim, essa pesquisa contribui para a teoria acrescentando conhecimento ao apresentar pela primeira vez a avaliação da circularidade promovida por tecnologias da I4.0 implementada em fabricantes de papel, visto que a I4.0 e EC ainda são paradigmas e a produção de papel é intensiva em recursos (SCHROTH *et al.*, 2022).

No que se refere as aplicações práticas, as motivações estão relacionadas a oportunidade de identificar e reportar a viabilidade de investimento no processo de transição para digitalização da produção e nas práticas de EC. Como consequência da digitalização, a expectativa de contribuir para um futuro verde, de modo que o setor possa ser positivamente afetado quanto aos aspectos econômicos, ambientais e sociais.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A pesquisa desenvolvida apresentada nesta tese foi estruturada em seis capítulos, como apresentado a seguir:

Capítulo 1: é a introdução, que apresenta a contextualização, formulação do problema e questão de pesquisa, definição dos objetivos, apresentação da delimitação do tema, justificativas e estrutura do trabalho;

Capítulo 2: é a revisão bibliográfica, onde são apresentados os conceitos fundamentais e relacionados a temática do trabalho, a revisão bibliométrica e revisão sistemática da literatura sobre tecnologias da I4.0 no setor de celulose e papel relacionada a EC;

Capítulo 3: é a metodologia de pesquisa, para apresentação dos procedimentos utilizados na realização da revisão bibliométrica e sistemática da literatura, estrutura metodológica da pesquisa, método de pesquisa e procedimento de coleta de dados, seleção de casos a serem incluídos na pesquisa, procedimento para cálculo da circularidade e procedimento para avaliação econômica;

Capítulo 4: é a apresentação dos resultados dos estudos de caso, abordando a estrutura convencional de operação, arquitetura das tecnologias da I4.0 identificadas nos casos, avaliação do índice de circularidade de cada caso e avaliação econômica;

Capítulo 5: é a apresentação das discussões dos resultados obtidos nos estudos de casos;

Capítulo 6: é a apresentação da conclusão, onde as considerações finais mostram os achados, contribuições do estudo, limitações e sugestões de pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, com o objetivo de mostrar os conceitos fundamentais relacionados à temática do trabalho, a revisão bibliométrica e revisão sistemática da literatura sobre tecnologias da I4.0 no setor de celulose e papel relacionada a EC.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os conceitos fundamentais relacionados a tecnologias da indústria 4.0, economia circular e processos de produção de celulose e papel.

2.1.1 Indústria 4.0

De acordo com Lasi *et al.* (2014) a indústria vem sofrendo transformações tecnológicas ao longo do tempo levando a mudanças de paradigmas que são tratadas como revoluções. A 1ª revolução industrial é caracterizada pela mecanização, a 2ª revolução industrial pelo uso intensivo de energia elétrica e a 3ª revolução industrial pela digitalização generalizada. Com isso, a digitalização avançada nas fábricas, a combinação de tecnologias de internet e tecnologias inteligentes voltadas para máquinas e produtos resultam em uma nova mudança de paradigma na produção industrial, estabelecendo uma 4ª revolução representada pelo termo indústria 4.0. Dessa forma, a I4.0 é um termo coletivo para tecnologias e conceitos de organização da cadeia de valor (HERMAN *et al.*, 2015), com uma visão de fábricas inteligentes, onde ecossistemas de fabricação podem ser conduzidos por sistemas inteligentes com propriedades autônomas, para autoconfiguração, automonitoramento e autocorreção (THAMES; SCHAEFER, 2016).

A I4.0 caracteriza-se por avanços tecnológicos disruptivos que supera as barreiras entre os mundos virtual e físico (PEREIRA; ROMERO, 2017), por isso pode ser entendida como uma filosofia de manufatura que utiliza sistemas de automação modernos e de trocas de dados (OZTEMEL; GURSEV, 2020). Roblek *et al.* (2016) e Posada *et al.* (2015) pontuam que as principais características da I4.0 são: digitalização, otimização e customização da produção; automação e adaptação; interação homem-máquina; serviços e negócios de valor

agregado e troca e comunicação automática de dados. Dessa forma, a proposta da I4.0 é aumentar a eficiência e a competência da manufatura por meio da adoção de tecnologias avançadas de informação e comunicação (XU *et al.*, 2018). Em outras palavras, os objetivos da I4.0 são alcançar um nível maior de eficiência operacional e produtividade, bem como nível maior de automação (THAMES; SCHAEFER, 2016; LUCATO *et al.*, 2019).

Para Salkin *et al.* (2018) a I4.0 está focada na construção de sistemas inteligentes que incluem a comunicação máquina a máquina e interação homem-máquina, para melhorar a produção e gerenciamento de serviços. Para isso, as empresas precisam encarregar-se de um gerenciamento eficaz do fluxo de dados extraídos da interação de sistemas inteligentes, onde a ideia principal é a instalação de sistemas de autocontrole, que permitem tomar precauções antes que o sistema sofra operação.

A empresa que deseja implementar a I4.0 precisa ter um planejamento de médio e longo prazo, principalmente no tocante ao futuro da operação que se deseja modernizar. Isso porque, inevitavelmente, alguns postos deixarão de existir, enquanto que outros novos postos de trabalho podem surgir e por isso é necessário que a implantação ocorra em fases (BENEŠOVÁ; TUPA, 2017). Com isso, as principais oportunidades estão relacionadas ao aprimoramento do planejamento e controle da produção, aumento da competitividade, imagem como empresa tecnológica, melhoria da qualidade do produto e processos (CONTADOR *et al.*, 2020).

2.1.1.1 Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0

De acordo com Goel e Gupta (2020) a I4.0 é conhecida como internet das coisas industrial, onde equipamentos, dispositivos e computadores estão conectados em processos de fabricação. Essas conexões promovem um ambiente dotado o suficiente para análise de big data e procedimentos de autocorreção, onde sensores, máquinas e produtos inteligentes podem se comunicar e aprender uns com os outros, para alcançar o conceito de fábrica inteligente.

Para Georgios *et al.* (2019) a I4.0 permite que os equipamentos se tornem entidades independentes capazes de coletar e analisar dados e aconselhá-los sem a necessidade de qualquer intervenção humana, pois introduz automanutenção, auto-otimização, auto-cognição e auto-personalização. Dessa forma, a combinação da internet das coisas com outras tecnologias como big data, computação em nuvem, sistemas ciberfísicos podem aprimorar e transformar os atuais sistemas de fabricação em sistemas inteligentes.

Rüßmann *et al.* (2015) destacam que a transformação para I4.0 é impulsionada por nove avanços tecnológicos fundamentais, onde sensores, máquinas, peças de trabalho e sistemas de tecnologia de informação conectados (chamados de sistemas ciberfísicos) podem interagir uns com os outros, obedecendo procedimentos padronizados. Nesse processo, a capacidade de adaptação às mudanças do sistema de forma dinâmica é suportada por coleta e análise de dados entre máquinas, comunicação via internet, de modo a alcançar processos ágeis, flexíveis e seguros para ocorrência de falhas. Além disso, o emprego de maneira integrada das tecnologias eleva a eficiência de recursos, células produtivas e operações.

Robôs Autônomos – os robôs autônomos têm sido utilizados para realização de atividades complexas em vários setores da indústria, além de comumente ser possível emprega-los em atividades com interação segura entre homem e máquina (RÜßMANN *et al.*, 2015). Conforme Goel e Gupta (2020) os robôs móveis usam sensores, software e alguns equipamentos para identificar seus arredores, e podem ser moveis autônomos ou não autônomos. Assim, os robôs móveis autônomos não precisam de orientação externa e podem explorar seu ambiente por conta própria, por exemplo Pet Robots, Game Bot, Delivery robot, Space Robots. Já os robôs móveis não autônomos precisam de algum sistema de comando e controle para movimentação, como exemplo, a orientação de robô na linha de montagem e fabricação de automóveis, pois é necessário orientação para determinar quando e onde posicionar uma peça na linha de montagem.

Big Data – a realização de coleta, análise e avaliação de grandes volumes de dados fornecidos por fontes diferentes auxiliam a tomada de decisões em tempo real no ambiente corporativo. As principais vantagens de análise de big data estão associadas à otimização da qualidade da produção, economia de energia, além de melhorar o controle do uso de equipamentos (RÜßMANN *et al.*, 2015). A análise de big data tem sido fundamental para fornecer previsão e tomada de decisão em sistemas de manufatura, pois fornece valor agregado a vários produtos e sistemas, aplicando tecnologias de ponta a produtos tradicionais na fabricação (WANG *et al.*, 2022).

Realidade Aumentada – na Indústria 4.0 o uso de aplicativos e programas especiais de geração de imagens são empregados para realidade aumentada, ou seja, para visualização direta ou indireta ao vivo de ambientes físicos do mundo real. Os principais benefícios da realidade aumentada para indústria é integrar a simulação no projeto de produtos e sistemas de produção (OZTEMEL; GURSEV, 2020). Fraga-Lamas *et al.* (2018) explicam que a lógica que envolve a realidade aumentada considera a câmera do dispositivo para capturar um

quadro, que é processado por um software que estima a posição da câmera em relação a um objeto de referência. Essa estimativa também pode fazer uso de sensores internos, que também ajudam a rastrear o objeto de referência, para que a imagem seja renderizada para a perspectiva apropriada e apresentada ao usuário na tela de um dispositivo.

Manufatura Aditiva – manufatura aditiva é a terminologia oficialmente adotada para se referir à prototipagem rápida, onde a tecnologia básica abordada é o Desenho Assistido por Computador em modelos tridimensionais (3D CAD) (GIBSON *et al.*, 2014). A manufatura aditiva também é conhecida como impressão em 3D para confecção de peças acabadas a partir de arquivos digitais (CAMACHO *et al.*, 2018). Com isso, a manufatura pode oferecer benefícios para melhorar processos e produtos, influenciados também pelo desenvolvimento de novos protocolos de aprendizado de máquina e inteligência artificial (BUTT, 2020). No que se refere ao processo, Haleem e Javaid (2019) destacam que a partir da manufatura aditiva pode produzir um objeto físico 3D por meio de um arquivo CAD (desenho auxiliado por computador) 3D gerado pelo software de projeto ou por escaneamento tridimensional. Durante o processo, o material é adicionado em camada para criar um objeto sólido, podendo ser materiais metálicos, termoplásticos, cerâmicos, bioquímicos, entre outros. Existem diferentes tipos de tecnologias usadas em manufatura aditiva como estereolitografia, sinterização seletiva a laser, modelagem de deposição fundida, sinterização direta de metal a laser, impressão 3D Polyjet, impressão 3D a jato de tinta, Laminated Object Manufacturing, Color-Jet-Printing, Electron Beam Melting e Multi-Jet-Printing

Computação em nuvem - é um modelo utilizado para acessar recursos computacionais, tais como redes, servidores, armazenamentos de dados, aplicativos e serviços fornecidos por um provedor em todos os lugares. As características essenciais da computação em nuvem são: autoatendimento sob demanda, amplo acesso à rede, agrupamento de recursos, elasticidade rápida, serviço medido (SOKOL; HOGAN, 2013). O tipo de desenvolvimento de computação em nuvem pode fornecer acesso a grandes conjuntos de dados e clusters de processadores remotos para filtrar, modelar, otimizar e compartilhar dados entre sistemas para melhorar o desempenho ao longo do tempo (OZTEMEL; GURSEV, 2020).

Segurança cibernética – A segurança cibernética é a organização e coleção de recursos, processos e estruturas usadas para proteger o ciberespaço (CRAIGEN *et al.*, 2014). Em outras palavras, devido ao alto volume de dados atualmente armazenados e processados nas mais diversas operações, a segurança cibernética tem concentrado esforços para o desenvolvimento de soluções automatizadas, inteligentes e capazes de proteger dados, a fim

de evitar incidentes e perdas (SARKER *et al.*, 2020). Logo, a segurança cibernética é um dos principais desafios com que as empresas têm de lidar para preservar a sua competitividade, quando decidem iniciar o processo de transformação digital (CORALLO *et al.*, 2020).

Internet das coisas (IoT) – é uma tecnologia que atua na integração, comunicação e interação computacional entre dispositivos, pessoas, dados e serviços, a fim de desenvolver processos autônomos e inteligentes, para aumentar/alcançar eficiência de operações (SANCHEZ *et al.*, 2020). A internet das coisas tem crescido rapidamente, pois possibilita que pessoas e “coisas” sejam conectadas a qualquer hora, em qualquer lugar, com qualquer coisa e com qualquer pessoa, melhorando a qualidade para usuários finais e suporte a infraestrutura e operações de uso geral (GEORGIOS *et al.*, 2019). Algumas das aplicações da IoT são na área de monitoramento ambiental, agricultura, indústrias de construção, casas/edifícios inteligentes, gerenciamento de desastres, sistemas solares assistidos, redes inteligentes, tecnologia robótica, assistência médica, indústrias automotivas, sistemas de resposta a emergências, sistemas de gerenciamento da cadeia de suprimentos (MALIK *et al.*, 2021).

Integração de sistemas – dentro do conceito da I4.0 é fundamental que haja a integração de sistemas, a fim de que departamentos estejam conectados entre si (área de projeto e área de produção), bem como clientes e fornecedores (RÜßMANN *et al.*, 2015). Isso porque a integração de sistemas é um aspeto crucial para I4.0, pois permite integrar tecnologias e colocá-las para trabalhar em conjunto, para aumentar a autonomia de processos de produção (SANCHEZ *et al.*, 2020).

Simulações – para aumentar a qualidade em linhas de produção, a simulação 3D de produtos, produção e processos já tem sido utilizada e a tendência é que esse recurso seja ampliado para uso em simulação de operação de plantas fabris (RÜßMANN *et al.*, 2015). Para Cruz-Mejía *et al.* (2019) a simulação pode ser aplicada para melhorar a entrega do produto. Com isso, a simulação de operações pode ajudar na coordenação e avaliação de desempenho da entrega pontual de produtos, simulando eventos discretos que avaliam as datas de vencimento de produtos feitos sob encomenda que incluem muitas incertezas. Assim, essa variabilidade pode ser avaliada em cenários de simulação onde as condições de estoque e as políticas de reposição podem ser avaliadas não apenas para atender às expectativas do cliente, mas também para realizar operações de entrega com custo mínimo. A simulação de eventos discretos é uma ferramenta eficiente para capturar todas as fontes de variabilidade, por isso produz boas estimativas de tempo e custo. Por isso, a simulação é uma tecnologia chave da I4.0 para apoiar o desenvolvimento de planejamento e modelos exploratórios, que

otimizam a tomada de decisão em projeto e operações de sistemas complexos (DE PAULA FERREIRA *et al.*, 2020).

Assim, a I4.0 como novo paradigma de revolução industrial sugere uma transformação mais extensa com base na integração inteligente de vários desenvolvimentos tecnológicos (SHARMA; JAIN, 2020). Por isso, outras tecnologias como internet de serviços - IoS – *Internet of Services* (PIVOTO *et al.*, 2021), RFID - *Radio Frequency Identification* (MEZZANOTTE *et al.*, 2021), blockchain, inteligência artificial, aprendizagem de máquina (SALKIN *et al.*, 2018), gêmeos digitais, entre outras (BUTT, 2020) também contribuem para transformação digital da indústria.

IoS - A internet de serviços (IoS – *Internet of Services*) é considerada um pilar importante da indústria 4.0, juntamente com a internet das coisas e aos sistemas ciberfísicos (REIS; GONÇALVES, 2018). De acordo com Cardoso *et al.* (2008) a IoS descreve uma infraestrutura que utiliza a internet como meio para ofertar e vender serviços, tornando os serviços em bens comercializáveis. Desse modo, a IoS é caracterizada em um ambiente de mercado de serviços que reúne tanto consumidores quanto fornecedores, para facilitar as interações comerciais entre as partes interessadas. Pivoto *et al.* (2021) destacam que as aplicações de IoS em conexões entre controladores, máquinas, produtos e objetos podem automatizar processos e serviços que envolvem gerenciamento de estoque, solicitação de transporte de carga e compras.

RFID – Os sistemas RFID (*Radio Frequency Identification*) são dispositivos e sensores de identificação por radiofrequência compostos por uma série de tags e leitores que permitem a identificação de objetos marcados, por meio de transmissões de rádio (MEZZANOTTE *et al.*, 2021). A tecnologia RFID é um conceito emergente para uma variedade de dispositivos IoT devido à integração de conceitos de detecção junto com a identificação (PATRE, 2021). Para Spekman e Sweeney (2006) RFID é uma evolução lógica para uma cadeia de suprimentos integrada com sucesso, onde a decisão de adoção pode ser de certa forma simples, dadas as suas vantagens e benefícios. Porém, os desafios envolvem questões culturais e comportamentais uma vez que a tecnologia RFID cruza a fronteira de uma empresa e é “anexada” a outro parceiro da cadeia de suprimentos, o que requer confiança, comprometimento e transparência de informações.

Inteligência artificial - a Inteligência Artificial (IA) pode oferecer o melhor das expectativas em muitos setores de aplicação (ARRIETA *et al.*, 2020). Em aplicações de robôs adaptativos e flexíveis combinados com o uso de IA facilitam a fabricação de diferentes

produtos, proporcionando redução de custos, tempo e esperas na produção (SALKIN *et al.*, 2018). O big data capacita a inteligência artificial, sendo que quanto maior o conjunto de dados, mais confiáveis são as previsões, considerando que a aprendizagem é baseada no comportamento e continuidades (GILCHRIST, 2016). Isso porque a IA é uma ciência que envolve inteligência adaptativa e coletiva para extrair informações em tempo real (LU, 2017). Salehi e Burgueño (2018) definem a IA como a capacidade de uma máquina imitar o comportamento humano inteligente, buscando usar algoritmos de inspiração humana. Para isso, métodos de IA como reconhecimento de padrões, aprendizado de máquina e aprendizado profundo têm sido cada vez mais adaptados e usados para monitoramento de saúde estrutural e identificação de danos, otimização, modelagem de propriedades concretas, identificação estrutural, engenharia sísmica, etc. Dessa forma, habilidades de computação, comunicação, controle, autonomia e sociabilidade são alcançadas ao combinar microprocessadores e IA com produtos, serviços e máquinas para torná-los mais inteligentes (ALCÁCER; CRUZ-MACHADO, 2019).

Aprendizagem de máquina – é um método de inteligência artificial que fornece às máquinas a capacidade de aprender sem programação explícita, onde algoritmos de aprendizado de máquina têm sido aplicados para análise de dados (MAHDAVINEJAD *et al.*, 2018) e em diversas áreas como engenharia (MAUREIRA *et al.*, 2021). No que se refere as vantagens e desvantagens de métodos de IA, Salehi e Burgueño (2018) apresentam uma comparação entre os métodos de aprendizagem de máquina, reconhecimento de padrões e aprendizado profundo em análise estrutural. Desse modo, o aprendizado de máquina apresenta como vantagens a aplicabilidade a sistemas de monitoramento de integridade estrutural tradicionais e orientados a dados, podendo ser integrado com IoT para aplicativos inteligentes, aplicável a problemas de otimização, além de não necessitar grande quantidade de dados. Porém, como desvantagens não pode ser usado para novos sistemas de monitoramento de saúde estrutural baseados em visão com base em imagens. O método reconhecimento de padrões tem como vantagens aplicação a sistema de monitoramento de integridade estrutural tradicionais e orientados a dados, não necessitando grande quantidade de dados, podendo ser usado com eficiência para problemas de classificação e reconhecimento. Como desvantagens, não pode ser integrado diretamente com IoT para aplicações inteligentes e não implica aprendizagem. Finalmente o método aprendizado profundo possui como vantagens aplicação para sistemas de monitoramento de saúde estrutural baseados em visão, é eficaz com grandes quantidades de dados, pode ser integrado com IoT para aplicações inteligentes e é

computacionalmente eficiente. Como desvantagens não podem ser usados de forma eficaz para sistemas tradicionais de monitoramento de saúde estrutural e necessita de grande quantidade de dados para desempenho eficiente (SALEHI; BURGUEÑO, 2018).

Blockchain – é uma tecnologia que agrega confiança, segurança e descentralização em diferentes campos, onde os tipos principais de blockchain podem ser distinguidos dependendo: da regulamentação de acesso (blockchains públicas, blockchains privadas, consórcio ou blockchains federados), das permissões (blockchains sem permissão, blockchains com permissão), do tipo de incentivos (blockchains tokenizados, Blockchains não tokenizados), do modo de operação (blockchains orientados a lógica, blockchains orientados a transações) (FERNANDEZ-CARAMES; FRAGA-LAMAS, 2019). As tecnologias de blockchain podem oferecer técnicas invioláveis e resilientes de manutenção de registros que envolvem aspectos de segurança e integridade de dados (ALLADI *et al.*, 2019).

Gêmeos digitais - O gêmeo digital é visto como um campo de pesquisa relativamente novo (JONES *et al.*, 2020). De acordo com Al-Ali *et al.* (2020) uma réplica virtual de um objeto (gêmeo digital) é baseada em plataforma de computação em nuvem que recebe dados de objeto físico em tempo real, de modelos 2D e 3D, dados históricos e de lista de materiais (BoM) para processamento, análise e visualização adicionais. Assim, o conceito de gêmeo digital tem evoluído como complemento à parte física, sendo aplicado em cidades inteligentes como energia, edifícios, fábricas, transporte, agricultura e assistência médica inteligentes, para controlar, monitorar, adaptar e proteger toda a infraestrutura física em tempo real (AL-ALI *et al.*, 2020). Além disso, avanços em inteligência artificial têm possibilitado a introdução de automação, de modo que recursos sofisticados fizessem parte do gêmeo digital, oferecendo possibilidades à profissionais para enfrentamento de decisões difíceis na prática (AGRAWAL *et al.*, 2022).

2.1.1.2 Sistemas autônomos da Indústria 4.0

Sanchez *et al.* (2020) definem a I4.0 como um conceito que surge da integração de tecnologias como inteligência artificial, fábricas inteligentes, sistemas ciber físicos, computação em nuvem, IoT, integração de sistemas, interações homem-máquina, análise de big data, entre outras. A fábrica inteligente é uma característica que promove autonomia ao processo produtivo, possibilitando auto-configuração, auto-supervisionamento, auto-recuperação, de modo que dispositivos trabalham em conjunto e de forma autônoma, para

alcançar os objetivos de fabricação e utilizar os recursos de forma eficiente (SANCHEZ *et al.*, 2020).

Para Van Der Mei *et al.* (2018) o controle autônomo de serviços, baseado em IoS é caracterizado pelo desenvolvimento de métodos e algoritmos eficientes que possibilitam a rede e provedores de serviços explorar as possibilidades do IoS. Para tanto, observa a necessidade de considerar: gestão autônoma e controle em tempo real - para fornecer serviços confiáveis no IoS, provedores de serviços precisam implementar mecanismos de controle; métodos e ferramentas de monitorização e previsão de serviço – onde um principal aspecto para o controle autônomo no IoS é o monitoramento e a previsão de serviço; precificação inteligente e concorrência em sistemas multidomínio - onde provedores de serviços no IoS podem implementar seu próprio mecanismo de preços, que pode envolver preços estáticos simples para políticas dinâmicas avançadas em que os preços podem variar conforme demanda real.

Salkin *et al.* (2018) observam que a I4.0 tem atraído atenção de empresas de manufatura e de sistemas de serviços, mesmo não havendo uma definição certa de I4.0 principalmente por não haver utilização definitiva das tecnologias para iniciar a transição para I4.0. Dessa forma, a I4.0 é composta pela integração de instalações de produção, cadeias de suprimentos e sistemas de serviços para permitir o estabelecimento de redes de valor agregado. Assim, todo o sistema deve envolver análise de dados e ferramentas diversas para tomada de decisão em tempo real com autonomia nos processos de produção e serviços.

Ustundag e Cevikcan (2018) destacam que a transição para I4.0 resulta em sistemas autônomos de produção em fábricas inteligentes, de maneira que a operação possa acontecer com maior eficiência. Para indústria tradicional mudar para I4.0 é necessário superação de desafios técnicos, econômicos, organizacionais como iniciativas fundamentais, para que homem, máquina e recursos possam comunicar entre si. Nesse processo, Bayram e Ince (2018) destacam que referente aos aspectos tecnológicos de transição para I4.0, as tecnologias de sensores têm papel fundamental para coleta, processamento e compartilhamento de dados, com suporte da computação em nuvem, para que a produção ocorra de forma inteligente.

2.1.1.3 Facilitadores e dificuldades na implantação da Indústria 4.0

A I4.0 possui potencial para aplicação em variados setores da indústria como, por exemplo, indústria de transformação (PEREIRA; ROMERO, 2017). Alguns recursos da I4.0

podem ser implementados em indústria de transformação de pequeno e médio porte que possui Sistema Integrado de Gestão Empresarial (ERP – *Enterprise Resource Planning*), máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado), a fim de reduzir tempos de ciclo de produtos, reduzir custo, promover a melhoria da qualidade de produtos e serviços, aumentar a variedade de produtos (ARM *et al.*, 2018).

A parceria indústria e universidade exerce um papel importante para a implantação da I4.0 nas empresas de pequeno e médio porte. Essa interação permite que empresas desses portes tenham acesso a alunos com habilidades interdisciplinares, com conhecimentos necessários para aplicação de tecnologias, e por outro lado os estudantes podem aplicar seus conhecimentos no ambiente natural de uma indústria (CENTEA *et al.*, 2020).

De acordo com Oztemel e Gursev (2020) alguns benefícios relevantes podem ser observados com a implantação das tecnologias da I4.0, tais como: capacidade de inovação aprimorada; fácil monitoramento e diagnóstico do sistema multifuncional; maior autoconsciência e capacidades de manutenção de sistemas; alta produtividade com produtos ecológicos; flexibilidade aprimorada com custos reduzidos; processo de desenvolvimento de produção mais rápido; tomada de decisão imparcial; em tempo real e baseada no conhecimento; participação nacional para contribuir com a economia; aumento do e-business com mercados mais disseminados e acesso aos mercados globais; acesso mais fácil aos serviços públicos (educação, saúde, atendimento local etc.); cidades; edifícios; fábricas inteligentes com controle à distância; aumento de produtos personalizados e facilidade ao acesso às informações pessoais.

De acordo com Thames e Schaefer (2016) a I4.0 tem potencial para atingir níveis sem precedentes de eficiência operacional e crescimento da produtividade, abrindo caminho para novos tipos de manufatura avançada e processos industriais, que envolve a interação homem-máquina. Por outro lado, os desafios de complexidade e gerenciamento precisam ser considerados, a fim de extrair todas as oportunidades potenciais proporcionadas pela I4.0 e a manufatura inteligente.

As barreiras da implantação de tecnologias da I4.0 incluem a viabilidade cultural dos modelos propostos e o apoio necessário dos governos. Além disso, os principais desafios a serem superados para implementação de tecnologias da I4.0 estão ligados às limitações socioculturais, cultura corporativa, codependência entre empresas (PHAM *et al.*, 2019).

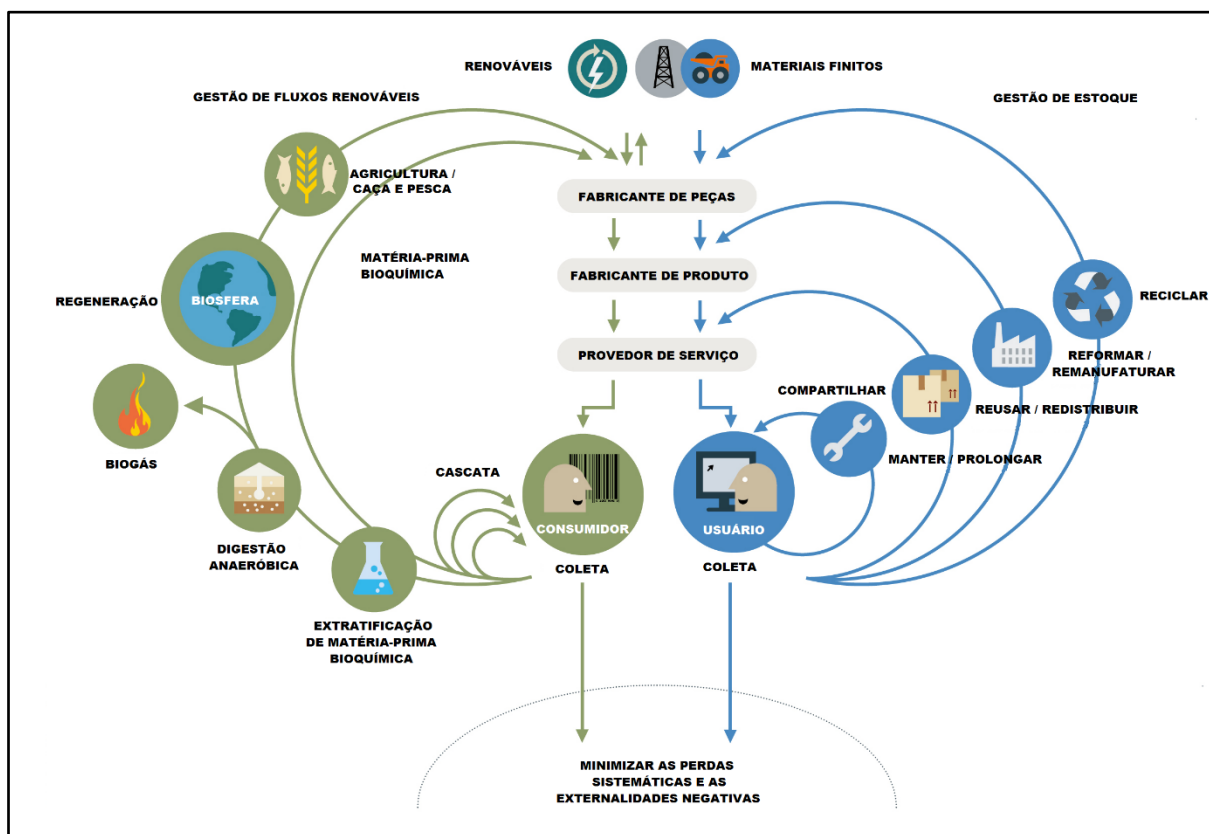
Na visão de Oztemel e Gursev (2020) as dificuldades na implantação das tecnologias da I4.0 envolvem redução de privacidade de dados, aumento dos ataques cibernéticos,

redução da segurança da informação, aumento do plágio e dificuldade de manter as propriedades intelectuais, disseminação de conhecimentos desgastados, restrição do acesso ao conhecimento (principalmente para enganar a sociedade), dificuldade para remover ou ocultar o fluxo de informações indesejadas.

2.1.2 Economia circular

Uma economia circular busca reconstruir o capital, seja ele financeiro, manufaturado, humano, social ou natural, com base nos princípios de eliminação de resíduos e poluição, manter produtos e materiais em uso, regeneração de sistemas naturais (ELLEN MACARTHUR, 2023). Assim, é razoável considerar que a EC é um conceito que zela pelo uso consciente de recursos extraído da natureza, para a transformação em produtos ou serviços de valor econômico significativo, de modo que tanto o produto quanto o serviço possam ser utilizados por diversas vezes, ao contrário dos padrões lineares praticados ao longo do tempo (KORHONEN *et al.*, 2018). A Figura 1 mostra a representação gráfica da EC.

Figura 1: Infográfico Borboleta da Economia Circular.



Fonte: Adaptado de Ellen MacArthur (2023).

Webster (2021) entende a EC como um sistema vivo instalado, que busca a regeneração do capital natural e à restauração do capital social, focada na renovação de uma economia industrial, de forma oposta aos modelos lineares caracterizados pela extração e esgotamento dos capitais natural e social. A economia circular tem como objetivo alcançar o desenvolvimento sustentável, proporcionando qualidade econômica, ambiental e social, de maneira que tanto as gerações atuais e futuras sejam beneficiadas. Portanto, a EC é um sistema econômico preocupado com a redução, reutilização, reciclagem e recuperação de matérias proveniente de processos de produção de produtos, distribuição e serviços, o que consequentemente substitui o conceito de fim de vida (KIRCHHERR *et al.*, 2017).

Para Geissdoerfer *et al.* (2017) a EC é um sistema regenerativo caracterizado pela minimização e estreitamento de circuitos de material e energia, a fim de reduzir as emissões, desperdícios de energia e recursos. Para alcançar seus objetivos a EC tem como premissa a longa duração de um produto, por isso as atenções estão voltadas desde o projeto, manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, recondicionamento e reciclagem (GEISSDOERFER *et al.*, 2017). Com isso, devido à escassez de recursos, se faz necessária a adoção de estratégias de transição para EC, uma vez que no mundo, apenas 8,6 % de todos os materiais extraídos retornam à economia após a utilização (GBC BRASIL, 2023).

No estudo desenvolvido por Kalmykova *et al.* (2018) foram identificados os seguintes métodos para implementação da EC:

- **Fonte de materiais** – caracterizado por: priorizar aquisição verde; checagem se há avaliação do ciclo de vida; substituição de material; procura por incentivos, subsídios e créditos fiscais;
- **Design** - caracterizado por: customização; projeto para desmontagem e reciclagem; design para modularidade; eco design; redução;
- **Manufatura** - caracterizado por: eficiência energética; produtividade de materiais; fabricação reproduzível e adaptável;
- **Distribuição e vendas** - caracterizado por: design de embalagens otimizado; redistribuir e revender;
- **Consumo e uso** – caracterizado por: envolvimento da comunidade; rotulagem ecológica; produto como serviço ou sistema de atendimento ao produto; rotulagem de produtos; reuso; compartilhamento; consumo socialmente responsável;
- **Coleta e descarte** - caracterizado por: responsabilidade estendida do produtor; reciclagem incentivada; construção de logística ou infraestrutura; separação; sistemas de retoma e troca;

- **Reciclagem e recuperação** - caracterizado por: aproveitamento de subprodutos; *cascading*; *downcycling*; recuperação de elemento ou substância; recuperação de energia; extração de bioquímicos; reciclagem funcional; reciclagem de alta qualidade; simbiose industrial; restauração; reutilização;
- **Remanufatura** - caracterizado por: remodelação ou remanufatura, melhoria, manutenção e reparo;
- **Entradas circulares** - caracterizado por: materiais de base biológica.

Quadro 1: Estratégias de circularidade para cadeia de produção.

Economia circular	Uso e fabricação mais inteligentes de produtos	Estratégias	Conceito
		R0 Recusar	Tornar o produto redundante abandonando sua função ou oferecendo a mesma função com um produto radicalmente diferente
		R1 Repensar	Tornar o uso do produto mais intensivo (por exemplo, compartilhando produtos ou colocando produtos multifuncionais no mercado).
	Estender a vida útil do produto e suas peças	R2 Reduzir	Aumentar a eficiência na fabricação ou uso de produtos consumindo menos recursos naturais e materiais
		R3 Reusar	Reutilização por outro consumidor de produto descartado que ainda esteja em boas condições e cumpra sua função original
		R4 Reparar	Reparo e manutenção do produto defeituoso para que possa ser utilizado com a sua função original
		R5 Renovar	Restaurar um produto antigo e atualizá-lo
		R6 Remanufaturar	Utilizar partes de produto descartado em um novo produto com a mesma função
		R7 Reaproveitar	Use o produto descartado ou suas partes em um novo produto com uma função diferente
	Aplicação útil de materiais	R8 Reciclar	Processar materiais para obter a mesma qualidade (grau alto) ou inferior (grau baixo)
Economia Linear		R9 Recuperar	Incineração de materiais com recuperação de energia

Fonte: Adaptado de Potting *et al.* (2017).

Nos estudos de Potting *et al.* (2017) foi apresentado o papel da inovação na EC, avaliando sua importância para estratégias onde ambições de circularidade variam de alta a baixa (R0 a R8). Desse modo, a inovação tecnológica radical desempenha um papel

importante em estratégias de circularidade menos ambiciosas (mais próximas de R8) e é menos relevante em estratégias de circularidade mais ambiciosas (mais próximas de R0). Com isso, as estratégias mais próximas de R0 estão mais próximas de modelos circulares, devido ao uso e fabricação mais inteligentes de produtos, de maneira que as estratégias próximas de R8 e R9 são caracterizadas pela aplicação útil de materiais, ficando mais próxima de modelos lineares, conforme apresentado no Quadro 1.

2.1.2.1 Incentivadores da economia circular

Os principais incentivadores da implementação da EC são órgãos legislativos, organizações não governamentais e empresas de consultoria (KALMYKOVA *et al.*, 2018). Por outro lado, a China tem demonstrado ser um país proativo no tocante a promoção da EC, por meio de promulgação de lei desde janeiro de 2009. Entretanto, mesmo que passados mais de 10 anos, a China ainda não obteve o desempenho que inicialmente se esperava para EC (HU *et al.*, 2018).

Na promoção da EC, os governos exercem um papel importante, por meio da criação de subsídios e incentivos fiscais. Entretanto os objetivos governamentais precisam estar bem definidos, de tal modo que permita alcançar metas de curto e longo prazo. Desse modo, a falta de uma estrutura bem definida para suportar a indústria e a comunidade não permite alcançar as iniciativas da EC (WINANS *et al.*, 2017).

Os principais desafios a serem superados para implementação da EC estão ligados ao panorama legislativo e político, limitações socioculturais, cultura corporativa, codependência entre empresas (PHAM *et al.*, 2019). Outros desafios como restrição a troca de informações, falta de regulamentação, incentivo e infraestrutura necessária para troca de recursos, além de limitação geográfica da indústria aos recursos podem limitar as iniciativas da EC (WINANS *et al.*, 2017).

2.1.3 Relação entre Indústria 4.0 e Economia circular

No estudo desenvolvido por Pham *et al.* (2019) é verificado que a I4.0 poderia prover ganhos para implementação do modelo da EC. Entretanto, vale salientar que cada empresa possui necessidades e características próprias, por isso cada caso precisa ser tratado individualmente. As empresas precisam ter como foco a modernização e digitalização de seus

sistemas produtivos, produtos e serviços, diante da crescente evolução tecnológica (OZTEMEL; GURSEV, 2020).

De acordo com Pham *et al.* (2019) o investimento dos governos em infraestrutura das tecnologias da I4.0 como um facilitador da EC é um importante passo para quebra de paradigma. Nesse contexto, Abdul-Hamid *et al.* (2020) defendem que a criação de políticas de incentivo para I4.0 podem impulsionar a EC. Assim, a criação de parceria entre acadêmicos, indústria e governos poderia impulsionar a implementação da digitalização da indústria, de maneira a alcançar ganhos econômicos, sociais e ambientais.

2.1.4 Processo de produção de celulose e papel

O papel consiste em fibras celulósicas aglomeradas em diferentes tamanhos e entrelaçadas entre si. A resistência mecânica do papel depende da combinação tamanho, resistência individual da fibra e como elas estão dispostas. As fibras são classificadas conforme tamanho, sendo longa (2mm a 5 mm de comprimento) e curta (0,5mm a 1,5 mm de comprimento). Com isso, a celulose de fibra longa tem maior resistência mecânica aos papéis e são utilizadas na fabricação de embalagem de alta resistência, como na fabricação de sacos de cimento. No caso da celulose de fibra curta, a vantagem está na fabricação dos papéis de imprimir e escrever (100% de fibra curta), uma vez que a opacidade é a característica mais importante que a resistência mecânica das celulose fibra longa (ROBERT, 2007).

O processo de produção de papel ocorre em três etapas, sendo inicialmente a conversão de matéria-prima fibrosa em celulose, em seguida o branqueamento da celulose e finalmente a celulose sendo convertida em papel (MBOOWA, 2021). Por isso, a fabricação de papel é uma tecnologia multidisciplinar que tem evoluído consideravelmente e apresentado avanços importantes ao longo dos anos (GULLICHSEN; PAULAPURO, 2000). Os aprimoramentos tecnológicos foram acompanhados de experimentos ao longo tempo, que utilizaram a madeira como fonte de fibras para a fabricação de celulose, em substituição a pedaços de tecidos e palhas de cereais como fontes de fibras (CAMPOS; FOELKEL, 2016). Desse modo, para a produção da celulose e do papel são utilizadas fibras celulósicas e outros materiais vegetais, sendo que em grande parte a madeira é a principal fonte de fibras. Porém, alguns tipos de papéis podem ser produzidos com trapos, linho, fiapos de algodão e bagaço da cana-de-açúcar. Vale ressaltar que o papel usado e reciclado, após processo de purificação, pode ser misturado a fibras virgens para produção de papel (BAJPAI, 2018).

A celulose da madeira é tida como a principal matéria-prima para a produção de papel, porque na composição da madeira, a celulose representa aproximadamente 50% do peso seco, além da lignina, hemicelulose e extrativos (BAJPAI, 2018), o que possibilita produzir vários produtos diferentes (EK *et al.*, 2009). Em razão disso, para produzir celulose a madeira precisa passar pelo processo de polpação, para remover a maior parte da lignina por degradação das moléculas e liberar as fibras celulósicas da madeira (EK *et al.*, 2009). Como a lignina é um produto químico orgânico, ela pode ser uma matéria-prima de grande valor para a produção de novos produtos químicos, além de a sua queima ser comum para a geração de energia utilizada nas fabricas de papel e celulose (BAJPAI, 2018).

Tabela 1: Principais processos de polpação de madeira

Processo de Polpação	Tratamento Químico	Tratamento Mecânico	T (°C)	MP	T (h)	RC (%)
Processo Mecânico						
SGW	n.a.	Grinder	130 – 180	S	n.a.	93–95
PGW	Vapor	Grinder	105 – 125	S	n.a.	93–95
RMP	n.a.	Refinador de disco		S	n.a.	93–95
TMP	Vapor	Refinador de disco	110 - 130	S	n.a.	80–90
CTMP	Vapor + Na ₂ SO ₃ , NaOH	Refinador de disco	120 - 130	S/H	n.a.	80–90
CMP	Na ₂ SO ₃ , NaOH	Refinador de disco	150 - 170	S/H	n.a.	80–90
Processos Semimecânicos						
NSSC	Na ₂ SO ₃ e Na ₂ CO ₃ ou NaHCO ₃	Refinador de disco	160 - 185	H	0,5 - 3	70 - 85
GLSC	Na ₂ SO ₃ e Na ₂ CO ₃	Refinador de disco		H		70 - 85
Non-sulfur	NaOH e Na ₂ CO ₃	Refinador de disco		H		70 - 85
Processos Químicos						
Soda	NaOH	n.a.	170 - 175	H		40 - 50
Soda-antraquinona	NaOH e anthraquinone	n.a.		H		45 - 55
Soda-oxigênio	NaOH e oxygen	n.a.		H		45 - 55
Sulfito ou bissulfito	Ca(HSO ₃) ₂ , NaHSO ₃ , NH ₄ HSO ₃ ou Mg(HSO ₃) ₂ e H ₂ SO ₄	n.a.	120 - 150	S/H	6 - 8	45 - 55
Kraft	NaOH E Na ₂ S	n.a.	170 - 175	S/H	2 - 5	45 - 55

H = madeira dura; S = madeira macia; na = não aplicado;

RC (%) = Rendimento da Celulose (%)

T (h) = Tempo de cozimento (h)

MP = Madeira com matéria-prima

Fonte: Adaptado de Baucher *et al.* (2003).

A polpação é feita usando enzimas biológicas, energia mecânica e/ou produtos químicos, onde a escolha do tipo de processo de polpação leva em consideração o rendimento das fibras (MBOOWA, 2021), considerando que a fibra de quase qualquer planta ou árvore

pode ser usada para papel (BAJPAI, 2018). Dessa forma, os processos de polpação são divididos em processo mecânica de polpação, processo semimecânicos de polpação, processo química de polpação (BAUCHER *et al.*, 2003). A Tabela 1 apresenta os principais processos de polpação de madeira.

Os principais processos de polpação da madeira apresentados na Tabela 1 são descritos a seguir:

➤ **Processos mecânicos de polpação**

- *Stone groundwood* (SGW) – é a formação de pastas mecânicas por polpação de toras madeira moída, também chamado de refino de cavacos (EK *et al.*, 2009);
- *Pressure groundwood* (PGW) – é caracterizado pela trituração da madeira sob pressão, onde o triturador é pressurizado com vapor e a madeira é aquecida e amolecida antes da trituração. Nesse processo, a temperatura de contato é maior entre a tora de madeira e o triturador, aumentando a separação das fibras e resultando em uma fibra com resistência mecânica superior ao processo SGW (BAUCHER *et al.*, 2003);
- *Refiner mechanical* (RMP) – é o processo do refinador de pasta mecânica realizado com discos metálicos rotativos dotados de barras e ranhuras, que separam as fibras da madeira. Os discos atuam comprimindo e expandindo sobre a madeira em ciclos repetitivos e quando utilizado água, os ciclos geram vapor e facilita o rompimento da fibra da madeira (BAUCHER *et al.*, 2003). Esse processo tem sido melhorado com a inclusão de pré-tratamentos térmicos e químicos de polpação (MBOOWA, 2021);
- *Thermomechanical* (TMP) – o processo de polpação termomecânico consiste na pré-vaporação dos cavacos de madeira antes de dois estágios de refino. O primeiro estágio é o desfibramento e ocorre em temperatura e pressão elevadas e o segundo estágio de refinação ocorre em temperatura ambiente, sob pressão atmosférica ou elevada (BAUCHER *et al.*, 2003);
- *Chemithermomechanical* (CTMP) – no processo de polpação quimio-termomecânica a madeira é impregnada com sulfito de sódio aquoso a temperatura elevada, para liberação mais seletiva de fibras inteiras (EK *et al.*, 2009);
- *Chemimechanical* (CMP) – no processo de polpação químico-mecânico a refinação ocorre com uma carga maior de sulfato de sódio, mas sem a adição de vapor (EK *et al.*, 2009);

➤ **Processos semimecânicos de polpação**

- *Neutral sulfite* (NSSC) – polpação semiquímica com sulfito neutro é o processo de polpação semiquímica/semimecânica mais utilizado, utilizando refinador de disco para o tratamento mecânico (BAJPAI, 2018). O processo é realizado em três etapas sendo inicialmente os cavacos de madeira embebidos com licor de cozimento de sulfito de sódio, posteriormente o cozimento dos cavacos e finalmente a desfibração com refinador (CAVE; FATEHI, 2015);
- *Green liquor* (GLSC) – polpação semiquímica com sulfito de sódio e carbonato de sódio a frio, utilizando refinador de disco para o tratamento mecânico (BAUCHER *et al.*, 2003);
- *Non-sulfur* – polpação semiquímica com hidróxido de sódio (soda caustica) a frio, utilizando refinador de disco para o tratamento mecânico (BAUCHER *et al.*, 2003);

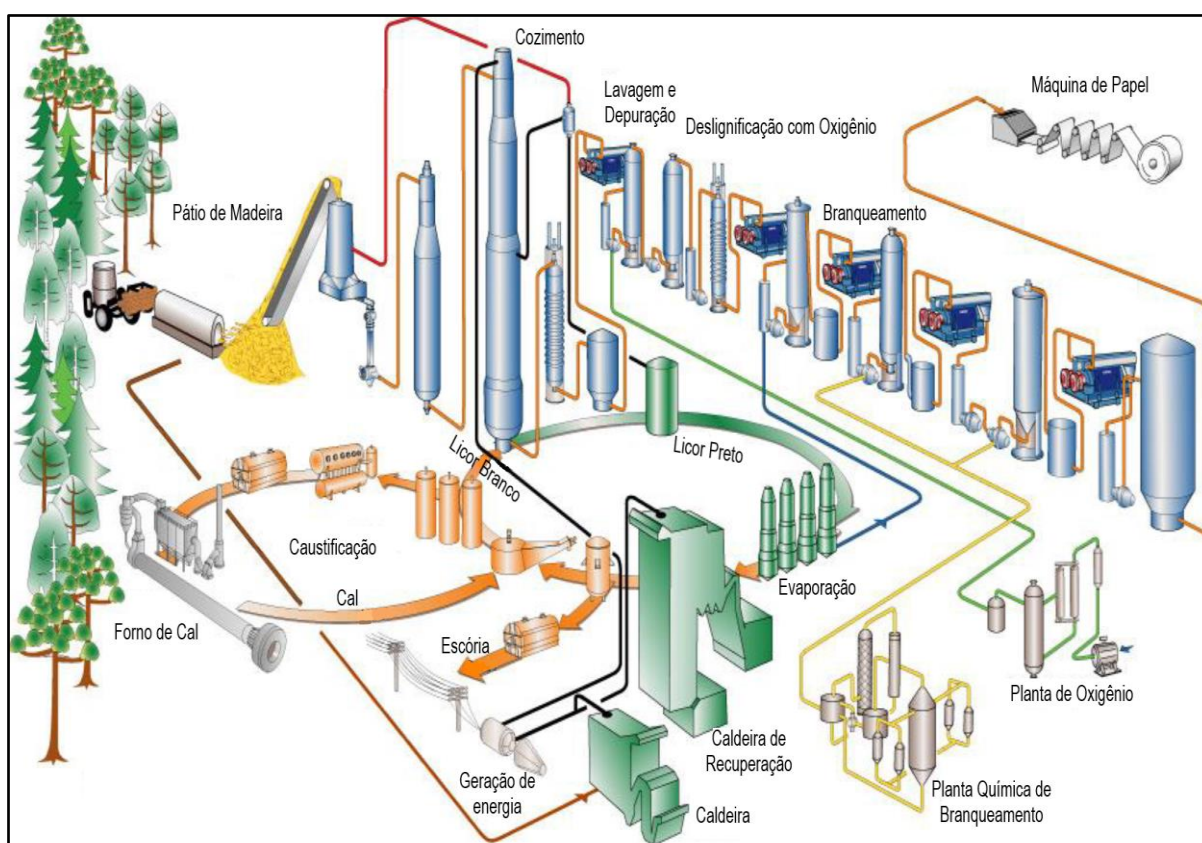
➤ **Processos químicos de polpação**

- Soda – a principal característica desse processo é a utilização do hidróxido de sódio como agente de remoção da lignina no licor de polpação, uma vez que a lignina da madeira se torna solúvel em água pela ação dos agentes químicos (EK *et al.*, 2009);
- Soda-antraquinona – a polpação por soda-antraquinona tem rendimento melhor que a polpação Kraft. Esse processo consiste na adição de uma quantidade pequena de antraquinona à soda, atuando como aditivo de polpação para melhorar a remoção da lignina remanescente do processo (EK *et al.*, 2009);
- Soda-oxigênio – a polpação soda-oxigênio tem maior vantagem em relação aos processos soda-antraquinona e soda, por oferecer maior praticidade para o tratamento da sílica retida na polpa resultante das polpações não-madeirada (TUTUŞ; EROĞLU, 2003);
- Sulfito ou bissulfito – nos processos químicos de polpação, o processo de polpação sulfito é caracterizado pelo cozimento dos cavacos de madeira submetidos a alta temperatura e pressão em um digestor, com o uso de uma solução líquida composta dióxido de enxofre e bissulfito de cálcio, sódio, magnésio ou amônio (MBOOWA, 2021);
- Kraft – a polpação Kraft é o processo mais utilizado para a produção de celulose entre os processos químicos de polpação (BRÄNNVALL, 2009), porque quase todos os tipos de madeira podem ser transformados em polpa, além da possibilidade de recuperação dos químicos e de geração de energia para alimentar o próprio processo (CAMPOS; FOELKEL, 2016). Desse modo, a polpação Kraft ocorre em duas linhas

nas fábricas de celulose, sendo uma linha de fibras que transforma a metade dos cavacos de madeira em celulose, e a linha de recuperação química que usa a outra metade dos cavacos para geração de eletricidade e calor (vapor) (MBOOWA, 2021). Assim, a polpação Kraft combina muitas operações e vários equipamentos e inicialmente as toras de madeira são descascadas e trituradas. Depois os cavacos triturados são submetidos a cozimento à 170 °C no digestor com licor branco em ambiente alcalino, para remoção da lignina e liberação de fibras (ANDERSSON, 2014). A Figura 2 mostra o fluxo do processo da polpação Kraft.

Com isso, o principal objetivo da polpação é realizar a mistura da matéria-prima (cavacos de madeira e/ou resíduos de papel) aos aditivos e produtos químicos em proporções de mistura apropriadas, de modo a obter uma massa fibrosa, de acordo com o tipo de produto e especificações pretendidas. A partir da polpação, toda pasta obtida é hidratada e diluída em água, para entrar na máquina de papel (TSAI *et al.*, 2018).

Figura 2: Fluxo da polpação Kraft.

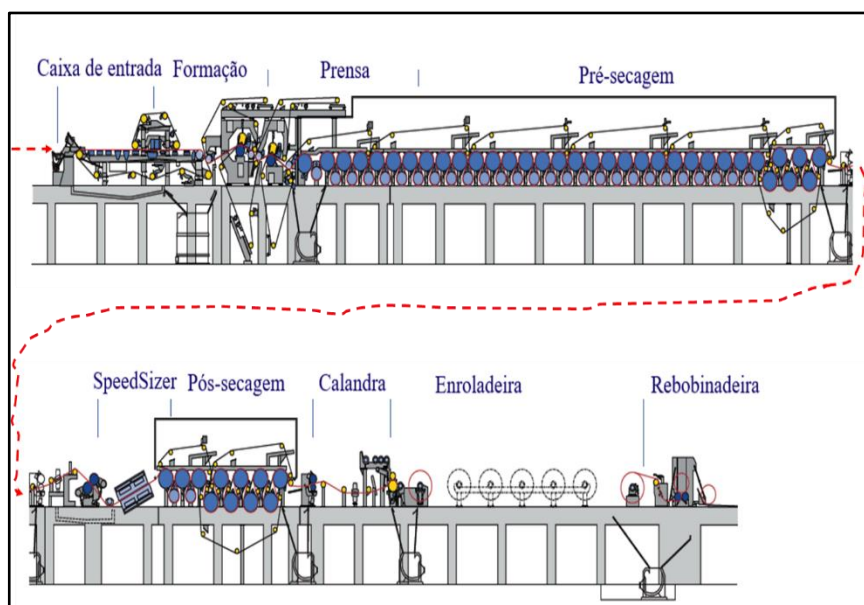


Fonte: Adaptado de Andersson (2014).

A máquina de fabricação de papel do tipo Fourdrinier é constituída por três seções principais, sendo: a seção de formação, a seção de prensagem e a seção de secagem. Dessa forma, o fluxo de produção de papel é iniciado na caixa de entrada da máquina, onde a pasta diluída com cerca de 0,5–1,0% de fibra é bombeada para o sistema da máquina (BAJPAI, 2015). Posteriormente, as fibras são dispersas sobre uma malha metálica, transformando em fibras longitudinais e transversais para entrar na máquina, sendo essas fibras com 99 - 99,5% de umidade aderem ao feltro. A maior parte da umidade é removida na seção da prensa, devido ação de rolos de pressão (TSAI *et al.*, 2018). Como trata-se de processo contínuo de produção, ao sair da seção da prensa, a folha de papel entra na seção da secagem, sendo exposta a cilindros secadores pressurizados com vapor quente no interior. Essa etapa o papel já sai com baixo nível de umidade, o que possibilita passar por processos de acabamento superficial, sendo revestimento ou colagem, dependendo do papel (EK *et al.*, 2009).

Em seguida, uma prensa de colagem (*size press*, SpeedSizer) pode ser usada para a aplicação de amido e revestimento em todas as aplicações de papel (TWOGETHER, 2008), podendo aplicar até 1,5 g/m² de amido ou até 5 g/m² de pigmentação de cor por lado da folha (TWOGETHER, 2011). Assim, o papel com o revestimento passa pela fase de pós-secagem com aquecimento constante, para seguir à calandragem (enroladeira), de modo a atingir a condição de utilização e concluir o processo de fabricação sendo enrolado em bobinas (TSAI *et al.*, 2018). A Figura 3 apresenta o layout típico da máquina de papel do tipo Fourdrinier.

Figura 3: Layout da máquina de papel do tipo Fourdrinier.



Fonte: Adaptado de Twogether (2011)

A fabricação de papel atualmente tem utilizado por volta de 50% de matéria-prima reciclada que normalmente passa por processo de polpação mecânica. Dessa maneira, o processo de preparação de massa objetiva transformar as diferentes matérias-primas, virgem e/ou reciclada, em pasta viável para produção de papel (BAJPAI, 2015). A Figura 4 apresenta as partes principais de uma máquina de produção de papel para embalagem, com uso de matéria-prima reciclada. Essas partes incluem a chegada da matéria-prima reciclada, unidade de preparação de massa (*stock preparation*), formação, prensa, secagem e calandragem.

Figura 4: Principais partes da máquina para produção de papel embalagem.



Fonte: Adaptado de VOITH Papermaking (2023)

2.1.5 Tipos de papel

Em geral, o papel é usado como meio de comunicação, para apresentar informações de texto e imagens, mesmo com a evolução tecnológica e de dispositivos eletrônicos de

informação (EK *et al.*, 2009). Dessa forma, aprimoramentos de materiais continuam em desenvolvimento em máquinas que produzem escrita e impressão, papéis finos e cartões, e em máquinas que fabricam papéis tissue e papéis finos para impressão (BAJPAI, 2018). No Quadro 2 são apresentados os principais tipos de papeis e suas características.

Quadro 2: Tipos de papel e suas características.

Qualidades de Papel	Características e atributos
Papel sulfite / papel comum (<i>Bond paper</i>)	Tem características de boa rigidez, durabilidade para manuseio, resistência à penetração e espalhamento da tinta, cor brilhante e limpeza. É usado para aplicações diversas de impressão como para papel timbrado, impressos publicitários, documentos legais, moeda
Papel de livro (<i>Book paper</i>)	Na maior parte os papeis de livro são produzidos de várias combinações de polpa química de madeira, resíduos de madeira moída, de cola, cargas e corantes. Por isso tem custo baixo, sendo aplicado para livros, catálogos, e outros materiais usando gravuras de linha. Também tem os papeis livro revestidos e produzidos para criar superfícies adequadas para a impressão de meios-tons de tela fina, sendo lisos, receptivo a tintas de impressão, com alto brilho capaz de dobrar sem danificar. O papel bíblico está incluso nessa qualidade e contém fibras longas e agentes de ligação artificiais para manter a resistência. Têm folhas leves, finas, fortes e opacas para livros como bíblias, dicionários e enciclopédias. Os papéis da Bíblia são pigmentados (carregados) com pigmentos como dióxido de titânio e sulfato de bário
Bristol	O papel Bristol faz parte de tipos de papéis rígidos e pesados com espessuras que variam de 0,15 mm em diante, sendo produzidos com combinações de polpa de madeira e química. Têm sido usados para cartões perfurados de máquinas de classificação.
Papéis de madeira e papel de jornal	Papéis de jornal são produzidos com variações de polpa de madeira moída com pequenas proporções de polpa de madeira química para resistência e durabilidade. Aplicados revistas, livros encadernados, catálogos, impressos comerciais de grandes quantidades. Papéis de madeira são volumosos, não possuem alta alvura e tendem a amarelar quando expostas à luz e após longo envelhecimento.
Embalagens Kraft (<i>Kraft wrapping</i>)	Tipo de papel pesado, usado para sacolas de papel e é um dos mais utilizados do que todos os outros papéis de embrulho combinados. É composto por polpa de madeira não branqueada. Possuem boa resistência à tração e ao rasgo, por isso são usados no embrulho de materiais úmidos, e embalagem de materiais a granel.
Papel cartão (<i>Paperboards</i>)	Tipo de papel de espessura com mais de 0,30 mm e feitos de polpa de madeira, palha, papel usado ou uma combinação desses materiais. Existem três tipos principais de papel cartão: (1) papelão, usado para produtos como papelão, bandejas, pratos e caixas de papelão, (2) papelão para embalagens, para a fabricação de contêineres de papelão ondulado e fibra sólida, e (3) especialidades de papel cartão, incluindo itens como papelão para encadernação e placas para construção.
Papéis sanitários (<i>Sanitary Papers</i>)	Papéis higiênicos, toalhas, lenços faciais e guardanapos, sendo produzidos de várias proporções de sulfito e polpas <i>kraft</i> branqueadas com pouco refino para preservar uma folha macia e absorvente. Devido à textura macia e volumosa dos papéis higiênicos, eles tem baixa resistência mecânica e de exposição à umidade durante o uso.

Fonte: Adaptado de Encyclopedia Britannica (2023).

No Quadro 3 são apresentados os tipos de polpação, a matéria-prima virgem utilizada e as possibilidades de produtos obtidos.

Quadro 3: Relação entre produtos obtidos e processo de polpação.

Tipo de polpação	Matéria-prima	Produto final
Polpação mecânica		
Pedra de chão	madeiras macias	Papel corrugado
Refinador mecânico (RMP)	madeiras macias	Papéis de impressão de papel de jornal e madeira de base
Termomecânica (TMP)	madeiras macias	Papéis de impressão de papel de jornal e madeira de base
Química-mecânica (CTMP)	madeiras macias	Papel de jornal, papéis finos
Polpação semiquímica		
Processo cáustico a frio	madeiras macias e madeiras duras	Papéis de impressão de papel de jornal e madeira de base
Processo de sulfito neutro	madeiras duras	Papéis de impressão de papel de jornal e madeira de base
Polpação química		
Polpa de sulfito	madeiras macias e madeiras duras	Papéis finos e de impressão
Polpa Kraft Sulfato	madeiras macias e madeiras duras	Papéis branqueados para imprimir e escrever, papelão, papéis de embalagem pesados não branqueados, papelão
Polpa solúvel	madeiras macias e madeiras duras	Viscose rayon, celofane, fibras de acetato e filme

Fonte: Adaptado de Bajpai (2015).

2.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

De acordo com Favoreto *et al.* (2014) o levantamento bibliométrico auxilia na contagem e refinamento das pesquisas existentes, para viabilizar a descrição do estado da arte do núcleo temático e teórico do trabalho científico em desenvolvimento, facilitando a identificação de lacunas de pesquisa.

Com isso, de acordo com os critérios de escolhas das palavras-chave e os procedimentos para revisão bibliométrica e sistemática estabelecidos no Capítulo 3, foram identificados inicialmente 363 registros nas bases de dados. Posteriormente, 31 novos artigos foram incluídos na fase de identificação, totalizando 394 artigos. As quantidades de artigos variam por conjunto de palavras-chave, conforme o retorno do mecanismo de busca para existência de estudos, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Artigos por conjunto de palavras chaves

nº	Idioma	Palavra 1	Palavra 2	Palavra 3	Quantidade de artigos
1	Inglês	"circular economy"	"industry 4.0"	"paper industry"	1
2	Inglês	"circular economy"	"industry 4.0"	"paper mill"	0
3	Inglês	"circular economy"	"industry 4.0"	"pulp"	1
4	Inglês	"circular economy"	"big data"	"pulp"	1
5	Inglês	"circular economy"	"Internet of Things"	"pulp"	1
6	Inglês	"industry 4.0"	"paper industry"		11
7	Inglês	"industry 4.0"	"paper mill"		4
8	Inglês	"industry 4.0"	"pulp"		12
9	Inglês	"big data"	"paper industry"		10
10	Inglês	"Augmented Reality"	"paper industry"		1
11	Inglês	"Additive Manufacturing"	"paper industry"		1
12	Inglês	"Cloud computing"	"paper industry"		6
13	Inglês	"Cyber security"	"paper industry"		1
14	Inglês	"Internet of Things"	"paper industry"		9
15	Inglês	"Systems integration"	"paper industry"		7
16	Inglês	"Machine learning"	"paper industry"		12
17	Inglês	"IoT"	"paper industry"		4
18	Inglês	"RFID"	"paper industry"		25
19	Inglês	"big data"	"paper mill"		4
20	Inglês	"Cloud computing"	"paper mill"		1
21	Inglês	"Cyber security"	"paper mill"		1
22	Inglês	"Internet of Things"	"paper mill"		1
23	Inglês	"Systems integration"	"paper mill"		8
24	Inglês	"Machine learning"	"paper mill"		11
25	Inglês	"RFID"	"paper mill"		6
26	Inglês	"big data"	"pulp"		20
27	Inglês	"Augmented Reality"	"pulp"		1
28	Inglês	"Additive Manufacturing"	"pulp"		18
29	Inglês	"Cloud computing"	"pulp"		7
30	Inglês	"Cyber security"	"pulp"		2
31	Inglês	"Internet of Things"	"pulp"		18
32	Inglês	"Systems integration"	"pulp"		21
33	Inglês	"Machine learning"	"pulp"		90
34	Inglês	"IoT"	"pulp"		10
35	Inglês	"RFID"	"pulp"		37
36	Inglês	"circular economy"	"papermaking"		23
37	Inglês	"industry 4.0"	"papermaking"		5
38	Inglês	"circular economy"	"industry 4.0"	"papermaking"	0
39	Inglês	"circular economy"	"Autonomous Robots"	"papermaking"	0
40	Inglês	"circular economy"	"big data"	"papermaking"	1
41	Inglês	"circular economy"	"Augmented Reality"	"papermaking"	0
42	Inglês	"circular economy"	"Additive Manufacturing"	"papermaking"	0
43	Inglês	"circular economy"	"Cloud computing"	"papermaking"	0
44	Inglês	"circular economy"	"Cyber security"	"papermaking"	0
45	Inglês	"circular economy"	"Internet of Things"	"papermaking"	0
46	Inglês	"circular economy"	"Systems integration"	"papermaking"	0
47	Inglês	"circular economy"	"Machine learning"	"papermaking"	1
48	Inglês	"circular economy"	"IoT"	"papermaking"	0
49	Inglês	"circular economy"	"RFID"	"papermaking"	0
50	Inglês	"circular economy"	"Algorithm"	"papermaking"	1
					394

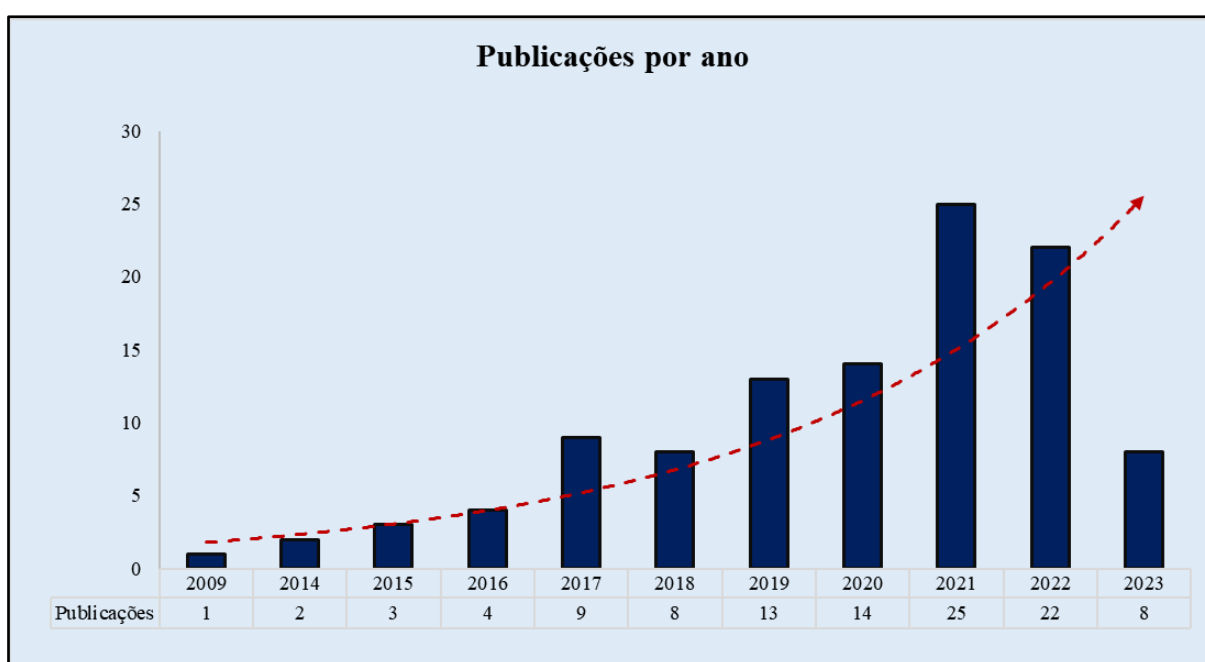
Fonte: Elaborado pelo autor.

A fase de triagem compreendeu duas etapas. A primeira teve como objetivo identificar artigos repetidos, onde após essa etapa restaram 273 trabalhos. Já a segunda etapa considerou a análise dos títulos, resumos, palavras chave, resultados e conclusões para identificar as

pesquisas aderentes ao setor estudado e aderência a investigação pretendida, onde foram obtidos 109 estudos.

A Figura 5 apresenta a evolução das publicações ao longo dos anos para as 109 pesquisas, que abordam tecnologias da I4.0 no setor de celulose e papel. Destaca-se que entre os anos de 2018 e 2023 foram identificadas 90 pesquisas, denotando aumento de interesse para a realização de pesquisas nesse setor, com a abordagem da I4.0. Ressalta-se ainda que o levantamento obtido considerou publicações até o mês de abril de 2023, ou seja, 8 pesquisas nos 4 primeiros meses de 2023.

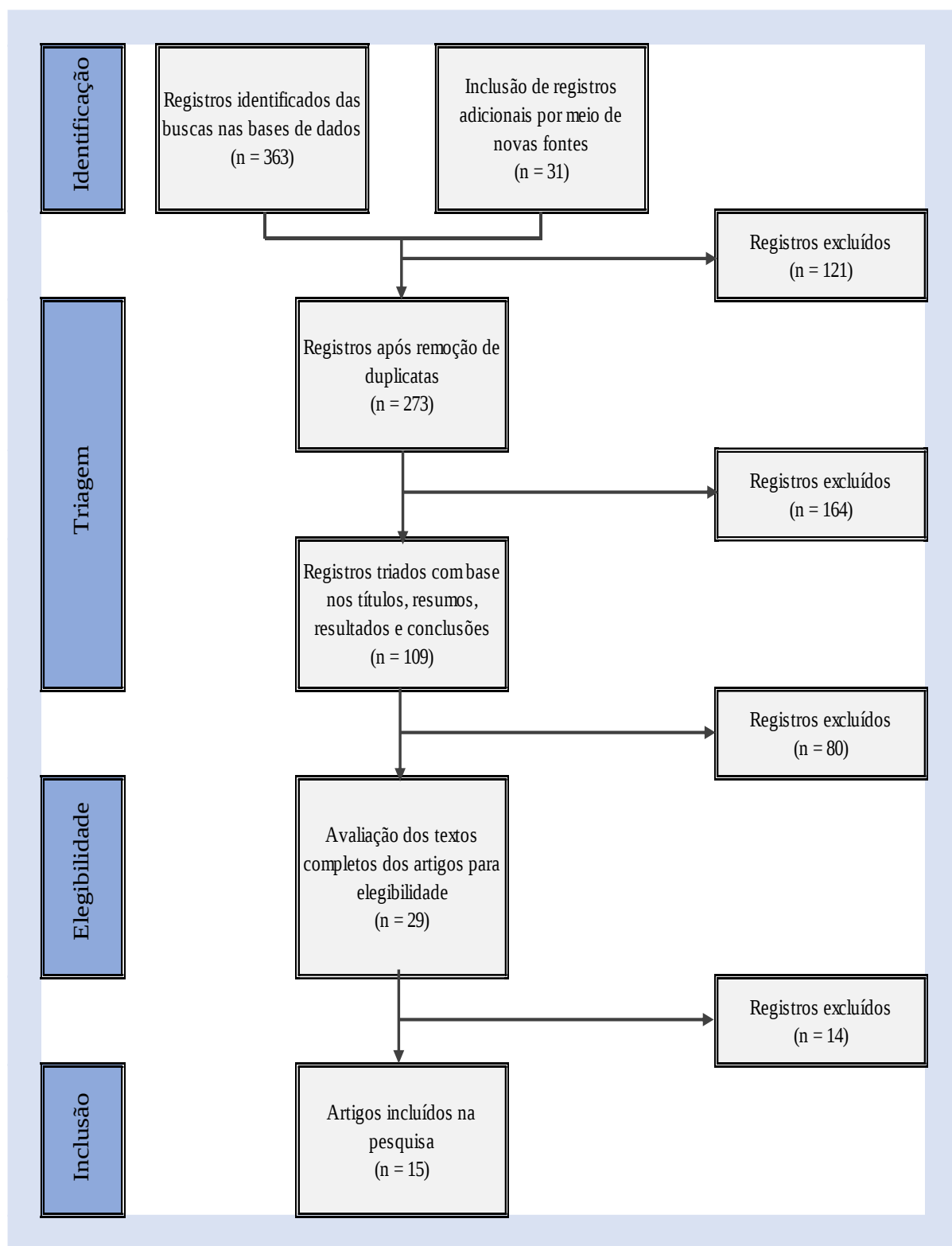
Figura 5: Evolução das publicações ao longo dos anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a conclusão da fase de triagem, foi realizada a análise dos 109 artigos para elegibilidade daqueles mais importantes para o estudo. Com isso, a fase de elegibilidade necessitou de análise cuidadosa, a fim de identificar pesquisas realizadas no setor de celulose e papel que apresentasse relação entre tecnologias da I4.0 e EC. Dessa forma, foram obtidos 29 artigos para compor nova análise para identificação de estudos relacionados a proposta. Assim, foram identificados 15 estudos para inclusão da revisão sistemática da literatura. A Figura 6 ilustra as fases realizadas da aplicação do framework PRISMA Flow Diagram de Moher *et al.* (2009), para realização de revisões sistemáticas e metanálises.

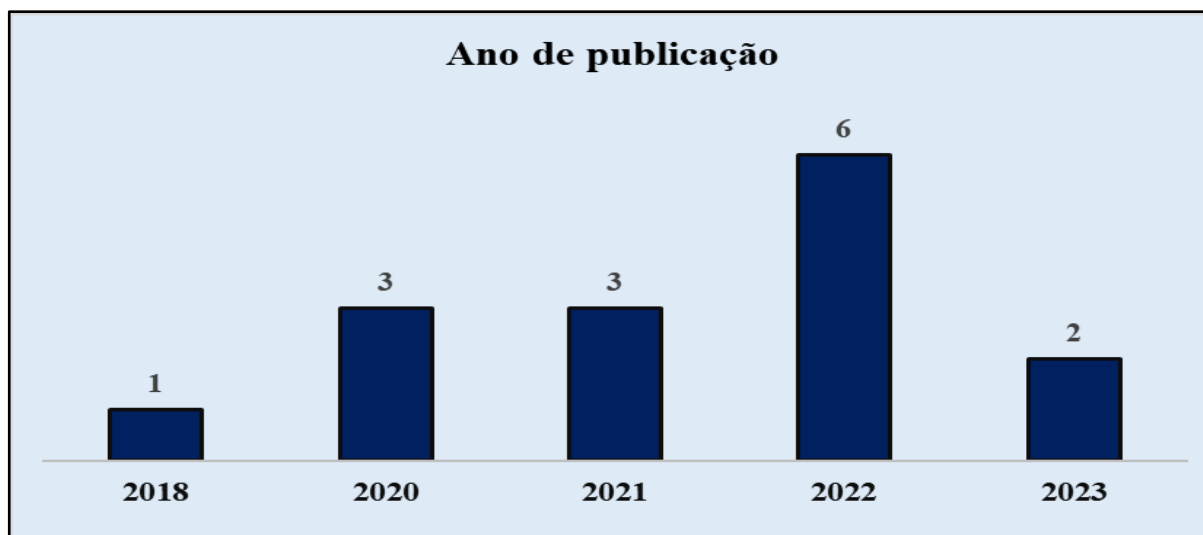
Figura 6: Resultados do processo de inclusão dos artigos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 7 apresenta a distribuição dos quinze artigos publicados ao longo dos anos. No que diz respeito à abordagem, os quinze estudos relacionam as tecnologias da I4.0 e EC no setor de celulose e papel, alcançando o refinamento necessário para identificar lacunas para o desenvolvimento do trabalho.

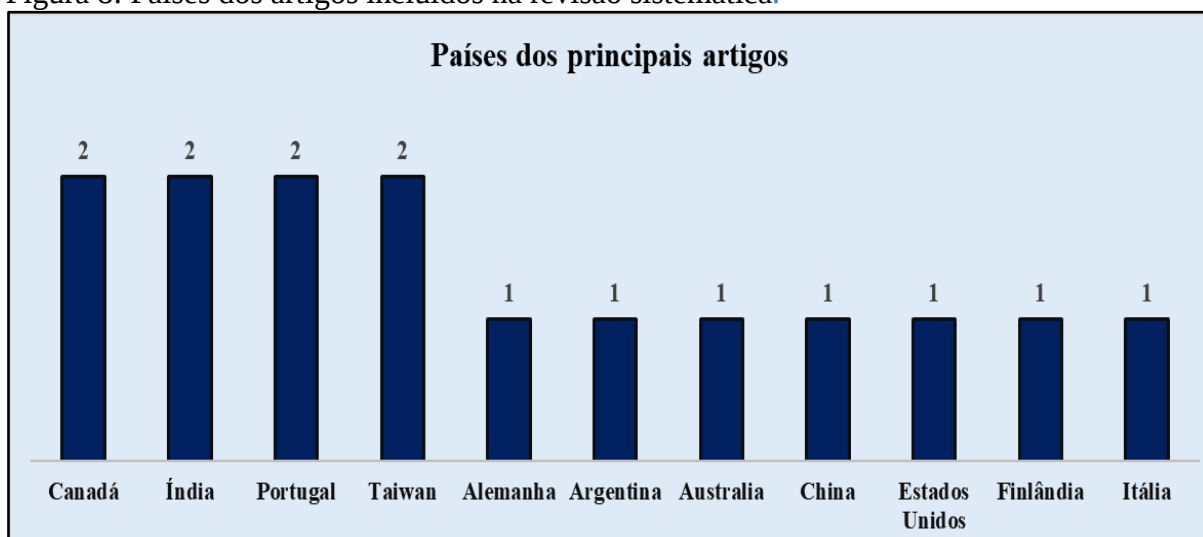
Figura 7: Ano de publicação dos artigos incluídos na revisão sistemática.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os quinze estudos principais foram publicados em onze países diferentes, sendo duas publicações no Canadá, Índia, Portugal e Taiwan, e na Alemanha, Argentina, Austrália, China, Estados Unidos, Finlândia e Itália uma publicação cada, como mostra a Figura 8.

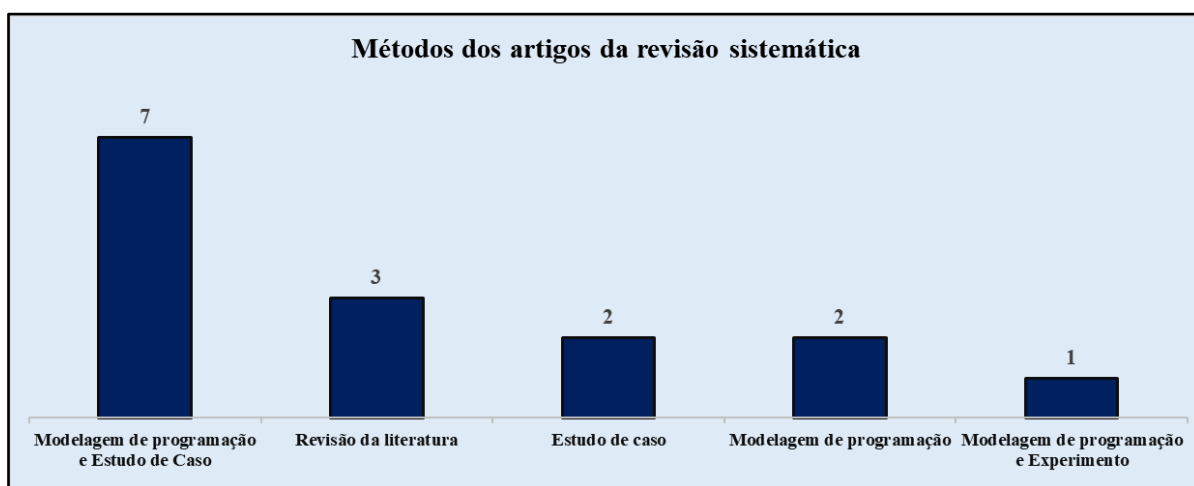
Figura 8: Países dos artigos incluídos na revisão sistemática.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a realização da revisão bibliométrica da literatura também foi possível identificar os métodos de pesquisas utilizados para o desenvolvimento dos principais artigos. Com isso, sete estudos utilizaram modelagem de programação com estudo de caso, três estudos realizaram revisão sistemática da literatura, duas pesquisas utilizaram estudos de caso, modelagem de programação e uma pesquisa realizou modelagem de programação com experimento, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9: Métodos de pesquisa dos artigos incluídos na revisão sistemática.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4: Locais e revistas das publicações incluídas na revisão sistemática.

Trabalhos que relacionam as tecnologias da indústria 4.0 com economia circular no setor de celulose e papel			
Autores	País pesquisado	Método	Revista
Tsai e Lai (2018)	Taiwan	Estudo de caso	Sustainability
Rechtin <i>et al.</i> (2020)	Estados Unidos	Modelagem de programação	TAPPI JOURNAL
El Koujok <i>et al.</i> (2020)	Canadá	Modelagem de programação e estudo de Caso	IEEE
Talebjedi <i>et al.</i> (2020)	Finlândia	Modelagem de programação e estudo de Caso	Energies
Gandolfo e Lupi (2021)	Itália	Estudo de Caso	Business Strategy and the Environment
Zhang <i>et al.</i> (2021)	China	Modelagem de programação e estudo de Caso	Processes
Su <i>et al.</i> (2021)	Taiwan	Modelagem de programação e estudo de Caso	Processes
Vimal <i>et al.</i> (2022)	Índia	Revisão da literatura	Sustainable Production and Consumption
Rodrigues <i>et al.</i> (2022)	Portugal	Modelagem de programação	Energies
Nadim <i>et al.</i> (2022)	Canadá	Modelagem de programação e estudo de Caso	Journal of Intelligent Manufacturing
Schroth <i>et al.</i> (2022)	Alemanha	Modelagem de programação e estudo de Caso	Proceedings
Pennells <i>et al.</i> (2022)	Austrália	Modelagem de programação e experimento	Cellulose
Clauser <i>et al.</i> (2022)	Argentina	Revisão da literatura	BioResources
Cardeal <i>et al.</i> (2023)	Portugal	Modelagem de programação e Estudo de Caso	Computers in Industry
Kumar <i>et al.</i> (2023)	Índia	Revisão da literatura	Journal of Water Process Engineering

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 4 apresenta as quinze pesquisas que relacionam as tecnologias da I4.0 e EC no setor de celulose e papel, no contexto do país onde a pesquisa foi realizada, do método de pesquisa e a revista que foi publicado o estudo.

O Quadro 5 apresenta os trabalhos que relacionam as tecnologias da I4.0 com EC no setor de celulose e papel, no contexto do tipo de produção abordada por cada estudo.

Quadro 5: Tipos de produção dos quinze estudos da revisão sistemática.

Trabalhos que relacionam as tecnologias da indústria 4.0 com economia circular no setor de celulose e papel			
Autores	País pesquisado	Método	Tipo de produção
Tsai e Lai (2018)	Taiwan	Estudo de caso	Produção de papel e celulose
Rechtin <i>et al.</i> (2020)	Estados Unidos	Modelagem de programação	Produção de celulose e papel
El Koujok <i>et al.</i> (2020)	Canadá	Modelagem de programação e estudo de Caso	Produção de papel e celulose
Talebjedi <i>et al.</i> (2020)	Finlândia	Modelagem de programação e estudo de Caso	Produção de celulose
Gandolfo e Lupi (2021)	Itália	Estudo de Caso	Produção de papel Tissue
Zhang <i>et al.</i> (2021)	China	Modelagem de programação e estudo de Caso	Produção de papel Tissue
Su <i>et al.</i> (2021)	Taiwan	Modelagem de programação e estudo de Caso	Produção de papel
Vimal <i>et al.</i> (2022)	India	Revisão da literatura	Produção de celulose e papel, açúcar, bebidas e cimento
Rodrigues <i>et al.</i> (2022)	Portugal	Modelagem de programação	Produção de papel e Celulose
Nadim <i>et al.</i> (2022)	Canadá	Modelagem de programação e estudo de Caso	Produção de papel e Celulose
Schroth <i>et al.</i> (2022)	Alemanha	Modelagem de programação e estudo de Caso	Produção de papel
Pennells <i>et al.</i> (2022)	Australia	Modelagem de programação e experimento	Pesquisa e desenvolvimento para produção de papel e celulose
Clauser <i>et al.</i> (2022)	Argentina	Revisão da literatura	Produção de celulose e papel, alimentos, açúcar e energia
Cardeal <i>et al.</i> (2023)	Portugal	Modelagem de programação e Estudo de Caso	Produção de Papel e Celulose
Kumar <i>et al.</i> (2023)	Índia	Revisão da literatura	Produção de Papel

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE TECNOLOGIAS DA I4.0 NO SETOR DE CELULOSE E PAPEL RELACIONADA A EC

Nesta seção é apresentada a revisão sistemática da literatura sobre o relacionamento entre I4.0 e EC no setor de celulose e papel. Nesse contexto, primeiramente é apresentada abordagem geral dos estudos, posteriormente são apresentadas tecnologias da I4.0 identificadas e como elas são empregadas para promoção da EC. Finalmente, os ganhos ambientais, econômicos e sociais identificados nas pesquisas que relacionam tecnologias da I4.0 e EC no setor de celulose e papel. Entretanto, com objetivo de facilitar a compreensão da

revisão sistemática da literatura sobre o relacionamento entre I4.0 e EC no setor de celulose e papel, o Quadro 6 apresenta a abordagem dos estudos, quanto a forma como as tecnologias da I4.0 são apresentadas nos estudos e como influenciam nas práticas de economia circular, para promover ganhos ambientais, econômicos e sociais.

Quadro 6: Relação entre tecnologias da I4.0 e EC no setor de celulose e papel.

Autores / Ano	Abordagem dos estudos	Indústria 4.0			Abordagem					
		Iso	Ger	Aut	Ambiental		Econômico		Social	
		QL	QT	QL	QT	QL	QT	QL	QT	
Tsai e Lai (2018)	Aplicação de modelo com tecnologias de I4.0 na produção de papel para embalagens, para planejar a produção ótima de produtos ABC.		X			X		X		X
El koujok <i>et al.</i> (2020)	Desenvolvimento de ferramenta de diagnóstico de falhas usando aprendizado de máquina, inteligência artificial para detecção de falhas no sistema de reboiler e auxiliar a recuperação de calor.			X	X		X			
Rechtin <i>et al.</i> (2020)	Fases de desenvolvimento de modelo preditivo para reduzir o uso desnecessário de fibras de celulose e produtos químicos.			X		X		X		
Talebjadi <i>et al.</i> (2020)	Proposta de uso de métodos de inteligência artificial, para simular a carga elétrica do motor e da geração de vapor na polpação termomecânica e recuperar energia térmica.	X				X				
Gandolfo e Lupi (2021)	Uso de tecnologias da I4.0 para aprimorar as práticas de EC.		X			X		X		X
Su <i>et al.</i> (2021)	Proposta de uso de algoritmo de inteligência artificial, para indicar o volume econômico de produção e estoque usando matéria-prima secundária.	X				X		X		
Zhang <i>et al.</i> (2021)	Proposta de modelo baseado em aprendizado de máquina, inteligência artificial, redes neurais para auxiliar no planejamento de consumo energético.			X	X		X			
Clauser <i>et al.</i> (2022)	Investigação das contribuições das ferramentas da I4.0 em projetos de biorrefinarias.			X	X		X			
Nadim <i>et al.</i> (2022)	Proposta de modelo baseado em análise de big data, aprendizado de máquina aplicado em uma caldeira de recuperação de licor negro, utilizada para restaurar produtos químicos do processo.			X	X		X			X
Pennells <i>et al.</i> (2022)	Proposta de uso de métodos de aprendizagem de máquina, para prever a qualidade das nanofibras de celulose, para desenvolvimento de materiais renováveis.	X			X					
Rodrigues <i>et al.</i> (2022)	Teste de algoritmo de inteligência artificial para prever valores de sensores da seção da prensa e reduzir desperdícios de energia elétrica.	X			X		X			
Schroth <i>et al.</i> (2022)	Proposta de modelo de inteligência artificial, análise de big data, aprendizado de máquina para auxiliar o operador na tomada de decisão de ajustes de doses de insumos.			X		X	X			
Vimal <i>et al.</i> (2022)	Identificação de drivers da adoção de I4.0 em uma rede de compartilhamento circular.		X		X		X			
Cardeal <i>et al.</i> (2023)	Proposta de uso de algoritmo de inteligência artificial, para identificação de peças de reposição com potencial de produção por manufatura aditiva.	X				X		X		X
Kumar <i>et al.</i> (2023)	Aplicações de inteligência artificial, aprendizado de máquina, internet das coisas para gestão do tratamento de águas residuais de fábricas de papel.	X			X		X			
Legenda: QL = Qualitativo QT = Quantitativo Iso = Tecnologia Isolada Ger = Abordagem generalista da tecnologia Aut = Sistema Autônomo										

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.1 Abordagem geral da indústria 4.0 no setor de celulose e papel

De acordo com Talebjedi *et al.* (2020) o uso intensivo de energia elétrica vem sendo amplamente discutido em vários setores da produção e no setor de celulose e papel não é diferente. O processo de polpação termomecânica, utilizado na produção de celulose, tem consumo significativo de energia elétrica e por isso a adoção de medidas para o consumo eficiente vem sendo observadas. Com isso, o estudo propôs a utilização de métodos de inteligência artificial, com objetivo de simular a carga elétrica do motor e de geração de vapor do refinador na polpação termomecânica, para cooperar com o consumo eficiente da energia. Para alcançar o objetivo, foi utilizado sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo incorporado com vários algoritmos de otimização evolucionária, a fim de obter a máxima precisão na simulação da quantidade de energia consumida e o vapor produzido. O estudo foi desenvolvido a partir de dados de um refinador de disco de uma fábrica de celulose localizada na Finlândia, no qual a energia térmica gerada pelo vapor durante o processo de refinação é recuperada e conectada à rede de aquecimento distrital. Os resultados apontaram que o teste usando inteligência artificial na polpação termomecânica indicou potencial para melhorar a eficiência energética, otimizando consumo de energia elétrica e quantidade de vapor. Além disso, o modelo poderia ser adotado como estratégia de controle de refino, alcançando oportunidades de redução de emissões e ganhos econômicas.

Su *et al.* (2021) conduziram trabalho com objetivo de desenvolver algoritmo de inteligência artificial para indicar o volume econômico de produção e estoque, com retornos de materiais mistos contendo sucata, para alavancar EC e minimizar custos. Desse modo, o estudo foi feito em uma empresa que produz celulose e papel no Taiwan, considerando: volume de produção-estoque; mudança de processo; produto defeituoso descartado, mas que pode ser convertido em sucata para uso em linha de produção; eficiência do equipamento; produção de itens com materiais mistos contendo sobras de sucata. Dessa forma, o modelo proposto demonstrou eficiência para indicar a quantidade ótima de produção, minimizar custos, reduzir quantidade de resíduos gerados, promover a EC por meio da conversão de papéis defeituosos em matéria-prima secundária.

De modo geral, os equipamentos industriais de processos contínuos funcionam intensamente e a prevenção de falhas vem sendo explorada de diferentes formas, nas várias etapas do processo. O estudo de Rodrigues *et al.* (2022) teve como objetivo prever valores de sensores da seção da prensa em uma fábrica de celulose de Portugal em três diferentes

períodos, considerando 15, 30 e 90 dias para condução de testes de algoritmo de aprendizagem de máquina. Para a construção do algoritmo foram utilizados conjuntos de dados registrados por sensores de corrente elétrica, nível de óleo, pressão, velocidade de rotação, temperatura e torque referentes a 3 anos de produção. O algoritmo foi desenvolvido utilizando a linguagem Python e a rede neural do tipo *multi-layer perceptron* foi a arquitetura implementada usando a biblioteca Python Sklearn. Os resultados mostraram que o método proposto pode realizar previsões do comportamento da máquina em curto, médio e longo prazo, detectando mau funcionamento, para gerar alertas e evitar perdas.

Pennells *et al.* (2022) destacam que estudos para o desenvolvimento de materiais renováveis têm sido conduzidos, a fim de minimizar as emissões, como o caso da nanofibra de celulose para a produção de papel. A nanofibra de celulose já é conhecida comercialmente, porém, sua caracterização ainda é um desafio, por utilizar métodos imprecisos, demorados e que podem influenciar na qualidade do produto final, no caso o nanopapel. Com isso, Pennells *et al.* (2022) voltaram atenção para o desenvolvimento de métodos de análise de morfologia por fibra óptica, como ferramenta on-line, para prever a qualidade das nanofibras. Para isso, experimentos foram conduzidos em laboratório na Austrália, desde a preparação de biomassa e produção de nanofibras, homogeneização de alta pressão, análise da morfologia da fibra, até a realização dos testes de propriedades mecânicas do nanopapel. Os resultados do experimento foram validados por meio de métodos estatísticos, no caso correlação de Pearson, indicando benefícios devido ao uso do dispositivo analisador de morfologia por fibra óptica. Assim, o estudo aponta oportunidade de economia de tempo de fabricação, uma vez que os teste de amostras de nanopapel poderão ser realizados mais rápido, com maior confiabilidade e evitando desperdícios durante a produção.

Cardeal *et al.* (2023) destacam que ferramentas da I4.0 poderiam contribuir para melhorar a disponibilidade de peças de reposição e assim otimizar estoques, identificar oportunidades de novas fontes de fornecimento e gerar ganhos. Com base nisso, foram conduzidos estudos que tratam de oportunidades na cadeia de suprimentos, com o objetivo de propor um modelo que auxilia na identificação de peças de reposição. O modelo proposto se baseia na seleção de peças com potencial de produção a partir da manufatura aditiva, para apoiar a tomada de decisão na gestão de peças de reposição, levando em consideração os benefícios econômicos e ambientais, comparado aos processos convencionais. A aplicação do modelo foi feita em uma indústria de papel e celulose localizada em Portugal, composta por planta de produção de celulose, planta de produção de bobinas de papel e outra planta de corte

de papel de impressão. A peça selecionada para manufatura aditiva necessitou ser reprojetada, a fim de atender as solicitações técnicas de instalação. Os resultados revelam potencial significativo para aplicação do modelo, indicando que a escolha da manufatura aditiva para fabricação peças de reposição pode gerar ganhos econômicos.

Kumar *et al.* (2023) observam que matéria orgânica, nutrientes, lignina e seus derivados são alguns tipos de materiais encontrados em efluentes de fabricas de papel e apresentam valor econômico relevante. Desse modo e tendo em vista a preservação dos recursos hídricos para o desenvolvimento sustentável da indústria, eles investigaram o desempenho e os desafios dos sistemas de tratamento existentes para águas residuais de fábricas de papel. A investigação feita por meio de revisão sistemática da literatura na Índia enfatizou às aplicações das tecnologias da I4.0 para a gestão das águas residuais, sendo que no contexto do tratamento de águas residuais, as tecnologias da I4.0 indicaram contribuições para EC, beneficiando o meio ambiente e o crescimento sustentável da indústria.

Para Tsai *et al.* (2018) a indústria de celulose e papel tem enfrentado pressões, devido aos aspectos ambientais da produção, onde o excesso de capacidade de produção pode aumentar as emissões, agravar os impactos ambientais e econômicos à longo prazo. Nesse contexto, eles conduziram estudo com objetivo de usar a teoria das restrições e programação matemática, incorporando custos do imposto de carbono, com uso de tecnologias de I4.0, para desenvolver modelo de decisão de produtos ABC. O estudo foi desenvolvido no Taiwan em empresa de médio porte e fabrica papel para embalagens de proteção de frutas, frituras e para lojas de departamentos. Os resultados indicam que o modelo para definição do mix ótimo de produção pode melhorar a coleta de dados do controle da produção, resultados econômicos e de emissões de CO₂.

Gandolfo e Lupi (2021) destacam que as empresas que buscam práticas de EC precisam adotar mudanças consistentes, para romper as barreiras do processo de transição, a fim de resolver os efeitos prejudiciais dos padrões lineares. Dessa forma, foi desenvolvido um estudo com objetivo de identificar estratégias, obstáculos e soluções encontradas para transição à um novo modelo de negócios. O estudo foi conduzido em uma empresa produtora de papel tissue na Itália, que tem adotado ferramentas de tecnologia da I4.0 e outras tecnologias para se destacar no mercado de atuação. Assim, os resultados identificados incluem adoção de tecnologias para redução do consumo de recursos naturais e energia, desenvolvimento de tecnologias inovadoras, novas linhas de produtos e estratégias de negócios com reutilização de resíduos.

Uma característica do setor de celulose e papel é a possibilidade de conexão e interação com outros setores. Desse modo, Vimal *et al.* (2022) desenvolveram estudo com o objetivo de criar um modelo, com base na identificação dos fatores (*drivers*) que impulsionam a adoção bem sucedida de tecnologias da I4.0 em uma rede de compartilhamento circular composta por indústria do setor de papel, cimento, açúcar e de bebidas alcoólicas na Índia. Para alcançar o objetivo do trabalho, inicialmente foi feita revisão de literatura para identificar e definir os drivers da adoção de I4.0 na rede de compartilhamento circular. Adicionalmente, um comitê composto por especialistas da indústria e academia suportou o processo de identificação e definição dos drivers. Assim, foram identificados 13 drivers, sendo: Vantagem competitiva; Mudanças no sentido da sustentabilidade; Agilidade; Lucratividade; Tomada de decisão descentralizada; Redução de lead time; Visibilidade; Satisfação do cliente; Transparência; Resiliência; Eficiência e qualidade; Coleta de dados em tempo real; Pressão dos stakeholders. Por meio de modelagem estrutural interpretativa total foi possível identificar a influência e relevância de cada driver, classificando em 6 níveis (VIMAL *et al.*, 2022):

Nível 1: Vantagem competitiva e lucratividade;

Nível 2: Mudanças no sentido da sustentabilidade, redução de lead time, satisfação do cliente e pressão dos stakeholders;

Nível 3: Eficiência e qualidade;

Nível 4: Agilidade e Resiliência;

Nível 5: A tomada de decisão descentralizada, a visibilidade e a transparência;

Nível 6: Coleta de dados em tempo real.

Entre os drivers identificados, a coleta de dados em tempo real é o driver que tem maior potência em uma rede compartilhamento circular, para impulsionar a adoção de sistemas de I4.0, por não ter dependência de outros drivers, enquanto a vantagem competitiva é o que possui maior dependência. Dessa forma, o modelo proposto pode auxiliar as organizações a adotar estratégias de implementação de I4.0 com base nos drivers de maior relevância em rede de compartilhamento circular, ao invés de adotar todos integralmente (VIMAL *et al.*, 2022).

As incertezas em processos contínuos também podem ocasionar desperdícios significantes e afetar a qualidade do produto. Dessa maneira, o estudo de Rehtin *et al.* (2020) teve como objetivo apresentar as fases de desenvolvimento de modelo preditivo voltado ao processo, para garantir a qualidade de acabamento de papel de embalagem. Os dados foram

concedidos por empresa fabricante de papel embalagem dos Estados Unidos. Assim, para construção de modelo preditivo foram seguidas as fases de coleta de dados, levantamento, limpeza e mineração de dados, construção do modelo preditivo inicial, acurácia do modelo preditivo e finalmente, a aplicação de aprendizado de máquina, para atualização constante em tempo real. O trabalho indicou que o modelo preditivo fornece oportunidades de ganhos econômicos, operacionais e ambientais. Além disso, é sugerido enfoque na adoção de inteligência artificial no setor de papel e celulose, uma vez que o setor apresenta falta de motivação para uso de tecnologias digitais (RECHTIN *et al.*, 2020).

As falhas em equipamentos de processos contínuos são tipos de situações anormais, que podem gerar perdas, mas a controle preditivo do processo pode contribuir para evitar prejuízos. Desse modo, El Koujok *et al.* (2020) elaboraram estudo na produção de celulose e papel para desenvolver meios de evitar eventos indesejados. Inclusive, foi proposta ferramenta de diagnóstico de falhas em tempo real, utilizando aprendizado de máquina, com base em dados históricos de produção. Para testar a eficácia da ferramenta proposta, primeiramente foi utilizado o benchmark do Tennessee Eastman Process (TEP - modelo de processo químico industrial proposto por Downs e Vogel (1993) para avaliar controles e monitoramento de processos por meio de simulação). Posteriormente foram utilizados os dados de um trocador de calor (reboiler) de uma fábrica de celulose termomecânica no Canadá, onde ocorriam falhas de válvulas, que causava desperdícios de energia e vapor. As principais contribuições da metodologia proposta foram a possibilidade de detectar e diagnosticar falhas em situações anormais no processo monitorado. Assim, a ferramenta proposta permite aos operadores do processo receber causas de falhas identificadas automaticamente, para tomar ações de reestabelecimento do processo, com base em informações confiáveis, evitando eventos indesejados e desperdícios.

A complexidade de consumo de energia elétrica das máquinas e a carga de trabalho são alguns dos fatores que dificultam a redução do consumo. Com isso, o estudo de Zhang *et al.* (2021) foi desenvolvido com objetivo de construir 3 modelos, com base no consumo de energia elétrica e vapor de uma máquina de papel tissue de uma fábrica na China. Para análise da relação dos parâmetros de processo e consumo de energia elétrica, foram utilizados métodos de regressão linear, rede neural artificial e árvore de aumento de gradiente extremo (XGBoost) por meio da linguagem de programação Python. Os modelos de consumo de energia elétrica e vapor foram combinados e avaliados para determinar o melhor modelo de consumo de energia para a máquina. Os resultados obtidos indicaram que o desenvolvimento

de modelos empíricos de consumo de energia elétrica é viável para a produção de papel, podendo auxiliar na programação de eficiência energética de máquinas de papel tissue, contribuindo para economia de energia e redução de impactos ambientais.

A ocorrência de eventos anormais em processos contínuos afeta a confiabilidade dos equipamentos, gerando prejuízos, algumas vezes irreparáveis, mas que poderiam ser evitados com a adoção de métodos de diagnósticos de causas. Logo, Nadim *et al.* (2022) propuseram modelos causais combinados com a experiência humana, para verificar a influência de determinadas variáveis em uma fábrica de celulose. Um modelo foi desenvolvido com uso de métodos de aprendizagem de máquina, a partir de dados históricos do funcionamento de uma caldeira de recuperação de licor negro de uma fábrica de celulose e papel do Canadá. As caldeiras de recuperação de licor negro têm função de restaurar produtos químicos usados no processo, remover resíduos e subprodutos descartáveis, e queima os componentes orgânicos para produzir vapor. Dessa forma, os dados sensoriais coletados permitem gerar uma metodologia de várias etapas, que integra aprendizado de máquina interpretável, mineração de processos e experiência humana. Os resultados obtidos mostram oportunidades de redução de tempo e esforços de especialista, sem eximir a responsabilidade humana, mas suportando as decisões em tarefas complexas. A consequência esperada com a adoção do modelo proposto é alcançar ganhos nos aspectos econômicos, ambientais, sociais e operacionais.

Schroth *et al.* (2022) observam que o controle de consumo de energia na fabricação de papel é uma tarefa difícil, devido ao intenso consumo na produção, enquanto grandes volumes de dados são gerados pela máquina, mas não são totalmente explorados. Com isso, trabalho com objetivo de construir modelo de inteligência artificial foi proposto a partir dos dados gerados pela máquina de uma fábrica de papel da Alemanha, para auxiliar o operador na tomada de decisão e evitar desperdícios. Os resultados apontam potencial de aplicação, beneficiando as decisões do operador, contribuindo para melhoria da qualidade do produto e do uso de energia, água e outros recursos.

As tecnologias da I4.0 têm contribuído para a evolução de processos industriais, por razão de melhorar equipamentos e controle digital. Paralelamente, os conceitos de EC têm sido adotados como estratégia em sentido ao desenvolvimento sustentável, de tal forma que Clauser *et al.* (2022) investigaram o potencial de contribuições das tecnologias da I4.0 em projetos de biorrefinarias nos aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais. Com isso, foi conduzida pesquisa na Argentina, considerando trabalhos nas áreas florestal, agrícola, alimentícia, farmacêutica, papel e celulose, química, biotecnológica, energética. Os resultados

apontaram que inteligência artificial, aprendizagem de máquina, redes neurais, internet das coisas, análise de big data estão sendo adotados em biorrefinarias. Assim, as tecnologias podem contribuir para aumentar o nível de qualidade nas implementações de biorrefinárias. No que se refere aos aspectos ambientais, inteligência artificial, aprendizagem de máquina, redes neurais podem auxiliar na redução do consumo de energia, cargas ambientais e os riscos operacionais da produção química.

2.3.2 Tecnologias da indústria 4.0 no setor de celulose e papel

O processo de polpação termomecânica exige consumo alto de energia do refinador, além de geração de vapor. Com isso, Talebjedi *et al.* (2020) testaram modelos de inferência neuro-fuzzy adaptativo a partir de métodos de inteligência artificial, com uso de algoritmos evolucionários. Os testes indicaram que uso de ferramentas da I4.0 podem ser empregadas para equilibrar o consumo de energia elétrica do processo de polpação termomecânica e possibilitar melhor aproveitamento do vapor gerado pela refinação.

Su *et al.* (2021) observam que a ocorrência de produção de itens defeituosos em fabricação de papel pode afetar os desempenhos econômicos e ambientais, devido a quantidade de tempo, energia e recursos desperdiçados. Com isso, o desenvolvimento de modelos de inteligência artificial para indicar a quantidade econômica de produção, pode melhorar a taxa de recuperação de produtos defeituosos, para uso como matéria-prima mista.

Rodrigues *et al.* (2022) destacam que as máquinas de fabricação de papel operam continuamente, por isso a busca por ferramentas para melhorar o nível de confiança dos equipamentos vem recebendo atenção. Em virtude disso, algoritmos de aprendizagem de máquina para prever o comportamento da prensa de máquina de papel foram desenvolvidos a partir de dados históricos de instrumentos de medição de corrente elétrica, pressão, temperatura, torque, nível de óleo e velocidade. O algoritmo proposto tem potencial de melhorar a manutenção, por previsões precisas, para evitar paradas inesperadas da produção e diminuir riscos de falha da máquina.

Pennells *et al.* (2022) pontuam que os métodos de caracterização de nanofibra de celulose são desafiadores no campo da pesquisa e desenvolvimento, porque as técnicas diretas e mais precisas envolvem custos altos com equipamentos. Por outro lado, as técnicas indiretas dos tipos; interação fibra-luz, interação fibra-solvente, interação fibra-fibra ou área superficial específica da fibra, embora sejam de simples aplicação, o nível de confiança é menor. Quanto

aos testes mecânicos, que são os mais utilizados, também são precisos, mas despendem maior tempo para caracterização, devido à realização off-line. Nesse caso, experimentos em laboratório foram conduzidos para testar um dispositivo de análise por fibra óptica, com aplicação on-line, para avaliar rapidamente a morfologia da polpa de micro e nanofibra. A modelagem baseada em métodos de aprendizagem de máquina pode ser uma alternativa viável para prever as propriedades mecânicas de nanopapel.

A respeito da aplicação de modelos preditivos, Cardeal *et al.* (2023) destacam as contribuições para confiabilidade do funcionamento da máquina e equipamentos, evitando paradas inesperadas e perdas, melhorando a qualidade do produto. No que se refere a manutenção de estoque de peças de reposição, foram propostos modelos para apoiar o processo de seleção de itens com características de produção a partir da manufatura aditiva. Dessa forma, isso pode ser uma alternativa viável dos pontos de vista técnico, econômico para a fabricação de peças de reposição, indicando que as ferramentas da I4.0 fornecem oportunidades de otimização da cadeia de suprimentos e abrir novas formas de manutenção de estoques do setor de papel e celulose.

As tecnologias da I4.0 podem facilitar a gestão de tratamento de efluentes da fábrica de papel. Com isso, Kumar *et al.* (2023) ressaltam que sistemas de controle de águas residuais de impressão podem ser auxiliados por internet das coisas, computação em nuvem e análise de big data para aumentar a qualidade do tratamento da água. Além disso, ferramentas com base em modelos de aprendizagem de máquina e inteligência artificial podem prever propriedades de biomassa e vestígios de metais em águas residuais.

Tsai *et al.* (2018) desenvolveram um modelo para determinar o melhor mix de produção, planejamento de manutenção e controle de qualidade na produção, em uma empresa fabricante de papel no Taiwan. Com isso, foi visto que o planejamento e controle da produção pode ser auxiliado pelas ferramentas da I4.0, para evitar a produção em excesso e ao mesmo tempo ser flexível. O modelo também foi testado para auxiliar o planejamento de manutenção, a partir de dados coletados do sistema de diagnósticos de vibração nos rolamentos, para aumentar a confiabilidade das paradas preventivas, aumentando a disponibilidade da máquina. Também foi verificada a possibilidade de identificar possíveis anomalias em determinados parâmetros de produção, para fornecer informações ao operador, permitindo ajustes preditivos da qualidade do produto.

Empresas fabricantes de papel têm iniciado transformações importantes na produção, para superar as barreiras ambientais e os desafios existente para mudanças de modelo de

negócio. Nesse contexto, a adoção de tecnologias inovadoras, como I4.0, pode contribuir para o uso otimizado de recursos naturais e energia, reutilização de resíduos (GANDOLFO; LUPI, 2021).

Os estudos desenvolvidos por Vimal *et al.* (2022) se concentraram na identificação e definição dos drivers para implantação da tecnologia da I4.0 em uma rede de compartilhamento circular que inclui o setor de papel e celulose. Os resultados fornecem clareza no processo de decisão para gestores e profissionais responsáveis pela administração de projetos de digitalização, com olhar para estratégias de desenvolvimento sustentável.

Rechtin *et al.* (2020) salientam que alcançar a máxima capacidade de produção e manter os níveis de qualidade do produto estão entre os principais desafios dos produtores de papéis para embalagem, uma vez que a produção ocorre em processo contínuo, mas sofre alterações com o passar do tempo. O processo pode ser impactado por desgaste de peças ou alterações de matéria-prima por exemplo, levando a perda de tempo e de recursos valiosos. Com isso, a adoção de inteligência artificial para modelos preditivos vem sendo discutida no setor de celulose e papel. Como as mudanças de processo ocorrem naturalmente, os modelos preditivos oferecem a vantagem de serem atualizados constantemente, de maneira que os dados históricos sejam sistematicamente renovados. Dessa forma, modelos preditivos podem auxiliar no ajuste de parâmetros de processo, para evitar quebras de folhas de papel, levando as máquinas a produzir dentro dos requisitos de qualidade e reduzir perdas.

El Koujok *et al.* (2020) indicam que uma das principais vantagens das fábricas de papel e celulose é que as máquinas são dotadas de sensores e instrumentos empregados na medição e controle de equipamentos. Com isso, a geração de dados ocorre em altos volumes, para centenas de variáveis, constituindo um patrimônio valioso para empresa. Assim, uma proposta de ferramenta de diagnóstico de falhas em tempo real foi testada em uma fábrica de celulose termomecânica, com o uso de inteligência e métodos de aprendizagem de máquina. A proposta consistiu em proporcionar ao operador, um ambiente operacional confiável e preciso no diagnóstico preditivo de falhas da máquina, com potencial de evitar impactos ambientais, perdas econômicas e de processo.

O consumo de energia elétrica e uso de vapor em máquina de papel tissue é alto e causa preocupação para fabricantes. Em razão disso, Zhang *et al.* (2021) propuseram modelos, considerando análise de dados históricos de consumo de vapor e eletricidade, para aplicação de métodos de aprendizagem de máquina. Assim, o modelo proposto pode auxiliar

no planejamento de consumo energético, permitindo o desenvolvimento de estratégias de otimização de consumo e máximo aproveitamento da energia elétrica e vapor.

Os modelos preditivos são desenvolvidos a partir de dados históricos de instrumentos e tem papel fundamental no processo de digitalização do setor de celulose e papel. A proposta de Nadim *et al.* (2022) oferece uma oportunidade de modelagem, que reúne dados sensoriais coletados, integrando aprendizado de máquina e experiência humana. O diferencial dessa proposta está na investigação da interação dos especialistas com os sistemas de controle de processo, para extrair padrões variáveis das correções feitas pelo o especialista durante a produção. Os resultados destacam o aumento da precisão em uma simulação do processo real, integrando modelo virtual e as experiências do especialista em tempo real. Além do mais, o modelo tem potencial de aprimorar os processos, devido a atualização baseada em dados em tempo real, reduzindo o esforço humano na reconstrução do modelo em processos complexos. Assim, ressalta-se que embora os modelos preditivos sejam precisos, a responsabilidade humana é indispensável, pois a partir das especificações técnicas pelo especialista, os desempenhos esperados poderão ser alcançados.

Para Schroth *et al.* (2022), a otimização da produção de papel pode ser alcançada com o uso de ferramentas da I4.0 como análise de big data, inteligência artificial e aprendizagem de máquina para apoiar o operador em suas tarefas diárias. Os benefícios incluem o uso de informações confiáveis para tomada de decisão do ajuste dos parâmetros de máquina, além de aumento da qualidade do produto.

Clauser *et al.* (2022) identificaram contribuições no estudo das ferramentas da I4.0 no contexto de biorrefinarias nos setores florestal, agrícola, alimentício, farmacêutica, papel e celulose, química, biotecnológica. Por consequência disso, foi visto que no projeto de processo de biorrefinarias, o desenvolvimento de processo envolve as atividades de projeto, avaliação, implementação e tomada de decisão, onde redes neurais artificiais, inteligência artificial e aprendizagem de máquina geram os seguintes benefícios:

- Caracterização da biomassa: estimativa da composição química da biomassa, redução de tempo e de custo com experimento, estimativa de vários parâmetros de biomassa (tamanho da partícula, volume, etc.);
- Projeto do processo: desenvolvimento de modelo com alta precisão, seleção e otimização de processo, predição da melhor condição de operação;
- Gestão estratégica: melhora do processo de projeto de produto, melhora do processo de desenvolvimento de produto, aperfeiçoamento da gestão logística (CLAUSER *et al.*, 2022).

2.3.3 Tecnologias da I4.0 para promoção da EC no setor de celulose e papel

O processo de polpação termomecânica é realizado com uso de refinador e tem grande consumo de energia elétrica pelo motor, mas estudos têm mostrado que o uso de inteligência artificial pode ser viável melhorar o consumo. De acordo com Talebjedi *et al.* (2020), mesmo que o consumo de energia elétrica seja alto na polpação termomecânica, algoritmos de inteligência artificial aplicados de forma preditiva pode auxiliar na otimização de consumo e viabilizar a recuperação da energia térmica gerada pelo vapor consumido, para aproveitamento em sistemas de aquecimento interno e locais.

Na produção de papel, as taxas altas de retorno de produtos rejeitados têm sido investigadas, para melhorar o desempenho financeiro e gerar oportunidades para EC. Assim, Su *et al.* (2021) propuseram modelos de inteligência artificial, para indicar o volume ótimo de produção e auxiliar nas tomadas de decisões gerenciais. Isso porque, é necessário processar a celulose comprada, para torná-la matéria-prima ideal, mas nessa etapa é comum que seja produzido papel com defeito, até que a matéria-prima esteja na condição necessária. Com isso, como alguns papeis podem ser produzidos a partir de celulose reciclada, os resíduos de papel da produção rejeitada podem ser transformados em matéria-prima secundária e propiciar atividades de EC em nível micro.

O uso de sistemas preditivos aplicados a manutenção de equipamentos industriais proporciona ganhos satisfatórios para redução de desperdícios de energia elétrica, detecção de possíveis falhas, para evitar perdas. Com isso, além do uso de tecnologias da I4.0 contribuir para uma produção mais eficiente, confiável e de qualidade, possibilita também uma contribuição circular em direção a sustentabilidade, afetando o valor e a imagem da empresa no mercado (RODRIGUES *et al.*, 2022).

O uso de dispositivos para aplicação preditiva e atuação on-line tem sido testado para controle de qualidade das propriedades mecânicas de materiais renováveis, como o desenvolvimento de nanofibras de celulose para a produção de papel, a fim de minimizar as emissões (PENNELLS *et al.*, 2022).

Nos processos contínuos, como o de fabricação de celulose e papel, a confiabilidade do equipamento é muito requerida, por isso o mercado de peças de reposição é frequentemente requisitado. Cardeal *et al.* (2023) apresentaram desenvolvimento de modelos para auxiliar no processo de seleção de peças com potencial de fabricação por meio de manufatura aditiva. Dessa modo, o objetivo foi repensar a forma de obtenção de peças,

respeitando os aspectos técnicos e da aplicação, mas com apoio das tecnologias, para identificar oportunidades de redução dos impactos ambientais.

A adoção de tecnologias da I4.0 para a gestão do tratamento de águas residuais tóxicas, decorrentes do processo de fabricação de papel, tem apontado benefícios, sendo que os ganhos estão relacionados a recuperação da lignina como matéria-prima para produção de subprodutos químicos, geração de energia a partir do tratamento, contribuindo para a EC (KUMAR *et al.*, 2023).

Segundo Tsai *et al.* (2018), o conceito de EC tem crescido no mundo e recebido atenção em diversos setores, e na indústria de celulose e papel não tem sido diferente. Na fabricação da celulose, o fluxo circular inicia com a entrada de matéria-prima virgem, papel reciclado, água, aditivos na área de polpação, onde a pasta de celulose produzida abastece a fábrica de papel. Quanto aos resíduos gerados na fabricação de celulose, tanto a água quanto o lodo do esgoto tratado são utilizados para a coprodução de energia eletrotérmica (vapor e eletricidade) para abastecer a fábrica de papel, e as cinzas residuais podem ser utilizadas em fabricas de cimento. O ciclo circular finalmente termina com os produtos de papel sendo reciclados após o uso, para reabastecer a fábrica de celulose como matéria-prima para extração de fibras. Assim, a utilização de tecnologias da I4.0 para estabelecer o melhor mix de fabricação, contribui para redução de excessos de produção, para propiciar reciclagem de resíduos industriais, melhorar a eficiência da utilização de recursos em um circuito fechado.

De acordo com Gandolfo e Lupi (2021), a adoção de soluções inovadoras para melhoria nos produtos e processos podem alcançar resultados de preservação do meio ambiente, além de gerar crescimento econômico. Com isso, algumas iniciativas de EC adotadas por uma empresa produtora de papel tissue têm sido aprimoradas com o uso de tecnologias da I4.0. Os resultados tem melhorado a recuperação das embalagens cartonadas, para reciclagem das fibras de celulose na produção de papel, reduzindo o uso de fibras virgens. Como as embalagens cartonadas são compostas por 74% de fibras de celulose, 4% de alumínio e 22% de polietileno, os resíduos de alumínio e polietileno recuperados tiveram seu fluxo melhorado, permitindo desenvolvimento de outros produtos.

Em uma rede de compartilhamento circular, Vimal *et al.* (2022) observaram interações para trocas de resíduos entre fabricas de papel e celulose, cimento, usina de açúcar e bebidas destiladas. Na produção de açúcar, o resíduo da produção resulta no bagaço de cana de açúcar, que é excelente matéria-prima fibrosa para a produção de celulose de fibra longa, para fabricação papel. Já na produção da polpa de celulose, o resíduo da fermentação da polpa é

utilizado pela fábrica de bebidas destiladas na produção de bebidas. O vapor produzido e a fabricação de papel liberam cinzas volantes, que podem ser utilizadas para geração de energia e para fabricação de cimento. Além disso, a produção de cana de açúcar pode utilizar a água e o efluente tratado da fábrica de papel e o papel usado, após triturado, pode servir de matéria-prima para indústria de papel, fechando o ciclo da rede. Contudo, nota-se que na rede de compartilhamento circular estudada, a coleta de dados em tempo real é o principal driver para a adoção de tecnologias da I4.0, para integrar as atividades econômicas, ambientais e trocas de resíduos entre as fabricas de papel, bebida, cimento e açúcar.

Na produção de embalagens, Rechtin *et al.* (2020) ressaltam que os modelos preditivos para controle de qualidade das propriedades mecânicas do papel podem trazer ganhos para a produção, como redução de desperdícios e aumento da qualidade do produto. Com isso, a redução do uso de produtos químicos e de fibras pode reduzir custos e emissões, uma vez que os métodos de operação convencional incorrem no uso de matéria-prima em excesso para garantir as propriedades mecânicas do produto.

De acordo com El Koujok *et al.* (2020), as fábricas de celulose, que utilizam o processo termomecânico, operam com aproveitamento e produtividade de celulose superior aos processos de polpação química. Porém, o processo termomecânico consome maior quantidade de energia, principalmente na produção de vapor. O processo termomecânico consiste em desfibrar os cavacos de madeira misturados a água, por meio da ação de refinadores, para produzir pasta de celulose para a produção de papeis de baixa qualidade, como papel de jornal. O vapor gerado no processo pode ser recuperado e o emprego de métodos de aprendizagem de máquina, como ferramentas de diagnóstico, propicia a detecção de falhas no sistema de trocadores de calor, para evitar a contaminação do vapor com os componentes da madeira e perdas de processo, promovendo a circularidade. Dessa forma, a energia do vapor sujo pode ser recuperada na forma de vapor limpo e misturada ao vapor de baixa pressão das turbinas, para geração de energia elétrica.

Conforme Zhang *et al.* (2021), nas máquinas de papel tissue ocorre consumo alto de energia e vapor para produção de papel e economizar energia está entre as principais preocupações do setor. Assim, o desenvolvimento de métodos de inteligência artificial podem auxiliar na construção de estratégias para programação de consumo, contribuir para redução de impactos e de custos envolvidos com eletricidade.

De acordo com Nadim *et al.* (2022), nas fábricas de celulose e papel, o licor negro é o resíduo gerado no processo de polpação Kraft. Com isso, as caldeiras de recuperação do licor

negro têm a função de restaurar os produtos químicos utilizados no processo, remover resíduos e subprodutos descartáveis, para utiliza-los como insumos de produção vapor e energia elétrica de consumo próprio. Consequentemente, o monitoramento desse processo complexo é fundamental, onde métodos de aprendizagem de máquina têm sido desenvolvidos para apoiar de forma preditiva as causas de falhas do equipamento. Dessa forma, os modelos causais de aprendizagem de máquina, além de garantir a confiabilidade do equipamento e processo, também contribuem satisfatoriamente para promoção da EC em nível micro, aumentando os lucros e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa.

Conforme Schroth *et al.* (2022), apesar da produção de papel reciclado exigir alto consumo de energia elétrica, esta estratégia é fundamental para EC, pois valoriza os resíduos de papel como matéria-prima. Também, o processo de produção do papel reciclado requer o uso de insumos químicos e diversos aditivos, a fim de alcançar os níveis de qualidade desejados para os produtos que se queira produzir. Com isso, foi feito estudo envolvendo análise de big data e métodos de aprendizagem de máquina, para apoiar as decisões do operador, no controle das doses de insumos. Assim, os benefícios potenciais estão associados à redução de desperdícios de insumos industriais, energia elétrica, incertezas do operador e de impactos ambientais.

Para Clauser *et al.* (2022), a escassez de recursos e a atenção aos impactos ambientais têm despertado interesse dos setores agrícolas, alimentícios, florestais, papel e celulose, químico, energético e de biotecnologia, para a valorização de biomassa e resíduos industriais no contexto de biorrefinarias e da EC. Dessa forma, as tecnologias da I4.0 como análise de big data, internet das coisas e inteligência artificial são ferramentas essenciais para projetos de biorrefinarias e para promover a circularidade. Embora seja necessário considerar os aspectos ambientais, econômicos e sociais para projetos de biorrefinarias, aplicação das tecnologias podem fornecer estratégias de melhor aproveitamento, valorização e aplicação da biomassa.

2.3.4 Tecnologias da I4.0 relacionadas aos ganhos ambientais no setor de celulose e papel

Conforme Talebjedi *et al.* (2020), a aplicação de algoritmos de inteligência artificial para simular a carga do motor e vapor gerado pelo refinador na polpação termomecânica, pode evitar desperdícios de energia elétrica e reduzir emissões.

Su *et al.* (2021) destacam que o desenvolvimento de modelos de inteligência artificial para redução de custos decorrentes de itens rejeitados e identificação da produção ótima tem

indicado oportunidades econômicas, ambientais e de circularidade. Com isso, os investimentos em tecnologias possibilitaram alcançar economia de 484,70 kg de matéria-prima virgem por ciclo, devido ao uso do produto rejeitado como matéria-prima, evitando descarte e reduzindo os desperdício na produção.

O desenvolvimento de modelos preditivos para prever falhas e mau funcionamento na seção da prensa de uma máquina de celulose pode gerar previsões de curto, médio e longo prazo. Com isso, a identificação de possíveis falhas de acionamentos, bombas e válvulas pode reduzir o desperdício de energia elétrica e evitar perdas gerais causadas pelo mau desempenho dos equipamentos (RODRIGUES *et al.*, 2022).

Segundo Pennells *et al.* (2022), a proposta de utilização de dispositivo para análise de morfologia de micro e nanofibra de celulose utilizando fibra ótica como ferramenta de análise on-line, pode ser uma alternativa de alto rendimento nos testes das propriedades do nanopapel. Assim, o dispositivo de análise de fibra ótica proposto poderia prever a qualidade das nanofibras de celulose em suspensão aquosa, sem a necessidade de fabricar e testar amostras de nanopapel. Com isso, benefícios consideráveis poderiam ser alcançados para o processamento da nano celulose, o que ajudaria no desenvolvimento de materiais renováveis, como forma de contribuir para redução de emissões.

A proposta de Cardeal *et al.* (2023) para aplicação de modelo de inteligência artificial no apoio à escolha de peças de reposição adequadas para manufatura aditiva foi testada em uma indústria de papel gráfico, para identificar oportunidades de ganhos ambientais e econômicos. Sobre os aspectos ambientais, foi realizada avaliação do impacto ambiental para verificar as diferenças entre os impactos ambientais, devido a troca de fornecedores e processo de fabricação. Com isso, a avaliação dos impactos ambientais considerou a fabricação, transporte e fim de vida como as principais categorias para análise dos resultados. Embora a fabricação local utilizando manufatura aditiva resulte em menos emissões devido ao transporte, as emissões da manufatura aditiva são surpreendentemente ainda maiores do que processo de fabricação metalúrgica convencional. Assim, a diferença total alcançou 4,01 kg CO₂ de mais emissões, indicando que a adoção de manufatura aditiva precisa romper algumas barreiras para tornar-se uma solução ambientalmente viável, em relação aos processos convencionais.

Durante o processo de fabricação de papel ocorre a liberação de substâncias tóxicas, que são nocivas à saúde e ao meio ambiente. Com isso, o estudo de Kumar *et al.* (2023) identificou que embora haja desafios processuais a serem superados para transformação

digital, a adoção de tecnologias da I4.0 para a gestão do tratamento de águas residuais pode ser uma estratégia de redução dos impactos ambientais. Isso porque, as tecnologias da I4.0 oferecem a possibilidade de conectar os mecanismos de operação de águas residuais, permitindo o monitoramento em tempo real e reduzir as chances de perdas durante o processo.

Tsai *et al.* (2018) desenvolveram modelos para suporte ao planejamento da produção de papel, com objetivo de determinar o mix ideal, para alcançar a menor quantidade de emissões de CO₂ e o máximo lucro possível. Com isso, para avaliação ambiental foram consideradas as quantidades de matéria-prima e tempo de processamento necessários para a produção de três produtos, para estimar as emissões de CO₂ durante a produção. Assim, o melhor mix para o planejamento de produção verde mensal pode ser obtido ao produzir 500 toneladas do Produto 1, 1415 toneladas do Produto 2 e 910 toneladas do produto 3, podendo alcançar 2834 toneladas de CO₂ emitidos e lucro máximo de \$1.154.258. Entretanto, a empresa tem investido em tecnologias de polpação, com objetivo de aumentar para 50% a proporção do uso de papel reciclado como matéria prima, para reduzir os impactos ambientais e diminuir os custos com matéria-prima. Dessa forma, o mix de produção ideal mensal seria 500 toneladas do Produto 1, 1141 toneladas do Produto 2 e 1250 toneladas do Produto 3 e com o lucro máximo aumentado para \$ 1.519.473.

O uso de ferramentas tecnológicas possibilita aprimoramento dos processos de produção, para eliminar perdas e identificar oportunidades. Gandolfo e Lupi (2021) destacam que as fibras de celulose de embalagens descartadas podem ser usadas como matéria-prima alternativa, indicando que empresa estudada recupera anualmente cerca de 771 milhões de embalagens cartonadas descartadas. Com isso, o volume de uso de matéria-prima virgem é reduzido, de maneira que o uso de matéria-prima reciclada aumenta em torno de 4% (51% para 55%).

Segundo Vimal *et al.* (2022), os drivers voltados aos aspectos ambientais, que impulsionam a adoção de tecnologias da I4.0 em rede compartilhamento circular composta por indústrias de bebidas alcoólicas, cimento, açúcar e papel e celulose, são mudança para a sustentabilidade, satisfação do cliente, transparência e resiliência. Com isso, as tecnologias de I4.0 podem criar caminhos para a sustentabilidade, por meio de redução de pegadas ambientais, compartilhamento de recursos e subprodutos na rede. Também foi observado que os modelos de negócios digitais podem aumentar a consciência ambiental, demonstrando que além dos aspectos econômicos, a rede dá importância às questões ecológicas, elevando a satisfação do cliente. Do mesmo modo que a transparência resulta em cooperação sem

precedentes na rede circular, permitindo que as indústrias trabalhem facilmente temas complexos, para aumentar o valor das empresas e atender as expectativas do cliente. Assim, a adoção de sistemas inteligentes na rede pode garantir resiliência, ao reestabelecer as condições normais de forma mais rápida diante de eventos indesejados, reduzindo a chance de riscos e perdas e pressão sobre o meio ambiente, pois melhora o fornecimento de matéria-prima entre as indústrias da rede.

A proposta de Rehtin *et al.* (2020) para utilização de modelos adaptáveis para prever a qualidade e resistência do papel em tempo real, pode ser uma estratégia viável para os fabricantes de embalagens, reduzindo impactos ambientais, ao mesmo tempo que aumentam a confiança do processo. Isso porque, para garantir a qualidade e as especificações do papel, os ajustes de quantidades de fibras e produtos químicos são feitos pelo operador com base nos resultados de laboratório, o que pode ocasionar em falta ou excesso de componentes adicionados. Assim, além de evitar perdas de fibras, estima-se que os ajustes em tempo real em uma máquina que produz 350.000 toneladas ao ano, poderia economizar 0,454 kg de produtos químicos a cada tonelada de papel produzido, o que reduziria 158.900 kg de produtos químicos ao ano.

A proposta de El Koujok *et al.* (2020) para uso de ferramentas baseadas em métodos de aprendizagem de máquina para diagnóstico de falhas em equipamentos na produção de celulose termomecânica, pode fornecer informações precisas para evitar falhas dos equipamentos. Com isso, as falhas no funcionamento de dispositivos de controle de fluxo podem ser detectadas, o que evitaria desperdícios de vapor e de energia elétrica.

De acordo com Zhang *et al.* (2021) as máquinas de papel tissue possuem um complexo consumo de energia e o desenvolvimento de modelos baseados em métodos de aprendizagem de máquina pode apoiar o planejamento de consumo de energia. Por esse motivo, as chances de redução de consumo de energia elétrica e de vapor utilizados na produção de papel podem proporcionar ganhos ambientais significantes, colaborando para diminuir as emissões.

A proposta de Nadim *et al.* (2022) para aplicação de modelos de inteligência artificial por métodos de aprendizagem de máquina, para garantir a confiabilidade do funcionamento da caldeira de recuperação de licor negro em uma fábrica de papel e celulose, resultou em resultados promissores. Referente aos aspectos ambientais, os ganhos estão relacionados a redução dos riscos de vazamentos de produtos químicos, perdas de componentes orgânicos, desperdícios de energia elétrica e de emissões de gases de efeito estufa.

O desenvolvimento de ferramentas de inteligência artificial pode apoiar o operador nas tarefas e decisões de ajustes do processo quando necessário. A proposta de aplicativo de inteligência artificial de Schroth *et al.* (2022) poderia entregar ao operador, opções precisas tanto de manuseio do equipamento, quanto para correções de parâmetros que melhoram a qualidade do papel e evita perdas. Com isso, estima-se que a operação com suporte da inteligência artificial poderia reduzir entre 2 a 4% o consumo de energia total, considerando que a umidade na seção de pré-secagem reduzisse 1%, devido ao controle inteligente o que melhoraria os aspectos ambientais.

Segundo Clauser *et al.* (2022), nos projetos de biorrefinarias as tecnologias da I4.0 como análise de big data, internet das coisas e inteligência artificial são ferramentas essenciais e os aspectos ambientais são levados em consideração na fase de concepção. Assim, os ganhos ambientais estão associados a redução das emissões e do consumo de energia elétrica, direcionamento dos resíduos industriais para aproveitamento como matéria-prima por outras empresas.

2.3.5 Tecnologias da I4.0 relacionadas aos ganhos econômicos no setor de celulose e papel

Conforme Talebjedi *et al.* (2020) a aplicação de algoritmos para simular a carga elétrica do motor e de geração de vapor do refinador na polpação termomecânica pode melhorar a eficiência energética. A otimização do consumo de energia elétrica e quantidade de vapor pode contribuir para redução de custos e emissões, gerar oportunidades para EC.

De acordo com Su *et al.* (2021) a utilização de algoritmo de inteligência artificial para o planejamento da quantidade ótima de produção tem potencial de redução de perdas e de minimização de custos. Dessa forma, a redução do desperdício de produtos rejeitados resultou na economia de 484,70 kg de fibras a cada ciclo de produção, por meio da estratégia de recuperação dos rejeitos como matéria-prima secundária. Assim, a produção com a quantidade ótima e investimento na recuperação de resíduos para uso como matéria-prima tem potencial de alcançar redução de 50% no custo unitário do produtos acabado, se o custo total for reduzido em torno de 34,62%.

Embora a adoção de manutenção preditiva envolva custos altos com aquisição de equipamentos para coleta e armazenamento de dados, custos com treinamento de pessoal, análise de dados e desenvolvimento de métodos, os potenciais benefícios são viáveis. Isso em razão de a manutenção preditiva propiciar uma produção regular, sem interrupções e avarias,

perdas econômicas, com melhor qualidade e menos emissões de poluentes, afetando positivamente a imagem da empresa no mercado (RODRIGUES *et al.*, 2022).

A utilização de manufatura aditiva para o fornecimento de peças de reposição pode ser uma oportunidade de abrir novos mercados e otimizar estoques. Para identificar as peças com potencial de fabricação por manufatura aditiva, Cardeal *et al.* (2023) apresentaram proposta de aplicação de modelo de inteligência artificial para apoiar na seleção, levando em conta oportunidades de ganhos ambientais e econômicos. Assim, para avaliação econômica foi considerada análise de custos envolvendo os custos de unidades de estoque, que é representado por custo de capital, mão de obra, almoxarifado, engenharia e tempo de inatividade. Dessa forma, embora inicialmente tenha ocorrido aumento do custo para adoção de manufatura aditiva, após um ano a redução do custo unitário de estoque pode chegar em até 49% em relação à produção convencional.

Os benefícios econômicos do uso das tecnologias da I4.0 para o tratamento de águas residuais podem ser obtidos pela oportunidade de utilização dos resíduos como matéria-prima para produção de outros produtos. Embora existam os desafios científicos e processuais a serem superados da mudança de tratamentos tradicionais para tecnologias digitais, as vantagens econômicas e ambientais são aspectos a serem considerados na tomada de decisão de investimento (KUMAR *et al.*, 2023).

Segundo Tsai *et al.* (2018), a aplicação de modelos de tecnologias da I4.0 para apoiar o planejamento da produção pode indicar o mix ideal de produção, para alcançar maior lucro e menor quantidade de emissões. No contexto econômico foram usadas técnicas de análise de custos envolvendo o custo total da atividade unitária (custo de material direto, custo de mão de obra direta, custo de máquina), o custo total da atividade do lote (custo de manuseio de estoque, custo de configuração), o custo do imposto de carbono e o custo regulatório ambiental. Com isso, o total de horas de mão de obra direta necessárias para produção verde foi de 45.290 h, com acréscimos de 13.610 horas extras, resultando em 2.834 toneladas de CO₂ emitidos, sendo 334 toneladas de CO₂ emissões extras que exigem um imposto de carbono mais alto. Assim, os impostos para 2500 toneladas de CO₂ seriam \$ 60000,00 e \$ 12024,00 de impostos para 334 toneladas de CO₂ das emissões extras, o que poderia alcançar lucro máximo de \$1.154.258, resultado do melhor mix mensal da produção de 500 toneladas do Produto 1, 1415 toneladas do Produto 2 e 910 toneladas do Produto 3. Porém, com estudos de investimentos em tecnologias de polpação, a empresa pretende aumentar para 50% a proporção do uso de papel reciclado como matéria-prima, para reduzir os impactos ambientais

e diminuir os custos. Dessa forma, o mix de produção ideal mensal seria 500 toneladas do Produto 1, 1141 toneladas do Produto 2 e 1250 toneladas do Produto 3 e com o lucro máximo aumentado para \$ 1.519.473.

Como mostra o estudo de Gandolfo e Lupi (2021), o uso de tecnologias para aprimorar o processo de recuperação de embalagens usadas contribui para o aumento da taxa de recuperação de embalagens. Assim, foi verificado que a recuperação anual de 771 milhões de embalagens gerou redução de custos de fibras, devido ao uso de fibras recuperadas para a produção de papel com fibras mistas. Além disso, essa prática contribuiu para o desenvolvimento de novos produtos com o uso do alumínio e polietileno recuperados das embalagens, o que gerou aproximadamente 60.000€ de receita adicional para empresa.

Para Vimal *et al.* (2022), em uma rede de compartilhamento circular composta por indústrias de bebidas alcoólicas, cimento, açúcar, celulose e papel os drivers voltados aos aspectos econômicos que impulsionam a adoção de tecnologias da I4.0 são vantagem competitiva, agilidade, rentabilidade e tomada de decisão descentralizada. A vantagem competitiva pode ser alcançada, quando as tecnologias de I4.0 são utilizadas para resolver as dificuldades da proteção contra poluição, o que melhora a logística e as transações entre as empresas pertencentes a rede, resultando na redução de custos inerentes às operações. No que se refere à agilidade, as interações flexíveis, eficientes e ágeis auxiliam na capacidade de responder rapidamente às mudanças na demanda, bem como oscilações de preços de mercado consumidor ou fornecedor. Da mesma maneira que a rentabilidade é sensivelmente afetada pelas tecnologias da I4.0, devido à redução de desperdícios de materiais, paradas da produção e equipamentos, uma vez que os recursos têm melhor desempenho, mesmo com investimento alto inicialmente. Paralelamente, as análises preditivas podem auxiliar na escolha da estratégia que gera o melhor resultado econômico, caracterizando tomada de decisão descentralizada.

Conforme Rehtin *et al.* (2020), o uso de modelo preditivo para ajustes do processo em tempo real pode evitar correções equivocadas e assegurar a qualidade de acabamento de papel de embalagem. A vantagem do monitoramento preditivo do processo é que as previsões ocorrem frequentemente, em uma faixa de 15 a 20 segundos, sendo que os métodos convencionais ocorrem em 45 e 90 minutos em laboratório, para realização de ensaios da resistência de papel. Com isso, os ajustes de processo em tempo real podem evitar o uso desnecessário de fibras de celulose e produtos químicos, para atingir as especificações técnicas do produto, que por sua vez têm custos altos. Dessa forma, estima-se que o uso otimizado de fibras em uma máquina que produz 350.000 toneladas de papel de embalagem por ano tem

potencial de redução 1% no peso base, o que poderia gerar uma economia de 500.000USD. No que se refere ao uso de produtos químicos para aumento de resistência do papel seco, se for aplicado a meta de redução de 1 libra (0,454 kg) de produto químicos a cada 1 tonelada de papel produzido, poderia ser alcançada economia de 500.000USD. Assim, o uso de modelo preditivo dentro processo de produção de papel para eliminar o uso excessivo de matéria prima, pode proporcionar ganhos econômicos para empresa.

De acordo com El Koujok *et al.* (2020), a aplicação de ferramenta de diagnóstico de falhas em tempo real em equipamentos de produção de celulose e papel tem potencial de evitar prejuízos financeiros. Isso porque, a proposta com métodos de aprendizagem de máquina oferece suporte preciso e confiável para tomadas de decisão, reduzindo a probabilidade de decisões equivocadas, evitando a ocorrência de falhas inesperadas e onerosas. Entretanto, a eficácia de uma ferramenta para predição de falhas dependerá do quanto a empresa está disposta a investir na I4.0, considerando que as máquinas devem estar equipadas com o número suficiente de sensores e medições para construção do modelo.

A adoção de modelos de consumo de energia pode auxiliar no planejamento energético de fabricas de papel tissue, considerando que as máquinas de papel consomem grande quantidade de energia. Dessa forma, o planejamento energético preciso poderia contribuir para obter ganhos econômicos, da diminuição de custos da redução de consumo de energia elétrica e de vapor utilizados na produção de papel (ZHANG *et al.*, 2021).

Segundo Nadim *et al.* (2022), a adoção de modelos para evitar falhas no funcionamento de caldeira de recuperação de licor negro de uma fábrica de celulose e papel tem potencial de gerar ganhos econômicos. Os ganhos poderiam ocorrer devido à redução de custos com insumos da produção, assegurando a restauração dos produtos químicos utilizados no processo, remoção de resíduos e subprodutos descartáveis, para utiliza-los como insumos para produzir vapor e energia elétrica de consumo próprio. Dessa forma, a ferramenta proposta pode impactar positivamente a operação da caldeira de recuperação de licor negro e contribuir para os lucros industriais.

Schroth *et al.* (2022) observam que no círculo produtivo do papel, a fabricação de papel é a fase que mais consome recursos e nessa etapa, o operador tem influência significativa para ajustes na produção, o que pode incorrer no uso demasiado de recursos. Com isso, o uso de ferramentas de inteligência artificial pode apoiar o operador com ajustes precisos para estabilizar o processo e a qualidade do papel, resultando em economia de recursos caros.

De acordo com Clauser *et al.* (2022), a valorização e aplicação da biomassa a partir de projetos de biorrefinarias assistidos por tecnologias da I4.0 pode proporcionar ganhos econômicos para diversos setores. No caso da indústria de celulose e papel os ganhos econômicos estariam associados devido a redução do consumo de energia, cargas ambientais e os riscos operacionais da produção química.

2.3.6 Tecnologias da I4.0 relacionadas aos ganhos sociais no setor de celulose e papel

Conforme Cardeal *et al.* (2023), o uso de ferramentas da I4.0 para desenvolvimento de modelos que auxiliam o processo de escolha de peças para produção a partir de manufatura aditiva pode gerar oportunidades. Com isso, os ganhos vão além dos benefícios econômicos e ambientais, mas envolvem o desenvolvimento de novas fontes de fornecimento, repensadas e alinhadas aos compromissos sociais.

Para Tsai *et al.* (2018), a utilização de modelos desenvolvidos a partir de tecnologias da I4.0 pode auxiliar na definição do melhor mix de produção de produtos de papel, influenciando na melhoria dos resultados econômicos e ambientais. Também foi verificado que quando a empresa aumenta a proporção de utilização de papel reciclado como matéria-prima, a utilização do melhor mix de produção indica redução de custos de produção e colabora para o cumprimento de metas de responsabilidades sociais.

Gandolfo e Lupi (2021) destacam que na empresa estudada, as ações internas para promoção da circularidade possibilitaram o desenvolvimento de novos produtos a partir do uso de resíduos, que em conjunto outras práticas ambientais de plantios de árvores, possibilitou a empresa receber certificação BAT (*Best Available Technology*). Com isso, a empresa tem demonstrado seu compromisso para promoção de ações que resulte em retornos positivos para o desenvolvimento econômico, ambiental e social.

Segundo Nadim *et al.* (2022), o uso de métodos de aprendizagem de máquina para o modelo proposto pode aumentar a confiabilidade do funcionamento de caldeiras de recuperação de licor negro e gerar ganhos. Nesse caso, a combinação entre experiência de operação com os dados históricos proporciona calibragem automática do modelo em tempo real, o que reduz tempo e esforço humano para atualização do modelo.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

O capítulo 3 trata a metodologia de pesquisa, para apresentação dos procedimentos utilizados na realização da revisão bibliométrica e sistemática da literatura, estrutura metodológica da pesquisa, método de pesquisa e procedimento de coleta de dados, a seleção de casos incluídos na pesquisa, procedimento para cálculo da circularidade e procedimento para avaliação econômica

3.1 PROCEDIMENTO PARA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA

O procedimento considerado para realização do trabalho foi o *framework* de revisão bibliométrica e sistemática proposto por De Oliveira Neto *et al.* (2018). O *framework* considera a definição de parâmetros de pesquisa a partir das palavras-chaves e seus conjuntos, perguntas básicas e específicas, conforme Figura 10. Também foram tidos como parâmetros básicos o journal publicado, título, autores, ano de publicação, referências bibliográficas, método utilizado nos estudos, país pesquisado, setor, objetivo e resultado dos artigos.

Figura 10: Modelo de revisão bibliométrica e sistemática.

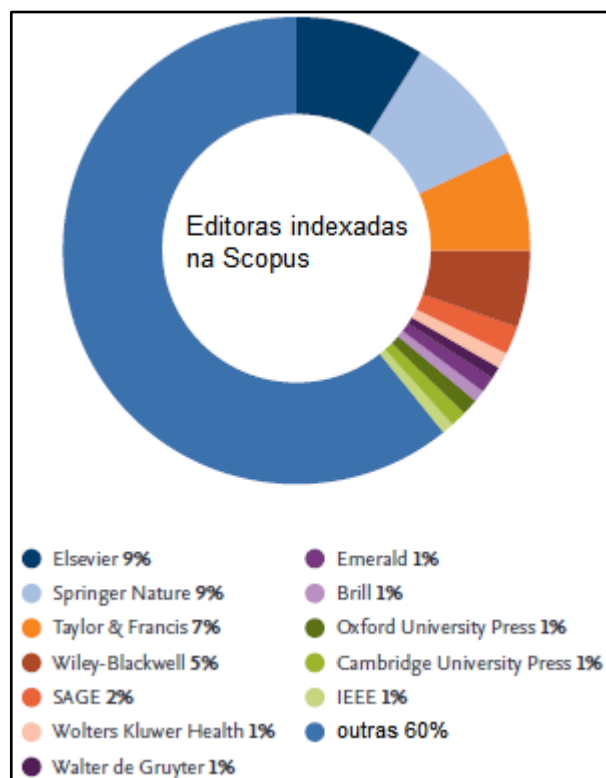


Fonte: Adaptado de De Oliveira Neto *et al.* (2018).

As palavras-chaves foram definidas de acordo com terminologias do setor e algumas das tecnologias da I4.0 apresentadas na fundamentação teórica. O levantamento de artigos foi feito utilizando 50 conjuntos de palavras-chaves e suas cognatas como apresentado na Tabela 2, para alcançar maior varredura possível de publicações relacionadas ao objetivo de pesquisa. Foram usados os termos: "paper industry"; "paper mill"; "pulp"; "papermaking"; "circular economy"; "industry 4.0"; "big data"; "Internet of Things"; "Augmented Reality"; "Additive Manufacturing"; "Cloud computing"; "Cyber security"; "Internet of Things"; "Systems integration"; "Machine learning"; "IoT"; "RFID"; "Algorithm".

Os artigos foram coletados a partir da base de dados Scopus. Atualmente a base Scopus possui cobertura significativa de conteúdo por incorporar as principais bases científicas, como: Elsevier; Springer Nature; Taylor & Francis; Wiley-Blackwell; Sage; Wolters Kluwer Health; Walter de Gruyter; Emerald; Brill; Oxford University Press; Cambridge University Press; IEEE; entre outras (SCOPUS, 2023). A Figura 11 apresenta a participação de publicações de cada base citada e incorporada na Scopus.

Figura 11: Bases incorporadas ao banco de dados da Scopus.



Fonte: Adaptado de Scopus (2023).

Para suportar o desenvolvimento do trabalho, além do modelo de revisão bibliométrica e sistemática De Oliveira Neto *et al.* (2018), também foram adaptadas as diretrizes do *framework PRISMA Flow Diagram* (PRISMA: *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), para realização de revisão sistemática e metanálises. As etapas do *PRISMA Flow Diagram*, para auxílio na revisão sistemática, considera as fases de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão de estudos. (MOHER *et al.*, 2009).

Com isso, a pesquisa de artigos foi realizada entre os anos de 2022 e 2023, com a definição de um intervalo de período aberto, refinando resultados de buscas limitadas a artigos e *review*. Sendo assim, a análise de cada artigo foi feita e seguidas as seguintes etapas e critérios estabelecidos:

- Etapa 1: levantamento bruto de artigos com uso de combinações de palavras chaves e cognatas nas bases de dados definidas, com busca no resumo e título dos artigos;
- Etapa 2: remoção de artigos duplicados, capítulo de livros, artigos de congresso, resumos expandidos, a partir da análise dos títulos, resumos, resultados, discussões;
- Etapa 3: leitura dos resumos, resultados, discussões e conclusões dos artigos, a fim de separar publicações, que pertencentes a temática e objetivos da pesquisa;
- Etapa 4: identificação de lacunas nas pesquisas e estritamente ligadas a temática proposta, a fim de compor a revisão sistemática da literatura sobre tecnologias da I4.0 no setor de celulose e papel relacionada a EC.

3.2 ESTRUTURA METODOLÓGICA DA PESQUISA

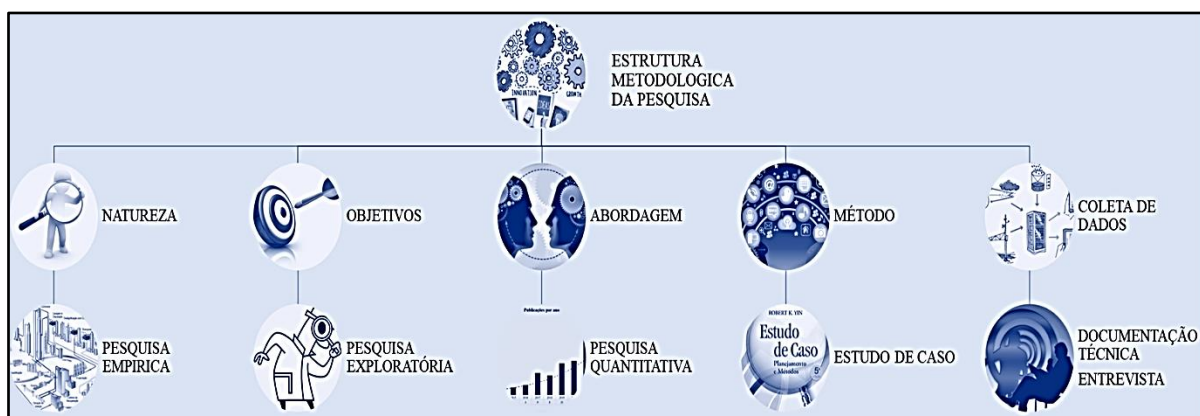
No que se refere a natureza dessa pesquisa, este trabalho se trata de pesquisa empírica caracterizado pelo uso de procedimentos pré-definidos, para coleta de dados, com posterior tratamento e análise (DE ANDRADE MARTINS, 2000). A pesquisa empírica relata aplicações dos resultados de pesquisas teóricas em processos reais, preocupando-se com testes em processos reais, com a validade de modelos científicos de pesquisa teórica quantitativa, e com a utilidade e desempenho de soluções resultantes (CAUCHICK *et al.*, 2012).

No que diz respeito aos objetivos, esse trabalho se trata de uma pesquisa do tipo exploratória e tem como objetivo explorar empresas fabricantes do setor de celulose e papel que adotaram tecnologias da I4.0, para avaliar a circularidade, uma vez não foram encontrados registros da realização de tal abordagem nas publicações científicas. Segundo Cauchick *et al.* (2012), as pesquisas com objetivos exploratórios necessitam de muito tempo

de condução, porque são pautadas em investigações profundas do tema da pesquisa, que posteriormente seguem procedimentos detalhados para coleta e tratamento de dados (CAUCHICK *et al.*, 2012). As pesquisas empíricas com objetivos exploratórios proporciona ao pesquisador um importante aumento da familiaridade com o tema, contribuindo para o desenvolvimento de novos estudos (MARCONI; LAKATOS, 2010).

Assim, essa pesquisa tem abordagem quantitativa, porque o objetivo envolve avaliação por meio de variáveis mensuráveis (MARTINS, 2012). A mensurabilidade é uma das principais preocupações em pesquisas de abordagem quantitativa, para definição de escala de mensuração (CAUCHICK *et al.*, 2012). Esse tipo de pesquisa se baseia na objetividade, devido a necessidade de discernimento analítico dos dados coletados a partir de procedimentos definidos, para investigar e compreender o objeto de observação (FONSECA, 2002). A Figura 12 apresenta a estrutura metodológica da pesquisa.

Figura 12: Estrutura Metodológica da Pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação ao método de pesquisa, foi utilizado o estudo de caso, visto que apesar de existirem estudos que tenham adotado estudo de caso, os trabalhos em sua grande maioria se concentraram em coleta de dados para modelagem de programação, ou seja, não foram identificados casos de aplicações de sistemas autônomos na produção de celulose e papel. Para Berto e Nakano (2014) as pesquisas empíricas produzem dados primários, em decorrência de observações inéditas e o estudo de caso como método tem essa característica, porque consiste na descrição e análise de um ou mais objetos (casos) em estudo (BERTO; NAKANO, 2014). O estudo de caso é um tipo de histórico de um fenômeno, sendo observados em várias fontes de evidências onde um fato ocorre (MIGUEL, 2007). Dessa

forma, o estudo de caso pode ser usado em muitas situações para contribuir ao conhecimento dos fenômenos individuais, organizacionais, grupais, sociais, políticos e relacionados (YIN, 2015).

Yin (2015) observa que a justificativa para a escolha de estudo de casos múltiplos está relacionada ao entendimento das replicações literais e teóricas. Se a estratégia for a replicação literal, assumindo resultados parecidos em vários casos estudados, logo dois ou mais casos são suficientes. Por outro lado, se a estratégia for a replicação teórica presumindo a obtenção de resultados contrários, deve ser adotado três ou quatro casos.

Yin (2015) ressalta que podem existir situações onde estudos envolvendo único caso seja suficiente, porém ele aconselha que se na realização de estudo com único caso for possível utilizar dois casos, as chances são maiores de realizar estudos melhores do que com único caso.

A coleta de dados para estudos de caso pode utilizar múltiplos instrumentos, inclusive com a interação entre o pesquisador e o objeto de pesquisa (BERTO; NAKANO, 2014). De acordo com Marconi e Lakatos (2010) as formas de coletar os dados dependerá da circunstância da investigação e para isso apresentam onze diferentes procedimentos para coleta de dados: 1) coleta documental; 2) observação; 3) entrevista; 4) questionário; 5) formulário; 6) medidas de opiniões e atitudes; 7) técnicas mercadológicas; 8) testes; 9) análise de conteúdo; 10) sociometria e 11) história da vida. Yin (2015) indica seis fontes de evidências para realização de estudos de casos, sendo: documentação; registros em arquivos; entrevistas; observações diretas; observação participante e artefatos físicos.

Portanto, essa pesquisa tem natureza empírica, com objetivos exploratórios e de abordagem quantitativa. Foi adotado como método de pesquisa o uso de casos múltiplos em três empresas e utilizando para coleta de dados, procedimentos composto por entrevista semiestruturadas, análise de documentação técnica.

3.3 PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS

Este estudo abordou as tecnologias da I4.0 relacionadas a EC no contexto de três empresas do setor de celulose e papel, com objetivo de avaliar a circularidade de fabricantes de celulose e papel que adotaram tecnologias da I4.0, como estratégia de transformação digital. Desse modo, Yin (2015) sugere que quando estudos com questões de pesquisa

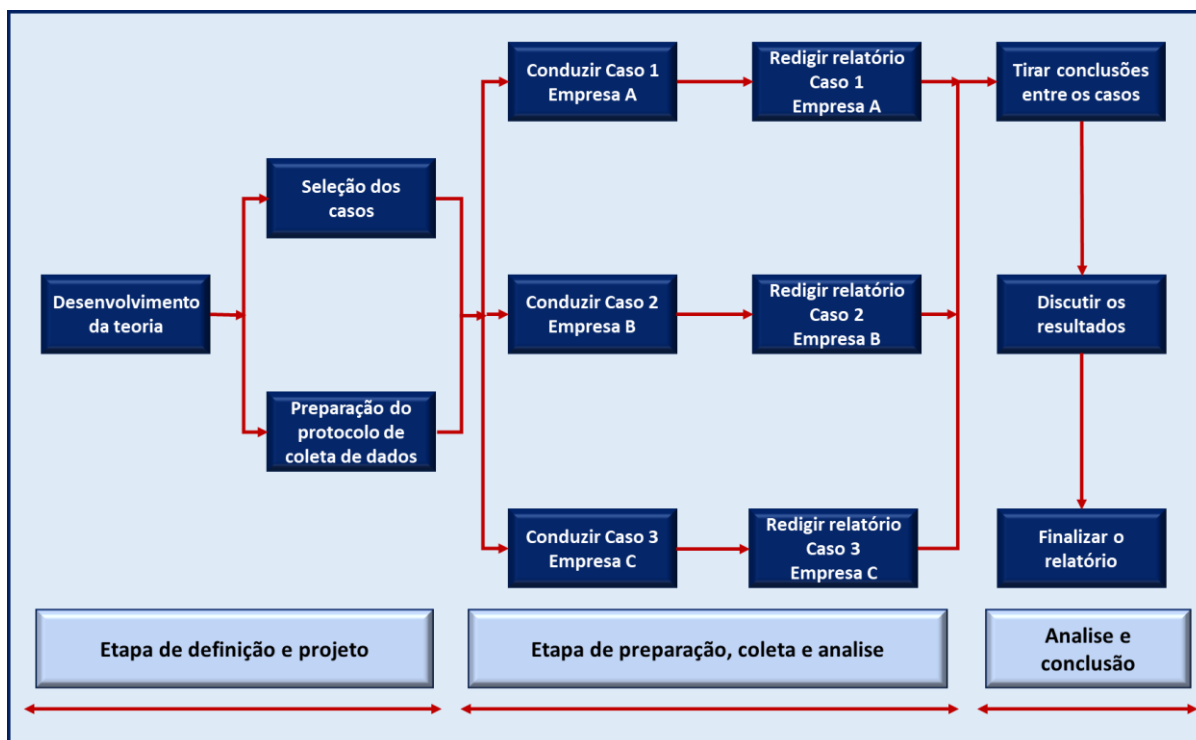
procuram explicar “como” ou “por que” determinado fenômeno funciona, o método estudo de caso é mais relevante para esse tipo de investigação. No que se refere a utilização de estudo de casos múltiplos, pode ser entendido como um projeto de desenvolvimento mais amplo, seguindo a lógica da replicação para os casos em investigação, de maneira que cada caso possa prever resultados similares ou contrastantes (Yin, 2015).

Para coleta de dados durante os estudos de casos foi utilizado como técnica o envio de e-mail e pesquisa no acervo digital das empresas. Posteriormente, foram conduzidas entrevistas semiestruturadas, sendo considerada a técnica mais adequada para abordagem quantitativa, de acordo com Bryman (2003) e Collins e Hussey (2007).

Miguel (2007) considera ser adequado estabelecer meios apropriados para a análise dos dados, tais como identificação de padrões nos dados, convergência e divergência, cruzamento de informações (particularmente no uso de casos múltiplos), dentre outros. Dessa forma, os dados relativos à produção, tipos de produtos, detalhes das tecnologias, dados econômicos e ambientais foram levantados. Adicionalmente, foi feito um confronto documental com os dados tratados. Posteriormente, foram consultados quatro especialistas fornecedores de tecnologias para o setor de celulose e papel, a fim de fazer nova rodada de confronto, relacionado a identificação das tecnologias levantadas nos casos e os dados técnicos da produção.

O formulário de pesquisa para entrevista semiestruturada consistiu na abordagem do uso de tecnologias da I4.0, de práticas ambientais e de EC, para isso foram seguidas as seguintes etapas: 1) levantamento dos dados de produção; 2) identificação da estrutura convencional de operação da máquina de papel no estado anterior a adoção das tecnologias da I4.0; 3) identificação comercial de tecnologias da I4.0 adotadas para transformação digital; 4) identificação de práticas ambientais; 5) levantamento dos ganhos operacionais, ambientais e econômicos. O estudo de casos múltiplos foi conduzido de acordo com as etapas ilustradas na Figura 13.

Figura 13: Condução do estudo de casos múltiplos.



Fonte: Adaptado de Yin (2015).

Para organizar a coleta de dados, foi elaborado protocolo para o estudo de caso, aumentando a confiabilidade da pesquisa e para orientar o pesquisador na realização da coleta (YIN, 2015). A estrutura do protocolo foi composta em cinco blocos, como mostrado a seguir:

Bloco A: Dados da empresa, quantidade de funcionários, tipo de produto produzido, volume de produção, conforme Apêndice 1;

Bloco B: Identificação da estrutura convencional de operação da máquina de papel no estado anterior a adoção das tecnologias da I4.0, para observar a influência humana no processo, conforme Apêndice 1;

Bloco C: identificação comercial das ferramentas adotadas para transformação digital, para abordar o desenvolvedor sobre aplicação, funcionamento técnico e tecnologias envolvidas no desenvolvimento da ferramenta, conforme Apêndice 2;

Bloco D: identificação de práticas ambientais, para verificar o fluxo de insumos e volumes em massa, conforme Apêndice 2 e documentação da empresa (relatórios de sustentabilidade e relatórios técnicos);

Bloco E: levantamento dos ganhos operacionais, ambientais e econômicos, para verificar ganhos absolutos mensuráveis em unidades de tempo, massa, percentual, monetários

considerando abordagem de custo e investimento, conforme Apêndice 2 e documentação da empresa (relatórios de sustentabilidade e relatórios técnicos).

3.4 SELEÇÃO DE CASOS A SEREM INCLUÍDOS NA PESQUISA

Referente a seleção das empresas para inclusão na pesquisa, a utilização de amostragem intencional é sugerida, de modo que os pesquisadores possam levantar as quantidades de informações relevantes para o estudo (PATTON, 2014). Com isso, Patton (2014) observa que a escolha proposital como critério de seleção, deve considerar que os casos típicos selecionados precisam contribuir com informações necessárias para avaliar as questões de pesquisa. Assim, foram estabelecidos os seguintes critérios para selecionar as empresas a serem contempladas nos estudos de caso: a) as empresas deveriam pertencer ao setor de celulose e papel; b) devem ter implementado tecnologias da I4.0; c) devem disponibilizar dados econômicos e ambientais dessa implantação. Com base nesses critérios e usando a replicação literal conforme Yin (2015), foram escolhidas as três empresas sendo uma localizada na Austria, outra na Espanha e outra na Alemanha:

Empresa A – A empresa tem sede na Austria e 6 filiais entre Europa e América. A produção anual atualmente é de aproximadamente 800.000 toneladas de papel, sendo 350.000 toneladas de papel gráfico de gramatura 40 a 60 g/m², para aplicações em material publicitário, folhetos, revistas, jornais e encartes. O restante da produção anual de 450.000 toneladas é de papel e papelão ecológico com gramatura de 70 a 240 g/m² para embalagem, produzidos na matriz austríaca e fabricados a partir de papel reciclado.

Empresa B – A empresa tem sede na Espanha e 10 filiais na Europa. Atualmente, a produção de todas unidades fabris somam aproximadamente 3.300.000 toneladas de papel. Os papéis fabricados nas unidades espanholas são o *fluting* reciclado, *fluting* semi-químico, *kraftliner*, *testliner* com gramaturas que variam entre 75 a 245 g/m², com produção anual de aproximadamente 1.900.000 toneladas. As demais unidades fora da Espanha produzem anualmente 1.400.000 toneladas dos mesmos tipos de papel produzidos na matriz, porém, em gramaturas que variam entre 80 a 280 g/m².

Empresa C – A empresa multinacional localizada na Alemanha com filiais na Europa e América somando 40 países. Os negócios da empresa têm alcançado relevância global quanto ao crescimento e consequentemente em capacidade de produção. Com isso, destacam-se a capacidade global de produção de papel e papelão que se aproxima de 8,5 milhões de toneladas por ano, para abastecimento de vários segmentos que utilizam caixas, embalagens e

painéis de papelão. A unidade da Alemanha tem capacidade para produzir 450.000 toneladas de papel kraftliner e testliner marrom com gramaturas de 115 a 200 g/m².

3.5 PROCEDIMENTO PARA CÁLCULO DA CIRCULARIDADE

Para avaliação da circularidade foi considerado o procedimento proposto por De Oliveira Neto *et al.* (2022) que consiste na comparação do total de intensidades de massa, conforme Equação 1. O procedimento sugere que obrigatoriamente sejam realizadas avaliações dos impactos ambientais antes e depois das intervenções em estudo, ou seja, nesse trabalho as avaliações dos impactos ambientais foram realizadas antes e após a adoção da I4.0.

$$\text{Índice de circularidade} = \frac{\text{MIT Total Depois}}{\text{MIT Total Antes}} \times 100 \quad (1)$$

A avaliação do impacto ambiental realizada nesse trabalho utilizou a ferramenta MIPS (*Material Input Per Service*), desenvolvida por Wuppertal Institute for Climate, Environmental and Energy - Germany (WUPPERTAL INSTITUTE, 2014). Essa ferramenta estima o impacto ambiental, por meio da utilização do balanço de massa dos materiais que se pretende avaliar o impacto do serviço (RITTHOFF *et al.*, 2002). Assim, para realização do cálculo, as massas dos materiais são multiplicadas pelos fatores de intensidade massa (MIF - *Mass Intensity Factors*) de cada intensidade de massa por compartimento (MIC - *Mass Intensity per Compartment*). Nessa avaliação, os materiais a serem avaliados são distribuídos nos compartimentos abióticos, bióticos, água, ar e terra. Após as multiplicações, os valores obtidos para cada compartimento são somados (RITTHOFF *et al.*, 2002). A Tabela 3 apresenta os valores de MIF para o amido, fibras virgens a partir de cavacos de madeira, fibras recicladas a partir de embalagens de papelão, vapor e energia elétrica utilizados no processo. Assim, para realização do cálculo do impacto ambiental foi usada Equação 2, onde o balanço de massa considerou toda massa de entrada dos componentes identificados. Destaca-se ainda que se o cálculo considerar utilização de matérias recuperados de descartes, os valores das massas deverão ser inseridos com sinal negativo.

$$\text{MIT} = \text{Mass} \times \text{MIF}_{\text{Abiotic}} + \text{Mass} \times \text{MIF}_{\text{Biotic}} + \text{Mass} \times \text{MIF}_{\text{Water}} + \text{Mass} \times \text{MIF}_{\text{Air}} \quad (2)$$

Tabela 3: Fatores de intensidade de massa (MIFs) usados no trabalho.

Componente	Consumo	Compartimentos				Impacto ambiental por compartimento [kg]
		Abiótico	Biótico	Água	Ar	
Amido (kg/kg)		1,07	0,00	22,09	1,56	
Fibra virgens de cavacos de madeira (kg/kg)		0,68	0,65	18,42	0,29	
Vapor (MJ/kg)		0,39	0,00	1,61	0,24	
Energia Elétrica (kg/kWh)		2,67	0,00	37,92	0,64	
Fibras recicladas de embalagem de papelão (kg/kg)		1,86	0,75	93,56	0,33	
MIC - <i>Mass intensity per compartment</i>						
MIT - <i>Mass intensity total</i>						

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A avaliação econômica foi realizada com base na análise dos custos de amido, fibras de celulose virgens e recicladas, energia elétrica e vapor, além do levantamento de investimentos realizados. Também foi calculada a TIR (Taxa Interna de Retorno), para a viabilidade econômica da implementação da I4.0, bem como o retorno do investimento conforme demonstrado. Assim, em projetos que é pretendido verificar a atratividade e viabilidade de um determinado investimento, a TIR é sugerida, pois considera o investimento realizado e os recebimentos financeiros nos períodos a serem analisados (PEREIRA; ALMEIDA, 2008).

O Payback foi calculado considerando a relação de aplicação dos recebíveis no fluxo de caixa, por meio do valor presente líquido e índice mínimo de atratividade de 15%. Tanto a TIR quanto o Payback foram calculados para o período definido usando o Microsoft Excel, conforme aplicado por Victorino Souza e De Oliveira Neto (2022).

4. RESULTADOS DO ESTUDO DE CASOS MÚLTIPLOS

Os resultados encontrados na realização do estudo são apresentados neste capítulo. Primeiramente são apresentadas as tecnologias identificadas nos estudos de casos de empresas, para posteriormente serem apresentados os casos individualmente. As características das empresas, onde os dados foram levantados para a realização dos estudos de caso, também são apresentados nesta seção.

4.1 EMPRESAS A, B e C - ESTRUTURA CONVENCIONAL DE OPERAÇÃO

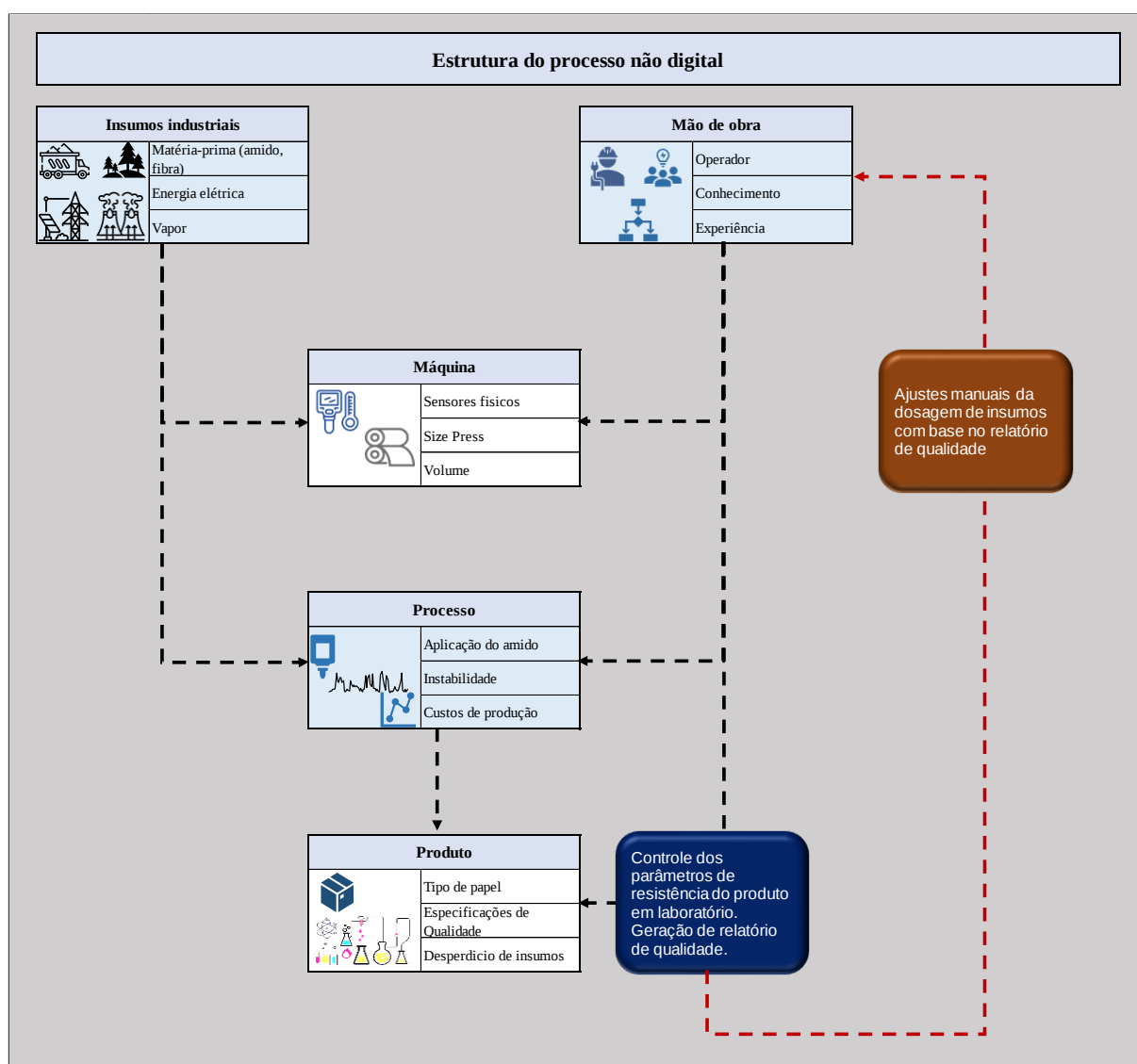
Na operação de uma máquina de papel, o operador da máquina desempenha função de suma importância no processo produtivo, a fim de alcançar a qualidade desejada ao menor custo possível. Nesse sentido, o operador tem a complexa responsabilidade de manter os parâmetros de resistência do papel, controlando as variações de dosagem de insumos e matéria-prima, para atingir as especificações de qualidade. Entretanto, como cada operador possui conhecimentos e habilidades diferentes, pode ocorrer o uso em demasia ou falta de algum componente da receita de fabricação do papel, para alterações de processo na forma convencional de ajuste e controle, o que pode gerar desperdícios em razão disso.

No que se refere aos ajustes da dosagem de componentes para controle da qualidade do papel, o operador realiza correções após obter os resultados dos ensaios de resistência do papel. Assim, no processo convencional os ensaios de resistência só podem ser realizados ao final do carregamento de uma bobina de papel. Como o procedimento convencional de medição das propriedades do papel são realizados em laboratório, obrigatoriamente é necessário aguardar o tempo de produção de uma bobina de papel, afim de retirar amostras para realização dos ensaios.

Com isso, de acordo com a velocidade e tipo de máquina de papel, o tempo para produção e carregamento de uma bobina de papel pode variar de 30 à 60 minutos. Posteriormente, os testes nas amostras são conduzidos e levam até 1,5 hora de realização e com base nos resultados dos ensaios, os ajustes para alteração da resistência do papel são feitos, mas os efeitos dos ajustes só poderão ser percebidos após um novo ciclo de carregamento de bobina e de realização de novos testes de laboratório. Dessa forma, somente entre 4 e 5 horas após a primeira medição, que os resultados dos ensaios de resistência estarão disponíveis, a fim de detectar se o papel produzido poderá atender as propriedades requeridas de mercado.

A Figura 14 apresenta a estrutura do processo convencional não digital. Como a máquina de papel é dividida em seções, a preparação de matéria-prima é feita conforme o tipo de papel produzido e de acordo com a formula de cada empresa. A entrada da matéria-prima na máquina de papel e demais componentes é ajustada manualmente, sendo que o conhecimento e experiência do operador influenciam na qualidade do produto. Os instrumentos de automação instalados na máquina auxiliam no acionamento de equipamentos e no monitoramento dos parâmetros de processo, como tempo de funcionamento, temperatura, pressão, vazão e deslocamentos, contribuindo para o controle do processo. Entretanto, o processo convencionalmente manual está sujeito as oscilações, acarretando em desperdícios de matéria-prima, energia elétrica e tempo, o que pode influenciar na qualidade do produto.

Figura 14: Estrutura do processo convencional

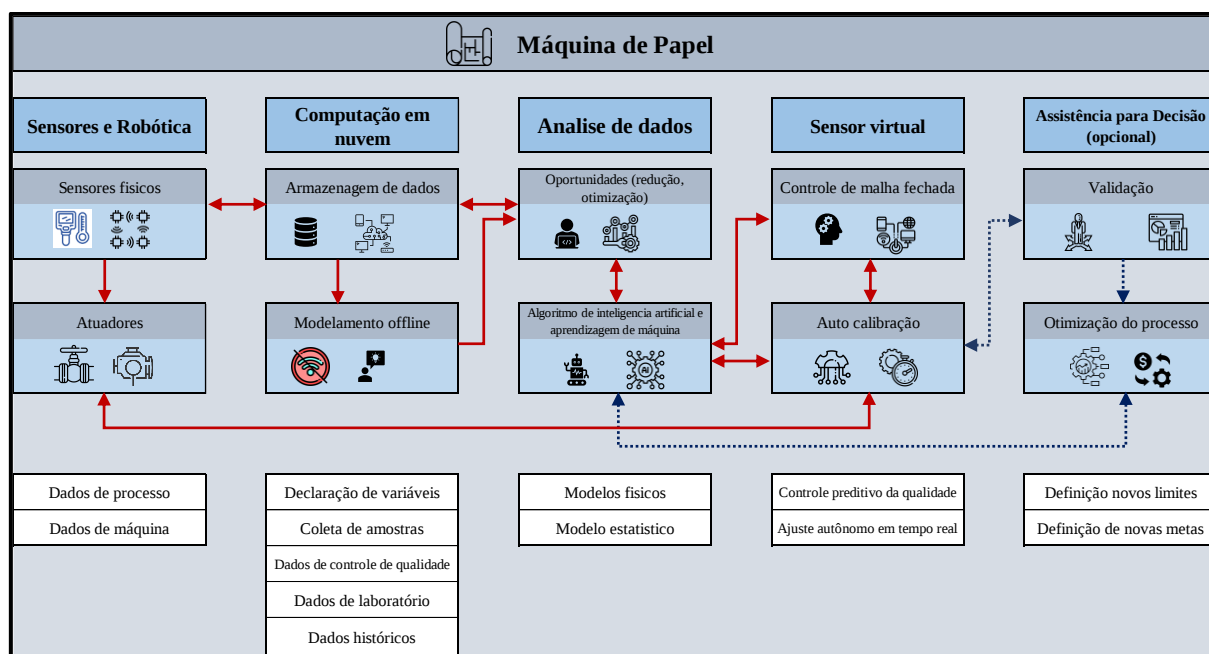


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 EMPRESAS A, B e C – ARQUITETURA DAS TECNOLOGIAS I4.0 EMPREGADAS

A ferramenta identificada nos casos 1, 2 e 3 possui o mesmo conceito de desenvolvimento, onde sua aplicação faz parte das estratégias de transformação digital das três empresas. Desse modo, conforme relatado pelas empresas, a ferramenta identificada, desde o desenvolvimento até implementação, envolveu a aplicação de tecnologias da I4.0, tais como: computação em nuvem (coleta e compartilhamento de dados da máquina, processo e qualidade); análise de big data (análise e tratamento dos dados); inteligência artificial e métodos de aprendizagem de máquina (algoritmo para controle preditivo). Além disso, as máquinas das três empresas possuem sistemas de automação (sensores físicos, atuadores, válvulas e instrumentos) que auxiliam na medição, controle e monitoramento do processo, para integração física e computacional. A Figura 15 apresenta a arquitetura das tecnologias da I4.0 identificadas nas três empresas.

Figura 15: Arquitetura das tecnologias da indústria 4.0.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir de diagnóstico do processo produtivo, por meio da análise dos dados de máquina, especificações de qualidade e históricos de fabricação é construído o modelo preditivo da qualidade do papel, considerando os cálculos de resistência do papel relacionados aos insumos, com acompanhamento on-line dos parâmetros de tecnologia do papel (fibras,

amido, aditivos) no processo. Posteriormente a implementação, as oscilações de insumos identificadas na produção são estabilizadas, devido ao controle racional das quantidades de insumos industriais, com retroalimentação de dados e predição dos parâmetros de processo. A partir da estabilização do processo, o sistema da máquina pode ser otimizado de acordo com os objetivos das empresas. Os objetivos podem ser relacionados a estratégia de produção ao menor custo possível ou de acordo com especificações de limites de resistência mecânica de um produto.

Dessa forma, nos casos estudados, a adoção da tecnologia identificada foi motivada pela oportunidade de otimização do uso de matéria-prima e demais insumos industriais, para o controle do processo de fabricação de papel. De forma que ganhos operacionais, aumento da qualidade do produto, redução de custos e da pegada de carbono pudessem ser obtidos.

Reitera-se que as máquinas de papel são projetadas com complexos sistemas de automação para tornar dinâmico o processo produtivo e para integrar os componentes mecânicos e eletrônicos. Com isso, diversos instrumentos são instalados para agilizar as tarefas e minimizar a interferência humana. Em razão disso, se fazem presentes válvulas para distribuição e controle de fluxo de água, produtos químicos, líquidos e fibras. Além do mais, sistemas de sensores são essenciais para a máquina de papel, sendo aplicados ao controle de temperatura, posicionamento, fluxo e pressão de fluidos, além de coleta de dados do funcionamento da máquina e do processo de produção de papel. Os diversos sensores instalados possibilitam verificar em tempo real a utilização de matéria-prima, aditivos, produtos químicos, consumo de energia elétrica durante a produção de uma máquina de papel.

Durante o processo e funcionamento da máquina, os dados coletados pelos sensores são armazenados em servidores, para processamento e modelagem matemática. Dessa forma, o banco de dados é acessado frequentemente para armazenar, analisar e arquivar informações já processadas. Assim, as informações decorrentes do histórico de produção permitem definir as variáveis para análise de correlação e modelagem estatística, uma vez que as informações são constituídas por dados de processo e da qualidade do produto, resultados de coleta de amostras e testes.

No processo de análise de dados, a atividade é caracterizada pela identificação intensa de toda e qualquer oportunidade de otimização do processo. Essa abordagem se faz necessária, pois são construídos os modelos estatísticos e cálculos matemáticos para o desenvolvimento dos algoritmos a partir dos resultados da análise. A combinação dos dados relevantes do processo, a qualidade na análise de dados possibilitarão os algoritmos de inteligência artificial atuar de forma autônoma, na resolução dos problemas de oscilação do

processo. Assim, a aplicação da tecnologia identificada realiza o controle preditivo da qualidade do produto, fazendo comparações entre os parâmetros definidos e novos dados coletados, para ajustar em tempo real as dosagens de insumos de forma autônoma (sem interferência do operador) em malha fechada, com calibragem automática, por retroalimentação de dados.

Embora o sistema opere em malha fechada, opcionalmente existem emissões de relatórios para suporte à tomada de decisão. Essa opção é necessária e usada somente quando ocorrem definições de novas metas ou trocas de produtos, para indicar objetivos de redução de insumo, aumento da resistência do papel, menor custo e redução significativa de desperdícios. Assim, o controle preditivo indica valores de qualidade do produto, não necessitando a realização de ensaios de laboratório de forma frequente para tomada de decisão, como no modelo convencional.

4.3 CASO 1 – EMPRESA A

O primeiro estudo de caso foi desenvolvido com base nas investigações da empresa multinacional com sede na Austria e 6 filiais entre Europa e América. Trata-se de uma empresa familiar com experiência de 150 anos na produção de papel, sendo que o controle administrativo atual já passa de 30 anos de existência, uma vez que a empresa passou por diversas transformações e alterações societárias desde sua fundação.

A empresa destaca-se pelo seu crescimento e trajetória de sucesso não sendo somente uma produtora de papel, mas um dos principais fabricantes europeus de papel de publicação e embalagem. Para isso, o grupo empresarial conta com 2500 colaboradores efetivos, sendo 400 na unidade fabril da Austria e por isso é um importante empregador local. Os produtos fabricados são papel para revista, papel residual, papel de embalagem e papelão, que são comercializados em vários locais do mundo. O grupo também se destaca pela flexibilidade no atendimento a diversas necessidades, oferecendo ao mercado produtor de papel as soluções de celulose produzidas em uma de suas unidades fabris, sendo dessa forma um dos principais abastecedores da indústria papaleira europeia.

A produção anual atualmente é de aproximadamente 800.000 toneladas de papel, sendo 350.000 toneladas de papel gráfico de gramatura 40 a 60 g/m², para aplicações em material publicitário, folhetos, revistas, jornais e encartes. O restante da produção anual de

450.000 toneladas é de papel e papelão ecológico com gramatura de 70 a 240 g/m² para embalagem, produzidos na matriz austríaca e fabricados a partir de papel reciclado.

O processo de produção do papel é complexo, porque demanda o uso de madeira, celulose e papel recuperado, além de muita água, energia e produtos químicos, porém, a empresa entende que o papel pode ser um produto natural e sustentável. Por isso, tem investido em tecnologias de ponta, que permite que o papel seja produzido de forma amigável ao meio ambiente. Assim, a fábrica de papel é abastecida por energia limpa gerada a partir de hidrelétrica e energia solar resultante dos painéis fotovoltaicos instalados nos telhados da fábrica.

A empresa ao longo de sua existência tem zelado pelas relações e parcerias sólidas, atuando em desenvolvimentos de soluções sustentáveis. Nesse contexto, faz parte da estratégia corporativa da empresa, as metas de sustentabilidade alinhadas aos objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas, tendo como compromisso a redução das emissões de CO₂ em 35% em suas unidades fabris até 2030. Assim, tem contribuído de forma ativa na promoção da EC com a adoção de diversas práticas, tais como:

- Adoção da reciclagem como uma de suas principais estratégias para polpar recursos preciosos, melhorando os negócios e preservando recursos primários, como a madeira;
- Otimização do processo produtivo para utilização eficiente de matéria-prima na produção de papel e na reciclagem de sobras;
- Valorização do papel de resíduo como matéria-prima para a produção de papeis de embalagem;
- Reutilização de papeis residuais para obtenção de fibras secundárias, com potencial de reuso de até 7 vezes e redução no consumo de energia elétrica e de produtos químicos;
- Investimento em energias renováveis a partir de usina fotovoltaica. O investimento possibilitou a geração de 2,6 GWh anualmente e redução de 700 toneladas em emissões de CO₂;
- Desenvolvimento e produção de papeis com fibras 100% recicladas para aplicações em material publicitário, revistas, jornais e embalagem;
- Desenvolvimento de papel para embalagem robustas com dupla camada, sendo uma face produzida a partir de fibras virgens e outra face com fibra reciclada, como alternativa ecológica e econômica.

Referente ao desenvolvimento de novos produtos, a empresa tem constantemente trabalhado no aprimoramento das formulações de papel. Essa abordagem está alinhada com

objetivo de aumentar o percentual de uso de fibras recicladas, mantendo os níveis de qualidade de acordo com as necessidades do cliente.

A empresa tem trabalhado para alcançar as metas de sustentabilidade, com investimentos e implementações de soluções digitais em suas fábricas. Uma das soluções consiste no monitoramento dos parâmetros de dosagem de fibras de celulose, para estabilizar o processo, identificar desvios, reduzir desperdícios e otimizar o uso de matéria-prima, devido a implementação das tecnologias da I4.0 apresentadas no tópico 4.2 e ilustrado na Figura 15. A ferramenta para controle preditivo de resistência do papel permitiu ajuste da dosagem de amido, redução de produtos químicos de branqueamento e consumo de energia elétrica.

Quanto aos aspectos ocupacionais, a empresa possui certificação ISO 45001 com programas voltados a segurança e saúde ocupacional. O objetivo é zelar pela integridade dos colaboradores, por meio de programas com zero acidente, garantindo melhor saúde, prevenindo lesões e cuidado, o que demonstra respeito mútuo, confiança e responsabilidade alinhados ao desenvolvimento dos negócios.

4.3.1 Avaliação da circularidade da adoção de tecnologias da I4.0 na Empresa A

Referente ao desenvolvimento de novos produtos, a empresa tem trabalhado no aprimoramento das formulações de papel, para aumentar o uso de fibras recicladas. Assim, foram levantados dados da produção de papel para embalagem com gramatura de 110 g/m² produzidos em proporção de 100% de fibras recicladas, em volume anual de 450.000 toneladas. A Tabela 4 apresenta o balanço de massa para produção anual de papel para embalagem em dois anos consecutivos, comparando antes e após controle preditivo com tecnologias da I4.0.

Tabela 4: Balanço de massa Caso 1

Componentes	Consumo Antes [kg]	Consumo Depois [kg]
Amido (kg/kg)	9.112.500,00	7.672.500,00
Fibra de cavacos de madeira (kg/kg)	0,00	0,00
Vapor (MJ/kg)	1.296.000.000,00	1.238.544.000,00
Energia Elétrica (kg/kWh)	18.225.000,00	17.417.025,00
Fibras de embalagem de papelão (kg/kg)	440.887.500,00	439.123.950,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido ao uso do controle preditivo com tecnologias da I4.0 para ajustes de insumos, houve redução da quantidade do amido, utilizado para melhorar a resistência superficial do papel. Assim, o nível de umidade do papel foi ligeiramente reduzido e por esse motivo, a quantidade de vapor na seção da secagem foi menor, resultando em redução de energia elétrica. Além disso, a quantidade de fibras recicladas também foi reduzida, uma vez que o controle preditivo alterou as doses necessárias para alcançar a resistência requerida. Dessa forma, o impacto ambiental pôde ser calculado como mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Avaliação do impacto ambiental do uso de sistema de controle convencional e digital – Caso 1.

Antes da adoção de tecnologias da I4.0						
Componentes	Consumo [kg]	Compartimentos				Impacto ambiental por compartimento [kg]
		Abiótico	Biótico	Água	Ar	
Amido (kg/kg)	9.112.500,00	1,07	0,00	22,09	1,56	225.261.000,00
Fibra de cavacos de madeira (kg/kg)	0,00	9.750.375,00	0,00	201.295.125,00	14.215.500,00	0,00
Vapor (MJ/kg)	1.296.000.000,00	0,68	0,65	18,42	0,29	2.903.040.000,00
Energia Elétrica (kg/kWh)	18.225.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	751.416.750,00
Fibras recicladas de papelão (kg/kg)	-440.887.500,00	0,39	0,00	1,61	0,24	-42.545.643.750,00
		505.440.000,00	0,00	2.086.560.000,00	311.040.000,00	
		2,67	0,00	37,92	0,64	
		48.660.750,00	0,00	691.092.000,00	11.664.000,00	
		1,86	0,75	93,56	0,33	
		-820.050.750,00	-330.665.625,00	-41.249.434.500,00	-145.492.875,00	
MIC - Mass intensity per compartment		-256.199.625,00	-330.665.625,00	-38.270.487.375,00	191.426.625,00	
MIT - Mass intensity total						-38.665.926.000,00
Após adoção de tecnologias da I4.0						
Componentes	Consumo [kg]	Compartimentos				Impacto ambiental por compartimento [kg]
		Abiótico	Biótico	Água	Ar	
Amido (kg/kg)	7.672.500,00	1,07	0,00	22,09	1,56	189.664.200,00
Fibra de cavacos de madeira (kg/kg)	0,00	8.209.575,00	0,00	169.485.525,00	11.969.100,00	0,00
Vapor (MJ/kg)	1.238.544.000,00	0,68	0,65	18,42	0,29	2.774.338.560,00
Energia Elétrica (kg/kWh)	17.417.025,00	0,00	0,00	0,00	0,00	718.103.940,75
Fibras de embalagem de papelão (kg/kg)	-439.123.950,00	0,39	0,00	1,61	0,24	-42.375.461.175,00
		483.032.160,00	0,00	1.994.055.840,00	297.250.560,00	
		2,67	0,00	37,92	0,64	
		46.503.456,75	0,00	660.453.588,00	11.146.896,00	
		1,86	0,75	93,56	0,33	
		-816.770.547,00	-329.342.962,50	-41.084.436.762,00	-144.910.903,50	
MIC - Mass intensity per compartment		-279.025.355,25	-329.342.962,50	-38.260.441.809,00	175.455.652,50	
MIT - Mass intensity total						-38.693.354.474,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

Referente à avaliação do impacto ambiental, houve aumento de impacto nos compartimentos biótico e água devido à redução do uso de fibras recicladas, como mostra a Tabela 5. Esse ajuste influenciou a avaliação, porque a quantidade de fibras tem maior representação para o cálculo do impacto, do que as quantidades dos demais componentes consumidos pela Empresa A. Entretanto, os compartimentos abiótico e ar tiveram 8,91% e 8,34% de redução respectivamente, mesmo com os compartimentos biótico e água sendo afetados. A avaliação do impacto ambiental indicou uma redução de 27.428.474,25 kg, conforme Tabela 6.

Tabela 6: Comparativo dos resultados de impacto por compartimento – Caso 1.

MIC - Mass intensity per compartment					
	Antes	Depois	Impacto obtido [kg]	Impacto %	Resultado do impacto
Abiótico	-256.199.625,00	-279.025.355,25	22.825.730,25	8,91%	Redução
Biótico	-330.665.625,00	-329.342.962,50	-1.322.662,50	0,40%	Aumento
Água	-38.270.487.375,00	-38.260.441.809,00	-10.045.566,00	0,03%	Aumento
Ar	191.426.625,00	175.455.652,50	15.970.972,50	8,34%	Redução
MIT - Mass intensity total	-38.665.926.000,00	-38.693.354.474,25	27.428.474,25	0,07%	Redução

Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora o controle preditivo com tecnologias da I4.0 tenha gerado reduções no uso de fibras recicladas e influenciado aumento do impacto nos compartimentos biótico e água, o índice de circularidade devido a comparação geral das avaliações de impactos resultou em 99,93% de circularidade. Desse modo, a Tabela 7 apresenta os resultados para EC devido a adoção de tecnologias da I4.0 feita pela Empresa A.

Tabela 7: Avaliação de circularidade - Caso 1.

Componente	Compartimentos				Impacto ambiental por compartimento [kg]
	Abiótico	Biótico	Água	Ar	
MIC - Mass intensity per compartment - Antes	-256.199.625,00	-330.665.625,00	-38.270.487.375,00	191.426.625,00	-38.665.926.000,00
MIT - Mass intensity total - Antes					
MIC - Mass intensity per compartment - Depois	-279.025.355,25	-329.342.962,50	-38.260.441.809,00	175.455.652,50	-38.693.354.474,25
MIT - Mass intensity total - Depois					
Redução	22.825.730,25	-1.322.662,50	-10.045.566,00	15.970.972,50	27.428.474,25
Índice de circularidade = $\frac{\text{MIT Total Depois}}{\text{MIT Total Antes}} \times 100$					99,93%

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Avaliação Econômica do Caso 1

A otimização do uso de amido e fibras alcançaram redução importantes para esses dois insumos, que consequentemente geraram reduções no consumo de energia e vapor. Com isso, as reduções alcançadas, devido a otimização feita de forma autônoma, geraram ganhos econômicos de \$954.913,44 ao ano. Dessa forma, o cálculo de ROI indicou que o investimento realizado pode ser recuperado em 1,16 anos, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados econômicos devido tecnologias da I4.0 – Caso 1.

	Antes	Depois	Economia
Custo anual médio amido [kg]	\$3.549.170,65	\$2.988.314,05	\$560.856,60
Custo anual médio fibras recicladas [kg]	\$49.062.433,08	\$48.866.183,35	\$196.249,73
Custo anual médio fibras virgens [kg]			
Custo anual da energia elétrica do consumo de vapor [\$/kWh]	\$4.461.814,53	\$4.264.007,42	\$197.807,11
Custo Total	\$57.073.418,26	\$56.118.504,82	\$954.913,44
Investimento total [\$]	\$534.149,14		
ROI ou TIR	125,97%	ao ano	
Payback Descontado a 15% ao ano	1,16	anos	

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 CASO 2 – EMPRESA B

O segundo estudo de caso foi desenvolvido com base nas investigações da empresa multinacional com sede na Espanha e 10 filiais na Europa. Nesse caso, a empresa é uma sociedade anônima com 80 anos de existência atuando na fabricação de papel, papelão e embalagens de papelão. Também possui instalações destinadas a produção de pellets a partir da recuperação e processamento de polietileno de baixa densidade, para uso na produção de filmes plástico.

A diversificação de negócios, recuperação de embalagens e o desenvolvimento de produtos sustentáveis são os diferenciais da trajetória de sucesso do grupo. O efetivo da empresa é de 10.000 colaboradores em todas as unidades, sendo que a matriz na Espanha emprega 3.800 colaboradores. Os produtos fabricados são papel para embalagem a partir de material reciclado, caixas de papelão, embalagens personalizadas para o mercado varejista, embalagens especiais para fabricantes de produtos orgânicos, embalagens para indústria pecuária.

Atualmente, a produção de todas unidades fabris somam aproximadamente 3.300.000 toneladas de papel. Os papéis fabricados nas unidades espanholas são o fluting reciclado, fluting semi-químico, kraftliner, testliner com gramaturas que variam entre 75 a 245 g/m², com produção anual de aproximadamente 1.900.000 toneladas. As demais unidades fora da Espanha produzem anualmente 1.400.000 toneladas dos mesmos tipos de papel produzidos na matriz, porém, em gramaturas que variam entre 80 a 280 g/m².

A empresa está entre os três maiores produtores de papel e celulose da Europa e é reconhecida por suas iniciativas de redução de impactos ambientais na produção de papel. As iniciativas da empresa levam em conta o crescimento da população, mudança nos padrões de consumo e estilo de vida, indicando a necessidade de estratégias, onde os ganhos econômicos garantam a sobrevivência do planeta. Assim, para que um sistema econômico possa prosperar é necessário reconhecer que são finitos os recursos disponíveis na natureza, por isso o uso da matéria-prima precisa ser responsável.

No contexto de aperfeiçoamento das operações da empresa, a utilização de ferramentas de manufatura enxuta tem sido fundamental para identificação de desperdícios nas atividades, reduzindo prazos, otimizando demanda e melhorando os processos. Além de ações de melhoria contínua, o compromisso com o meio ambiente tem provocado uma série de ações, tornando a EC um impulsionador de estratégia de longo prazo, para abrir novos mercados e oferecer novos serviços. Dessa forma, as principais práticas adotadas são:

- Utilização consciente dos insumos industriais, de modo a alcançar eficiência no uso de todo material fundamental para produção;
- Instalação de formas de recuperação de energia contidas em processos e resíduos da produção;
- Reaproveitamento de águas residuais para redução no consumo, resultando aumento em 6% no uso de água reciclada e redução de 3% na retirada de água fornecida pela cidade, extraída de lençóis freáticos e outras fontes naturais;
- Geração de vapor a partir do reaproveitamento de águas residuais também contribui para melhoria da pegada hídrica;
- Desenvolvimento de novas soluções para projeto, produção, fornecimento e recuperação de embalagens, para aumentar a circularidade;
- Utilização de papel reciclado como matéria-prima para a produção de embalagens;
- Ouvir a opinião do cliente para desenvolver soluções que reduzam o impacto ambiental e ao mesmo tempo mantenha a qualidade do produto;
- Fabricação de embalagens a partir de papeis 100% reciclados mantendo as especificações de qualidade em termos de força, design e resistência;
- Instalação de usinas para geração de combustível sólido recuperado, como iniciativa de ambiental para alcançar lixo zero e eliminar as emissões de resíduos;
- Reintegração no ciclo produtivo, como matéria-prima secundária, todo material desperdiçado, como iniciativa da EC.

A empresa tem participação ativa em parceria com escolas de ensino médio e universidade para o incentivo e motivação no desenvolvimento de projetos de pesquisa voltadas a eficiência energética aplicadas na indústria. Além disso, a empresa também tem dado oportunidade à alunos de engenharia e design para criarem novos designs de embalagens, para serem aproveitados no e-commerce.

4.4.1 Avaliação da circularidade da adoção de tecnologias da I4.0 na Empresa B

A Empresa B produz papel para embalagem com gramatura de 115 g/m² na proporção de 95% de fibras recicladas e 5% de fibras virgens, em volume anual de 410.000 toneladas. O balanço de massa apresentado na Tabela 9 refere-se ao consumo anual de insumos industriais. Desse modo, após a adoção de controle preditivo com tecnologias da I4.0, foi possível comparar os consumos de insumos industriais.

Tabela 9: Balanço de massa Caso 2.

Componentes	Consumo Antes [kg]	Consumo Depois [kg]
Amido (kg/kg)	8.302.500,00	6.595.417,92
Fibra de cavacos de madeira (kg/kg)	20.084.875,00	0,00
Vapor (MJ/kg)	1.443.200.000,00	1.356.319.360,00
Energia Elétrica (kg/kWh)	20.295.000,00	19.073.241,00
Fibras de embalagem de papelão (kg/kg)	381.612.625,00	399.606.857,92

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ajuste por controle preditivo com tecnologias da I4.0 gerou redução das doses de aplicação de amido na produção de papel da Empresa B, onde o consumo de fibras virgens foi reduzido e substituído por 100% de fibras recicladas para produção de papel. Com isso, os ajustes de insumos influenciaram no consumo de vapor e energia elétrica e todas as especificações de qualidade do produto foram alcançadas. O impacto ambiental foi calculado como mostra a Tabela 10.

Tabela 10: Avaliação do impacto ambiental do uso de sistema de controle convencional e digital – Caso 2.

Antes da adoção de tecnologias da I4.0						
Componente	Consumo [kg]	Compartimentos				Impacto ambiental por compartimento [kg]
		Abiótico	Biótico	Água	Ar	
Amido (kg/kg)	8.302.500,00	1,07	0,00	22,09	1,56	205.237.800,00
Fibra de cavacos de madeira (kg/kg)	20.084.875,00	8.883.675,00	0,00	183.402.225,00	12.951.900,00	402.500.895,00
Vapor (MJ/kg)	1.443.200.000,00	0,68	0,65	18,42	0,29	3.232.768.000,00
Energia Elétrica (kg/kWh)	20.295.000,00	13.657.715,00	13.055.168,75	369.963.397,50	5.824.613,75	836.762.850,00
Fibras de embalagem de papelão (kg/kg)	-381.612.625,00	0,39	0,00	1,61	0,24	-36.825.618.312,50
MIC - Mass intensity per compartment		562.848.000,00	0,00	2.323.552.000,00	346.368.000,00	
MIT - Mass intensity total		2,67	0,00	37,92	0,64	
		54.187.650,00	0,00	769.586.400,00	12.988.800,00	
		1,86	0,75	93,56	0,33	
		-709.799.482,50	-286.209.468,75	-35.703.677.195,00	-125.932.166,25	
		-70.222.442,50	-273.154.300,00	-32.057.173.172,50	252.201.147,50	
						-32.148.348.767,50
Após adoção de tecnologias da I4.0						
Componente	Consumo [kg]	Compartimentos				Impacto ambiental por compartimento [kg]
		Abiótico	Biótico	Água	Ar	
Amido (kg/kg)	6.595.417,92	1,07	0,00	22,09	1,56	163.038.730,98
Fibra de cavacos de madeira (kg/kg)	0,00	7.057.097,17	0,00	145.692.781,85	10.288.851,96	0,00
Vapor (MJ/kg)	1.356.319.360,00	0,68	0,65	18,42	0,29	3.038.155.366,40
Energia Elétrica (kg/kWh)	19.073.241,00	0,00	0,00	0,00	0,00	786.389.726,43
Fibras de embalagem de papelão (kg/kg)	-399.606.857,92	0,39	0,00	1,61	0,24	-38.562.061.788,81
MIC - Mass intensity per compartment		528.964.550,40	0,00	2.183.674.169,60	325.516.646,40	
MIT - Mass intensity total		2,67	0,00	37,92	0,64	
		50.925.553,47	0,00	723.257.298,72	12.206.874,24	
		1,86	0,75	93,56	0,33	
		-743.268.755,72	-299.705.143,44	-37.387.217.626,54	-131.870.263,11	
		-156.321.554,68	-299.705.143,44	-34.334.593.376,37	216.142.109,48	
						-34.574.477.965,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A avaliação do impacto ambiental mostra que todos compartimentos foram afetados. A Tabela 10 apresenta os detalhes de consumo de insumos e os impactos nos compartimentos, devido aos ajustes em tempo real. Destaca-se que o compartimento abiótico foi o mais

impactado, alcançando redução de 122,61%. Com isso, a Tabela 11 mostra a avaliação do impacto ambiental com redução de 2.426.129.197,50 kg após controle preditivo com tecnologias da I4.0.

Tabela 11: Comparativo dos resultados de impacto por compartimento – Caso 2.

	MIC - Mass intensity per compartment				Resultado do impacto
	Antes	Depois	Impacto obtido [kg]	Impacto %	
Abiótico	-70.222.442,50	-156.321.554,68	86.099.112,18	122,61%	Redução
Biótico	-273.154.300,00	-299.705.143,44	26.550.843,44	9,72%	Redução
Água	-32.057.173.172,50	-34.334.593.376,37	2.277.420.203,87	7,10%	Redução
Ar	252.201.147,50	216.142.109,48	36.059.038,02	14,30%	Redução
MIT - Mass intensity total	-32.148.348.767,50	-34.574.477.965,00	2.426.129.197,50	7,55%	Redução

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os impactos ambientais diminuíram quando o ajuste automático reduziu a zero o uso de fibras virgens, para a substituição por fibras recicladas e influenciar na circularidade das avaliações, resultando 92,98%. Isso indica que a adoção de controle preditivo com tecnologias da I4.0 feita pela Empresa B tem mostrado contribuições para EC, conforme Tabela 12.

Tabela 12: Avaliação de circularidade - Caso 2.

Componente	Compartimentos				Impacto ambiental por compartimento [kg]
	Abiótico	Biótico	Água	Ar	
MIC - Mass intensity per compartment - Antes	-70.222.442,50	-273.154.300,00	-32.057.173.172,50	252.201.147,50	-32.148.348.767,50
MIT - Mass intensity total - Antes					
MIC - Mass intensity per compartment - Depois	-156.321.554,68	-299.705.143,44	-34.334.593.376,37	216.142.109,48	-34.574.477.965,00
MIT - Mass intensity total - Depois					
Redução	86.099.112,18	26.550.843,44	2.277.420.203,87	36.059.038,02	2.426.129.197,50
Índice de circularidade = $\frac{\text{MIT Total Depois}}{\text{MIT Total Antes}} \times 100$					92,98%

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Avaliação Econômica do Caso 2

As otimizações alcançadas influenciaram principalmente na redução do uso de fibras virgens, com substituição por fibras recicladas. Então, ganhos ambientais foram alcançados e contribuiu para relevantes resultados econômicos, onde as reduções de amido, energia e fibras geraram economia de \$10.150.500,09 ao ano. Embora os custos com fibras recicladas tenham aumentado em \$2.002.417,51, a principal economia ocorreu devido à redução do uso de fibras virgens. Assim, foi verificado que a economia alcançada possibilitou a recuperação do investimento em 0,20 anos (73 dias de produção), conforme Tabela 13.

Tabela 13: Resultados econômicos devido tecnologias da I4.0 – Caso 2.

	Antes	Depois	Economia
Custo anual médio amido [kg]	\$3.233.688,81	\$2.568.808,09	\$664.880,73
Custo anual médio fibras recicladas [kg]	\$42.466.261,52	\$44.468.679,03	\$-2.002.417,51
Custo anual médio fibras virgens [kg]	\$11.175.331,98		\$11.175.331,98
Custo anual da energia elétrica do consumo de vapor [\$/kWh]	\$5.194.433,46	\$4.881.728,57	\$312.704,89
Custo Total	\$62.069.715,77	\$51.919.215,68	\$10.150.500,09
Investimento total [\$]	\$979.273,42		
ROI ou TIR	728,56%	ao ano	
Payback Descontado a 15% ao ano	0,20	anos	

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 CASO 3 – EMPRESA C

O terceiro estudo de caso foi desenvolvido com base nas investigações da empresa multinacional localizada na Alemanha com filiais na Europa e América somando 40 países. A empresa tem vasta história de sucesso ao longo de 90 anos, sendo especialista na produção de papelão e caixas de embalagem. Ao longo dos anos a empresa sofreu algumas fusões, o que possibilitou expansão mundial dos negócios.

O grupo estabeleceu sede corporativa nos Estados Unidos e sede global na Europa, devido sua atuação na produção de matéria-prima florestal, para abastecimento de suas fábricas de papel de forma integrada e de outras companhias do setor. Considerando todas as áreas de atuação e os negócios expandindo, a empresa tem 360 locais de produção e 48.000 colaboradores. A empresa tem negócios voltados ao fornecimento de papeis para embalagens, papelão, fibras recuperadas, papeis reciclados.

Os negócios da empresa têm alcançado relevância global quanto ao crescimento e consequentemente em capacidade de produção. Com isso, destacam-se a capacidade global de produção de papel e papelão que se aproxima de 8,5 milhões de toneladas por ano, para abastecimento de vários segmentos que utilizam caixas, embalagens e painéis de papelão. A unidade da Alemanha tem capacidade para produzir 450.000 toneladas de papel kraftliner e testliner marrom com gramaturas de 115 a 200 g/m². Os setores atendidos são diversos, como empresas de produtos de confeitaria, bebidas, comidas congeladas, produtos frescos fornecendo embalagens para alimentos, bens de consumo e indústrias em geral.

A empresa está entre as maiores produtoras mundiais de papel, papelão, embalagens e matérias prima no setor, além do mais, a empresa tem posição de destaque por iniciativas de apoio a preservação da natureza e proteção do planeta. Para isso, a empresa atua em conjunto com fornecedores, clientes, colaboradores e sociedade, de modo que suas operações funcionem com atividades que valorizam o meio ambiente, para que seus produtos sejam reciclados ao final do ciclo de vida.

O compromisso de criar soluções amigas do planeta está incorporado na visão e estratégia da organização, com envolvimento da alta gestão até o chão de fábrica das operações. Nesse contexto, a criação de negócios circulares tem sido fundamental para projetar operações preparadas para utilização dos recursos de forma consciente. Dessa forma, a estratégia de EC tem sido implementada por meio de diversas práticas, tais como:

- Utilização de recursos virgens de maneira consciente e reutilizar tudo que for possível;
- Utilização de matérias-primas primárias 100% renováveis e em circuito fechado produzida pelo grupo;
- Reciclagem da fibra do papel pós-consumo. Essa prática representa quase 80% da matéria-prima utilizada na produção de embalagem;
- Reutilização de fibras separadas no tratamento da água do processo de produção de papel, para aplicação como subproduto orgânico, para biocombustível;
- Separação de metais, plásticos, madeira, tecido da reciclagem e recuperação do papel, para envio a empresas parceiras que utilizam esses materiais;
- Desenvolvimento de parceria com outros setores para o fornecimento de óleo terebintina e *tall oil*. As resinas e óleos extraídos durante o processo de produção do papel virgem servem como matéria-prima para indústrias químicas e farmacêuticas;
- Projetar produtos com único tipo de material, para melhorar a reciclabilidade da embalagem.

4.5.1 Avaliação da circularidade da adoção de tecnologias da I4.0 na Empresa C

No levantamento de dados da Empresa C foi visto que o papel para embalagem com gramatura de 100 g/m² é produzido com 76% de fibras recicladas e 24% de fibras virgens, em volume anual de 380.000 toneladas. Em dois anos consecutivos, os volumes de uso de matéria-prima e demais insumos sofreram variações em decorrência da adoção de controle preditivo com tecnologias da I4.0, onde a Tabela 14 apresenta o balanço de massa para esses dois momentos.

Tabela 14: Balanço de massa Caso 3.

Componentes	Consumo Antes [kg]	Consumo Depois [kg]
Amido (kg/kg)	7.695.000,00	6.923.790,00
Fibra de cavacos de madeira (kg/kg)	89.353.200,00	74.309.881,40
Vapor (MJ/kg)	1.398.400.000,00	1.363.346.773,33
Energia Elétrica (kg/kWh)	19.665.000,00	19.172.064,00
Fibras de embalagem de papelão (kg/kg)	282.951.800,00	297.239.525,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a nova fase de produção foi identificado que os insumos utilizados na produção do papel para embalagem foram completamente alterados pelo controle preditivo com tecnologias da I4.0. As doses de amido e de fibras virgens tiveram reduções de volume, que impactaram o consumo de vapor e de energia elétrica, além do aumento da proporção de aplicação de fibras recicladas. A partir disso e considerando os balanços de massa para os dois momentos de produção, a avaliação do impacto ambiental foi realizada e apresentada na Tabela 15.

Tabela 15: Avaliação do impacto ambiental do uso de sistema de controle convencional e digital – Caso 3.

Antes adoção de tecnologias da I4.0						
Componente	Consumo [kg]	Compartimentos				Impacto ambiental por compartimento [kg]
		Abiótico	Biótico	Água	Ar	
Amido (kg/kg)	7.695.000,00	1,07 8.233.650,00	0,00 0,00	22,09 169.982.550,00	1,56 12.004.200,00	190.220.400,00
Fibra de cavacos de madeira (kg/kg)	89.353.200,00	0,68 60.760.176,00	0,65 58.079.580,00	18,42 1.645.885.944,00	0,29 25.912.428,00	1.790.638.128,00
Vapor (MJ/kg)	1.398.400.000,00	0,39 545.376.000,00	0,00 0,00	1,61 2.251.424.000,00	0,24 335.616.000,00	3.132.416.000,00
Energia Elétrica (kg/kWh)	19.665.000,00	2,67 52.505.550,00	0,00 0,00	37,92 745.696.800,00	0,64 12.585.600,00	810.787.950,00
Fibras de embalagem de papelão (kg/kg)	-282.951.800,00	1,86 -526.290.348,00	0,75 -212.213.850,00	93,56 -26.472.970.408,00	0,33 -93.374.094,00	-27.304.848.700,00
MIC - Mass intensity per compartment		140.585.028,00	-154.134.270,00	-21.659.981.114,00	292.744.134,00	
MIT - Mass intensity total						-21.380.786.222,00
Após adoção de tecnologias da I4.0						
Componente	Consumo [kg]	Compartimentos				Impacto ambiental por compartimento [kg]
		Abiótico	Biótico	Água	Ar	
Amido (kg/kg)	6.923.790,00	1,07 7.408.455,30	0,00 0,00	22,09 152.946.521,10	1,56 10.801.112,40	171.156.088,80
Fibra de cavacos de madeira (kg/kg)	74.309.881,40	0,68 50.530.719,35	0,65 48.301.422,91	18,42 1.368.788.015,40	0,29 21.549.865,61	1.489.170.023,27
Vapor (MJ/kg)	1.363.346.773,33	0,39 531.705.241,60	0,00 0,00	1,61 2.194.988.305,07	0,24 327.203.225,60	3.053.896.772,27
Energia Elétrica (kg/kWh)	19.172.064,00	2,67 51.189.410,88	0,00 0,00	37,92 727.004.666,88	0,64 12.270.120,96	790.464.198,72
Fibras de embalagem de papelão (kg/kg)	-297.239.525,60	1,86 -552.865.517,62	0,75 -222.929.644,20	93,56 -27.809.730.015,32	0,33 -98.089.043,45	-28.683.614.220,59
MIC - Mass intensity per compartment		87.968.309,51	-174.628.221,29	-23.366.002.506,88	273.735.281,12	
MIT - Mass intensity total						-23.178.927.137,54

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, foi identificado que todos os compartimento apresentaram redução de impacto ambiental, devido aos ajustes de insumos conforme Tabela 15. O compartimento abiótico foi o que teve maior redução de impacto ambiental, 37,43% e 52.616.718,49 kg de material deixaram de impactar negativamente. Isso se deve ao controle preditivo com tecnologias da I4.0, que reduziu a quantidade de fibras virgens, para aumentar o uso de fibras recicladas. Assim, a Tabela 16 apresenta o comparativo de impacto por compartimento da Empresa C, alcançando redução total de 1.798.140.915,54 kg.

Tabela 16: Comparativo dos resultados de impacto por compartimento – Caso 3.

	MIC - Mass intensity per compartment			Impacto %	Resultado do impacto
	Antes	Depois	Impacto obtido [kg]		
Abiótico	140.585.028,00	87.968.309,51	52.616.718,49	37,43%	Redução
Biótico	-154.134.270,00	-174.628.221,29	20.493.951,29	13,30%	Redução
Água	-21.659.981.114,00	-23.366.002.506,88	1.706.021.392,88	7,88%	Redução
Ar	292.744.134,00	273.735.281,12	19.008.852,88	6,49%	Redução
MIT - Mass intensity total	-21.380.786.222,00	-23.178.927.137,54	1.798.140.915,54	8,41%	Redução

Fonte: Elaborado pelo autor.

A otimização do uso de amido e de fibras feita pelo controle preditivo com tecnologias da I4.0 alcançou combinações de quantidades de materiais, que possibilitou garantir as qualidades técnicas do produto, alcançando ganhos significantes para o meio ambiente. A Tabela 17 apresenta o índice de circularidade de 92,24%, com base na avaliação dos impactos ambientais da Empresa C.

Tabela 17: Avaliação de circularidade – Caso 3.

Componente	Compartimentos				Impacto ambiental por compartimento [kg]
	Abiótico	Biótico	Água	Ar	
MIC - Mass intensity per compartment - Antes	140.585.028,00	-154.134.270,00	-21.659.981.114,00	292.744.134,00	-21.380.786.222,00
MIT - Mass intensity total - Antes					
MIC - Mass intensity per compartment - Depois	87.968.309,51	-174.628.221,29	-23.366.002.506,88	273.735.281,12	-23.178.927.137,54
MIT - Mass intensity total - Depois					
Redução	52.616.718,49	20.493.951,29	1.706.021.392,88	19.008.852,88	1.798.140.915,54
Índice de circularidade = $\frac{\text{MIT Total Depois}}{\text{MIT Total Antes}} \times 100$					92,24%

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.2 Avaliação Econômica do Caso 3

A Empresa C alcançou economia total anual de \$7.245.166,70 devido a otimização do uso dos principais insumos para produção de papel embalagem. Apesar de ter ocorrido aumento de custos de uso de fibras recicladas, a redução dos demais insumos, além de reduzir os impactos ambientais, diminuiu os custos anuais com amido, fibras virgens e energia elétrica. Dessa forma, a avaliação econômica indicou retorno do investimento em 0,27 anos (100 dias de produção), conforme Tabela 18.

Tabela 18: Resultados econômicos devido tecnologias da I4.0 – Caso 3

	Antes	Depois	Economia
Custo anual médio amido [kg]	\$2.997.077,44	\$2.696.703,68	\$300.373,76
Custo anual médio fibras recicladas [kg]	\$31.487.179,27	\$33.077.132,68	\$-1.589.953,40
Custo anual médio fibras virgens [kg]	\$49.716.598,85	\$41.346.415,85	\$8.370.183,01
Custo anual da energia elétrica do consumo de vapor [\$/kWh]	\$6.565.026,77	\$6.400.463,43	\$164.563,34
Custo Total	\$90.765.882,33	\$83.520.715,63	\$7.245.166,70
Investimento total [\$]	\$921.407,27		
ROI ou TIR	553,37%	ao ano	
Payback Descontado a 15% ao ano	0,27	anos	

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Após a realização das avaliações dos impactos ambientais, índice de circularidade e dos resultados econômicos de cada caso, foi feita a comparação dos resultados obtidos e apresentados em base unitária. Para isso foi considerado as reduções totais obtidas e comparadas com a produção total anual. Dessa forma, a Tabela 19 apresenta as reduções unitárias obtidas de cada componente submetida a avaliação de impacto ambiental dos casos estudados.

Tabela 19: Redução obtida a cada tonelada de papel produzida.

	Caso 1 - Empresa A	Caso 2 - Empresa B	Caso 3 - Empresa C
Produção anual [ton]	450.000,00	410.000,00	380.000,00
Componente avaliado			
Redução de consumo de amido [kg/ton]	3,20	4,16	2,03
Redução de consumo de amido [g/m ²]	0,40	0,52	0,20
Redução de consumo de fibras [kg/ton]	3,92	5,10	1,99
Redução de consumo de vapor [MJ/ton]	127,68	211,90	92,25
Redução de consumo de energia elétrica [kWh/ton]	1,80	2,98	1,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 20 apresenta a redução unitária de impacto ambiental obtida em cada compartimento, ou seja, abiótico, biótico, água e ar. A intensidade total unitária obtida por tonelada de papel produzida também é apresentada. Assim, com a adoção da tecnologia apresentada a Empresa A reduziu 60,95 kg/ton, a Empresa B 5917,39 kg/ton e a Empresa C reduziu 4731,95kg/ton de papel produzido.

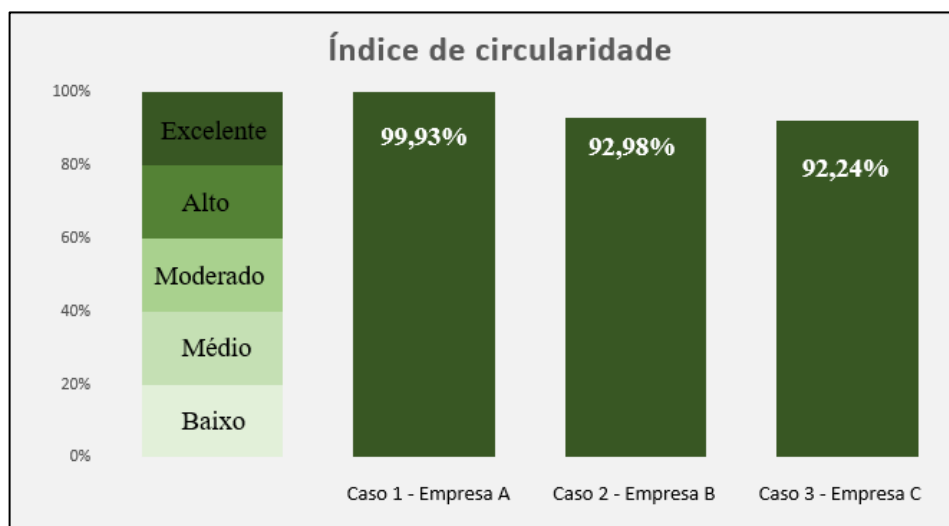
Tabela 20: Comparação da intensidade de massa unitária reduzida por tonelada de papel produzido.

	Caso 1 - Empresa A	Caso 2 - Empresa B	Caso 3 - Empresa C
	Total MIC [kg/ton]	Total MIC [kg/ton]	Total MIC [kg/ton]
Abiótico	50,72	210,00	138,47
Biótico	-2,94	64,76	53,93
Água	-22,32	5.554,68	4.489,53
Ar	35,49	87,95	50,02
MIT	60,95	5.917,39	4.731,95

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os índices de circularidade são apresentados na Figura 16. Como explicado anteriormente, os índices foram obtidos por meio da comparação das avaliações dos impactos ambientais por intensidades de massa calculados antes e depois da adoção das tecnologias da I4.0. Os índices obtidos estão em nível de excelência, indicando alta circularidade devido a reduções de insumos na produção conforme Potting *et al.* (2017), uma vez que os casos estudados envolveram investimentos em novas tecnologias, no caso controle preditivo para controlar a qualidade do papel.

Figura 16: Comparação dos índices de circularidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que diz respeito aos aspectos econômicos, também são apresentados as relações unitárias de investimento e economia financeira para a produção anual. Apesar de as empresas possuírem características diferentes em termos de especificações de gramatura do papel, a relação unitária pode facilitar a tomada de decisão para estimar novos investimentos com base em volumes de produções diferentes. Dessa forma, a Tabela 21 apresenta os investimentos e economias totais, bem como as bases unitárias para cada unitárias da produção dos casos.

Tabela 21: Comparação unitária dos resultados econômicos.

	Caso 1 - Empresa A	Caso 2 - Empresa B	Caso 3 - Empresa C
Investimento total	\$ 534.149,14	\$979.273,42	\$ 921.407,27
Economia total alcançada	\$ 954.913,44	\$ 10.150.500,09	\$ 7.245.166,70
Investimento unitário \$/ton	\$ 1,19	\$ 2,39	\$ 2,42
Economia alcançada unitário \$/ton	\$ 2,12	\$ 24,76	\$ 19,07

Fonte: Elaborado pelo autor.

5. DISCUSSÕES

A investigação conduzida nesse trabalho teve como premissa a avaliação da circularidade de fabricantes de celulose e papel que adotaram tecnologias da indústria 4.0. Isso porque, o setor de celulose e papel está entre as principais indústrias que mais consomem energia no mundo (DEL RIO *et al.*, 2022) e em decorrência dos aspectos ambientais também contribuem para as emissões de gases de efeito estufa (GRIFFIN *et al.*, 2018). Por outro lado, esse setor possui potencial de redução dos impactos ambientais, por meio de práticas de EC, onde os resíduos gerados podem ser aproveitados por outros setores, como produção de materiais de construção (TERRONES-SAETA *et al.*, 2020; MUÑOZ *et al.*, 2021), produção de bioetanol a partir de lama de fábrica de papel (ALKASRAWI *et al.*, 2021), produção de carvão ativado a partir do lodo primário (JARIA *et al.*, 2019) e recuperação de águas residuais (MOLINA-SÁNCHEZ *et al.*, 2018). No tocante a transição para I4.0 o setor de celulose e papel tem iniciado o processo de transformação digital (CLAUSER *et al.*, 2022), inicialmente com aperfeiçoamento do projeto de automação (CUI; XU, 2020), posteriormente com aplicações de tecnologias da I4.0 como algoritmos de aprendizagem de máquina para estimar o teor de umidade dos cavacos de madeira (SUTHAR; HE, 2021) e ferramentas para detecção de qualidade de papel (TANG *et al.*, 2020).

Vimal *et al.* (2022) realizaram estudo para identificar os drivers da adoção de I4.0 em uma rede de compartilhamento circular, onde as tecnologias de I4.0 podem criar caminhos à sustentabilidade. Talebjedi *et al.* (2020) aplicaram testes com métodos de inteligência artificial, para simular a carga elétrica do motor e da geração de vapor na polpação termomecânica, contribuindo para redução de custos e emissões, para gerar oportunidades para EC. Enquanto Clauser *et al.* (2022) investigaram as contribuições potenciais das tecnologias da I4.0 em projetos de biorrefinarias, onde os resultados apontaram oportunidades de ganhos ambientais e de redução de emissões e consumo de energia elétrica. Porém, Kumar *et al.* (2023) investigaram as aplicações inteligência artificial por método de aprendizagem de máquina para prever propriedades de biomassa e vestígios de metais em águas residuais. Portanto, esse estudo investigou grandes empresas do setor de celulose e papel, que implementaram tecnologias da I4.0 para controle preditivo da qualidade na produção de papel de embalagem, para avaliar a circularidade a partir dos ganhos ambientais e consequentemente os ganhos econômicos. Dessa forma, essa pesquisa corrobora com os estudos propostos de modelos preditivos de Rehtin *et al.* (2020) para garantir a qualidade de

acabamento de papel de embalagem e de Schroth *et al.* (2022) para auxiliar o operador na tomada de decisão e evitar desperdícios da incerteza de ajustes manuais. Com isso, essa pesquisa identificou que a aplicação de tecnologias da I4.0 para controle preditivo da qualidade do papel na produção das três empresas alcançou ganhos operacionais. Os ganhos estão relacionados a redução do tempo de testes em laboratório, realização de ajustes automáticos da dosagem dos insumos, aumento da precisão da aplicação de doses de insumos e melhoria dos níveis de qualidade do produto.

Essa pesquisa identificou e apresentou casos de três diferentes empresas líderes mundiais na produção de papel que iniciaram a transição para I4.0, implementando tecnologias da I4.0 para o controle preditivo na produção de papel. Assim, foram identificadas características parecidas com a abordagem feita por Rechlin *et al.* (2020), que demonstraram as fases de desenvolvimento de modelo preditivo, para garantir a qualidade de acabamento de papel de embalagem. Já nos estudos de El Koujok *et al.* (2020) e Nadim *et al.* (2022) foram apresentadas propostas e testes de ferramentas de diagnósticos de falhas, a partir de dados de empresas fabricantes de celulose e papel. Enquanto que Zhang *et al.* (2021) propuseram ferramentas, para otimizar o uso de energia elétrica e de vapor, além de Schroth *et al.* (2022) apresentarem proposta de ferramenta digital para auxiliar tomadas de decisão pelo operador. Porém, Rodrigues *et al.* (2022) propuseram algoritmo de inteligência artificial para predição de falhas na seção da prensa na fábrica de celulose. Enquanto, Pennells *et al.* (2022) apresentaram proposta baseada em métodos de aprendizagem de máquina, para prever a qualidade das nanofibras de celulose no desenvolvimento de novos materiais, como nanopapel. Portanto, o destaque dessa pesquisa foi a apresentação de casos de empresas com tecnologias da I4.0 já implementadas, como estratégia de transformação digital que alcançaram ganhos, devido otimização na dosagem de insumos indústrias, reduções de uso em excesso de matéria-prima, vapor e energia elétrica no controle preditivo da qualidade do papel.

No que se refere aos aspectos ambientais, essa pesquisa mostrou que as empresas fabricantes de papel, que implantaram tecnologias da I4.0, reduziram o impacto ambiental por meio da otimização do uso de amido, fibras virgens, vapor e energia, e aumento do uso de fibras recicladas. Dessa forma, os impactos no meio ambiente foram quantificados, possibilitando estimar quanto os compartimentos abiótico, biótico, água e ar deixaram de ser impactados negativamente pela produção de papel. Essa abordagem se diferencia na pesquisa, porque outros estudos apresentam de forma qualitativa as vantagens ambientais para

economia circular. Desse modo, os trabalhos que tratam a adoção de tecnologias da I4.0 ligada a econômica circular abordam o aproveitamento de resíduos industriais como matéria-prima (VIMAL *et al.*, 2022; CLAUSER *et al.*, 2022; KUMAR *et al.*, 2023), a otimização do consumo de energia elétrica e vapor (RODRIGUES *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2021; EL KOUJOK *et al.*, 2020), a restauração de produtos químicos (NADIM *et al.*, 2022), o desenvolvimento de materiais renováveis (PENNELLS *et al.*, 2022). Por outro lado, os estudos que apresentam ganhos ambientais quantitativos realizam estimativas de emissões de CO₂ (TSAI; LAI, 2018; CARDEAL *et al.*, 2023), comparações percentuais de redução de matéria-prima (GANDOLFO; LUPI, 2021; SCHROTH *et al.*, 2022), balanço de massa (RECHTIN *et al.*, 2020; SU *et al.*, 2021), previsão de carga do motor e de vapor gerado (TALEBJEDI *et al.*, 2020). Portanto, essa pesquisa identificou que a otimização dos insumos em tempo real durante a produção, permite aos gestores visualizar a estimativa do impacto ambiental por compartimento. Além disso, dentro do ciclo de produção foi identificado o uso de fibras recicladas, redução de fibras virgens, amido, energia elétrica de consumo de vapor, onde as empresas A, B e C alcançaram redução anuais de 27.428.474,25 kg, 2.426.129.197,50 kg e 1.798.140.915,54 kg respectivamente.

Su *et al.* (2021) propuseram algoritmo de inteligência artificial para indicar a quantidade ótima de produção de papel e promover a EC, por meio da conversão de papéis defeituosos em matéria-prima secundária, onde identificaram potencial de economia de 484,70 kg de matéria-prima virgem por ciclo. Gandolfo e Lupi (2021) conduziram estudo em uma empresa, onde o uso de tecnologias da I4.0 melhorou o fluxo de recuperação de embalagens, possibilitando a redução do uso de matéria-prima virgem e aumento do uso de matéria-prima reciclada (51% para 54%). Zhang *et al.* (2021) modelos de inteligência artificial com base no consumo de energia elétrica e vapor da máquina de papel tissue para auxiliar no planejamento de consumo energético. Nadim *et al.* (2022) utilizaram métodos de aprendizagem de máquina como proposta de aplicação em uma caldeira de recuperação de licor negro, utilizada para restaurar produtos químicos. Com isso, essa pesquisa identificou com exclusividade a influência das tecnologias da I4.0 no controle preditivo da qualidade do produto, onde as reduções de impactos ambientais obtidas possibilitaram estimar a circularidade, devido as práticas adotadas de redução e de reutilização de material descartado. Assim, as reduções de impactos ambientais alcançadas pelas empresas A, B e C obtiveram índice de circularidade de 99,93%, 92,98% e 92,24% respectivamente

No que diz respeito aos aspectos econômicos, algumas pesquisas apresentam indícios de ganhos (EL KOUJOK *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2021; CLAUSER *et al.*, 2022; NADIM *et al.*, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2022; SCHROTH *et al.*, 2022; VIMAL *et al.*, 2022; KUMAR *et al.*, 2023) e as pesquisas que resultam em ganhos quantitativos sugerem oportunidade de aumento de lucro (TSAI; LAI, 2018), redução de custo de matéria-prima (Rechtin *et al.*, 2020), oportunidade de receitas adicionais (GANDOLFO; LUPI, 2021), redução percentual de custos (SU *et al.*, 2021; CARDEAL *et al.*, 2023). Desse modo, esse pesquisa identificou reduções de custo com matéria-prima e energia elétrica, além de economia devido ao investimento na implementação de tecnologias da I4.0.

No que se refere aos ganhos econômicos quantitativos, Tsai e Lai (2018) propuseram modelo com tecnologias de I4.0 para indicar o melhor mix para produção verde, podendo alcançar 2834 toneladas de CO₂ de emissões e lucro máximo de \$ 1.519.473. Enquanto Rechtin *et al.* (2020) propuseram modelo preditivo, para garantir a qualidade de acabamento de papel de embalagem, indicando potencial de redução 158.900 kg de produtos e economia de \$500.000 anual. Por outro lado, Cardeal *et al.* (2023) desenvolveram modelo de inteligência artificial para auxiliar na identificação de peças com potencial de produção por manufatura aditiva. De maneira que a diferença entre os processos alcançou 4,01 kg CO₂ equivalente de mais emissões e oportunidade de redução de 49% no custo unitário de estoque após um ano (CARDEAL *et al.*, 2023). Portanto, essa pesquisa se distingui por avaliar cuidadosamente os resultados econômicos obtidos devido as reduções de uso dos insumos da produção, devido ao uso tecnologias da I4.0 no controle preditivo implementado nas três empresas. Dessa forma, as economias anuais e retornos de investimentos alcançados pelas empresas A, B e C resultaram respectivamente em \$954.913,44 e retorno em 1,16 anos, \$10.150.500,09 com retorno em 0,20 anos e \$7.245.166,70 e retorno 0,27 anos.

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento da presente tese procurou cobrir as lacunas identificadas na literatura referente a adoção de tecnologias de I4.0 relacionadas a EC no setor de celulose e papel. Embora tenham sido identificados trabalhos que relacionassem a adoção de tecnologias de I4.0 com a EC, contudo, as aplicações foram apresentadas na forma de desenvolvimentos e testes com potencial aplicação na produção. Com isso, o trabalho de pesquisa teve como premissa a avaliação da circularidade de fabricantes de celulose e papel que adotaram tecnologias da indústria 4.0, uma vez que na revisão sistemática da literatura não foram encontradas publicações com essa abordagem. Então, para avaliação do índice de circularidade foi necessário comparar os impactos ambientais resultantes das avaliações dos impactos ambientais com fatores de intensidade de massa, considerando os momentos antes e após a adoção de tecnologias da I4.0 nas empresas estudadas. Assim, com base nas reduções de insumos foi feita avaliação econômica com retorno de investimento.

Com base na literatura, foi visto que o setor de celulose e papel é intensivo em consumo de energia elétrica, matéria-prima e consequentemente em emissões. Por outro lado, o setor de celulose e papel contribui para economia global e têm implementado ações inovadoras que resultam em ganhos econômicos, ambientais e sociais, para reverter a imagem de indústria intensivista.

A adoção de tecnologias da indústria 4.0 estimula a circularidade de recursos empregados na produção de papel, quando as tecnologias da I4.0 são aplicadas de forma integrada desde o desenvolvimento até a aplicação de modelo para controle preditivo da qualidade do papel. Assim, as correções automáticas da aplicação das tecnologias possibilitam reduzir o uso de matéria-prima de alto custo, como o amido e fibras virgens, aumentar a taxa de proporção de uso de fibras recicladas, reduzir o consumo de vapor e energia elétrica. Esses achados contribuem para o meio ambiente, pois reduz o uso matéria-prima primária, para prática porque essas ações melhoram a imagem do setor, para a sociedade porque reduz as emissões para o meio ambiente.

Também como contribuição prática, essa pesquisa oferece oportunidades sob o aspecto econômico da viabilidade de investimento em tecnologias da I4.0, como estratégia inicial de transformação digital no setor. Isso porque, nos modelos convencionais de produção de papel, o operador da máquina tem participação direta nos ajustes e controles de insumos e, como cada operador possui conhecimentos diferentes, as doses excessivas e desperdícios são

frequentes. Com isso, os modelos preditivos identificados nas empresas estudadas podem padronizar, controlar e ajustar automaticamente em tempo real as doses dos insumos, com base na predição da qualidade e especificações do produto em produção. Os retornos de investimentos podem ocorrer entre 2,5 e 14 meses, mas isso dependerá de condições particulares das empresas, quanto ao volume de produção anual, estratégias de proporção de uso de matéria-prima (virgem e reciclada), especificações e tipos de produto.

Para o meio ambiente essa pesquisa apresenta oportunidades de redução do uso de matéria-prima primária, como as fibras virgens e potencializa o uso de matéria-prima secundária, para uso de fibras recicladas, além das reduções de amido, vapor e energia elétrica. Desse modo, o estudo identificou que as otimizações de insumos na produção de papel para embalagem alcançaram reduções de impacto ambiental e elevaram o índice de circularidade. Assim, a aplicação das tecnologias da I4.0 para o controle preditivo da qualidade de papel contribuem para um futuro verde, afetando positivamente o setor, uma vez que as oportunidades para o meio ambiente beneficiam a sociedade diretamente.

Como contribuições para a teoria, esse estudo apresenta várias oportunidades, pois cobre as lacunas identificadas, mostrando como a adoção de tecnologias da indústria 4.0 estimula a circularidade de recursos empregados na produção de celulose e papel. Isto significa que essa pesquisa retrata que a adoção de tecnologias da I4.0 estimula a circularidade na produção de papel, demonstrando conexão entre os temas e como os ganhos foram obtidos. Também os procedimentos para avaliação do impacto ambiental e do índice de circularidade foram aplicados de forma satisfatória, sendo diferencial para cobertura das lacunas. Portanto, os conhecimentos gerados e reportados podem gerar novas contribuições em outras investigações, com expectativa de oportunidades de ganhos nos aspectos econômicos, sociais, teoria e prática.

Desse modo, para pesquisas futuras é sugerida investigação em grandes empresas do setor de celulose e papel localizadas em outros países como Brasil, Estados Unidos, China e Índia, uma vez que esses países tem participação relevante na produção e consumo mundial de papel. Como as investigações identificaram aplicações de tecnologias da I4.0 na produção de papel para embalagem, então novas investigações poderiam ser conduzidas em fábricas de papel tissue (higiênicos e absorventes) e papeis gráficos, para verificar se essas fábricas estão em processo de transformação digital.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL-HAMID, A. Q.; ALI, M. H.; TSENG, M. L.; LAN, S.; KUMAR, M.. Impeding challenges on industry 4.0 in circular economy: Palm oil industry in Malaysia. **Computers & Operations Research**, v. 123, p. 105052, 2020.
- ABTCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. Disponível em: <<https://www.abtcp.org.br/o-setor>>. Acesso em 16 de abril de 2023.
- AGRAWAL, A.; FISCHER, M.; SINGH, V.. Digital twin: From concept to practice. **Journal of Management in Engineering**, v. 38, n. 3, p. 06022001, 2022.
- AL-ALI, A. R.; GUPTA, R.; ZAMAN BATOOL, T.; LANDOLSI, T.; ALOUL, F.; AL NABULSI, A.. Digital twin conceptual model within the context of internet of things. **Future Internet**, v. 12, n. 10, p. 163, 2020.
- ALCÁCER, Vitor; CRUZ-MACHADO, Virgilio. Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. **Engineering science and technology, an international journal**, v. 22, n. 3, p. 899-919, 2019.
- ALKASRAWI, M.; AL-OTHMAN, A.; TAWALBEH, M.; DONCAN, S.; GURRAM, R.; SINGSAAS, E.; ALMOMANI, F.; AL-ASHEH, S.. A novel technique of paper mill sludge conversion to bioethanol toward sustainable energy production: Effect of fiber recovery on the saccharification hydrolysis and fermentation. **Energy**, v. 223, p. 120018, 2021.
- ALLADI, T.; CHAMOLA, V.; PARIZI, R. M.; CHOO, K. K. R.. Blockchain applications for industry 4.0 and industrial IoT: A review. **Ieee Access**, v. 7, p. 176935-176951, 2019.
- ANDERSSON, Per. A dynamic Na/S balance of a kraft pulp mill: Modeling and simulation of a kraft pulp mill using WinGEMS. **Department of Engineering and Chemical Science, Chemical Engineering, Karlstad University**, 2014.
- ARM, J.; ZEZULKA, F.; BRADAC, Z.; MARCON, P.; KACZMARCZYK, V.; BENESL, T.; SCHROEDER, T.. Implementing industry 4.0 in discrete manufacturing: options and drawbacks. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 6, p. 473-478, 2018.
- ARRIETA, A. B.; DÍAZ-RODRÍGUEZ, N.; DEL SER, J.; BENNETOT, A.; TABIK, S.; BARBADO, A.; GARCIA, S.; GIL-LOPEZA, S.; MOLINAG, D.; BENJAMINSH, R.; CHATILA, R.; HERRERA, F.. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. **Information fusion**, v. 58, p. 82-115, 2020.
- BAJPAI, Pratima. Basic overview of pulp and paper manufacturing process. **Green chemistry and sustainability in pulp and paper industry**, p. 11-39, 2015.
- BAJPAI, Pratima. Biotechnology for pulp and paper processing. **Singapore: Springer**, 2018.
- BAUCHER, M.; HALPIN, C.; PETIT-CONIL, M.; BOERJAN, W.. Lignin: genetic engineering and impact on pulping. **Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology**, v. 38, n. 4, p. 305-350, 2003.

BAYRAM, B.; İNCE, G.. Advances in Robotics in the Era of Industry 4.0. **Industry 4.0. Managing The Digital Transformation**, p. 187-200, 2018.

BERTO, Rosa Maria Villares de Souza; NAKANO, Davi. Revisitando a produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Production**, v. 24, p. 225-232, 2014.

BRÄNNVALL, Elisabet. Overview of pulp and paper processes. **Pulping chemistry and technology**, v. 2, p. 1-13, 2009.

BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M.. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. **International Journal of Information and Communication Engineering**, v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014.

BRYMAN, Alan. Research methods and organization studies. **Routledge**, 2003.

BUTT, Javaid. Exploring the interrelationship between additive manufacturing and Industry 4.0. **Designs**, v. 4, n. 2, p. 13, 2020.

CABRERA, D.; CERRADA, M.; MACANCELA, J. C.; SIGUENCIA, J.; SÁNCHEZ, R. V.. Technology selection for Industry 4.0 oriented condition-based monitoring system: A case study in the paper mills industry. **IFAC-PapersOnLine**, v. 55, n. 19, p. 211-216, 2022.

CAMACHO, D. D.; CLAYTON, P.; O'BRIEN, W. J.; SEEPERSAD, C.; JUENGER, M.; FERRON, R.; SALAMONE, S.. Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review. **Automation in Construction**, v. 89, p. 110-119, 2018.

CAMPOS, Edison da Silva; FOELKEL, Celso. A evolução tecnológica do setor de celulose e papel no Brasil. São Paulo: **Abtcp—Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel**, 2016.

CARDEAL, GONÇALO; LEITE, MARCO; RIBEIRO, INÊS. Decision-support model to select spare parts suitable for additive manufacturing. **Computers in Industry**, v. 144, p. 103798, 2023.

CARDOSO, Jorge; VOIGT, Konrad; WINKLER, Matthias. Service engineering for the internet of services. In: **Enterprise Information Systems: 10th International Conference, ICEIS 2008, Barcelona, Spain, June 12-16, 2008, Revised Selected Papers 10**. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

CAUCHICK, Paulo; MORABITO, Reinaldo; PUREZA, Vitoria. Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção. 2ª Ed. – São Paulo. **Elsevier Brasil**, 2012.

CAVE, Germaine; FATEHI, Pedram. Separation of lignosulfonate from spent liquor of neutral sulphite semichemical pulping process via surfactant treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 151, p. 39-46, 2015.

CENTEA, D.; SINGH, I.; WANYAMA, T.; MAGOLON, M.; BOER, J.; ELBESTAWI, M.. Using the SEPT Learning Factory for the Implementation of Industry 4.0: case of SMEs. **Procedia Manufacturing**, v. 45, p. 102-107, 2020.

CEPI – Confederation of European Paper Industries. Disponível em: <<https://www.cepi.org/policy-area/industry-transformation/>>. Acesso em: 16 de abril de 2023.

CLAUSER, N.M., FELISSIA, F.E., AREA, M.C., VALLEJOS, M.E.. Integrating the New Age of Bioeconomy and Industry 4.0 into Biorefinery Process Design. **BioResources** 17(3), pp. 5510-5531, 2022.

CONTADOR, J. C.; SATYRO, W. C.; CONTADOR, J. L.; DE MESQUITA SPINOLA, M.. Flexibility in the Brazilian Industry 4.0: Challenges and Opportunities. **Global Journal of Flexible Systems Management**, p. 1-17, 2020.

CORALLO, Angelo; LAZOI, Mariangela; LEZZI, Marianna. Cybersecurity in the context of industry 4.0: A structured classification of critical assets and business impacts. **Computers in industry**, v. 114, p. 103165, 2020.

CRAIGEN, Dan; DIAKUN-THIBAUT, Nadia; PURSE, Randy. Defining cybersecurity. **Technology Innovation Management Review**, v. 4, n. 10, 2014.

CRUZ-MEJÍA, Oliverio; MÁRQUEZ, Alberto; MONSREAL-BARRERA, Mario M. Product delivery and simulation for Industry 4.0. **Simulation for Industry 4.0: Past, Present, and Future**, p. 81-95, 2019.

CUI, H.; XU HL, N. I. U. S.. Discussion on Intelligent Design of Paper Industry. **China Pulp & Paper**, v. 39, n. 8, p. 26-36, 2020.

DE ANDRADE MARTINS, Gilberto. Manual Para Elaboração de Monografias E Dissertações. **Editora Atlas SA**, 2000.

DE OLIVEIRA NETO, G. C.; PINTO, L. F. R.; AMORIM, M. P. C.; GIANNETTI, B. F.; DE ALMEIDA, C. M. V. B. A framework of actions for strong sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 1629-1643, 2018.

DE OLIVEIRA NETO, G. C.; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, G. L. V.; ARNS, V. D.; TUCCI, H. N. P.; AMORIM, M.. Assessment of the Eco-Efficiency of the Circular Economy in the Recovery of Cellulose from the Shredding of Textile Waste. **Polymers**, v. 14, n. 7, p. 1317, 2022.

DEL RIO, D. D. F.; SOVACOOOL, B. K.; GRIFFITHS, S.; BAZILIAN, M.; KIM, J.; FOLEY, A. M.; ROONEY, D.. Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, p. 112706, 2022.

DE PAULA FERREIRA, William; ARMELLINI, Fabiano; DE SANTA-EULALIA, Luis Antonio. Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 149, p. 106868, 2020.

DOWNS, JAMES J.; VOGEL, ERNEST F. A plant-wide industrial process control problem. **Computers & chemical engineering**, v. 17, n. 3, p. 245-255, 1993.

EK, Monica; GELLERSTEDT, Göran; HENRIKSSON, Gunnar (Ed.). Pulping chemistry and technology. **Walter de Gruyter**, 2009.

EL KOUJOK, M.; RAGAB, A.; GHEZZAZ, H.; AMAZOUZ, M. A multiagent-based methodology for known and novel faults diagnosis in industrial processes. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 17, n. 5, p. 3358-3366, 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. What Is a Circular Economy? Disponível em: <<https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>> Acesso em: 1 de abril 2023.

ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. Paper Grades. Paper Making. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/papermaking/Paper-grades>>. Acesso em: 07 de maio de 2023.

EZEUDU, Obiora B.; EZEUDU, Tochukwu S. Implementation of circular economy principles in industrial solid waste management: Case studies from a developing economy (Nigeria). **Recycling**, v. 4, n. 4, p. 42, 2019.

FAVORETO, Ricardo Lebbos; AMÂNCIO-VIEIRA, Saulo Fabiano; SHIMADA, Alexandre Teruky. A produção intelectual em RBV: uma incursão bibliométrica nos principais periódicos nacionais. **REBRAE**, v. 7, n. 1, p. 37-55, 2014.

FERNANDEZ-CARAMES, Tiago M.; FRAGA-LAMAS, Paula. A review on the application of blockchain to the next generation of cybersecure industry 4.0 smart factories. **Ieee Access**, v. 7, p. 45201-45218, 2019.

GBC BRASIL – Por que Devemos Adotar a Circularidade no Ambiente Construído para Alcançar um Equilíbrio Regenerativo. **Green Building Council Brasil**. 2023. Disponível em: <<https://www.gbcbrasil.org.br/por-que-devemos-adotar-a-circularidade-no-ambiente-construido-para-alcancar-um-equilibrio-regenerativo/>> Acesso em: 14.05.2023.

GANDOLFO, Alessandro; LUPI, Lorenzo. Circular economy, the transition of an incumbent focal firm: How to successfully reconcile environmental and economic sustainability?. **Business strategy and the environment**, v. 30, n. 7, p. 3297-3308, 2021.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M.; HULTINK, E. J.. The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. **Journal of cleaner production**, v. 143, p. 757-768, 2017.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B.. Additive manufacturing technologies. New York: **Springer**, 2014.

GILCHRIST, Alasdair. Industry 4.0: the industrial internet of things. **Apress**, 2016.

GOEL, G.; VASIĆ, M. V.; KATIYAR, N. K.; KIRTHIKA, S. K.; PEZO, M.; DINAKAR, P.. Potential pathway for recycling of the paper mill sludge compost for brick making. **Construction and Building Materials**, v. 278, p. 122384, 2021.

GOEL, Ruchi; GUPTA, Pooja. Robotics and industry 4.0. A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, **Sharp Business and Sustainable Development**, p. 157-169, 2020.

GRIFFIN, PAUL W.; HAMMOND, GEOFFREY P.; NORMAN, JONATHAN B. Industrial decarbonisation of the pulp and paper sector: A UK perspective. **Applied Thermal Engineering**, v. 134, p. 152-162, 2018.

GULLICHSEN, Johan; PAULAPURO, Hannu. Paper and board grades. **TAPPI and Finnish Paper Engineers' Association**, 2000.

HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd. Additive manufacturing applications in industry 4.0: a review. **Journal of Industrial Integration and Management**, v. 4, n. 04, p. 1930001, 2019.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B.. Design principles for Industrie 4.0 scenarios: a literature review. **Technische Universität Dortmund, Dortmund**, v. 45, 2015.

HU, Yuan; HE, Xuan; POUSTIE, Mark. Can legislation promote a circular economy? a material flow-based evaluation of the circular degree of the chinese economy. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 990, 2018.

IEA – International Energy Agency. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/pulp-and-paper>>. Acesso em: 16 de abril de 2023.

JAIN, P.; GUPTA, C.. A sustainable journey of handmade paper from past to present: a review. **Problemy Ekorozwoju**, v. 16, n. 2, 2021.

JARIA, G.; SILVA, C. P.; OLIVEIRA, J. A.; SANTOS, S. M.; GIL, M. V.; OTERO, M.; CALISTO, V.; ESTEVES, V. I.. Production of highly efficient activated carbons from industrial wastes for the removal of pharmaceuticals from water—A full factorial design. **Journal of hazardous materials**, v. 370, p. 212-218, 2019.

JAUHAR, S. K.; RAJ, P. V. R. P.; KAMBLE, S.; PRATAP, S.; GUPTA, S.; BELHADI, A.. A deep learning-based approach for performance assessment and prediction: A case study of pulp and paper industries. **Annals of Operations Research**, p. 1-27, 2022.

KALMYKOVA, Yuliya; SADAGOPAN, Madumita; ROSADO, Leonardo. Circular economy—From review of theories and practices to development of implementation tools. **Resources, conservation and recycling**, v. 135, p. 190-201, 2018.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, conservation and recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.

KORHONEN, Jouni; HONKASALO, Antero; SEPPÄLÄ, Jyri. Circular economy: the concept and its limitations. **Ecological economics**, v. 143, p. 37-46, 2018.

KUMAR, Rajesh; MAURYA, Annapurna; RAJ, Abhay. Emerging technological solutions for the management of paper mill wastewater: Treatment, nutrient recovery and fourth industrial revolution (IR 4.0). **Journal of Water Process Engineering**, v. 53, p. 103715, 2023.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H. G.; FELD, T.; HOFFMANN, M.. **Industry 4.0. Business & information systems engineering**, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014.

LI, YUZHONG; MA, CHUNYUAN. Circular economy of a papermaking park in China: a case study. **Journal of cleaner production**, v. 92, p. 65-74, 2015.

LI, Z.; ZENG, H.; XIAO, X.; CAO, J.; YANG, C.; ZHANG, K.. Resource value flow analysis of paper-making enterprises: A Chinese case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 577-587, 2019.

LU, Yang. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of industrial information integration**, v. 6, p. 1-10, 2017.

LUCATO, Wagner Cezar *et al.* Model to evaluate the Industry 4.0 readiness degree in Industrial Companies. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 13, p. 1808-1813, 2019.

MAHDAVINEJAD, M. S.; REZVAN, M.; BAREKATAIN, M.; ADIBI, P.; BARNAGHI, P.; SHETH, A. P.. Machine learning for Internet of Things data analysis: A survey. **Digital Communications and Networks**, v. 4, n. 3, p. 161-175, 2018.

MALIK, P. K.; SHARMA, R.; SINGH, R.; GEHLOT, A.; SATAPATHY, S. C.; ALNUMAY, W. S.; PELUSI, D.; GHOSH, U.; NAYAK, J.. Industrial Internet of Things and its applications in industry 4.0: State of the art. **Computer Communications**, v. 166, p. 125-139, 2021.

MARCONI, MARINA DE ANDRADE; LAKATOS, EVA MARIA. Fundamentos de metodologia científica. 7. ed.-São Paulo: **Atlas**, 2010.

MARTINS, R.A. A.. Abordagens quantitativa e qualitativa . In: CAUCHICK MIGUEL, P.A.C. (Coord.). **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2012.

MAUREIRA, C.; PINTO, H.; YEPES, V.; GARCÍA, J. Towards an AEC-AI industry optimization algorithmic knowledge mapping: an adaptive methodology for macroscopic conceptual analysis. **IEEE Access**, v. 9, p. 110842-110879, 2021.

MBOOWA, Drake. A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-12, 2021.

MEZZANOTTE, P.; PALAZZI, V.; ALIMENTI, F.; ROSELLI, L. Innovative RFID sensors for Internet of Things applications. **IEEE Journal of Microwaves**, v. 1, n. 1, p. 55-65, 2021.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Production**, v. 17, p. 216-229, 2007.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G.; PRISMA GROUP. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS medicine**, v. 6, n. 7, p. e1000097, 2009.

MOLINA-SÁNCHEZ, E.; LEYVA-DÍAZ, J. C.; CORTÉS-GARCÍA, F. J.; MOLINA-MORENO, V.. Proposal of sustainability indicators for the waste management from the paper industry within the circular economy model. **Water**, v. 10, n. 8, p. 1014, 2018.

MUÑOZ, P.; LETELIER, V.; MUÑOZ, L.; BUSTAMANTE, M. A.; GENCEL, O.; SUTCU, M.. The combined effect of bottom ashes and cellulose fibers on fired clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124307, 2021.

MYLLYMÄKI, P.; PESONEN, J.; NURMESNIEMI, E. T.; ROMAR, H.; TYNJÄLÄ, P.; HU, T.; LASSI, U.. The use of industrial waste materials for the simultaneous removal of ammonium nitrogen and phosphate from the anaerobic digestion reject water. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 8, p. 4013-4024, 2020.

NADIM, KARIM; RAGAB, AHMED; OUALI, MOHAMED-SALAH. Data-driven dynamic causality analysis of industrial systems using interpretable machine learning and process mining. **Journal of Intelligent Manufacturing**, p. 1-27, 2022.

OZTEMEL, Ercan; GURSEV, Samet. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 1, p. 127-182, 2020.

PATRE, Situ Rani. Passive Chipless RFID sensors: Concept to applications—A review. **IEEE Journal of Radio Frequency Identification**, v. 6, p. 64-76, 2021.

PENNELLS, J.; HEUBERGER, B.; CHALÉAT, C.; MARTIN, D. J.. Assessing cellulose micro/nanofibre morphology using a high throughput fibre analysis device to predict nanopaper performance. **Cellulose**, v. 29, n. 4, p. 2599-2616, 2022.

PEREIRA, A. C.; ROMERO, Fernando. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1206-1214, 2017.

PEREIRA, Warley Augusto; ALMEIDA, L. da S. Método manual para cálculo da taxa interna de retorno. **Revista Objetiva**, v. 4, n. 64, p. 1-13, 2008.

PHAM, T. T.; KUO, T. C.; TSENG, M. L.; TAN, R. R.; TAN, K.; IKA, D. S.; LIN, C. J.. Industry 4.0 to Accelerate the Circular Economy: A Case Study of Electric Scooter Sharing. **Sustainability**, v. 11, n. 23, p. 6661, 2019.

PIVOTO, D. G.; DE ALMEIDA, L. F.; DA ROSA RIGHI, R.; RODRIGUES, J. J.; LUGLI, A. B.; ALBERTI, A. M.. Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review. **Journal of manufacturing systems**, v. 58, p. 176-192, 2021.

POSADA, J.; TORO, C.; BARANDIARAN, I.; OYARZUN, D.; STRICKER, D.; DE AMICIS, R.; VALLARINO, I.. Visual computing as a key enabling technology for industrie 4.0 and industrial internet. **IEEE computer graphics and applications**, v. 35, n. 2, p. 26-40, 2015.

POTTING, J.; HEKKERT, M. P.; WORRELL, E.; HANEMAAIJER, A.. Circular economy: measuring innovation in the product chain. **Planbureau voor de Leefomgeving**, n. 2544, 2017.

RECHTIN, C.; LEWIS, A.; ZARKO, B. A.; RANJAN, C.. Creating Adaptive Predictions for Packaging Critical Quality Parameters Using Advanced Analytics and Machine Learning. **TAPPI JOURNAL**, v. 18, n. 11, p. 679-689, 2019.

REIS, Jacqueline Zonichenn; GONÇALVES, Rodrigo Franco. The role of internet of services (ios) on industry 4.0 through the service oriented architecture (soa). In: **Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2018, Seoul, Korea, August 26-30, 2018, Proceedings, Part II**. Springer International Publishing, 2018.

RITTHOFF, Michael; ROHN, Holger; LIEDTKE, Christa. Calculating MIPS: resource productivity of products and services. **Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy**, v.27e, 52p.2002.

ROBERT, Noely T. Forlin. Produção de embalagem de papel. **Rede de Tecnologia e Inovação** do Rio de Janeiro, 2007.

ROBLEK, Vasja; MEŠKO, Maja; KRAPEŽ, Alojz. A complex view of industry 4.0. **Sage open**, v. 6, n. 2, p. 2158244016653987, 2016.

RODRIGUES, J. A.; FARINHA, J. T.; MENDES, M.; MATEUS, R. J.; CARDOSO, A. J. M.. Comparison of Different Features and Neural Networks for Predicting Industrial Paper Press Condition. **Energies**, v. 15, n. 17, p. 6308, 2022.

ROYO, P.; ACEVEDO, L.; ARNAL, Á. J.; DIAZ-RAMÍREZ, M.; GARCÍA-ARMINGOL T.; FERREIRA, V. J.; FERREIRA, G.; LÓPEZ-SABIRÓN, A. M.. Decision support system of innovative high-temperature latent heat storage for waste heat recovery in the energy-intensive industry. **Energies**, v. 14, n. 2, p. 365, 2021.

RÜßMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M.. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. **Boston Consulting Group**, v. 9, n. 1, p. 54-89, 2015.

SALAMEH, T.; TAWALBEH, M.; AL-SHANNAG, M.; SAIDAN, M.; MELHEM, K. B.; ALKASRAWI, M.. Energy saving in the process of bioethanol production from renewable paper mill sludge. **Energy**, v. 196, p. 117085, 2020.

SALEHI, Hadi; BURGUEÑO, Rigoberto. Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. **Engineering structures**, v. 171, p. 170-189, 2018.

SALKIN, C.; ONER, M.; USTUNDAG, A.; CEVIKCAN, E.. A conceptual framework for Industry 4.0. **Industry 4.0: managing the digital transformation**, p. 3-23, 2018.

SANCHEZ, Manuel; EXPOSITO, Ernesto; AGUILAR, Jose. Industry 4.0: survey from a system integration perspective. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, p. 1-25, 2020.

SARKER, I. H.; KAYES, A. S. M.; BADSHA, S.; ALQAHTANI, H.; WATTERS, P.; NG, A.. Cybersecurity data science: an overview from machine learning perspective. **Journal of Big Data**, v. 7, n. 1, p. 1-29, 2020.

SCHROTH, M.; HAKE, F.; MERKER, K.; BECHER, A.; KLAEGGER, T.; HUESMANN, R.; EICHHORN, D.; OEHM, L.. Optimization paper production through digitalization by developing an assistance system for machine operators including quality forecast: a concept. **arXiv preprint arXiv:2206.11581**, 2022.

SCOPUS. Content Coverage Guide. *Disponível em*: < <https://www.elsevier.com/?a=69451> >: Acesso em: 13 de maio de 2023.

SHARMA, Aditi; JAIN, Deepak Kumar. Development of industry 4.0. **A Roadmap to Industry 4.0: smart production, sharp business and sustainable development**, p. 23-38, 2020.

SOKOL, Annie W.; HOGAN, Michael D. NIST Cloud Computing Standards Roadmap. No. **Special Publication** (NIST SP)-500-291r2. 2013.

SOPELANA, A.; AURIAULT, C.; BANSAL, A.; FIFER, K.; PAIVA, H.; MAURICE, C.; WESTIN, G.; RIOS, J; OLEAGA, ASIER; CAÑAS, A.. Innovative Circular Economy Models for the European Pulp and Paper Industry: A Reference Framework for a Resource Recovery Scenario. **Sustainability**, v. 13, n. 18, p. 10285, 2021.

SOUALHI, M.; EL KOUJOK, M.; NGUYEN, K. T.; MEDJAHHER, K.; RAGAB, A.; GHEZZAZ, H.; AMAZOUZ, M.; OUALI, M. S.. Adaptive prognostics in a controlled energy conversion process based on long-and short-term predictors. **Applied Energy**, v. 283, p. 116049, 2021.

SPEKMAN, Robert E.; SWEENEY, Patrick J. RFID: from concept to implementation. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, 2006.

SU, R. H.; WENG, M. W.; YANG, C. T.; LI, H. T.. An Imperfect Production–Inventory Model with Mixed Materials Containing Scrap Returns Based on a Circular Economy. **Processes**, v. 9, n. 8, p. 1275, 2021.

SUTHAR, Kerul; HE, Q. Peter. Multiclass moisture classification in woodchips using IIoT Wi-Fi and machine learning techniques. **Computers & Chemical Engineering**, v. 154, p. 107445, 2021.

TALEBJEDI, B.; KHOSRAVI, A.; LAUKKANEN, T.; HOLMBERG, H.; VAKKILAINEN, E.; SYRI, S.. Energy modeling of a refiner in thermo-mechanical pulping process using ANFIS method. **Energies**, v. 13, n. 19, p. 5113, 2020.

TALEBJEDI, B.; LAUKKANEN, T.; HOLMBERG, H.; VAKKILAINEN, E.; SYRI, S.. Advanced energy-saving optimization strategy in thermo-mechanical pulping by machine learning approach. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 37, n. 3, p. 434-452, 2022.

TERRONES-SAETA, J. M.; SUÁREZ-MACÍAS, J.; IGLESIAS-GODINO, F. J.; CORPAS-IGLESIAS, F. A. Evaluation of the use of electric arc furnace slag and ladle furnace slag in

stone mastic asphalt mixes with discarded cellulose fibers from the papermaking industry. **Metals**, v. 10, n. 11, p. 1548, 2020.

THAMES, Lane; SCHAEFER, Dirk. Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0. **Procedia cirp**, v. 52, p. 12-17, 2016.

TANG, W.; ZHANG, C.; FENG, B.; ZHANG, Y.; WANG, Q.; WANG, M. Review of advanced control technologies and modern control systems for paper industry. **China Pulp & Paper**, v. 39, n. 8, p. 14-25, 2020.

TSAI, WEN-HSIEN; LAI, SHANG-YU. Green production planning and control model with ABC under industry 4.0 for the paper industry. **Sustainability**, v. 10, n. 8, p. 2932, 2018.

TUTUŞ, A.; EROĞLU, H.. A practical solution to silica problem in straw pulping. *Appita Journal*, v. 56, n. 2, p. 111-115, 2003.

TWOGETHER. Water for life requires inventiveness. **Paper Technology Journal**. 2008
Disponível em: < https://voith.com/corp-en/voith-paper_twogether26_en.pdf > Acesso em: 09 de maio de 2023.

TWOGETHER. First IEM starts up at Perlen Papier AG. **Paper Technology Journal**. 2011.
Disponível em: < https://voith.com/corp-en/voith-paper_twogether32_en.pdf > Acesso em: 09 de maio de 2023.

URBINATI, A., ROSA, P., SASSANELLI, C., CHIARONI, D., TERZI, S. Circular business models in the European manufacturing industry: A multiple case study analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 122964, 2020.

USTUNDAG, Alp; CEVIKCAN, Emre. Industry 4.0: managing the digital transformation. by **Springer Nature**, 2018.

VAN DER MEI, R.; VAN DEN BERG, H.; GANCHEV, I.; TUTSCHKU, K.; LEITNER, P.; LASSILA, P.; BURAKOWSKI, W.; LIBERAL, F.; ARVIDSSON, Å.; HOBFELD, T.; WAC, K.; MELVIN, H.; GALINAC GRBAC, T.; HADDAD, Y.; KEY, P.. State of the art and research challenges in the area of autonomous control for a reliable internet of services. **Springer International Publishing**, 2018.

VICTORINO SOUZA, Gabriel Luis; DE OLIVEIRA NETO, Geraldo Cardoso. Reducing the microbiological contamination of cutting fluids by applying the ultraviolet radiation. **Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)**, v. 21, n. 1, 2022.

VIMAL, K. E. K.; CHURI, Ketki; KANDASAMY, Jayakrishna. Analysing the drivers for adoption of Industry 4.0 technologies in a functional paper–cement–sugar circular sharing network. **Sustainable Production and Consumption**, v. 31, p. 459-477, 2022.

VOITH - Disponível em: <https://voith.com/corp-en/industry-solutions/papermaking.html#202955>. Acessado em: 01.05.2023.

VOITH Papermaking Disponível em: <<https://voith.com/corp-en/industry-solutions/papermaking/green-bay-pm4.html>> Acesso em: 09 de maio de 2023.

WANG, J.; XU, C.; ZHANG, J.; ZHONG, R.. Big data analytics for intelligent manufacturing systems: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 62, p. 738-752, 2022.

WEBSTER, Ken. A circular economy is about the economy. **Circular Economy and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 115-126, 2021.

WINANS, Kiara; KENDALL, Alissa; DENG, Hui. The history and current applications of the circular economy concept. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 825-833, 2017.

WUPPERTAL INSTITUTE. Table of Material intensity of materials, fuels and transport services. <https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/MIT_2014.pdf>. Acessado em 01 de Abril, 2023.

XU, Li Da; XU, Eric L.; LI, Ling. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International journal of production research**, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.

YIN, Robert K. Case Study Research: Design and Methods, fifth ed. **Bookman editora**, 2015.

ZHANG, HUANHUAN; LI, JIGENG; HONG, MENGNA. Machine Learning-Based Energy System Model for Tissue Paper Machines. **Processes**, v. 9, n. 4, p. 655, 2021.

ZHANG, Z.; ZHANG, H. L.; ZHANG, H. Q. Green construction and sustainable development from engineering companies of pulp and paper making engineering based on the "Carbon Peak and Carbon Neutrality" goals. **China Pulp & Paper**, v. 41, n. 3, p. 92-96, 2022.

APÊNDICE 1 - Formulário para levantamento dos dados gerais da empresa e produção

Empresa: _____ Data: _____

Tempo de fundação: _____ Porte da empresa: _____

Quantidade de colaboradores: _____

Tipos de produtos: _____

Dados técnicos dos produtos: _____

Dados de produção antes e depois: _____

Descrição da produção antes e depois da adoção I4.0: _____

Levantamento das práticas de EC: _____

Levantamento de documentos técnicos

[illegible]