

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ECONÔMICAS

SARAH CRISTINA RIBEIRO FERREIRA

**INDÚSTRIA 4.0 NA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE: UMA
ANÁLISE DAS EXPERIÊNCIAS BRASILEIRA E ESTADUNIDENSE**

UBERLÂNDIA – MG

2019

SARAH CRISTINA RIBEIRO FERREIRA

INDÚSTRIA 4.0 NA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE: UMA
ANÁLISE DAS EXPERIÊNCIAS BRASILEIRA E ESTADUNIDENSE

Monografia apresentada ao Instituto de Economia da
Universidade Federal de Uberlândia, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências
Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Germano Mendes de Paula

UBERLÂNDIA – MG

2019

SARAH CRISTINA RIBEIRO FERREIRA

INDÚSTRIA 4.0 NA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE: UMA
ANÁLISE DAS EXPERIÊNCIAS BRASILEIRA E ESTADUNIDENSE

Monografia apresentada ao Instituto de Economia da
Universidade Federal de Uberlândia, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências
Econômicas.

BANCA EXAMINADORA:

Uberlândia, 17 de dezembro de 2019

Prof. Dr. Germano Mendes de Paula

Prof.^a. Dr.^a. Marisa dos Reis Azevedo Botelho

Prof.^a. Dr.^a. Ana Paula Macedo de Avellar

AGRADECIMENTOS

Finalizar esta monografia é a conclusão de mais de quatro anos de muitos ensinamentos e realizações. É um privilégio poder estudar algo que me cativa e ter tido todo o apoio para concluir este trabalho. Essa monografia representa o encerramento de uma jornada, aproveito então esse espaço para agradecer a todos que contribuíram durante este percurso.

Agradeço a Deus, que me deu forças e abriu os caminhos para a concretização deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Adilson e Cristina, pelo apoio incondicional, pelo amor e pelos conselhos. Vocês são a razão do meu empenho e eu dedico esse trabalho a vocês. Agradeço ao meu irmão, Gabriel, pelas diversas vezes em que me ouviu apresentar esse trabalho e tantos outros que o antecederam.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Germano, por dirigir meus esforços com compromisso, profissionalismo e sabedoria, exigindo o meu melhor e oferecendo oportunidades e conselhos que serão úteis para além da minha vida acadêmica.

Agradeço a todos os professores com quem tive o privilégio de ter aula. Não poderia deixar de destacar as docentes encarregadas de despertar em mim o desejo em estudar Economia Industrial, a quem tenho a honra de ter na banca deste trabalho, Prof.^a. Dr.^a. Ana Paula Avellar e Prof.^a. Dr.^a. Marisa Botelho.

Agradeço ao Erico de Castro Ebeling e ao Carlos Augusto Soares do Amaral Santos pelas indicações bibliográficas e pelos comentários construtivos feitos a esse trabalho.

Agradeço ao PET Economia, que foi uma extensão da minha casa e minha família. Agradeço ao tutor, Guilherme Jonas, pelo apoio e pelas múltiplas oportunidades. Agradeço aos amigos que se tornaram tão próximos e espero carregar por toda minha vida, Julia, Maria e Iago. Agradeço a Kamila, minha melhor amiga, por todas as discussões que fizeram meus dias mais divertidos e interessantes, por todos os conselhos e por sua amizade.

Agradeço ao meu amigo Felipe, pelas longas discussões sobre pesquisa, sem você nada disso seria possível. Agradeço a minha dupla, Bárbara, pela amizade, companheirismo e respeito durante essa graduação.

E, por fim, agradeço ao meu amor, Mateus, por me apoiar, por cuidar de mim, por me dar tanto carinho. Palavras são insuficientes para representar minha gratidão, você fez tudo mais fácil.

RESUMO

A Indústria 4.0 diz respeito às aplicações de novas tecnologias à produção manufatureira fazendo com as fábricas sejam conectadas em sistemas ciberfísicos. Este trabalho tem como objetivo discutir a difusão e impacto da Indústria 4.0 no setor de papel e celulose em dois dos principais produtores mundiais de papel e celulose, o Brasil e os Estados Unidos. A hipótese adotada é de que a Indústria 4.0 tem um alto impacto nos países selecionados e a sua difusão é elevada no setor de papel e celulose. A metodologia aplicada consiste na identificação de oito *clusters* tecnológicos e seus primeiros efeitos sobre o setor, sendo estes internet das coisas, produção inteligente e conectada, inteligência artificial, tecnologias de redes, biotecnologia e bioprocessos, nanotecnologia, materiais avançados e armazenamento de energia. As tecnologias investidas no setor reforçam estratégias competitivas predominantes, de forma que os Estados Unidos tenderão a reforçar sua liderança em papel e o Brasil reforçará sua liderança em celulose.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Papel e Celulose, Inovação.

ABSTRACT

The Industry 4.0 is related to the applications of new technologies to manufactories, making factories connected with cyber-physical systems. This paper's main objective is to discuss the impact and dissemination of the Industry 4.0 in the pulp and paper sector inserted in the two most crucial world producers of pulp and paper, Brazil and USA. The assumed hypothesis is that the industry 4.0 has a high impact on the selected countries and presents a high dissemination inside the pulp and paper sector. The applied methodology consists in the identification of the effects of 8 technology clusters amidst the sector, such as the internet of things, connected smart production, artificial intelligence, net technology, biotechnology and bioprocesses, nanotechnology, advanced material and energy storage. The invested technologies in this sector reinforce the prevailing competitive strategies, so that the USA may tend to reinforce its leadership in paper and Brazil, in pulp.

Key words: Industry 4.0, Pulp and Paper, Innovation

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Caracterização dos clusters tecnológicos	19
Quadro 2 – Desafios à geração ou à difusão das inovações em tecnologias associadas às TICs	20
Quadro 3 – Desafios à geração ou à difusão das inovações em tecnologias físicas	21
Quadro 4 – Percepção quanto à difusão das tecnologias disruptivas na indústria mundial de celulose – 2017, 2022 e 2027	38
Quadro 5 – Percepção quanto à difusão e intensidade do impacto das tecnologias disruptivas na indústria mundial de celulose – 2027	39
Quadro 6 – Medidas do Technologies for Sustainable Manufacturing of Pulp and Paper Products	42
Quadro 7 – Difusão de tecnologias entre os tipos de indústrias de papel e celulose – 2017 ..	44
Quadro 8 – Principais semelhanças e diferenças entre o impacto da Indústria 4.0 nos Estados Unidos e Brasil	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentagem de empresas inovadoras e objetivo da inovação no setor de papel e celulose nos Estados Unidos e Brasil	34
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – A história das revoluções industriais e suas principais alterações na estrutura produtiva.....	15
Figura 2 – Processo de produção de celulose e papel	25
Figura 3 – Crescimento anual esperado da demanda de papel e celulose por regiões e países selecionados – 2016-2021 (%)	30

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção mundial de celulose, papel e aparas de papel – 2005-2017 (milhões de toneladas).....	29
--	----

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1. A INDÚSTRIA 4.0 EM PERSPECTIVA TEÓRICA	13
1.1. EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA	13
1.2. INDÚSTRIA 4.0	16
2. O SETOR DE PAPEL E CELULOSE	24
2.1. CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA.....	24
2.2. ESTRUTURA DE MERCADO E COMPETIVIDADE	27
2.3. INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NO SETOR	32
3. INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DE PAPEL E CELULOSE	36
3.1. ESTADOS UNIDOS	40
3.2. BRASIL	43
CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

INTRODUÇÃO

A primeira revolução industrial marcou a transição radical de uma economia agrária para processos de produção mecanizados, revolucionando não somente a economia, mas a estrutura em que se organiza a sociedade. O segundo período de transformação permitiu o nascimento de uma era de consumo em massa e a terceira permitiu a automação e otimização da produção por meio do uso de eletrônicos e de tecnologia da informação (TI) a nível industrial (GTAI, 2014; SANTOS *et. al.*, 2018).

Atualmente, a indústria se encontra na iminência de uma nova revolução, a Indústria 4.0. Este é um termo coletivo para tecnologias e conceitos da organização da cadeia de valor, baseado em fábricas inteligentes e modulares conectadas por sistemas ciberfísicos que monitoram processos, criam cópias virtuais da realidade e tomam decisões descentralizadas (HERMANN, PENTEK e OTTO, 2015). A aplicação de novas tecnologias à produção manufatureira é um pré-requisito da Indústria 4.0, no entanto o conceito não se limita à aplicação dessas tecnologias. A Indústria 4.0 cria e articula fábricas inteligentes em um sistema produtivo e comercialização substancialmente diferentes criando novos modelos de negócios (IEDI, 2017).

A indústria de base florestal vivenciou as três fases anteriores da transformação industrial, a contar pela criação da energia a vapor até a elétrica, passando pela integração progressiva das tecnologias de automação e informação. O setor de papel e celulose é altamente competitivo e caminha alinhado com as vantagens que os avanços tecnológicos podem proporcionar. Os conceitos da Indústria 4.0 têm destaque nesse novo cenário e prometem mudar a realidade dos parques fabris de celulose e papel nos próximos anos (MARTIN, 2017).

Países com alto desenvolvimento industrial têm investido para modernizar sua indústria, potencializar a produção industrial e disputar a posição de liderança mundial, enquanto outras nações investem para não perder competitividade global e avançar na produção mundial. Assim, este trabalho se propõe a avaliar de que modo as tecnologias próprias a Indústria 4.0 influenciarão a indústria de papel e celulose entre os grandes produtores mundiais nos próximos anos. A análise se aprofundará sobre os Estados Unidos, maior produtor mundial de celulose e segundo maior produtor de papel em 2018, e o Brasil, segundo maior produtor de celulose e oitavo maior produtor de papel (IBÁ, 2019).

Este trabalho tem como objetivo discutir a difusão e impacto da Indústria 4.0 no setor de papel e celulose em dois dos principais produtores mundiais de papel e celulose. A hipótese

adotada é de que a Indústria 4.0 tem um alto impacto nos países selecionados e a sua difusão é elevada no setor de papel e celulose, além de ser um setor intensivo em capital.

A metodologia aplicada nesse trabalho consiste na identificação de oito *clusters* tecnológicos e seus primeiros efeitos sobre o setor, sendo estes internet das coisas, produção inteligente e conectada, inteligência artificial, tecnologias de redes, biotecnologia e bioprocessos, nanotecnologia, materiais avançados e armazenamento de energia. Além do uso materiais bibliográficos cedidos pela empresa Klabin S/A a respeito do funcionamento técnico de uma firma produtora de papel e celulose.

Para alcançar o objetivo apontado, este trabalho será dividido em três capítulos além desta sucinta introdução e das considerações finais. O primeiro capítulo se dedica a esclarecer o significado de Indústria 4.0 estabelecendo seus principais *clusters* tecnológicos. O segundo capítulo discute o setor por meio de três elementos: progresso técnico, processo inovativo e estrutura de mercado. O terceiro capítulo avalia os impactos e difusão das tecnologias próprias a Indústria 4.0 nos países selecionados, além de examinar as mudanças na indústria e no mercado promovidas pela adoção desse novo paradigma e, para que, por fim, seja possível comparar o avanço tecnológico nos países analisados.

1. A INDÚSTRIA 4.0 EM PERSPECTIVA TEÓRICA

Este capítulo expõe os principais aspectos da mudança tecnológica com alguns conceitos que serão utilizados durante todo o trabalho. De início apresenta-se uma revisão voltada para a conceituação de evolução tecnológica, para em seguida focalizar no desenvolvimento tecnológico característico à Indústria 4.0, classificando-a de acordo com *clusters* tecnológicos de inovação.

1.1. EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

A mudança tecnológica está relacionada com o lançamento ou aprimoramento de produtos, processos produtivos, métodos gerenciais ou uso de insumos e matérias-primas. A inovação faz parte do processo de mudança tecnológica, na medida em que desenvolve novos e melhores produtos e processos, novas formas organizacionais, além da aplicação de tecnologia existente em novos campos, permitindo a abertura de novos mercados (CONCEIÇÃO, 2000).

O entendimento dos fatores capazes de exercer influência às mudanças tecnológicas relacionadas com a dinâmica inovativa não é unânime na literatura econômica. Segundo Campos e Urraca-Ruiz (2008), o fenômeno pode ser compreendido por três linhas de investigação distintas: a) a primeira trata a mudança técnica como um elemento exógeno à economia, sendo a tecnologia reconhecida como um conjunto de informações aplicáveis de fácil reprodução; b) a segunda corrente percebe os processos inovativos como resultado da estrutura de mercado, demonstrando a influência das variáveis de tamanho da firma e concentração de mercado no entendimento do desempenho inovativo de cada setor; por fim, c) a terceira, em que se insere a teoria neo-schumpeteriana, atribui uma lógica própria para o processo inovativo sem descartar a importância de fatores econômicos para a concepção da inovação.

A visão neo-schumpeteriana engloba o conceito de paradigma tecnológico, sendo este um pacote de procedimentos que orientam a investigação sobre um problema tecnológico, definindo o contexto, os objetivos a serem alcançados, os recursos a serem utilizados, isto é, um padrão de solução de problemas técnico-econômicos. Assim, a noção de trajetória tecnológica formulada por Dosi (1982) surge como uma consequência, na medida em que o paradigma tecnológico age como um direcionador dos esforços tecnológicos e, com efeito, do

próprio progresso técnico. O processo de seleção do progresso técnico se torna endógeno, na medida em que a inovação tecnológica é produzida pelo processo competitivo inerente ao mecanismo de seleção do mercado. Desta forma, a inovação é resultado da concorrência capitalista, haja vista que os diferenciais de inovatividade e não-instantaneidade da difusão geram vantagens competitivas que são a fonte do lucro capitalista. Deste modo, a forma como são definidos os paradigmas e trajetórias tecnológicas dependem de interesses econômicos dos inovadores, da capacidade tecnológica acumulada e de variáveis institucionais que abarcam desde as agências públicas de fomento até gastos militares (DOSI, 1982; KUPFER, 1996).

As mudanças tecnológicas são diferenciadas por seu grau de inovação e pela extensão das mudanças em relação ao que havia antes. A gama de inovações pode ser classificada em quatro tipos: a) a primeira corresponde às inovações incrementais, cuja característica é o melhoramento e modificação cotidianos; b) a segunda é chamada de inovação radical, caracterizada por uma ruptura na tecnologia de produtos e processos; c) a terceira refere-se aos novos sistemas tecnológicos, causados por transformações abrangentes que afetam mais de um setor e dão origem a novas atividades econômicas; finalmente, d) o quarto tipo corresponde ao novo paradigma técnico-econômico, cujas alterações afetam toda a economia envolvendo mudanças técnicas e organizacionais (TIGRE, 2006). Segundo Perez (2010) o paradigma técnico-econômico é classificado a partir da alteração da estrutura de custos, a percepção de oportunidades de inovação e surgimento de novos modelos.

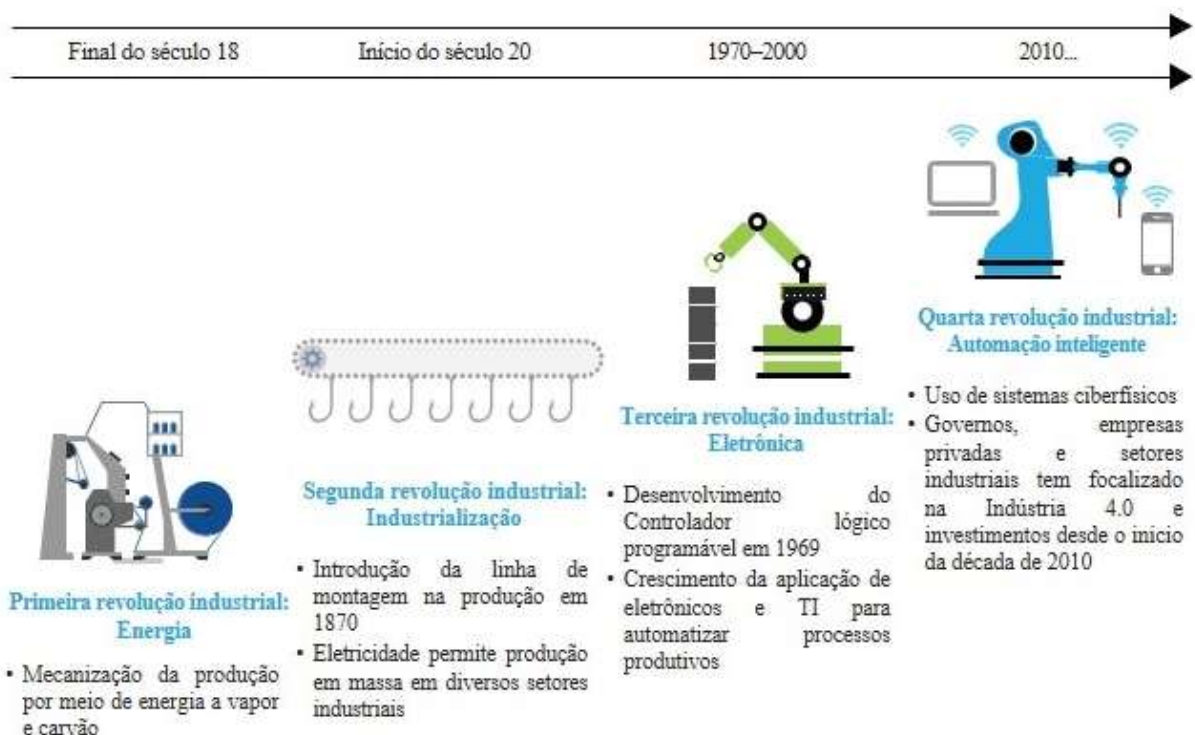
A instituição de um novo paradigma se dá na forma de revolução industrial, alterando a lógica de organização industrial e da própria sociedade. A Primeira Revolução Industrial ocorreu no século XVIII na Inglaterra com a substituição progressiva dos métodos artesanais de produção por máquinas e ferramentas, pela exploração do carvão como energia e pelo uso crescente da energia do vapor (COELHO, 2016). As transformações no processo produtivo tiveram consequências significativas no âmbito econômico e social, dado que o modo de produção foi substituído pela produção fabril, que permitiu um aumento sem precedente da produtividade.

Durante a Segunda Revolução Industrial, o conhecimento científico foi o principal motor de mudança por meio do desenvolvimento da química e eletricidade. Além disso, a Segunda Revolução Industrial acarretou uma nova divisão internacional do trabalho que se orientava pela produção em massa, repartição de tarefas, separação entre os trabalhos de concepção e execução e o trabalho individualizado. Essa lógica baseava-se na busca por ganhos de produtividade, por meio da produção em escala (ANDRADE, 2017).

Nas décadas de 1970 a 2000, desenvolveu-se a Terceira Revolução Industrial, com a proliferação e uso dos semicondutores, dos computadores, automação e robotização em linhas de produção, com informação armazenada e processada de forma digital, além da evolução da Tecnologia da Informação (TI) e da internet (COELHO, 2016). Segundo Andrade (2017), essa fase se difere das anteriores na medida em que permitiu um aumento da produtividade do trabalho na indústria e serviços, em especial àqueles que recolhem, processam, transmitem e arquivam informações.

Com o desenvolvimento da internet, dos sensores, dos *softwares* e *hardwares*, iniciou-se uma transformação na indústria, com capacidade de alterar a organização industrial atual por meio da integração dos sistemas virtuais e físicos nos processos produtivos (SANTOS et al., 2018). Essa série de transformações é reconhecida como a Quarta Revolução Industrial, também chamada de Indústria 4.0. A figura 1 resume as revoluções industriais e seus principais desenvolvimentos.

Figura 1 – A história das revoluções industriais e suas principais alterações na estrutura produtiva



Fonte: Sniderman, Mahto e Cotteler (2016)

A seção seguinte apresenta uma discussão sobre as particularidades da Indústria 4.0, aprofundando nas principais transformações promovidas por essa revolução a fim de

compreender a extensão das mudanças tecnológicas promovidas até agora por esse novo paradigma.

1.2. INDÚSTRIA 4.0

O termo Indústria 4.0 se refere à revolução tecnológica de sistemas conectados para a introdução de sistemas ciberfísicos. Além disso, representa uma mudança do paradigma de produção “centralizada” para uma produção “descentralizada”, que é possível graças aos avanços tecnológicos que possibilitaram a criação uma rede inteligente e independente capaz de interagir com processos reais e virtuais. Os sistemas de produção tornam-se mais flexíveis e colaborativos graças à introdução de tecnologia de ponta ligadas à internet. As máquinas usam auto-otimização e autoconfiguração a fim de proporcionar eficiências de custos muito superiores e bens ou serviços de maior qualidade (GTAI, 2014; SANTOS et al., 2018).

A Indústria 4.0 possui três características fundamentais: a) a digitalização e integração das cadeias de valor, desde o desenvolvimento do produto até a manufatura, logística e serviços, de forma que toda a informação sobre o processo se torna disponível em tempo real para todos os membros da cadeia de valor; b) a digitalização de produtos e serviços a partir da adição de sensores inteligentes ou da criação de novos produtos, permitindo que as empresas possam gerar dados para o aprimoramento dos produtos com o foco na necessidade dos clientes; c) a criação de modelos de negócios digitais, de forma que as firmas possam ampliar o acesso ao cliente, otimizando a interação da cadeia produtiva por meio de soluções digitais e personalizadas (PwC, 2016).

Segundo o IEL (2017), essa nova revolução pode ser compreendida a partir de oito *clusters* de inovações disruptivas que impactarão a indústria nos próximos anos, constituindo-se por: a) Inteligência Artificial (IA), b) tecnologias de redes, c) Internet das Coisas (IoT, no acrônimo em inglês), d) Produção Inteligente e Conectada (PIC), e) materiais avançados, f) nanotecnologia, g) biotecnologia e bioprocessos e h) armazenamento de energia. Essas tecnologias possibilitam a introdução de interfaces avançadas na relação homem-máquina, detecção de fraudes, caracterização do perfil dos clientes e interação com a cadeia de valor em vários níveis, isto é, com impactos setoriais distintos e com difusão não homogênea dos clusters tecnológicos na economia.

A IA está associada ao conjunto de tecnologias que são inspiradas na maneira como o ser humano usa seu sistema nervoso e seu corpo para sentir, aprender, raciocinar e agir. A partir

de um conjunto organizado de conhecimentos e tecnologias, a IA pode ser aplicada à percepção, compreensão, processamento, interpretação, otimização e ação das máquinas. Essa tecnologia utiliza de tecnologias “instrumentais” como *big data*, capaz de disponibilizar grandes volumes de dados estruturados, e armazenamento e processamento na nuvem. Essas tecnologias são combinadas e utilizadas para análise de dados, permitindo a otimização da qualidade da produção e o aumento da eficiência do uso de recursos. Assim, a IA possibilita a criação de máquinas capazes de tomar decisões sem a intervenção direta humana (IEL, 2017; FREITAS, 2017).

Uma rede de comunicação é um sistema de computadores, canais de transmissão e recursos relacionados e interligados para trocar informações. As tecnologias de rede são responsáveis por interligar sistemas e soluções a nível corporativo, mediante o uso de plataformas de automação de processos centralizadas e integradas (SANTI, 2018). A IoT é definida como um sistema de interconexão, por meio da internet, de dispositivos informáticos incorporados em objetos cotidianos, permitindo-lhes enviar e receber dados e atuar sobre esses objetos. Normalmente essa tecnologia é aplicada para extração e análise de dados para tomada de decisão. Assim, a IoT implica a capacidade de monitorar e controlar as ferramentas da produção e utilizar os dados coletados para aumentar a produtividade e melhorar a eficiência (IEL, 2017).

A PIC refere-se aos sistemas ciberfísicos de interconexão, digitalização, processamento e otimização da cadeia produtiva. Essa tecnologia é baseada em infraestruturas de comunicação em sistemas de produção, aliadas à IA, permitindo aplicações em processos, serviços, diagnóstico e operação de produtos. Desta forma, a PIC proporciona o controle virtual do processo produtivo, que passa a ser feito remotamente, possibilitando que o processo se torne mais previsível por meio de processos de otimização, análise estatística, alertas sensoriais e modelagem preditiva. A empresa se torna capaz de identificar a causa e o efeito de falhas existentes no processo com maior agilidade (MARTIN, 2017). Há muita convergência entre as inovações de IoT, redes, IA e PIC, sendo a última compreendida como a mais abrangente e agregadora das demais (DE PAULA, 2018).

Materiais avançados representam avanços sobre materiais tradicionais, englobando materiais novos ou modificados com estrutura ou funcionalidade superior para sua aplicação comercial. Os materiais avançados permitem a introdução de novos mercados, bem como mudanças nos mercados já existentes. A nanotecnologia é definida como a manipulação dos átomos para a produção de novos materiais em escala nanoscópica, ou seja, menor que 100 nm

em pelo menos uma de suas dimensões. A aplicação da nanotecnologia pode ser caracterizada por três usos distintos: a) nanomateriais, estruturas em escala em forma não processada, como as nanopartículas; b) nanointermediários, produtos intermediários com características nano, tal como tecidos, chips; e, c) produtos finais incorporando nanotecnologia (FLORÊNCIO et al., 2017; IEL, 2017).

A biotecnologia é o conjunto de técnicas que utiliza organismos vivos, processos ou sistemas biológicos no meio industrial, por meio da combinação de engenharia genética, biologia celular e sistemas computacionais (FLORÊNCIO et al., 2017). O Armazenamento de energia corresponde à utilização de reações químicas para estocar energia elétrica. Essas tecnologias são usadas para três fins principais: a) autonomia de sistemas em relação à rede de eletricidade, b) eletrificação de produtos e processos outrora dependentes de combustível fóssil e c) segurança das matrizes energéticas (IEL, 2017).

Segundo o IEL (2017), a nível mundial inovações radicais são pouco frequentes, exceto para o *cluster* de nanotecnologia, nos demais *clusters* há predomínio de inovações incrementais. Além disso, em IA e IoT há predomínio de tecnologias em mutação, o que induz a uma maior imprevisibilidade. Para as redes, materiais avançados, biotecnologias e armazenamento de energia verifica-se relevância de tecnologias maduras. No geral, em todos os *clusters* há o potencial de inovações criadoras de novos mercados, o que reforça o potencial transformador dessas tecnologias.

Além disso, os *clusters* são caracterizados em categorias relacionadas ao processo – natureza, contribuição e prospectiva – e pela adoção das inovações – tipo, espectro e intensidade do impacto. A natureza da inovação diz respeito ao “grau de novidade” ou a carga de “inovatividade” de uma tecnologia; a contribuição determina a extensão em que as tecnologias de um *cluster* são utilizadas pelos demais; enquanto a prospectiva tem como objetivo captar o grau de maturidade das tecnologias em desenvolvimento (IEL, 2017).

Os tipos de inovação são definidos de acordo com sua incidência na empresa ou na cadeia de valor, podendo ser de processo, produto, mercadológica, matéria prima e organizacional; o espectro trata da amplitude de aplicação das inovações em diferentes atividades econômicas; a intensidade do impacto da inovação pode ser dividida em moderado, quando há o aumento da competitividade das empresas, em disruptivo, quando a inovações provocam mudanças no *status quo* concorrencial, e em impacto incremental com potencial disruptivo no futuro. O quadro 1 sintetiza a caracterização dos *clusters* abordados.

Quadro 1 – Caracterização dos *clusters* tecnológicos

	IA	Tecnologias de Redes	IoT	PIC	Materiais Avançados	Nanotecnologia	Biociencia	Armazenamento de Energia
Tipos de Inovações	Inovações de processo, produto, insumos organizacionais, infraestrutura e mercado	Inovações de produto, infraestrutura e mercado	Inovações de processo, produto, insumos organizacionais, infraestrutura e mercado	Inovações de processo, organizacional e mercados	Inovações de produto, insumos e mercados	Inovações de produto, insumos, processos e mercados	Inovações de produto, insumos, processos e mercados	Inovações de produto, processo e de mercado
Espectro	Tecnologias de propósito geral	Tecnologias de propósito geral	Tecnologias de propósito geral	Tecnologias de propósito específico a processos produtivos em qualquer atividade	Tecnologias de propósito específico	Tecnologias de propósito geral	Tecnologias de aplicação específica na medicina, agroindústria, química	Tecnologia de propósito específico para eletrificação autônoma e conservação de energia
Contribuição do <i>Cluster</i> pra os demais	IoT, Redes, PIC, Materiais Avançados, Nanotecnologia, Biociencia, Armazenamento de Energia	IA, IoT, PIC, Armazenamento de Energia	IoT, Redes, PIC, Materiais Avançados, Nanotecnologia, Biociencia, Armazenamento de Energia	Materiais Avançados, Nanotecnologia, Biociencia	Redes, Nanotecnologia, Armazenamento de Energia	IoT, Redes, PIC, Materiais Avançados, Biociencia, Armazenamento de Energia	Materiais Avançados, Nanotecnologia	IoT, Redes, PIC
Prospectiva	Predomínio em tecnologias em mutação	Convivência de tecnologias maduras e tecnologias em seleção	Predomínio em tecnologias em mutação	Convivência de tecnologias em seleção e em mutação	Convivência de tecnologias maduras, em seleção e em mutação	Convivência de tecnologias em seleção e em mutação	Convivência de tecnologias maduras e em mutação	Convivência de tecnologias maduras e em seleção
Natureza da Inovação	Incremental com potencial radical	Predomina incremental	Incremental com potencial radical	Incremental com potencial radical	Predomina incremental	Predomina radical	Incremental com potencial radical	Predomina incremental
Intensidade do Impacto	Predomina disruptivo	Predomina potencial disruptivo	Predomina potencial disruptivo	Predomina potencial disruptivo	Predomina moderado	Predomina potencial disruptivo	Predomina potencial disruptivo	Predomina moderado

Fonte: IEL (2017)

Por meio da adoção dos oito clusters tecnológicos os processos vêm se tornando cada vez mais complexos, adicionando valor à cadeia produtiva. Tendo como exemplo o *cluster* de biotecnologia, as inovações de produto propiciam a criação de insumos e abrem novos mercados ao modificar a base técnica de conhecimentos. Apesar de ter uma aplicação restrita a setores poucos produtivos, o *cluster* é capaz de contribuir com as nanotecnologias, por meio da biologia molecular, e aos materiais avançados, mediante aos biomateriais. Ademais, as inovações da biotecnologia já estão estabelecidas e evoluem de maneira incremental. Porém, se tratando de inovações em setores específicos podem se transformar em inovações radicais com potencial disruptivo, na medida que essas tecnologias estão sujeitas a mutações (IEL, 2017).

A geração e difusão de novas tecnologias são afetadas por desafios socioeconômicos que exercem papel decisivo na trajetória e no ritmo do progresso técnico. Os principais desafios elencados são: a) ético ou regulatório, que dizem respeito às tecnologias que ameaçam valores éticos ou requerem medidas regulatórias; b) normativo, que estão relacionado à necessidade de estabelecimento de normas técnicas; c) tecno-econômicos, que se referem às capacitações técnicas e organizacionais adaptadas a cada sistema produtivo, e; d) socioambientais, relacionam-se à percepção da sociedade sobre os riscos associados à produção ou ao uso das novas tecnologias (IEL, 2017). Os quadros 2 e 3 analisam os desafios potenciais de acordo com a divisão dos *clusters* em dois grupos: tecnologias associadas às TIC e tecnologias predominantemente físicas.

Quadro 2 – Desafios à geração ou à difusão das inovações em tecnologias associadas às TICs

Grupo A: IA, Redes, IoT, PIC

Ético-regulatórios:

- Liberdade de escolha. Direito à privacidade e confidencialidade de dados.
- Propriedade e acesso aos dados (indivíduos vs. empresas).
- Segurança pessoal e usos negativos sobre a vida do indivíduo. Proteção contra vandalismo e roubo de dados.
- Grau de autonomia das máquinas.
- Responsabilização e penalização por violações de acesso a dados e usos indevidos, prejuízos ou acidentes.
- Segredos Industriais.

Normativos:

- Padrões abertos vs. padrões proprietários.
- Normas técnicas para rastrear decisões.

- Proteção criptográfica.
- Disponibilidade, qualidade, integridade e tratamento dos dados.
- Compatibilidade e sensorização de *legacy systems*.

Tecno-econômicos:

- Capacitações técnicas e organizacionais adaptadas a cada sistema produtivo.

Socioambientais:

- Aceitação social principalmente no que tange questões de privacidade.
- Efeito sobre meio ambiente e saúde (antenas).
- Reciclagem e descarte de equipamentos, insumos e bens.

Fonte: IEL (2017)

Quadro 3 – Desafios à geração ou à difusão das inovações em tecnologias físicas

Grupo B: Materiais Avançados, Nanotecnologia, Biotecnologia, Armazenamento de Energia

Ético-regulatórios:

- Regras e limitações a armamentos (materiais e nanotecnologia).
- Uso e manipulação de genomas humano e animal/vegetal.
- Respeito à liberdade individual de escolha e à privacidade.
- Segurança de organismos modificados.
- Poder econômico derivado de propriedade intelectual.

Normativos:

- Tecnologias abertas vs. tecnologias proprietárias.
- Prevenção de efeitos ambientais deletérios, normas de descarte e disposição de resíduos.
- Ausência ou lentidão de amadurecimento de normas técnicas.
- Rigidez de normas existentes como fator impeditivo à inovação.

Tecno-econômicos:

- Capacitações técnicas e organizacionais adaptadas a cada sistema produtivo.
- Desenvolvimento da bioinformática e custo-*performance* de processamento; aperfeiçoamento e adaptação de algoritmos para uso clínico.
- Desenvolvimento de bancos de biodados (biobancos).
- Disponibilidade de redes de recarga para automóveis elétricos.
- Tempo de recarga rápida e de duração (autonomia).

Socioambientais:

- Aceitação social principalmente no que tange questões de segurança.
- Riscos à saúde e descarte de materiais, nanotecnologia e biotecnologia.
- Reciclagem e descarte de equipamentos, insumos e bens.

Fonte: IEL (2017)

A Indústria 4.0 vai além da inovação tecnológica, sendo marcada pela diferenciação das empresas no mundo dos negócios por meio da gestão de conhecimentos

e capacitação de seus funcionários (SCHWAB, 2016). Segundo Aires, Kempner-Moreira e Freire (2017) esses dois elementos configuram os principais desafios para a adoção da Indústria 4.0, na medida em que o perfil dos trabalhadores foi se modificando, passando do trabalho manual para o intelectual, exigindo que as firmas se preocupassem com a formação técnica de seus empregados.

Além disso, a gestão do conhecimento elenca alguns desafios tais como: o desenvolvimento de tecnologias que promovam soluções econômicas e compatíveis com as necessidades dos clientes, o compartilhamento do conhecimento e o desenvolvimento dos trabalhadores. A aplicação destas novas tecnologias também é um desafio, pois para manterem-se competitivas as indústrias precisarão modernizar seus parques fabris (AIRES, KEMPNER-MOREIRA e FREIRE, 2017).

As possibilidades geradas pela Indústria 4.0 permitem o aumento da velocidade de computação e soluções para os negócios. Anteriormente a esta revolução, os processos de resolução de problemas possuíam baixa complexidade e eram focalizados na resolução de problemas individuais. As inovações tecnológicas criam soluções sistemáticas aptas para identificar áreas de maior ou menor desempenho, enquanto a modelagem preditiva é capaz de encontrar e quantificar padrões existentes nos dados utilizando-se de algoritmos avançados aptos a prever os rendimentos futuros (KARLOVIĆ, 2017).

A Indústria 4.0 atua nas três áreas responsáveis pela definição de um paradigma técnico-econômico citadas por Perez (2010). Segundo Martins (2018), a Indústria 4.0 promove a melhora dos resultados por meio da receita, dos custos e da eficiência global. A obtenção de uma receita adicional é proveniente de aumento da participação de mercado nos principais produtos, maiores margens, em produtos e serviços, obtidas a partir da análise de dados, novos produtos, serviços e soluções digitais, além de produtos personalizados. Os menores custos e maior eficiência provêm de controle de qualidade em tempo real, digitalização e automatização de processos, planejamento em tempo real para otimização da execução, produção flexível, utilização inteligente dos recursos humanos e maior velocidade nas operações.

A construção de uma rede de informações baseadas na introdução dos sistemas ciberfísicos permite a formação de fábricas inteligentes, cujo principal componente é uma produção conectada com foco na interação homem-máquina, melhoria dos processos e aumento da logística (Zhou, Li e Zhou, 2015). De acordo com Peixoto e Pereira (2018), a interoperabilidade dos sistemas, a virtualização, a descentralização dos controles dos processos produtivos, a adaptação da produção em tempo real e a flexibilização da

produção alterarão o modelo organizacional de forma que haverá uma tendência à produção em massa de produtos altamente personalizados.

A aplicação dos sistemas tecnológicos próprios a Indústria 4.0 tem a capacidade de inovar infraestruturas fabris, produtos e processos produtivos, como resposta à crescente necessidade de flexibilidade e eficiência. A introdução de tecnologias inteligentes na produção afeta a tomada de decisão gerando maior autonomia e a integração de informações na tomada de decisão.

O setor de papel e celulose, que é o principal objeto desta monografia, vem participando ativamente das mudanças tecnológicas das três fases da transformação industrial e acompanha as inovações próprias à Indústria 4.0 (MARTIN, 2017). O próximo capítulo busca caracterizar o setor e sua interação com as inovações tecnológicas, a fim de permitir a análise da quarta revolução industrial para com o mesmo.

2. O SETOR DE PAPEL E CELULOSE

O objetivo desse capítulo é apresentar um panorama do setor de papel e celulose, no Brasil e no mundo, com base no histórico recente do setor, por meio do estudo de como os agentes interage a partir do ponto de vista da produção, da inovação e de como o mercado se organiza.

2.1. CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA

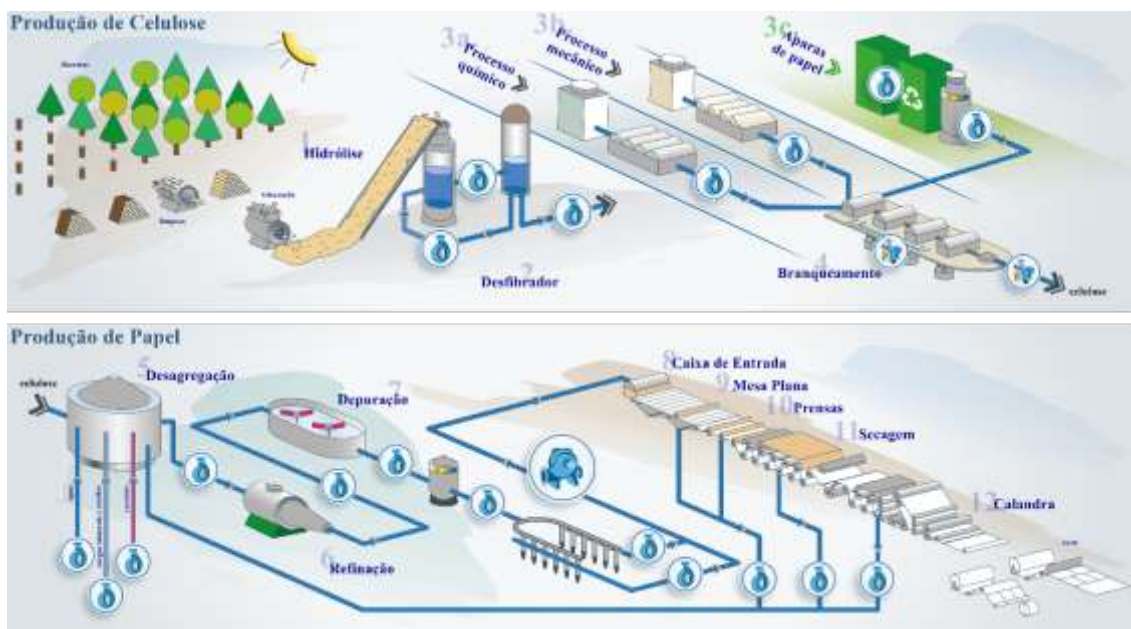
Segundo Piotto (2003), a celulose é um composto natural existente nos vegetais, de onde é extraída, podendo ser encontrada em toda a extensão da planta. É um dos principais componentes das células vegetais e são frequentemente chamadas de “fibras”, por sua forma alongada e pequeno diâmetro. A preparação da pasta celulósica consiste na separação das fibras dos demais componentes do organismo vegetal, em particular a lignina, que atua como um cimento, ligando as células entre si e proporcionando rigidez à madeira. A celulose pode ser fabricada de outros vegetais além da madeira, sendo mais comum a obtenção por meio do algodão, linho, sisal, bambu e bagaço de cana. A partir da produção do polímero celulose constitui-se a celulose de mercado ou celulose integrada, cuja composição são fibras de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e minerais. Além disso, nem toda a produção é destinada à produção de papéis, como é o caso da celulose solúvel, destinada à fabricação de uma ampla gama de produtos, com destaque para o segmento têxtil (BNDES, 2012).

As fibras de celulose podem ser virgens, quando resultam diretamente do processo de transformação da madeira, ou recicladas, quando são obtidas de aparas de papel ou da reciclagem de papéis usados. Entretanto, a celulose reciclada não substitui por completo as fibras virgens pois se degradam nos vários ciclos reciclagem. A celulose é denominada integrada quando se destina à produção de papel em uma planta anexa à produção do insumo, ao passo que é denominada de mercado quando é vendida para outras plantas de papel (BIAZUS, HORA E LEITE, 2010). A fibra curta é originada de plantas folhosas, especialmente o eucalipto, e a longa de coníferas, como o pinus, ou não-coníferas, como bambus e sisais. Cada fibra têm propriedades que tornam mais adequadas à fabricação de determinados tipos de papéis (BNDES, 2012).

O processo se inicia nas florestas plantadas para produção de celulose de mercado, onde a madeira é colhida, decascada, desganhada e picada. Em seguida, o material

resultante passa pelo processo de hidrólise, responsável por retirar o excesso de líquido, e pelo desfibramento, em que as fibras são separadas. O processo de fabricação determina o rendimento da madeira e a qualidade da celulose. O processamento da madeira é chamado de polpação, onde a madeira é transformada em uma massa fibrosa. Existem duas formas de liberar as fibras: a) mecanicamente, a madeira é prensada a úmido, contra um rolo giratório, cuja superfície é coberta por abrasivos, reduzindo-as a uma pasta fibrosa denominada “pasta mecânica”, alcançando um alto rendimento. No entanto, nesse processo não ocorre uma separação completa das fibras dos demais constituintes, obtendo-se uma pasta barata de aplicação limitada; b) quimicamente, que pode ser dividido em três subtipos: soda, sulfito e *kraft* (sulfato), que se diferenciam pelo tipo de químico acrescentado à fórmula, esse processo é utilizado para transformar a madeira em uma massa de fibras individualizadas através do uso de químicos e calor. Em ambos há a geração de calor de tal forma que o processo apresenta também características termodinâmicas. A maioria desses processos possuem uma etapa final comum: o branqueamento, responsável por trazer a coloração característica ao papel (PIOTTO, 2003). A figura 2 demonstra as etapas da produção da celulose e do papel.

Figura 2 – Processo de produção de celulose e papel



Fonte: Andritz (2018)

Segundo a classificação elaborada pelo BNDES (2012), a celulose, tanto de mercado quanto integrada, costuma ser agrupada em celulose *kraft* branqueada de fibra

curta (*bleached hardwood kraft pulp* – BHKP) ou celulose *kraft* branqueada de fibra longa (*bleached softwood kraft pulp* – BSKP), celulose *kraft* não branqueada e pasta mecânica. A BHKP é produzida por meio de processo químico, suas principais aplicações são os papéis de imprimir e escrever (I&E), sanitários, especiais, além de papel-cartão. É o principal tipo de celulose produzida no Brasil, totalizando 21% do total da indústria em 2018 (IBÁ, 2019), e na qual o país possui a maior competitividade global proveniente do eucalipto, como será discutido na próxima seção. A BSKP, também constituída por processo químico, é mais resistente e mais cara que a anterior, dado que é feita por coníferas, que possuem um ciclo mais longo.

A maior parte da composição do papel é constituída a partir da celulose, que é o insumo mais importante no processo. Além desta, também são utilizadas matérias primas não fibrosas, como cargas minerais, agentes de colagem, amidos e corantes. O processo de produção do papel pode ser dividido em duas partes, a preparação da massa e a máquina de papel. A elaboração da massa consiste na desagregação da celulose e seu refino, na fabricação da massa por meio da adição da matéria prima não fibrosa e da depuração da massa. Em seguida, a massa resultante passa por processos maquinários que incluem cinco etapas: a) a caixa de entrada, responsável por distribuir as fibras de forma uniforme; b) a mesa plana, que dá a formação da folha; c) a presa, que retira a água excedente; d) a secagem, que realiza a cura das resinas adicionadas; e, e) a calandra, usada para o acerto de espessura e aspereza do papel (PIOTTO, 2003).

Os papéis têm um amplo espectro de utilização e são classificados nas seguintes categorias: papel imprensa, papéis de imprimir e escrever (I&E), embalagens e descartáveis conforme explicado a seguir. O papel imprensa é destinado majoritariamente à impressão de jornais, mas também inclui periódicos, revistas, listas telefônicas, suplementos e encartes. Papéis I&E costumam ser divididos em quatro subgrupos dependendo de duas características, revestimento – revestidos ou não revestidos – e fabricação – “*wood free*” se a composição for exclusivamente de celulose branqueada ou “*wood containing*” se na composição fibrosa houver pastas de alto rendimento além de celulose. Mencione-se que revestimento e a não utilização de pasta mecânica conferem maior qualidade e valor ao papel. A categoria de I&E é muitas vezes agrupada com o papel imprensa sob a denominação de papéis gráficos. As embalagens incluem papéis *kraftliner*, *testliner*, *sackkraft*, papel-cartão, entre outros. Os papéis descartáveis do tipo *tissue* ou higiênicos possuem finalidade sanitária, sendo seu principal produto o papel higiênico (BNDES, 2012).

Na próxima seção se discute a estrutura de mercado mundial do setor de papel e celulose, destacando as diferenças entre os dois ao longo da cadeia produtiva, além dos principais aspectos relacionados a competitividade.

2.2. ESTRUTURA DE MERCADO E COMPETIVIDADE

O setor de papel e celulose possui diferentes características ao longo da sua cadeia produtiva, enquanto a indústria de celulose é altamente globalizada, o papel possui demanda regional e uma produção fragmentada com atuação de médias empresas. Além disso, ela pode ser examinada sobre uma única ótica na medida em que as fábricas tendem a se organizar de maneira homogênea, apesar da produção da celulose ser dividida entre BHKP e BSKP. No papel, porém, a lógica é distinta. As particularidades de cada segmento não permitem definir razões universais, haja visto a pluralidade de produtos que compõem esse mercado (BNDES, 2012).

A indústria mundial de celulose caracteriza-se por ter fortes barreiras à entrada como alto investimento, existência de escala mínima de eficiência produtiva, difícil acesso a terras e longo período de maturação do investimento. No entanto, um novo entrante não encontra dificuldade de aquisição de tecnologias mais eficientes, a não ser pelo alto volume de recursos financeiros requeridos. A indisponibilidade de terras e subutilização de tecnologias no segmento florestal diminui a competitividade do entrante, podendo inviabilizar estrategicamente um projeto, dado que a base florestal não pode estar distante da unidade industrial (BIAZUS, HORA e LEITE, 2010). Na fabricação de papel, as escalas mínimas de eficiência diferem muito de acordo com o segmento de mercado, sendo elevadas em produtos padronizados de consumo generalizado, especialmente papel imprensa, I&E e alguns tipos de embalagem (PINHO e AVELLAR, 2002).

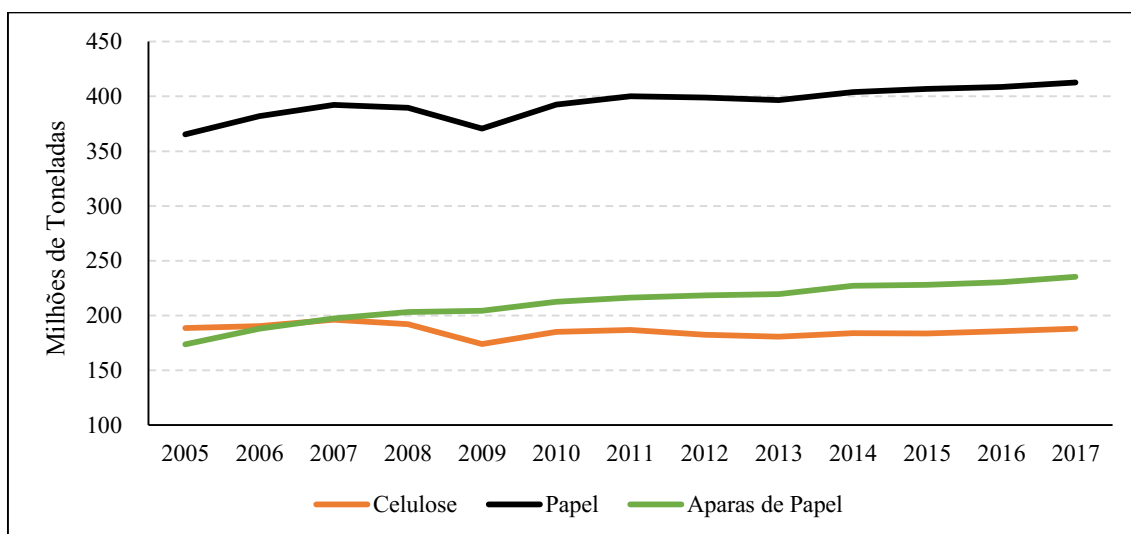
A competição na indústria de celulose é global e marcada por diferentes aspectos como o crescente aumento de economias de escala, o movimento de fusões e aquisições, o acirramento da concorrência e o elevado poder de barganha dos clientes e fornecedores, canais de distribuição e logística globais e o comportamento cíclico de preços (BIAZUS, HORA e LEITE, 2010). A competitividade do fabricante de papel está ligada a localização das unidades fabris, na medida em que na maior parte dos segmentos de papel a produção se concentra próxima aos consumidores devido à complexidade da cadeia de distribuição. Além disso, outros fatores são determinantes para a decisão da localização

da firma tal como a necessidade de assistência técnica aos consumidores pós-venda, principalmente para papéis gráficos, a venda direta aos consumidores, elevando a necessidade e importância do *branding*, e a baixa densidade ou valor agregado, encarecendo o frete para longas distâncias. Como a escala é um importante fator competitivo, os produtores localizados próximos a grandes mercados consumidores aumentaram sua competitividade em relação àqueles localizados em pequenos mercados (HORA, RIBEIRO e MENDES, 2018).

A celulose é uma *commodity* cujo preço é determinado internacionalmente, que são sensíveis às alterações da capacidade da indústria, aos estoques dos produtores, ao valor do dólar norte americano, aos custos de produção e frete e, sobretudo, às oscilações da atividade econômica mundial, o que lhe confere um caráter tipicamente cíclico (BIAZUS, HORA e LEITE, 2010). No geral a produção é concentrada em grandes empresas com elevada escala produção – mínimo de 1,5 milhão de toneladas/ano. Os preços do papel são *spread* da celulose. A demanda de celulose está diretamente relacionada ao consumo de papel, que por sua vez está vinculado ao crescimento da população, à renda e à escolaridade, haja vista quanto maiores estes indicadores, maior o consumo de papéis do tipo I&E e *tissue*. No nível industrial, quanto maior for a produção, maior será o fluxo de mercadorias e, conseqüentemente, maior o consumo de embalagens (CORREA, 2014).

Entre 2005 e 2017, o crescimento da produção global de papéis foi de 1,1% ao ano, em média. Em 2017 a oferta global foi de 412,6 milhões de toneladas, um incremento de 47,4 milhões de toneladas em relação ao patamar registrado em 2005 segundo dados obtidos pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (*Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO*, 2019). No mesmo período, o crescimento do PIB global foi, em média, 2,7%. A principal razão para tal divergência reside na redução do consumo *per capita* de papéis em mercados maduros, em especial nos papéis gráficos. A produção global de celulose destinada à produção de papel oscilou com crescimento de -0,6% nesse período, em média (FAO, 2019). Isto é explicado por meio da maior utilização de aparas (utilizadas por meio da reciclagem) no *mix* de fibras utilizados na produção de papel (BNDES, 2012). Conforme o gráfico 1 demonstra, a utilização de fibra reciclada é superior à da fibra virgem.

**Gráfico 1 – Produção mundial de celulose, papel e aparas de papel – 2005-2017
(milhões de toneladas)**

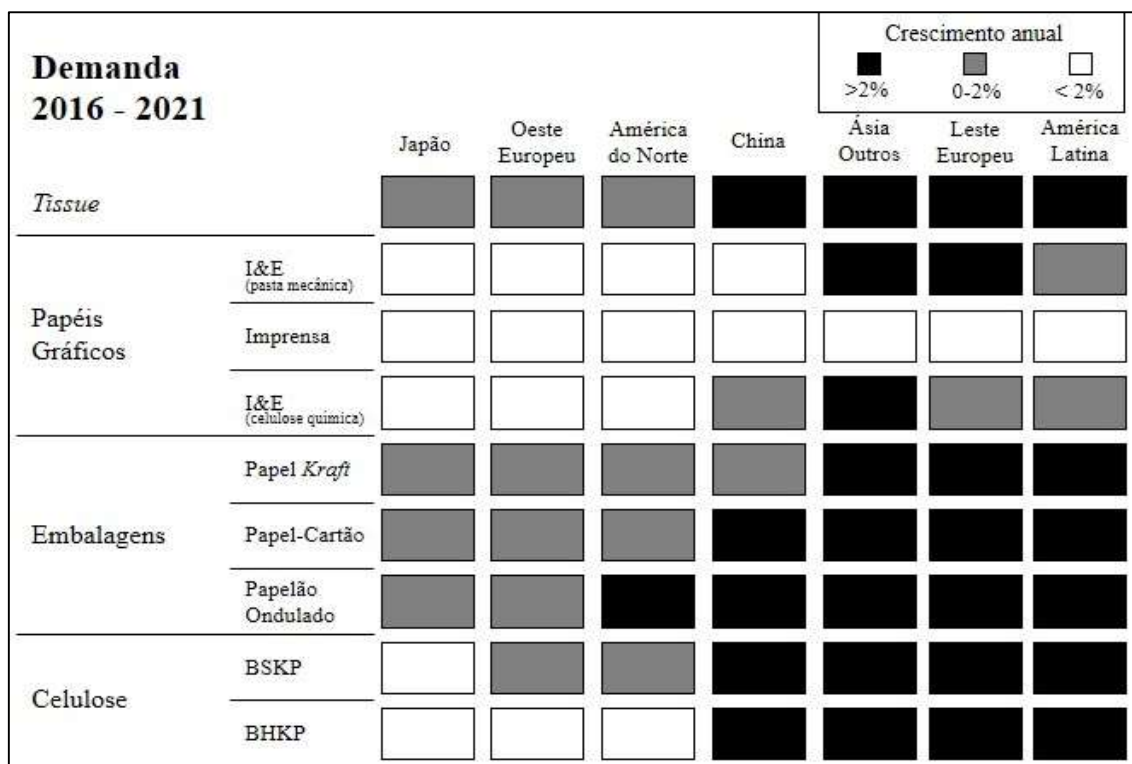


Fonte: Elaboração própria utilizando os dados obtidos através da FAO (2019).

Segundo Berg e Lingqvist (2019), a indústria de papel e celulose tem experimentado uma intensa transformação, na medida em que a demanda do setor tem aumentado nos últimos anos. No entanto, esse acréscimo foi mais lento do que o registrado no passado, haja vista que a média de crescimento entre 1993 e 2007 foi de 1,3% e a partir de 2010 até 2017 foi de 1%, sendo que os anos de 2008 e 2009 não foram considerados, dado que tem comportamento atípico em relação aos outros anos analisados. A demanda por embalagens e papéis sanitários teve um aumento de 36% entre 2005 e 2017 a nível global (FAO, 2019).

A demanda de produtos de papel e celulose tenderão ao crescimento na década de 2020, mesmo com a queda da demanda de papéis gráficos. Essa retração deve ser compensada pelo aumento da demanda por embalagens, ancorado no desenvolvimento do *e-commerce*, e por papéis *tissue*, que baseiam no progresso de países emergentes que passam a desfrutar de melhores condições sanitárias. A expansão da demanda por celulose tende a seguir a perspectiva de crescimento da economia, como demonstra a Figura 3.

Figura 3 – Crescimento anual esperado da demanda de papel e celulose por regiões e países selecionados – 2016-2021 (%)



Fonte: Berg e Lingqvist (2019)

Em 2018, o Brasil se consolidou como o segundo maior produtor mundial de celulose, sendo superado apenas os Estados Unidos da América. O Brasil e os Estados Unidos produziram, conjuntamente, 38% de toda a fibra celulósica mundial em 2018. Os Estados Unidos foi o segundo maior fabricante de papéis em 2018, gerando 71,8 milhões de toneladas, e o Brasil ocupa a oitava colocação, com uma produção de 10,4 milhões de toneladas (FAO, 2019).

Os Estados Unidos são o maior produtor de celulose do mundo, produzindo 26% de toda a fibra celulósica em 2017. A fabricação e o consumo de celulose no país possuem série histórica muito semelhante, de forma que a exportação serve apenas para escoamento do excedente não consumido internamente, sendo cerca de 15% em 2018 (FAO, 2019). Quando se trata de papel, o país é considerado um mercado maduro, com um consumo de 221 quilogramas de papel *per capita* em 2015 (MOURA, 2018). No entanto, o setor demonstra uma retração no país, pois o consumo de papel imprensa declinou 70% entre 2000 e 2013 e o papel I&E teve uma redução de 28% entre 2004 e 2017. A queda é atribuída à adoção de meios eletrônicos para a distribuição de notícias, propaganda e veiculação das diversas mídias. No entanto, outros produtos do segmento

de papéis permaneceram no seu nível de demanda estagnado, de modo que os Estados Unidos mantiveram sua posição como segundo maior consumidor de papéis em 2017 (FAO, 2019; PRESTEMON, WEAR e FOSTER, 2015).

A produção de papel e celulose no Brasil é referência mundial pela sua competitividade em relação a custos, com destaque para o setor florestal. Com uma participação de aproximadamente 1,1% do Produto Interno Bruto (PIB) e 6,1% do PIB Industrial em 2017, a indústria de papel e celulose é de grande importância para a economia brasileira (IBÁ, 2019). O país está em uma posição de destaque na produção mundial de celulose, com participação de 10% no mercado global em 2017, segundo dados da FAO (2019). Essa alta parcela advém da alta competitividade da produção brasileira no setor florestal a partir da vantagem em relação ao custo da madeira, dado que o país apresenta o maior potencial de crescimento florestal quando comparado com outros países. A capacidade de competição brasileira no setor é oriunda de condições edafoclimáticas altamente favoráveis e de um longo histórico em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) florestal realizado pelas principais empresas do setor e órgãos de pesquisa, sendo que o setor possui uma média de investimento de 2,2% das receitas investidas em P&D (COSTA, 2017; BNDES, 2012).

No entanto, a competitividade brasileira da celulose não reflete no segmento de papéis, em 2017 o país produziu apenas 10,4 milhões de t, o equivalente a 2,5% da produção global (FAO, 2019). O fato da produção de papel se concentrar em torno dos seus mercados consumidores explica esse fato. Deficiências logísticas, alta e complexa carga tributária, pequeno porte das empresas de papéis, além da competição por recursos com a celulose (que oferece maior rentabilidade econômica e potencial de crescer em outros mercados via exportação), ajudam a complementar o quadro (BNDES, 2012).

Em 2018, a produção brasileira de celulose foi de 21,1 milhões de toneladas (t), montante 8% superior ao ano anterior, fazendo com o que o país subisse duas posições no *ranking* de produção consolidando-se no mercado mundial da *commodity*. A maior parte da produção é voltada para fibra curta e 86% tem como principal destino a exportação. A produção de papéis, no mesmo ano, totalizou 10,4 milhões de toneladas, volume 0,4% menor do que o ano anterior. A principal razão para este desempenho foi a retração das vendas domésticas, sendo 81% da produção destinada para consumo interno (IBÁ, 2019).

A próxima seção se constitui da análise do processo de inovação na indústria de celulose e papel a fim de compreender como o setor se relaciona com as tecnologias.

2.3. INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NO SETOR

Os indicadores de competitividade e desempenho econômico-financeiro das firmas ou das indústrias são normalmente relacionados aos indicadores de inovação. No entanto, de acordo com a visão neo-schumpeteriana, o impacto dos indicadores de inovação depende das especificidades tecnológicas de cada indústria. Em alguns setores, o processo de aprendizagem ocorre por tentativa e erro (*learning by doing*), em outras indústrias, o conhecimento é gerado por pesquisas científicas (*learning from science and technology*) e, em alguns setores, os conhecimentos são incorporados pela interação com outras firmas (*learning by interacting*), além da possibilidade de combinação entre esses mecanismos. Em suma, a natureza da base de conhecimento apresenta especificidades de âmbito setorial, que estabelecem o regime de aprendizagem tecnológica presente em cada indústria e influencia atividade inovativa das firmas (DA SILVA, 2013). Nessa seção, o objetivo é estabelecer o posicionamento do setor de papel e celulose quanto à intensidade da inovação a nível global, bem como para os Estados Unidos e Brasil.

As tecnologias de fabricação de papel e celulose, como numerosas outras tecnologias, evoluíram de forma incremental. A principal alteração tecnológica ocorreu no início do século XIX, com o advento da produção baseada em máquinas. No entanto levou quase 100 anos para que a fabricação de papel a base mecânica substituísse completamente a forma manual de fabricação de papel. A base tecnológica não mudou drasticamente nos últimos anos, embora tenha crescido em escala (OJALA, VOUTILAINEN e LAMBERG, 2012). Portanto, as mudanças na base tecnológica da indústria global têm sido lentas.

De acordo com Laestadius (1998), OCDE (2007) e Galindo-Rueda e Verger (2016), a produção de papel e celulose é uma atividade classificada como de baixa-média intensidade tecnológica no âmbito global. Essas classificações utilizam como critério de agrupamento a taxa de investimento em P&D que pode ser entendida como uma *proxy* do nível de inovação. O mesmo pode ser qualificado de várias maneiras, na medida em que as intensidades de P&D diferem conforme o nível de segmentação das atividades. A indústria florestal, de celulose e papel é constituída por três etapas diferentes em termos de características da intensidade da inovação, nas atividades industriais o desenvolvimento pode ocorrer em um curto período de meses, enquanto na atividade florestal a referência situa-se na escala de décadas para obtenção dos resultados

decorrentes do desenvolvimento e homologação de um novo produto. Além disso, os requerimentos quanto à escala produtiva e ao grau de modernização são distintos nas três etapas (DE PAULA, 2018).

De modo geral, a indústria de papel e celulose acompanhou as tendências internacionais de globalização industrial, ainda que dependendo de matérias-primas e mercados específicos. Assim, os fatores como a procura e o suprimento de matérias-primas explicam significativamente a evolução da indústria de papel e celulose. O domínio da indústria também tem estado estreitamente vinculado ao controle da tecnologia em termos de fabricação de papel. Contudo, a intensidade da pesquisa e desenvolvimento são baixas no setor, com média de investimento de 0,5% da receita em P&D na indústria mundial; inovações em maquinário são terceirizadas ao setor de bens de capital, enquanto o desenvolvimento de novos produtos é interno (OJALA et al., 2013; HUJALA et al., 2015).

O caso dos Estados Unidos é um exemplo do processo da mudança tecnológica. Durante o final do século XIX e início do século XX, o custo de novas tecnologias era baixo, encorajando novas empresas a entrarem no mercado. Durante a passagem do século XX, economias de escala fizeram com que a produção de papel e celulose se tornasse intensiva em capital e a integração vertical entre papel e celulose resultou em grandes firmas, criando as primeiras multinacionais do setor. O país se tornou o líder em novas tecnologias a partir da década de 1920, ancorado no desenvolvimento de químicos (OJALA, VOUTILAINEN e LAMBERG, 2012).

O Brasil representa um caso de desenvolvimento tardio da indústria de papel e celulose, tendo o país atingido sua maturidade após 1970. Para o Brasil, a principal vantagem competitiva é a disponibilidade de florestas adequadas para a produção industrial. Tal competitividade é responsável por afetar o foco de pesquisa e conhecimentos de engenharia, além de organização de atividades de mercado e estrutura de populações industriais (OJALA et al., 2013). Segundo Ojala, Voutilainen e Lamberg (2012), uma das vantagens da indústria brasileira é o favorável ambiente institucional promovido pelas políticas de aquisição de tecnologias com objetivo de fomentar o domínio industrial do país.

Segundo Ojala et al. (2013), o domínio da indústria, definido como a aglomeração da capacidade de produção, conhecimento tecnológico e capacidade de gerenciamento e comercialização, permite a análise de mudanças no setor. No início do século XX, o domínio industrial para os EUA que o manteve até meados desse século e, no início do

século XXI, a liderança se deslocou lentamente para a Ásia e a América do Sul. Nessas mudanças, o domínio se transferia sempre para a região com mais alto potencial de mercado em termos de volume populacional e celeridade no crescimento econômico.

A tabela 1 apresenta a porcentagem de empresas do setor de papel e celulose que adotaram inovação, de processo ou de produto, em diversos países sendo que a análise se dedica aos Estados Unidos e Brasil. Para a confecção da tabela foi considerada a manufatura de celulose, papel e produtos de papel¹. A tabela utiliza dados da *Business R&D and Innovation Survey* (BRDIS) 2014, produzida pela *National Science Foundation* (NSF, 2014), Pesquisa Industrial de Inovação Tecnológica (PINTEC) 2014 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014), da União Europeia foram utilizados os dados da *Community Innovation Survey* (CIS) 2014 do *Centre for European Economic Research* (ZEW, 2014) e *China Statistical Yearbook 2014* por *National Bureau of Statistics of China* (NBS, 2014).

Tabela 1 – Porcentagem de empresas inovadoras e objetivo da inovação no setor de papel e celulose nos Estados Unidos e Brasil

País	Período	Número de empresas que realizaram			Porcentagem do total	
		inovação de produto ou de processo	%	Inovação de produto	Inovação de processo	
EUA	2012-2014	326	28,0	18,1	23,0	
Brasil	2012-2014	647	30,3	10,9	29,4	
China	2013-2014	1 805	26,5	16,7	20,2	
União Europeia	2012-2014	380 455	49,1	25,4	35,8	

Fonte: Elaboração própria com dados do NSF (2014), IBGE (2014), NBS (2014) e ZEW (2014)

Os EUA possuem um baixo número absoluto de firmas que realizam inovação, consequência do estágio que a indústria se encontra caracterizado pelo número reduzido de empresas resultado da saturação da demanda, debilitando os incentivos para investir

¹ Para os EUA, foi considerada a classificação 322 – Manufatura de Papel do NAICS. Para o Brasil, a divisão 17 – Fabricação de celulose, papel e produtos de papel segundo o CNAE. A China não possui um sistema de classificação setorial como os outros países analisados, portanto foi adotada a classificação presente no próprio *China Statistical Yearbook* que classifica o setor analisado como “Manufatura de papel e produtos de papel”. Para a União Europeia foi considerada a divisão “*Manufacture of paper and paper products*”

em capacidade de produção (OJALA et al., 2013). O Brasil inova mais do que os Estados Unidos proporcionalmente, sendo a maior parte inovação de processo, que são fundamentais para o desenvolvimento da competitividade de produtos produzidos em larga escala. A reorganização dos processos de negócios potencializa as oportunidades abertas pelas tecnologias incorporadas em máquinas e equipamentos. As inovações de processo permitem diferenciar uma empresa de outra, aumentando a qualidade e a produtividade (TIGRE, 2006).

A fim de analisar a relação entre Estados Unidos e Brasil com as inovações tecnológicas próprias a Indústria 4.0 o terceiro capítulo busca investigar a experiência destes países quanto à adoção e difusão das tecnologias no setor de papel e celulose.

3. INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DE PAPEL E CELULOSE

O presente capítulo tem como objetivo discorrer sobre os impactos que as tecnologias inerentes à Indústria 4.0 exercem sobre o setor de papel e celulose a nível global, além de apresentar uma análise sobre os Estados Unidos e Brasil. Durante essa investigação será apresentada a discussão sobre as transformações, bem como os desafios e oportunidades que essa mudança representa.

A partir do advento da Indústria 4.0, o setor de papel e celulose tende a se organizar em “ecossistemas”, que substituirão os processos e funções individuais. A cadeia de valor tende a ser continuamente interconectada, permitindo o envio e recebimento de informações por meio de computação em nuvem e sistemas de *big data*. Desta forma, as novas tecnologias tenderão a automatizar trabalhos repetitivos de modo que o foco se torne a análise e, por consequência, a tomada de decisão (CEPI, 2015). O registro de informações transmitidas pelos sensores possibilitará que o sistema se adapte aos diferentes estágios da produção, estabelecendo parâmetros a serem executados durante todos o processo produtivo.

Segundo Karlović (2017), os bens de capital para a produção de celulose possuem um alto nível de automação. A manutenção preventiva de sensores e *scanners*, acompanhada do processo de controle das máquinas e do sistema de controle de qualidade, permite avaliar a produtividade de todo o sistema produtivo. Os controles automáticos se adaptam constantemente às condições, na medida em que utilizam-se *softwares* altamente especializados ao ciclo de produção da celulose.

Martin (2017) afirma que por intermédio da Indústria 4.0 haverá redução do contato entre homens e máquinas, gerando maior segurança nas fábricas. As possibilidades de manutenção preditiva mais eficientes aumentarão o tempo de vida útil dos ativos, bem como aumento da produtividade, a partir do sensoriamento virtual e real nas unidades fabris. Tecnologias como GPS, reconhecimento de voz e gestos e análise computacional já são utilizadas na indústria para coleta, sincronização e visualização de dados, mas essa tecnologia vem sendo superada por meio da integração dos sistemas. A expectativa é que os clientes acessem dados mais práticos e profundos como previsões e recomendações baseadas na experiência das máquinas e da fabricação de papel.

A IoT possibilita à indústria a capacidade de capturar e compartilhar dados e informações de máquinas e processos de produção de celulose e papel para usá-los em prol do cliente. Para se beneficiar dessa ideia é necessário que a conexão e uso de dados

seja contínuo para embasar as decisões tomadas, seja em relação a diagnóstico de máquinas, direcionamento da produção ou otimização de custos (MARTIN, 2017). A presença massiva de internet no processo produtivo leva a uma geração de dados para ser estocada, processada e apresentada de uma maneira energeticamente sustentável e eficiente. Para isso, surgiu o conceito de *Green IoT*, que pode ser definido como procedimentos adotados via IoT para a redução do efeito estufa provocado pela adoção dessas tecnologias no curto prazo. Genericamente, as empresas do setor têm se comprometido com sustentabilidade em seus negócios, sendo os principais problemas, além das mudanças climáticas e do efeito estufa, a eficiência energética, florestas sustentáveis, preservação da biodiversidade, gestão dos recursos hídricos, desperdício e reciclagem (SHAIKH, ZEADALLY e EXPOSITO, 2017; JONES e COMFORT, 2017)

A produção inteligente e conectada tende a massificar o acesso à informação, facilitando a tomada de decisões, na medida que as empresas podem transformar o modelo em que o suporte e entrega de serviços é oferecido aos clientes. Conceitos como a virtualização e descentralização também podem colaborar para otimizar a operação das plantas em aspectos que compreenderão desde tratamento de água e utilização de energia até a forma de processamento das informações. A automação e troca de dados de dispositivos de rede controlados por sistemas de inteligência artificial combinados com manipulação dos dados por computação em nuvem tende a proporcionar o aumento da produtividade e do valor adicionado da produção (KARLOVIĆ, 2017)

O *big data* permite a extração de informações que colaboram no controle do processo industrial até a tomada de decisões gerenciais. Uma série de tecnologias são adotadas para tomadas de decisão em tempo real, como modelagem de dados com técnicas avançadas, redes neurais artificiais, árvores de decisão, sensores virtuais e mineração de dados, além de técnicas de “clusterização” para identificar os melhores cenários de operação (MARTIN, 2017). O volume de dados gerado na fabricação de papel, ao longo de extensos períodos, não pode ser processado com eficácia utilizando-se métodos manuais, no entanto por intermédio do *big data* e computação em nuvem será possível realizar a análise de grandes quantidades de dados.

A conectividade proporcionada pelas tecnologias de redes possibilita a interconexão de sistemas e uma maior gama de soluções, enquanto gera uma grande quantidade de informações, que expostas, podem representar ataques cibernéticos às indústrias. Na indústria de papel e celulose, a instalação de um projeto de segurança cibernética envolve a tecnologia de automação e a política de segurança de TI. A

segurança aplicada aos sistemas de controles industriais é dinâmica, sendo que as áreas de tecnologia da automação e TI avaliam rotineiramente os riscos presentes e indicam melhorias necessárias (SANTI, 2018).

As biotecnologias e bioprocessos são fundamentais ao setor, dado que as fábricas são biorrefinarias. Além disso, a aplicação de enzimas abre um novo portfólio de oportunidades nos processos químicos da produção. As nanoestruturas, por sua vez, indicam inúmeras oportunidades ao setor. A nanocelulose produz oportunidades internas, no âmbito do desenvolvimento de produtos, e oportunidades externas, a partir de produtos inovadores oferecidos ao mercado complementando a linha de produção atual (DE PAULA, 2018). A implementação de materiais avançados na produção gera uma transformação nos recursos na indústria de papel, cuja principal característica será uma produção limpa, circular e ecológica (HUANG, 2017). A celulose é um composto com a habilidade química de isolamento térmico e armazenamento de energia, portanto as florestas constituem meios naturais de armazenamento de energia (COUTINHO, 2006).

O Quadro 4 sistematiza a percepção predominante acerca da difusão global dos clusters tecnológicos no setor por parte das empresas brasileiras em três momentos: em 2017, em 2022 e em 2027 de acordo com De Paula (2017).

Quadro 4 – Percepção quanto à difusão das tecnologias disruptivas na indústria mundial de celulose – 2017, 2022 e 2027

Tecnologias	2017	2022	2027
Internet das Coisas	Baixa/Moderada	Alta	Alta
Produção inteligente e conectada	Baixa	Moderada	Alta
Inteligência artificial, <i>big data</i> e computação em nuvem	Baixa	Moderada	Alta
Redes de comunicação rápidas e seguras	Moderada/Alta	Alta	Alta
Biotecnologia e Bioprocessos	Baixa/Moderada	Moderada	Alta
Materiais nanoestruturados	Baixa	Moderada	Alta
Materiais avançados	Baixa	Moderada	Alta
Armazenamento de energia	Baixa	Baixa	Moderada/Alta

Fonte: De Paula (2018)

Segundo De Paula (2017), na indústria de celulose, à adoção do *cluster* de IoT não é maciça e sua difusão atual é considerada baixa/moderada, no entanto a expectativa de uma difusão alta em cinco anos fazendo parte da rotina das pessoas e organizações. A produção inteligente e conectada não é disseminada, especialmente em economias em

desenvolvimento. Para o setor florestal, a difusão e o impacto já são relativamente moderados e devem permanecer assim até 2022. A disseminação de inteligência artificial, computação cognitiva, redes neurais e análises preditivas é pequena na indústria de celulose frente às possibilidades vislumbradas. Do mesmo modo, a análise de informações através de *big data* é limitada. A adesão de tecnologias de rede é moderada/alta, todavia sua intensidade de adoção depende da região das plantas, o que indica dificuldade para a plena adesão. Ademais, as redes são utilizadas dentro de uma mesma linha de produção.

Ainda segundo De Paula (2017), *cluster* de biotecnologia e bioprocessos têm uma difusão moderada no setor florestal e baixa na área industrial. As fábricas de celulose não empregam completamente a ideia de extrair da base florestal todos os produtos que poderiam contribuir para a redução da participação dos produtos são sustentáveis no cotidiano. Até 2022 espera-se que ocorram melhorias, especialmente na edição de genomas para culturas vegetais. Os materiais nanoestruturados apresentam baixa difusão e impacto para o setor. Após a solução de questões toxicológicas inerentes ao produto nano, espera-se que a difusão seja moderada. Os materiais avançados encontram-se em escala piloto com poucos projetos, sendo que os compósitos têm adoção e impactos reduzidos. As florestas são grandes armazenadores de energia, portanto tecnologias a esse respeito apresentam baixo impacto e são apropriadas pelas produtoras não integradas de papel, que não se beneficiam da geração de energia propiciada pela produção de celulose (DE PAULA, 2017). O Quadro 5 aponta para uma convergência entre o grau de difusão e a intensidade do impacto em 2027 pelo mesmo autor.

Quadro 5 – Percepção quanto à difusão e intensidade do impacto das tecnologias disruptivas na indústria mundial de celulose – 2027

Tecnologias	Difusão	Impacto
Internet das Coisas	Alta	Moderado
Produção inteligente e conectada	Alta	Alto
Inteligência artificial, <i>big data</i> e computação em nuvem	Alta	Moderado
Redes de comunicação rápidas e seguras	Alta	Alto
Biotecnologia e Bioprocessos	Alta	Alto
Materiais nanoestruturados	Alta	Alto
Materiais avançados	Alta	Alto
Armazenamento de energia	Moderada/Alta	Alto

Fonte: De Paula (2018)

Os *clusters* apresentados deixarão de ser um diferencial para algo essencial na indústria, com grande importância para lidar com os desafios atuais da indústria. Ao adotar essas tecnologias, as máquinas serão capazes de operar com maior flexibilidade e capacidade de utilização com reação mais rápida aos processos, aumentando a lucratividade e diminuindo a necessidade de capital humano.

Em um nível mundial, o setor planeja investir, em média, 4% das receitas atuais em digitalização até 2020. A expectativa é de que o setor alcance um alto nível de digitalização e integração das suas operações, sendo que, em 2016, 38% das empresas possuíam um alto grau e 72% esperam alcançar um nível alto até 2020. Além disso, espera-se uma redução dos custos operacionais em 4,2% ao ano durante esse período (PwC, 2016). Segundo Martin (2017), existem economias em matéria prima, energia, produção, rendimento e qualidade mediante aos processos de otimização. As perspectivas são de um aumento de 20% no tempo de vida dos equipamentos consumíveis, redução de 15% e 20% no consumo de energia e matérias primas, respectivamente, num cenário em qual a produção tenderá a aumentar em 15% nos próximos 20 anos.

Para uma análise pormenorizada, durante esse capítulo o foco será a análise dos principais produtores do setor, Estados Unidos e Brasil, a despeito dos *clusters* tecnológicos apresentados acima a fim de permitir uma comparação entre esses países.

3.1. ESTADOS UNIDOS

Os produtos de base florestal são crescentemente desafiados pelo uso de materiais alternativos e novas tecnologias. As pressões do setor relacionadas ao uso de equipamentos eletrônicos e a limitação de capital para novos investimentos. Como resultado das pressões econômicas, a indústria de papel e celulose diminuiu em um quarto sua força de trabalho nos Estados Unidos na década de 2000 (AF&PA, 2009). A inovação é um elemento essencial para garantir a sustentabilidade do setor, na medida em que o investimento em tecnologias pode reduzir custos de produção e permitir às firmas o uso de métodos de avançados de manufatura. Segundo Brown et. al. (2010) é necessário que haja um realinhamento do foco setorial em torno de P&D para que a indústria se torne atrativa a investidores e clientes.

Segundo Berg e Lingqvist (2019) a partir da digitalização da manufatura a base de custos dos produtores tendem a se reduzir em até 15%. Cerca de 60% de todas as

tarefas podem ser automatizados nos próximos 10 anos. E na década de 2020 a expectativa é que 30% das funções físicas e manuais se tornem obsoletas, enquanto as habilidades tecnológicas cresçam.

O desenvolvimento da Indústria 4.0 no setor está ligado ao *Advanced Manufacturing Technology Consortia* (AMTech) que é um programa cujo objetivo é fortalecer a indústria por meio de pesquisa, de forma que haja a participação de toda cadeia de valor, de universidades e de agências governamentais. A plataforma *Technologies for Sustainable Manufacturing of Pulp and Paper Products* funciona por meios de incentivos e financiamentos federais com cinco focos de ação: a) uso de tecnologias de armazenamento de energia para tornar as florestas biorrefinarias; b) avanço em materiais avançados, com enfoque em produtos florestas e na recuperação de aparas de papel; c) a sustentabilidade florestal; d) desenvolvimento de tecnologias de integração da produção; e) força de trabalho tecnologicamente avançada (KHAN, 2014). O Quadro 6 esquematiza as medidas do programa.

Quadro 6 – Medidas do Technologies for Sustainable Manufacturing of Pulp and Paper Products

<p>Aumentar o suprimento de biomassa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incrementar o crescimento de biomassa de madeira utilizável; • Desenvolver geneticamente árvores para fins específicos; • Colher, processar e fornecer uma variedade de tipos de biomassa florestal com qualidade e custo competitivo; • Melhorar os sistemas de manejo florestal. 	<p>Reduzir o uso de água em 50%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduzir o uso de água na produção de papel e celulose em 50%; • Desenvolver tecnologias para tratar e reutilizar a água em plantações; • Desenvolver o reuso da água em circuito fechado.
<p>Aumentar o valor da biomassa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desenvolver processos de cultivo de árvores de ciclo curto; • Desenvolver novos produtos derivados de biomassa que ofereçam altos valores e substituam produtos derivados de petróleo; • Melhorar a separação de componentes da biomassa e sua conversão em produtos; • Desenvolver processo de biorrefinaria termoquímica de baixo capital. 	<p>Reduzir as emissões de carbono e consumo de energia</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gerar e energia de forma mais eficiente com emissões 25% mais baixas de gases de efeito estufa; • Reduzir o gasto energético da produção em 25%; • Eliminar o uso de combustíveis fósseis; • Reduzir as emissões de CO2 com novas técnicas de captura usineiras.
<p>Aumentar o reuso e reciclagem de resíduos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Melhorar a escolha das aparas de papel; • Permitir que aparas de papel tenham um desempenho equivalente ao de fibras virgens; • Uso de componentes não fibrosos de maneira eficiente; • Alavancar o uso de biomassa na produção de energia renovável; • Desenvolver produtos que permitam a reciclagem. 	<p>Criar novos produtos e novos processos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Criar novos compósitos de base biológica e nanotecnológica; • Alcançar uma melhoria de 20 a 50% no desempenho de produtos de papel e embalagens; • Desenvolver novas funcionalidades ao papel; • Desenvolver novas formas de embalagem de biomassa; • Separar a biomassa em componentes básicos, preservando as propriedades em nanoescala dos componentes; • Desenvolver novas funcionalidades impressas para criar superfícies "inteligentes" no papel

Fonte: Brown et. al. (2010)

A sustentabilidade é um enfoque da indústria, na medida em que o fortalecimento da viabilidade econômica de longo prazo do setor depende de fatores ecológicos (BROWN et. al., 2010). Além disso, o foco setorial está relacionado aos novos produtos

a partir do surgimento de novas aplicações industriais que englobam desde nanofibras a materiais compósitos e fibras de carbono à base de lignina. Novos processos estão sendo projetados para extrair fibras como matéria-prima para a produção de açúcar e produtos químicos, mantendo as partes de celulose da lasca de madeira para produtos de celulose (BERG e LINGQVIST, 2019).

A indústria de papel e celulose nos Estados Unidos possui uma base tradicional que faz com que o setor tenha amplo acesso ao mercado de crédito. A confluência de mudanças tecnológicas e de recursos para qual o setor deve se preparar aliadas a capacidade de financiamento permite às firmas alcançarem liderança de mercado via tecnologia, representando uma nova possibilidade de competitividade. Ademais, no segmento de embalagens o setor pode usar a tecnologia para competir com produtos substitutos tal como o plástico (FEBER, NORDIGÅRDEN e VARASANI, 2019).

Os desafios para a indústria de papel e celulose estadunidense não estarão relacionados à estrutura de custos, mas o enfoque será na criação de valor do produto. A principal questão para o mercado de papéis é o segmento de embalagens, com o desenvolvimento no comércio eletrônico no país, sendo a segurança a principal preocupação. A tendência é que as companhias ampliem seu portfólio corporativo em torno dos principais negócios, para criar propostas de valor diferenciadas para os clientes. Assim, as empresas terão que investir em inovação, gestão de talentos e logística comercial para promover o crescimento do setor de base florestal (BERG e LINGQVIST, 2019).

3.2. BRASIL

O setor de celulose se aproxima das melhores práticas mundiais, sendo que em relação ao setor florestal a produtividade brasileira é superior em relação aos competidores internacionais, mesmo sem utilizar a plenitude das TIs disponíveis para o manejo florestal. No segmento industrial, como os fornecedores de equipamentos e tecnologias do segmento analisado são globalizados, os investimentos estão equalizados frente aos competidores internacionais. A biotecnologia, e em especial a nanotecnologia, tem papel fundamental para a liderança do país, dado que o Brasil possui a maior operação em nanocelulose com produção anual de duas toneladas, cuja escala é pequena comparado às plantas comuns no mercado (FERREIRA e DE PAULA, 2018). Cerca de 35% das empresas do setor possuem um engajamento alto em relação a implementação de

tecnologias associadas à Indústria 4.0, com comitês ou diretorias específicas e 41% possuem um engajamento médio, com trabalhos isolados (FRIAS, DA SILVA e KAKEHASI, 2019).

O quadro 7 apresenta uma tabela comparando digitalização, integração vertical e horizontal, nível de automação, integração da automação e das tecnologias de informação e, por fim, o engajamento na adoção da Indústria 4.0. Entende-se integração vertical como àquela que engloba diferentes etapas do processo de transformação de insumos em produtos e integração horizontal consiste na introdução de produtos que de alguma forma estejam relacionados aos produtos originais e possam ser vendidos pelos canais de distribuição já estabelecidos.

Quadro 7 – Difusão de tecnologias entre os tipos de indústrias de papel e celulose – 2017

Nível	Digitalização	Integração Vertical	Integração Horizontal	Nível Automação	Integração Automação e TI	Engajamento em I4.0
Celulose	Alta	Moderada/ Alta	Alta	Alta	Moderada/ Alta	Moderada/ Alta
Papel Integrado	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada/ Alta
Papel Não Integrado	Baixa/ Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baixa/ Moderada	Baixa/ Moderada

Fonte: Frias, Da Silva e Kakehasi (2019)

O quadro 7 corrobora com a tese de que o setor de celulose é mais inovativo em comparação com os níveis de papel e papel não integrado, além disso a indústria de papel não integrado normalmente é formada por firmas de menor escala o que desestimula os investimentos. As firmas produtoras de celulose competem a nível global e por isso são estimuladas a se engajar em Indústria 4.0, essa participação também ocorre quando se trata de papel integrado, mas essas empresas realizam menores investimentos dado que a maior parte da produção se destina à celulose de mercado, como analisado no capítulo anterior.

Na concepção das empresas do setor no Brasil, a importância dos *clusters* tecnológicos varia entre redes de comunicação, materiais avançados, materiais nanoestruturados, armazenamento de energia, processos inteligentes e conectados e

biotecnologia. Os motivos para a escolha das tecnologias de redes partem de questões de segurança da informação e sua capacidade de paralisar ou inviabilizar negócios. Materiais avançados se baseiam na questão da sustentabilidade, na medida que o desenvolvimento tecnológico demanda produtos de fontes “verdes”. A nanotecnologia se torna importante para a viabilização de novas aplicações e produtos. O armazenamento de energia tenderá à reformulação dos padrões de concorrência e modelos de negócios, mesmo com o desafio ligado à escala tecnológica. Os processos inteligentes e conectados podem propiciar uma produção rápida, automatizada e de alta qualidade, com novas operações logísticas. Por fim, as biotecnologias estão ligadas à redução de gases de efeito estufa e da pegada de carbono (FERREIRA e DE PAULA, 2018). Frias, Da Silva e Kakehasi (2019) apontam que as tecnologias com mais aplicabilidade na indústria de papel e celulose são computação em nuvem e *big data*, IoT e inteligência artificial, sendo a computação em nuvem como a tecnologia habilitadora da Indústria 4.0 com maior aplicação no setor.

Segundo Ferreira e De Paula (2018), os *clusters* têm fortes benefícios para as empresas brasileiras. As vantagens do IoT são a agilidade, redução de custos da produção e melhoria na qualidade de vida. As tecnologias de redes proporcionam acessibilidade em pontos remotos com informações em tempo real. Inteligência artificial, *big data* e computação em nuvem são responsáveis pela redução de custos em TI e ampliação de análises complexas. Processos inteligentes e conectados permitem a redução de custos. Materiais avançados possibilitam produtos mais sustentáveis e materiais nanoestruturados geram novos produtos. O armazenamento de energia propicia energia sustentável e de menor custo. Enfim, a biotecnologia tem como benefício a maior produção florestal e adaptação a efeitos relacionados às mudanças climáticas.

A principal barreira das tecnologias de redes são os ataques cibernéticos. O principal empecilho para processos inteligentes e conectados e inteligência artificial é a acessibilidade e aplicabilidade da tecnologia. Materiais avançados sofrem da pressão de preços dos produtos da indústria do petróleo. Biotecnologias e materiais nanoestruturados podem enfrentar barreiras regulatórias, bem como o armazenamento de energia, todavia, este ainda possui a necessidade de altos investimentos. De maneira geral, pode-se considerar como obstáculos os investimentos para instalação de sensores e rede interna dentro da unidade produtiva, segurança da informação, padronização dos protocolos de comunicação, infraestrutura e disponibilidade de mão de obra especializada e de fornecedores para atender o aumento da demanda. No entanto, a intensidade dos benefícios é mais relevante que a intensidade das barreiras. A disponibilidade de mão de

obra especializada também é tida como um desafio a ser enfrentado no contexto da Indústria 4.0, na medida em que as tecnologias específicas demandam profissionais aptos. O setor encontra dificuldade de encontrar trabalhadores com formação especializada em Indústria 4.0 (FERREIRA e DE PAULA, 2018; FRIAS, DA SILVA e KAKEHASI, 2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitas oportunidades existem a respeito do futuro da Indústria 4.0 no setor de papel e celulose. As tecnologias da Indústria 4.0 permitirão o acesso à informação e facilitarão a tomada de decisões, as empresas mudarão a forma são que oferecidos o suporte e entrega de serviços aos clientes (FERREIRA e DE PAULA, 2018). As oportunidades de digitalização, integração e automação permitem às empresas acrescentarem valor a si e às suas cadeias de valor, de modo que proporcionam um aumento da produtividade. As possibilidades de crescimento a partir da Indústria 4.0 aumentam à medida que as firmas procuram se manter relevantes na era da infraestrutura inteligente e digitalmente conectada.

Para os Estados Unidos a prioridade é a sustentabilidade ambiental e a criação de novos produtos e processos químicos, enquanto para o Brasil tecnologias de rede são vistas com grande importância. A indústria norte americana possui acesso a créditos e potencial de crescimentos guiados pelo setor de embalagens, enquanto que o cenário brasileiro é de alta produtividade em relação aos competidores internacionais, com possibilidade de redução dos custos.

A intensidade entre os benefícios proporcionados pela Indústria 4.0 são mais relevantes que a intensidade das barreiras (FERREIRA e DE PAULA, 2018). Para ambos países existem significativos obstáculos relacionadas ao investimento de mão de obra, gestão e logística. A segurança dos produtos também é uma prioridade para o setor. Além disso, o setor é intensivo em capital e tem um grande período de maturação de suas plantas e, conseqüentemente, leva muitos anos antes que as inovações sejam completamente adotadas na indústria (ROGERS, 2018).

O investimento brasileiro se concentra no segmento de celulose, enquanto que nos EUA há maior concentração para a cadeia de papel integrado, dado a própria configuração industrial dos países (PRESTEMON, WEAR e FOSTER, 2015; BNDES, 2012). Desta forma, o Brasil tende a liderar tecnologicamente para celulose, enquanto os EUA devem dominar no setor de papéis consolidando a atuação desses países na cadeia global do setor. O quadro 8 consolida as principais semelhanças e diferenças entre esses dois países.

Quadro 8 – Principais semelhanças e diferenças entre o impacto da Indústria 4.0 nos Estados Unidos e Brasil

	Estados Unidos	Brasil
Segmento Industrial	Papel-Integrado	Celulose de mercado
Existência de Política Industrial	Sim	Não
Enfoque em sustentabilidade	Sim	Sim
Enfoque em novos produtos	Sim	Sim
Enfoque no segmento de embalagens	Sim	Não
Enfoque nas tecnologias de rede	Não	Sim
Pouca mão de obra disponível	Sim	Sim

Fonte: Elaboração própria.

De um modo geral, os impactos apontados parecem insuficientes para alterar radicalmente os modelos de negócios do segmento, tendendo a reforçar estratégias competitivas predominantes (DE PAULA, 2018). Além disso, existem outros aspectos a serem considerados além daqueles tratados nesse trabalho, tal como a influência chinesa no setor na medida em que a demanda do país tem uma grande representatividade para a indústria de papel e celulose. Ademais, a China vem construindo seu sistema interno de coleta de papéis e implementando cada vez mais regras de importação que aumentam os requisitos para materiais de alta qualidade, mesmo quando isso reduz o volume das importações de países como os Estados Unidos e Brasil (KINSELLA, 2018).

As tecnologias da Indústria 4.0 permitirão o acesso à informação e facilitarão a tomada de decisões, as empresas mudarão a forma são que oferecidos o suporte e entrega de serviços aos clientes. Outros conceitos, como virtualização e descentralização, também colaborarão para otimizar a operação das plantas em aspectos que compreenderão desde tratamento de água e utilização de energia até a nova forma de processamento das informações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES, R; KEMPNER-MOREIRA, F; FREIRE, P. Indústria 4.0: desafios e tendências para a gestão do conhecimento. In: I Seminário de Universidade Corporativa e Escolas de Governo. *Anais...* Florianópolis, p. 224-247, 2017.

AF&PA - AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. Environment, Health, and Safety Verification Program Biennial Report. 2008.

ANDRADE, P. S. A. M. *A Quarta Revolução Industrial e sua relação com a produtividade atual: uma revisão da literatura*. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Administração) — Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ANDRITZ. *Premium pumping technology for the pulp and paper industry: IoT enabled pump solutions*. 2018.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *BNDES 60 anos: perspectivas setoriais*. Rio de Janeiro: BNDES, v.1, p. 334-381, 2012.

BERG, P; LINGQVIST, O. *Pulp, paper, and packaging in the next decade: Transformational change*. McKinsey&Company: Paper and Forest Products. 2019.

BIAZUS, A; HORA, A. B; LEITE, B. G. P. *Panorama de mercado: celulose*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, BNDES Setorial, n. 32, p. 311-370, 2010.

BROWN, R.; HANSEN, F.; JAMES, M.; GREENE, A.; MUNDERVILLE, M. Forest Products Industry Technology Roadmap. *The 2020 Agenda*, v. 2020, 2010.

CAMPOS, B.; URRACA RUIZ, A. Padrões setoriais de inovação na indústria brasileira. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 8, n. 1, p. 167-210, 2009.

CEPI - CONFEDERATION OF EUROPEAN PAPER INDUSTRIES. *Paper Industry 4.0: What Digital Can Do For The Paper Industry*. Brussels: CEPI, 2015.

COELHO, P. M. N. *Rumo à Indústria 4.0*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.

CONCEIÇÃO, O. A. C. A centralidade do conceito de inovação tecnológica no processo de mudança estrutural. *Revista Ensaios FEE*, Porto Alegre, v.21, n.2. p. 58-76, 2000.

CORREA, D. V. G. *Celulose: logística e distribuição internacional*. SENAI-SP Editora, São Paulo, 2014.

COSTA, D. R. S. *A indústria de papel e celulose: breve panorama nacional, inovação e estratégias ambientais de empresas no estado da Paraíba*. Trabalho de conclusão de

curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

COUTINHO, J. A. P. Materiais de mudança de fase para isolamento térmico e armazenamento de energia. *Engenharia Química*, p. 2-7, 2006.

DA SILVA, E. H. Taxonomia setorial com indicadores de esforço inovativo. *Revista de Economia Contemporânea*, v. 17, n. 1, 2013. PINTEC (2014)

DE PAULA, G. M. Nota Técnica do Sistema Produtivo Insumos Básicos e Foco Setorial Siderurgia. *Relatório do Projeto Indústria 2027: Riscos e Oportunidades para o Brasil Diante de Inovações Disruptivas*. Rio de Janeiro: IE-UFRJ; Campinas: IE-UNICAMP, 2017.

DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research policy*, v. 11, n. 3, p. 147-162, 1982.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *FAOSTAT-Forestry database*. Roma, Italia, 2019.

FEBER, D.; NORDIGÅRDEN, D.; VARANASI, S. *Winning with new models in packaging*. McKinsey&Company: Paper and Forest Products. 2019.

FERREIRA, S. C. R.; DE PAULA, G. M. Os primeiros impactos da Indústria 4.0 sobre o setor de papel e celulose. In: III Encontro Nacional de Economia Industrial e Inovação, Uberlândia. *Anais...* São Paulo: Blucher, v. 5, n. 1, p. 405-423, 2018.

FLORÊNCIO, M. N. S.; MIRANDA, D. P. S. L.; SANTOS, A. C.; DIAS, C. T.; RUSSO, S. L.; OLIVEIRA JR, A. M. Prospecção Tecnológica: Um Estudo Sobre os Depósitos de Patentes em Nanobiotecnologia. *Cadernos de Prospecção – Salvador*, v. 10, n. 2, p.315-326, 2017.

FREITAS, A. A. *A internet das coisas e seus efeitos na indústria 4.0*. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Sistemas de Computação) — Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2017.

FRIAS, A. R.; DA SILVA, F. V.; KAKEHASI, A. L. Artigo técnico: Pesquisa setorial: indústria 4.0: a transformação digital nas indústrias de papel e celulose no Brasil. *O Papel: revista mensal de tecnologia em celulose e papel*, v. 80, n. 3, p. 68-73, 2019.

GALINDO-RUEDA, F; VERGER, F. *OECD taxonomy of economic activities based on R&D intensity*. 2016.

GTAI – GERMANY TRADE & INVEST. *Industrie 4.0: Smart manufacturing for the future*. Berlin: GTAI, 2014.

HERMANN, M., PENTEK, T., OTTO, B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*, Business Engineering Institute St. Gallen, n.1, 2015.

HORA, A. B.; RIBEIRO, L. B. N. M.; MENDES, R. Papel e celulose = Paper and cellulose. In: PUGA, F. P.; CASTRO, L. B. (Org.). *Visão 2035: Brasil, país desenvolvido: agendas setoriais para alcance da meta*. 1. ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, p. 119-142, 2018.

HUANG, J. *Sustainable Development of Green Paper Packaging*. Environment and Pollution. v. 6, n. 2, p. 1-5, 2017.

HUJALA, M.; TUPPURA, A; JANTUNEN, A.; ARMINEN, H. Structural changes and effects of R&D investments in the pulp and paper industry. *International Wood Products Journal*, v. 6, n. 4, p. 181-188, 2015.

IBÁ. *Relatório 2018*. São: Indústria Brasileira de Árvores (Ibá). 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa industrial de inovação tecnológica - Pintec*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012-2014.

IEL – INSTITUTO EUVALDO LODI; NC - NÚCLEO CENTRAL. *Mapa de clusters tecnológicos e tecnologias relevantes para competitividade de sistemas produtivos*. Brasília, DF: IEL/NC, 2017.

IEDI – INSTITUTO DE ESTUDOS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. *Indústria 4.0: A Quarta Revolução Industrial e os Desafios para a Indústria e para o Desenvolvimento Brasileiro*. Brasília: IEDI, 2017.

JONES, P; COMFORT, D. The Forest, Paper And Packaging Industry And Sustainability. *International Journal Of Sales, Retailing And Marketing*. v.6 n.1, p.3-21, 2017.

KARLOVIĆ, I. Technologies For Using Big Data In The Paper And Printing Industry. *Journal Of Print And Media Technology*. Slovenia. v.6, n.2, p. 75-84, 2017.

KHAN, H. M. *Technologies for Sustainable Manufacturing of Pulp and Paper Products*. 2014.

KINSELLA, S. Maximising recycled fibre content. *The State of the Global Paper Industry Shifting Seas: New Challenges and Opportunities for Forests, People and the Climate*. v.2, 2018.

KUPFER, D. Uma abordagem neo-schumpeteriana da competitividade industrial. *Revista Ensaio FEE*, Porto Alegre, v.17, n.1. p. 355-372, 1996.

LAESTADIUS, S. The relevance of science and technology indicators: the case of pulp and paper. *Research Policy*, v. 27, n. 4, p. 385-395, 1998.

MARTIN, C. Indústria 4.0 Aponta Caminhos para Chegar à Fábrica Do Futuro: Máquinas Inteligentes e Comunicação Entre Processos Serão Novo Padrão dos Parques Fabris de Celulose e Papel. *O Papel: Revista Mensal de Tecnologia em Celulose e Papel*. v.78, n. 4, p. 54-62, 2017.

MARTINS, N. F. S. *Estudo das vantagens da aplicação de metodologias, Indústria 4.0, no contexto industrial*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2018.

MOURA, J. M. *Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados: Segmento Celulose e Papel*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética. 2018

NSF – NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. *Business R&D and Innovation Survey – BRDIS*. Alexandria: NSF, 2012-2014.

OCDE – ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. *OECD Science, Technology and Industry: Scoreboard 2007*. Paris: OCDE, 2007.

OJALA, J; LAMBERG, J-A; PELTONIEMI, M; SÄRKKÄ, T.; VOUTILAINEN, M. A. Evolução Da Indústria De Papel Global. *O Papel: Revista Mensal de Tecnologia em Celulose e Papel*, v. 74, n. 9, p. 51-54, 2013

OJALA, J; VOUTILAINEN, M; LAMBERG, J-A. The evolution of the global paper industry: concluding remarks. *The Evolution of Global Paper Industry 1800-2050*. Springer, Dordrecht, p. 345-363, 2012.

PEIXOTO, J. A; PEREIRA, L. M. *Industria 4.0 na auto-organização dos sistemas produtivos*. Revista Eletrônica Científica UERGS, v.4, n.3, p. 525-538, 2018.

PEREZ, C. *Technological revolutions and techno-economic paradigms*. Cambridge Journal of Economics, v. 34, n.1, p.185-202, 2010.

PINHO, M.; AVELLAR, A. P. M. Economias de escala, barreiras à entrada e concentração na indústria de celulose e papel. In: XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba. *Anais...* Rio de Janeiro: Abepro, p. 1-8. 2002.

PIOTTO, Z. C. *Eco-eficiência na indústria de celulose e papel*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.

PWC – PRICEWATERHOUSECOOPERS. *Industry 4.0: Building the digital enterprise*. Munich: PWC. 2016.

SANTI, T. Segurança Cibernética na Indústria 4.0. *O Papel: Revista Mensal de Tecnologia em Celulose e Papel*. v.79, n. 2, p. 68-69, fevereiro 2017.

- SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T. D. F. M.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B. Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*. v.4, n.1, p.111-124, 2018.
- SCHWAB, K. *A quarta revolução industrial*. São Paulo: Edipro, 2016.
- SHAIKH, F. K; ZEADALLY, S; EXPOSITO, E. Enabling Technologies for Green Internet of Things. *IEEE Systems Journal*. v.11, n.2, p. 983-994, 2017.
- SNIDERMAN, B; MAHTO, M; COTTELEER, M. J. *Industry 4.0 and manufacturing ecosystems: Exploring the world of connected enterprises*. Deloitte University Press, New York, 2016.
- TIGRE, P. B. *Gestão da inovação: a economia da tecnologia no Brasil*. Rio de Janeiro: Campus-Elsevier, 2006.
- ZEW – CENTRE FOR EUROPEAN ECONOMIC RESEARCH. *Community Innovation Survey – CIS*. Berlim: ZEW, 2012-2014.
- ZHOU, K; LI, T; ZHOU, L. *Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges*. 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), IEEE, p. 2147-2152, 2015.