

**INOVAÇÃO AMBIENTAL TECNOLÓGICA DE PROCESSO PARA REDUZIR IMPACTO AMBIENTAL DOS EFLUENTES EM INDÚSTRIA DE CELULOSE**

**PATRICIA LIMA NOGUEIRA**  
CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

**MARIA TEREZA SARAIVA DE SOUZA**  
CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

# **INOVAÇÃO AMBIENTAL TECNOLÓGICA DE PROCESSO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES EM INDÚSTRIA DE CELULOSE**

## **1 INTRODUÇÃO**

As empresas utilizam inovação ambiental para reduzir os danos gerados pelas suas atividades (TSENG *et al.*, 2013). As inovações, quando adequadamente implantadas, podem auxiliar na prevenção e controle da poluição, na redução dos riscos ambientais, na melhoria de produtos, processos e serviços, na redução de impactos ambientais e no aumento do desempenho ambiental (CARRILLO-HERMOSILLA; DEL RÍO; KÖNNÖLÄ, 2010; CHENG; YANG; SHEU, 2014). Nas indústria de celulose e papel, as inovações ambientais aplicadas têm sido relacionadas a processo (SUHR *et al.*, 2015) já que inovações de produto podem levar a alteração da qualidade e aplicabilidade dos seus produtos (SUHR *et al.*, 2015; POPP; HAFNER; JOHNSTONE, 2011).

O tema de inovação e a redução de impactos ambientais dos efluentes gerados mostram-se relacionados visto que as tecnologias ambientais têm sido utilizadas em empresas para reduzir impactos ambientais significativos. Sendo assim, este estudo busca responder a como questão de pesquisa: Como as inovações ambientais tecnológicas de processo contribuem para mitigar impactos ambientais gerados pelos efluentes nas indústrias do setor de celulose?

O objetivo deste trabalho é analisar como a inovação ambiental tecnológica de processo contribui para mitigar impactos ambientais dos efluentes das indústrias do setor de celulose. Os objetivos secundários relacionados a este trabalho são:

- a) verificar a aplicabilidade das Melhores Práticas (BAT) relacionado a efluentes das indústrias do setor de celulose;
- b) mapear os parâmetros mais restritivos da legislação federal, estadual e municipal relacionados a efluentes para comparar com os resultados das empresas estudadas.

As indústrias do setor de celulose têm introduzido diversas tecnologias ambientais no processo produtivo para mitigar grandes acidentes e reduzir os riscos. Essas tecnologias, se aplicadas na totalidade do processo produtivo das indústrias, podem levar a uma redução significativa de impactos ambientais (SUHR *et al.*, 2015; BRASIL, 2000).

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A inovação ambiental consiste em processos novos ou modificados, técnicas, sistemas e produtos que evitam ou reduzem danos ambientais (KEMP; ARUNDEL, 1998). A inovação também é utilizada para prevenção e controle da poluição e, em algumas empresas tem sido vista como uma redução nos custos e emissões gerados nos processos produtivos atendendo assim as regulamentações ambientais (KEMP; PONTOGLIO, 2011; LIAO; TSAI, 2018; KIEFER; GONZÁLEZ; CARRILLO-HERMOSILLA, 2018). Para atender às exigências dos acordos nacionais e internacionais ambientais, não é suficiente realizar apenas adaptações das tecnologias existentes e sim buscar alternativas que envolvem mudanças de processos produtivos por meio da implementação de políticas voltadas às inovações para um melhor desempenho econômico e ambiental (RENNINGS *et al.*, 2006; JOVÉ-LLOPIS; SEGARRA-BLASCO, 2018). Inovação ambiental é, então, o processo de desenvolvimento de novos produtos, ou significativamente melhorados, processos ou serviços que podem fornecer valor ao cliente e aos negócios e que leva a uma redução dos danos ambientais, controle da poluição (KEMP; PEARSON, 2008; MARTÍNEZ-ROS; KUNAPATARAWONG, 2019) diminuindo significativamente o impacto ambiental (KEMP; ARUNDEL, 1998; KEMP; PONTOGLIO, 2011), criando novos espaços de mercado, produtos e serviços ou processos orientados para as questões ambientais (CHARTER; CLARK, 2007; OLTRA; SAINT JEAN, 2009) de forma

integrada (CHARTER; CLARK, 2007). Sendo assim, a inovação ambiental serve para prevenir ou reduzir, diagnosticar e monitorar os danos antrópicos, gerados pelas ações do homem (MARKUSSON, 2001; LIAO; TSAI, 2018; KIEFER; GONZÁLEZ; CARRILLO-HERMOSILLA, 2018). O desenvolvimento de Inovação Ambiental visa o ganho de competitividade econômica com a segurança ambiental preservada. De acordo com a visão europeia, a economia deve buscar um aumento de riqueza utilizando menos recursos naturais e causando menor impacto ambiental. Nesta busca, as fronteiras entre as políticas clássicas devem ser transgredidas e as políticas industriais, ambientais, tecnológicas e científicas devem convergir (COENEN; LÓPEZ, 2010).

Uma das formas de mensurar a inovação é através de indicadores. Os indicadores de inovação ambiental podem ser classificados de acordo com algumas categorias: políticas governamentais, as estruturas organizacionais internas, estratégias e motivações ambientais, compensação, fontes de informação, colaboração e as condições de adequação. A regulação governamental e as parcerias podem ter um efeito nas políticas de inovação da empresa tendo como indicadores os subsídios em P&D, subsídios de adoção de tecnologia, esquemas de assistência técnica ou políticas de compras. As estruturas organizacionais internas incluem declarações de missão e metas de longo prazo para reduções de emissões, uso de energia e melhorias de produtos, Análises de Ciclo de Vida (ACV), auditorias ambientais e princípios, colaboração com fornecedores e utilizadores em relação a questões ambientais, contatos com autoridades, e a inclusão de ambientalistas e cidadãos no desenvolvimento de uma política firme. Os indicadores de estratégias e motivações ambientais incluem indicadores dos aspectos organizacionais e estratégicos de P&D e gestão ambiental, de gestão, metas de inovação, o cumprimento da regulamentação em vigor, as possíveis regulamentações futuras, responsabilidade social. Indicadores de compensações envolvem os custos da inovação ambiental para determinar a utilidade das compensações como incentivo à inovação ambiental. Indicadores de fontes de informação tem como foco o desenvolvimento de políticas públicas eficazes para estimular a inovação e requer informações sobre os tipos de fontes de informação que são mais úteis para finalidades. Indicadores de colaboração envolvem o gerenciamento de cadeia e a administração de produtos na cadeia produtiva. E por fim, os indicadores de adequação incluem critérios de desenvolvimento e a frequência com que os desenvolvedores de usuários mantêm a inovação em segredo ou para outras empresas (KEMP; ARUNDEL, 1998; GARCÍA-GRANERO; PIEDRA-MUÑOZ; GALDEANO-GÓMEZ, 2018).

A depender da forma de implantação da inovação ambiental, ela pode ser classificada em incremental e radical. As mudanças incrementais envolvem graduais e contínuas modificações que preservam sistemas de produção e mantêm as redes existentes, agregando valor no sistema em que as inovações estão enraizadas (CARRILLO-HERMOSILLA; DEL RÍO; KÖNNÖLÄ, 2010). As melhorias podem envolver redução de custos e melhoria de produtos, no entanto leva a ganhos ambientais limitados. Por outro lado, as inovações em larga escala, envolvendo a substituição de todo um processo de produção ou o desenvolvimento de um novo produto possibilitam melhorias marcantes na sustentabilidade ambiental (KEMP; ARUNDEL, 1998). As mudanças radicais muitas vezes desconsideram os processos e tecnologias utilizados trazendo novas alternativas para o atendimento das necessidades organizacionais. São mudanças descontínuas que buscam a substituição de componentes ou até mesmo de sistemas inteiros, criando novas redes e acrescentando novos valores (CARRILLO-HERMOSILLA; DEL RÍO; KÖNNÖLÄ, 2010; ARDITO *et al.*, 2018). A inovação radical é mais estimulada pela regulamentação do que pelos instrumentos de mercado (ASHFORD; AYERS; STONE, 1985).

A inovação ambiental possui características diferenciadas a depender da sua aplicação, podendo ser classificada em inovação ambiental organizacional, inovação ambiental de

produto e inovação ambiental de processo (VDI, 2001). As tecnologias aplicadas na inovação ambiental de processos são classificadas em: tecnologias *end-of-pipe* e tecnologias limpas (VDI, 2001). As tecnologias *end-of-pipe* são incluídas em um sistema de produção existente e aplicam ações que influenciam nos requisitos ambientais (KEMP; ARUNDEL, 1998; VDI, 2001). A aplicação das tecnologias *end-of-pipe* é limitada, mas pode ser estimulada por questões regulatórias (FRONDEL; HORBACH; RENNINGS, 2007) tais como tecnologias usadas em tratamento de água (VDI, 2001). As tecnologias limpas são entendidas como minimizadores dos impactos ambientais no processo produtivo (KEMP; ARUNDEL, 1998; VDI, 2001) podendo ser estimulada, pelas forças do mercado (FRONDEL; HORBACH; RENNINGS, 2007). Algumas das tecnologias limpas incluem utilização de materiais ambientalmente corretos e alteração de processo produtivo com ganho ambiental (VDI, 2001). Os principais fatores que impulsionam inovação nas tecnologias de processo tanto nas tecnologias limpas quanto nas tecnologias *end-of-pipe* são as capacidades tecnológicas, a possibilidade de apropriação e a estrutura de mercado. As capacidades tecnológicas tais como *know-how* e conhecimento para desenvolvimento de novos produtos e processos e os fatores internos são fundamentais para a tomada de decisão quanto à inovação implantada. O investimento na implantação de inovações tecnológicas depende de investimentos em pesquisa anterior, tornando difícil a separação entre ambos, levando à apropriação. Esta é, muitas vezes, dificultada pela criação do monopólio por patentes e a implementação de barreiras de mercado para dificultar imitação ou até mesmo garantir que inovações sejam específicas para as empresas pesquisadas. Sem isso, as inovações podem ser utilizadas por qualquer empresa. A estrutura de mercado também pode impulsionar a inovação uma vez que os mercados competitivos geram pressões constantes na criação de inovações (FRONDEL; HORBACH; RENNINGS, 2007). As empresas têm utilizado tecnologias limpas mais frequentemente do que as tecnologias *end-of-pipe* para resolver os problemas ambientais. Apesar da maioria das instalações investirem em tecnologias limpas, as tecnologias *end-of-pipe* ainda estão sendo utilizadas para a contenção de impactos ambientais gerados acidentalmente.

Na União Europeia, o conceito das melhores práticas disponíveis (BATs) foi utilizado pela primeira vez relacionados à proteção atmosférica e hídrica (SILVO et al., 2005; HUYBRECHTS et al., 2018). As indústrias controlado de forma integrada a poluição resultante de atividades desenvolvidas nas indústrias através da aplicação das BATs (CE, 1996; PELLINI; MORRIS, 2001).

## 2.1 TECNOLOGIAS AMBIENTAIS DE PROCESSOS EM INDÚSTRIA DE CELULOSE

O processo de fabricação de celulose, também chamado de polpação, ocorre em fábricas de celulose ou integradas (papel e celulose) e seus processos específicos podem gerar impactos ambientais diferenciados (SOUZA, 2008). O processo de fabricação *kraft*, utilizado no Brasil, visa recuperar reagentes químicos complexos provenientes do processo de produção (SOUZA, 2008; SUHR et al., 2015).

A poluição hídrica é caracterizada pela descarga de elementos resultantes do processo produtivo gerando impacto ambiental. Para que isso não atinja grandes proporções faz-se necessário aplicar requisitos específicos de gerenciamento de águas residuais. Isso permite o exame dos impactos potenciais nos ecossistemas sejam eles de água doce, sejam de água salgada (BAI et al., 2018). A poluição hídrica é decorrente de diversos fatores, dentre eles o lançamento de efluentes não tratados.

Os principais processos que geram águas residuais são os produtores de madeira, lavagem de celulose, branqueamento de papel, digestores e os processos de fabricação de papel (ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; SOLOMAN et al., 2009). Os

efluentes resultantes de máquinas de papel, do processo de pasta e várias operações de limpeza e rastreio também podem conter fibras que, se tratadas podem servir de matéria prima para o papel. Outras águas residuais tais como os efluentes de manuseio de madeira ou sistemas de recuperação de químicos podem conter contaminantes não fibrosos que podem tornar-se problemáticos em sistemas de recuperação de fibra, a menos que sejam utilizados sistemas de limpeza (ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015). Os principais contaminantes que devem ser evitados são cascas (*bark*), sólidos de cal, borra, grãos (*grits*) e sujeira (ALDA, 2008). Os principais efeitos ambientais gerados envolvem aumento do lodo, impactos térmicos, geração de espuma, alteração da cor com impacto na morte de zooplânctos e peixes e mudanças no ecossistema terrestre (SOLOMAN *et al.*, 2009). O esgotamento do oxigênio, devido ao crescimento de micro-organismos em meio das águas residuais, impacta no meio ambiente, principalmente em caso de presença de poluentes orgânicos. Os poluentes orgânicos tais como carboidratos, proteínas e ácidos orgânicos podem influenciar nas bactérias aeróbias que consomem Oxigênio Dissolvido (OD), podendo levar a redução da concentração de OD na água. Com essa redução organismos aeróbios como peixes e crustáceos pode morrer por asfixia. O ambiente anaeróbio leva a presença de microrganismos anaeróbios que também decompõem a matéria orgânica, o que pode gerar maus odores. Como as emissões de poluentes da água afetam diretamente os corpos de água regionais, as águas residuais já que quando liberados em corpos de água, os poluentes da água são envolvidos em reações biológicas, químicas e físicas simultâneas. Sendo assim, a concentração de poluentes varia em diferentes partes dos corpos de água com diferentes impactos potenciais (BAI *et al.*, 2018).

Os principais parâmetros para análise dos efluentes são DBO (CARVALHO, 2005; STYLES *et al.*, 2009; ALDA, 2008; LI *et al.*, 2016), DQO (STYLES *et al.*, 2009; ALDA, 2008; LI *et al.*, 2016; SOLOMAN *et al.*, 2009; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015), AOX (SOLOMAN *et al.*, 2009; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015) e sólidos suspensos (CARVALHO, 2005; STYLES *et al.*, 2009; SOLOMAN *et al.*, 2009; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015). Para uma análise mais estruturada outros parâmetros podem ser considerados individualmente (SOLOMAN *et al.*, 2009; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; CARVALHO, 2005; STYLES *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2016).

As características poluidoras das águas residuais variam a depender dos processos utilizados na produção e da qualidade do papel produzido e a remediação de águas residuais depende do impacto ambiental gerado. Sendo assim podem ser utilizados diversos processos de tratamento podendo ser físico, biológico ou integrado. O tratamento físico tem como objetivo remover sólidos suspensos, partículas coloidais, compostos tóxicos, materiais flutuantes e cores de águas residuais e tem como técnicas sedimentação, ultra filtração, flotação, coagulação, floculação, ozonização, eletrólise e oxidação. O tratamento biológico pode ser classificado em tratamento aeróbio e tratamento anaeróbio, que, apesar de objetivos semelhantes, possuem técnicas de atuação diferentes. Por fim, o sistema integrado é o tratamento de águas residuais que combina outros tipos diferentes com o objetivo de aumentar a sua eficácia como, por exemplo, físico-químico, físico-biológico, biológico aeróbico-biológico anaeróbico e outros (BUYUKKAMACI; KOKEN, 2010; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; SUHR *et al.*, 2015). Apesar da maioria das indústrias de celulose e papel utilizarem o tratamento biológico em seus efluentes, ao final ainda é possível encontrar quantidade significativa de compostos de cor, microrganismos, compostos orgânicos recalcitrantes, sólidos em suspensão e compostos inorgânicos, sendo necessário algumas vezes um tratamento adicional (GÖNDER; ARAYICI; BARLAS, 2011).

As tecnologias ambientais podem servir de apoio para aplicação de técnicas específicas de tratamento. As melhores técnicas disponíveis para o tratamento de efluentes de

celulose e papel estão presentes em quatro grupos: de forma geral na indústria de celulose e papel com as técnicas presentes nas BAT 04 e 05; no processo de polpa Kraft, com as técnicas presentes na BAT 19; no processo de polpação de sulfito, com a BAT 33 e no processo de polpação mecânica, com BAT 40 (SUHR *et al.*, 2015).

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Este estudo pode ser classificado como um estudo de casos múltiplos. O estudo de caso busca entender a dinâmica estudada em um ambiente podendo gerar teorias específicas (EISENHARDT, 1989), já que é uma investigação empírica e tem como característica a análise de evidências, com base em proposições teóricas que orientarão na coleta de dados (YIN, 2015). A análise dos dados utilizou a síntese cruzada de dados permitindo um melhor entendimento do setor de celulose relacionado à aplicação das tecnologias ambientais.

Para o estudo foram então selecionadas as empresas Eldorado Brasil Celulose S/A, Suzano Papel E Celulose S.A., CMPC Celulose Riograndense Ltda, Fíbria Celulose S/A, Veracel Celulose S.A, Klabin S.A sendo as plantas agrupadas a depender da data de sua instalação sendo o Grupo 1 composto das empresas mais antigas e o Grupo 2 composto por empresas mais modernas.

Foram coletados dados com base em documentos e registros em arquivos, entrevistas e observação. A análise de dados foi realizada por meio da triangulação de dados (YIN, 2015). O objetivo da comparação dos grupos das empresas foi verificar se as unidades adaptadas com tecnologias ambientais podem reduzir os seus impactos ambientais da mesma forma que as plantas mais recentes. Os dados coletados foram analisados em conjunto para entender como as inovações ambientais estão sendo utilizadas nas indústrias de celulose.

### 4 RESULTADOS DA PESQUISA

As técnicas e inovações que permitiram a melhoria do desempenho ambiental baseiam-se nas melhores práticas para prevenção de poluição (BAT) e nas tecnologias identificadas nas entrevistas e outras fontes de pesquisa aplicadas às empresas do estudo. Foram também realizadas análises das tecnologias aplicadas ao tratamento de efluentes de acordo com os dois grupos de empresas, identificando os resultados da aplicação das tecnologias em cada grupo. Após o agrupamento das tecnologias foi realizada a comparação dos resultados dos indicadores ambientais das empresas com os principais parâmetros estabelecidos nas legislações e documentos associados para análise do grau de poluição.

Os dados coletados na pesquisa sobre a BAT de Armazenamento e preparação de madeira na indústria de celulose e papel são apresentados no Quadro 1 junto com as principais tecnologias aplicáveis identificadas na entrevista.

Quadro 1- Resumo da BAT de Armazenamento e preparação de madeira

Técnicas	Comparativo de Grupos			
	Grupo 1		Grupo 2	
	Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos	Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos
Descascamento a seco para evitar contaminação da água	NA – 3	<i>Harvester</i>	N - 3 NA - 2	<i>Harvester</i> Tambor lavador e descascador de tora
Evitar a contaminação das cascas e da madeira com areia e pedras	S – 1 NA - 2	Pavimentação da área de armazenagem	S – 3 N – 1 NA – 1	<i>Harvester</i> Tambor lavador e descascador de tora Pavimentação da área de armazenagem Cobertura do pátio de madeira
Pavimentação das áreas de armazenagem de madeira	S – 2 N - 1	Definição em projeto de planta	S – 4 N - 1	Definição em projeto de planta

Técnicas	Comparativo de Grupos			
	Grupo 1		Grupo 2	
	Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos	Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos
Minimização do escoamento superficial de água nas áreas de armazenagem de madeiras	S - 3	Sistema de captação de água no pátio de madeira e encaminhamento para ETE	S - 4 NA - 1	Sistema de captação de água no pátio de madeira e encaminhamento para ETE
Coleta de água contaminada e remoção de sólidos	S - 3	Sistema de captação de água no pátio de madeira e encaminhamento para ETE	S - 5	Sistema de captação de água no pátio de madeira e encaminhamento para ETE

Fonte: Autora

Nota: S = Sim. N = Não. NA = Não Aplicável à estrutura/ processo da empresa

O descascamento de toras nas florestas ocorre com a tecnologia *Harvester*, que corta e descasca a madeira. Apesar de não ser uma tecnologia específica para este estudo, foi mencionada em entrevista como sendo necessária para evitar contaminação do efluente. As empresas que não descascam nas florestas, bem como aqueles que apesar de usar o *Harvester* recebem as toras de madeira com restos de cascas, utilizam o tambor de descascamento e lavagem que possui a possibilidade de coletar a água contaminada e enviar para a ETE. A madeira no pátio fica exposta a intempéries e a poeira e areia trazidas pelos caminhões no descarregamento da madeira sendo as formas de minimizar esta contaminação são: a Pavimentação da área de armazenagem e Cobertura do pátio de madeira, sendo estas tecnologias mencionadas na coleta de dados da BAT apesar de não terem sido mencionadas como tecnologias que melhoram o desempenho ambiental. A pavimentação da área de armazenagem das empresas que citaram esta tecnologia foi contemplada no projeto da unidade. Por fim, a Minimização do escoamento superficial de água nas áreas de armazenagem de madeiras e a Coleta de água contaminada e remoção de sólidos são aplicadas com o Sistema de captação de água no pátio de madeira e encaminhamento para ETE. Desta forma, a água residual do pátio de madeira não é escoada diretamente para o rio, sendo tratada antes da sua emissão. De forma geral, as técnicas da BAT de Armazenamento e preparação de madeira são aplicadas mais nas empresas do Grupo 2 do que nas empresas do Grupo 1.

Os dados coletados na pesquisa sobre a BAT de águas residuais e emissões para a água no processo de polpa *kraft* são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2- Resumo da BAT de águas residuais e emissões para a água no processo *kraft*

Técnicas	Comparativo de Grupos			
	Grupo 1		Grupo 2	
	Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos	Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos
Recirculação parcial da água processual no branqueamento	S - 3	Processo de branqueamento sem cloro livre	S - 5	Processo de branqueamento sem cloro livre
Cozimento modificado antes do branqueamento	S - 3	Processo de pré-branqueamento	S - 5	Processo de pré-branqueamento
Deslignificação com oxigênio antes do branqueamento	S - 3	Processo de pré-branqueamento	S - 5	Processo de pré-branqueamento
Lavagem fechada e eficiente da pasta crua	S - 3	Recirculação de água	S - 4 N - 1	Recirculação de água
Monitorização e contenção eficaz dos derrames, incluindo a recuperação de substâncias e energia.	S - 3	Sistemas de bacia de contenção Lagoa de Emergência	S - 5	Sistemas de bacia de contenção Lagoa de Emergência
Manutenção na evaporação do licor negro e caldeira de recuperação, para	S - 3	Sistemas de bacia de contenção	S - 5	Sistemas de bacia de contenção

Técnicas	Comparativo de Grupos			
	Grupo 1		Grupo 2	
	Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos	Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos
acomodar picos de carga.		Recuperação de Químicos		Recuperação de Químicos
Extração e reutilização dos condensados contaminados	S – 3	Recuperação de Químicos	S – 5	Recuperação de Químicos

Fonte: Autora

Nota: S = Sim. N = Não. NA = Não Aplicável à estrutura/ processo da empresa

As técnicas de recirculação parcial da água processual no branqueamento, cozimento modificado antes do branqueamento, monitorização e contenção eficaz dos derrames, incluindo a recuperação de substâncias e energia, monitorização e contenção eficaz dos derrames, manutenção na evaporação do licor negro e caldeira de recuperação, para acomodar picos de carga, extração, deslignificação com oxigênio antes do branqueamento e reutilização dos condensados contaminados são aplicados por todas as empresas de ambos os grupos. A técnica de lavagem fechada e eficiente da pasta crua é aplicada por todas as empresas do Grupo 1 enquanto que apenas uma empresa no Grupo 2 não aplica a técnica. A recirculação e água mencionada nesta BAT é uma tecnologia aplicada também no tópico de água uma vez que reduz o seu consumo.

As emissões de águas residuais tratadas ou efluentes precisam ser monitoradas. Os dados coletados na pesquisa sobre a BAT de Monitoramento são apresentados no Quadro 3 junto com as principais tecnologias aplicáveis identificadas na entrevista.

Quadro 3 - Resumo das BATs de Monitoramento (efluentes) e suas tecnologias

BAT	Técnicas	Comparativo de Grupos			
		Grupo 1		Grupo 2	
		Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos	Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos
Monitoramento das emissões para a água	Demanda química de oxigênio (CQO) ou carbono orgânico total (COT) ou demanda química de oxigênio	S – 3	ETE/ Controle Laboratorial	S – 3 N - 2	ETE Controle Laboratorial
	DBO	S – 2 N – 1	ETE/ Controle Laboratorial	S – 4 N - 1	ETE/ Controle Laboratorial
	Sólidos suspensos totais (SST) Diária	S – 3	ETE/ Controle Laboratorial	S – 5	ETE/ Controle Laboratorial
	Nitrogênio total	S – 2 N – 1	ETE/ Controle Laboratorial	S – 3 N - 2	ETE/ Controle Laboratorial
	Fósforo total	S – 3	ETE/ Controle Laboratorial	S – 5	ETE/ Controle Laboratorial
	EDTA, DTPA	S – 2 N – 1	ETE/ Controle Laboratorial	S – 1 N - 4	ETE/ Controle Laboratorial
	AOX (em conformidade com a norma EN ISO 9562:2004)	S – 3	ETE/ Controle Laboratorial	S – 5	ETE/ Controle Laboratorial
	Metais relevantes (por exemplo, Zn, Cu, Cd, Pb, Ni)	S – 3	ETE/ Controle Laboratorial	S – 5	ETE/ Controle Laboratorial



BAT	Técnicas	Comparativo de Grupos			
		Grupo 1		Grupo 2	
		Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos	Aplicação BAT	Tecnologias/ Equipamentos
Monitorando parâmetros-chave do processo	Monitoramento dos principais parâmetros de processo relevantes para as emissões para a água	S – 3	ETE/ Controle Laboratorial	S – 5	ETE/ Controle Laboratorial

Fonte: Autora

Nota: S = Sim. N = Não. NA = Não Aplicável à estrutura/ processo da empresa

O Antiespumante e Sistema de dispersão são tecnologias que são aplicadas ao fim do processo e, embora atuem com objetivos específicos não produzem impacto ambiental. O antiespumante, utilizado por apenas uma empresa foi justificado por trazer uma melhoria apenas no aspecto visual do efluente uma vez que os demais parâmetros atenderiam a legislação. A justificativa da aplicação do sistema de dispersão pauta no lançamento do efluente em diversos pontos da lagoa ou rio.

Nas entrevistas e nos relatórios de sustentabilidade foram identificados indicadores de poluição hídrica comparados com os parâmetros mais restritivos previstos em legislação. Inicialmente foi feito o levantamento dos valores dos indicadores das empresas nas entrevistas e nos relatórios de sustentabilidade. Depois foi feita a transformação dos dados para que eles estivessem na mesma unidade de medida para posteriormente calcular a média das empresas de cada grupo. Foi também realizada uma pesquisa sobre os principais parâmetros definidos nas melhores práticas BAT de 2001 e 2014 e nas legislações estaduais e federais associadas às unidades de pesquisa: CONAMA RESOLUÇÃO No 430, DE 13 DE MAIO DE 2011, DECRETO N° 8.468, de 08 de setembro de 1976 – SP, Deliberação CECA N° 36 DE 27/06/2012 – MS, NT-202.R-10 - Critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos – RJ, Portaria N° 05/89, de 16/03/89. – RS, Portaria SEMA n° 105 de 18/11/2011 – MA, RESOLUÇÃO CEPRAM n° 1 de 08/10/1974 – BA e Portaria SEMA n° 16. Com base nestes valores foram identificados os parâmetros legais mais restritivos apresentados no Quadro 4.

Quadro 4- Médias e Parâmetros Restritivos de Efluentes.

Classificação	Indicadores	Media G1	Media G2	Restritivo
Físico	Sólidos Suspensos	1,04	1,61	Ausência
	Vazão m <sup>3</sup> /t <sub>sa</sub>	56,66	27,56	25-50
Inorgânico	Fosforo Total mg/l P	0,05	0	1,0
	Mercúrio total mg/L	0	0	0,01
	Nitrogênio amoniacal total mg/l	1	0	10
Orgânico	AOX kg/t <sub>sa</sub>	0,04	0,04	<0,20
	Fenol mg/l	0,03	0	0,5
	DBO 5 dias, 20°C kg/t <sub>sa</sub>	1,21	0,28	0,3 – 1,5
	DQO kg/t <sub>sa</sub>	11,47	4,44	Até 20
	Sulfeto de carbono (mg/l)	0,10	0	1,0
	Substâncias tenso ativas que reagem ao azul de metileno (mg/MBAS/L)	1,6	0	2,0

Fonte: Autora

A maioria dos indicadores de efluentes de ambos os grupos está abaixo dos parâmetros mais restritivos estabelecidos na legislação ou nas melhores práticas. Como em ambos os grupos há implantação de tecnologias ambientais permite-se concluir que a implantação destas tecnologias impacta na melhoria dos indicadores auxiliando o atendimento aos padrões mais restritivos. Observa-se também que os melhores indicadores estão presentes no Grupo 2, das empresas tecnologicamente mais modernas.

#### 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os principais processos geradores de águas residuais nas industriais de celulose são lavagem de celulose, digestão e branqueamento (ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; SOLOMAN et al., 2009). As águas residuais podem ser tratadas por diversas tecnologias podendo estas ser classificadas, de acordo com as entrevistas, em tecnologias de captação e dispersão de efluentes, tecnologias que melhoram a qualidade do efluente, tecnologias para tratamento específico de efluentes e tecnologias de tratamento químico de efluentes.

As tecnologias de captação e dispersão de efluentes encontradas em entrevista são Sistema de captação de água no pátio de madeira, que encaminha a água contaminada com lignina da madeira para a ETE; tambor de descascamento e lavagem de toras, que ao lavar as toras já capta a água contaminada e encaminha para a ETE; sistema de bacias de contenção (SUHR et al., 2015), responsável por coletas emergenciais e resíduos de graxa e óleo para encaminhamento à ETE; lagoa de emergência (ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; SUHR et al., 2015), que permite armazenar temporariamente o efluente fora dos padrões antes de enviá-lo novamente a ETE; e o sistema de dispersão, que lança o efluente em diversos pontos para evitar possíveis impactos.

As tecnologias que melhoram a qualidade do efluente, identificados nas entrevistas, têm como objetivo evitar que a ETE seja sobrecarregada: Bacia de sedimentação (ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; SUHR et al., 2015), que sedimentam e recupera o efluente; Ciclônico, reduz a quantidade de fibras por depuração (SUHR et al., 2015); alterações de processos com as tecnologias de processo de pré-branqueamento e branqueamento sem cloro elementar (SOLOMAN et al., 2009; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015). As alterações na fabricação de celulose têm sido consideradas como alterações de processo com melhorias ambientais, comumente citadas em algumas entrevistas. A recirculação parcial da água processual no branqueamento é possível com a alteração do processo para a utilização de Processo de branqueamento sem cloro livre, atualmente consolidado como parte do processo de produção de celulose. Essa alteração possibilita a recirculação de água e a redução do consumo de recursos naturais que foi abordado anteriormente. A alteração no processo de fabricação também inclui a inserção da fase de pré-branqueamento facilitando a aplicação das técnicas de cozimento modificado antes do branqueamento, a deslignificação com oxigênio antes do branqueamento, a reutilização de água com a lavagem fechada e eficiente de pasta crua e a extração e a reutilização dos condensados contaminados, levando a recuperação química. As tecnologias que melhoram a qualidade da água são mais presentes em empresas do Grupo 2 do que no Grupo 1.

As tecnologias, para tratamento específico, utilizadas efetivamente no tratamento de efluentes das empresas pesquisadas são: Decantadores; Depuradores (ALDA, 2008; BUYUKKAMACI; KOKEN, 2010; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015); Lagoa de aeração; sistemas de lodos ativados (SUHR et al., 2015; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015); sistema de neutralização de efluentes automatizados (ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015); sistema de tratamento de efluentes específicos (ALDA, 2008; BUYUKKAMACI; KOKEN, 2010; CHEN et al., 2012; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; GÖNDER; ARAYICI; BARLAS, 2011; SUHR et al., 2015); Sistema de grids para aeração nas lagoas aeradas e no sistema de lodos ativados (ALDA, 2008; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015), sistema de correção de pH (ALDA, 2008; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015). As tecnologias aplicadas para tratamento específico são mais presentes em empresas do Grupo 2 do que no Grupo 1.

As tecnologias para tratamento químico (ALDA, 2008; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015) identificados em entrevistas são antiespumantes, que retiram a espuma do efluente antes do lançamento no rio; e controle laboratorial com análise de DQO (ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; STYLES et al., 2009; LI et al., 2016), DBO (CARVALHO, 2005; STYLES et al., 2009; LI et al., 2016), condutividade (LI et al., 2016) e pH (LI et al., 2016). As tecnologias aplicadas para tratamento químico são mais presentes em empresas do Grupo 2 do que no Grupo 1.

Em análise das BATs para identificar seus impactos nos indicadores coletados, percebeu-se que as BATs sobre efluentes não impactam diretamente os indicadores finais uma vez que a BAT de armazenamento e preparação de madeira na indústria de celulose e papel ocorre no início do processo e a BAT de águas residuais e emissões para a água no processo de polpa Kraft ocorre durante o processo. No entanto, antes de despejar qualquer efluente nos rios e lagoas, faz-se necessário o seu tratamento pela Estação de Tratamento de Efluentes (SUHR *et al.*, 2015), que é uma tecnologia *end-of-pipe* (CARRILLO-HERMOSILLA; DEL RÍO; KÖNNÖLÄ, 2010; VDI, 2001; FRONDEL; HORBACH; RENNINGS, 2007). Sendo assim, as BATs de efluentes são responsáveis pela melhoria da qualidade dos efluentes antes de seu tratamento. Caso haja um aumento de produção ou uma duplicação da linha de operação haverá uma tendência de aumento da carga de efluentes necessitando para isso ajustes na ETE para atendimento as novas demandas. Neste caso, estando a capacidade da ETE comprometida, as BATs poderão apoiar o desempenho ambiental pela redução da carga de efluente a ser tratado. No entanto, caso a ETE esteja dimensionada para receber devidamente as cargas de efluentes no limite de sua capacidade, os indicadores do efluente tratado sempre estarão de acordo com os limites estabelecidos pela legislação. Com base nas BATs de efluentes pode-se observar que a maior parte das técnicas estão sendo aplicadas em empresas de ambos os grupos, sendo uma constante tanto em empresas antigas com melhorias das tecnologias ambientais, quanto em empresas mais recentes já implantadas de acordo com os novos critérios tecnológicos, seguida de algumas BATs aplicadas na maioria das empresas do Grupo 2. Apesar da preocupação em adaptar novas tecnologias às unidades antigas, as BATs e as inovações tecnológicas de processos estão mais frequentes nas empresas do Grupo 2. Desta forma pode-se concluir que, com relação a efluentes, as empresas que possuem a aplicação de BATs e implementação de inovações tecnológicas ambientais de processos possuem menor potencial de poluição.

Das tecnologias identificadas na pesquisa as que podem impactar nos indicadores de efluentes são decantadores (ALDA, 2008; BUYUKKAMACI; KOKEN, 2010; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015), depuradores (ALDA, 2008; BUYUKKAMACI; KOKEN, 2010; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015), sistema de lodos ativados (SUHR *et al.*, 2015), lagoa de aeração (SUHR *et al.*, 2015), sistema de neutralização de efluentes automatizados, sistema de tratamento de efluentes específicos (SUHR *et al.*, 2015), sistemas de grids para aspersão de oxigênio, sistema de correção de pH, tanques, torre de equilíbrio. Destas tecnologias a lagoa de aeração (SUHR *et al.*, 2015) e o sistema de lodos ativados (SUHR *et al.*, 2015) podem ser encontradas em plantas de ambos os grupos e a torre de equilíbrio, utilizada em plantas que possuem mais de uma linha de produção, aplicada em empresa do Grupo 1. As demais tecnologias são consideradas um apoio no tratamento de efluentes e são específicas de empresas do Grupo 2. Por fim, na maioria das empresas são realizadas análises laboratoriais, sejam diárias ou periódicas, para garantir que as empresas estejam despejando efluente nos padrões estabelecidos.

De acordo com a literatura, as águas residuais podem ser também submetidas a tratamento químico, com as tecnologias de coagulação, floculação, filtração, ozonização e oxidação; tratamento físico, com as tecnologias de floculação, flotação, ultra filtração, sedimentação e eletrólise; tratamento biológico aeróbio, com as tecnologias de reator em

batelada de sequenciamento; e tratamento biológico anaeróbio, com as tecnologias de reatores RLF, UASB e 158 e filtro anaeróbio (ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015). No entanto, essas tecnologias não foram mencionadas em entrevistas ficando estas restritas as tecnologias de Lodos ativados, lagoas aeradas, bacia de estabilização facultativa, também chamada de lagoa de emergência, e decantadores.

Nos parâmetros físicos foram avaliados os indicadores de sólidos suspensos e vazão (CARVALHO, 2005; BAI et al., 2018; STYLES et al., 2009). O indicador de Sólidos Suspensos teve como parâmetro mais restritivo a ausência de sólidos suspensos. O Grupo 1 teve como média dos indicadores o valor de 1,04 kg/tsa enquanto que o Grupo 2 teve uma média maior de 1,91 Kg/tsa. A técnica de Sólidos Suspensos Totais é aplicada em todas as empresas de ambos os grupos. O último indicador dos parâmetros físicos é o da vazão, sendo o parâmetro mais restritivo entre 25 e 50 m<sup>3</sup>/tsa. O Grupo 1 teve o indicador de uma empresa no intervalo estabelecido pelo parâmetro, um abaixo e acima dos valores estabelecidos, sendo a média do grupo 56,76 m<sup>3</sup>/tsa, acima dos parâmetros estabelecidos. O Grupo 2 teve duas empresas fora do intervalo restritivo, sendo um acima e outro abaixo. No entanto a média do Grupo 2, ficou dentro do parâmetro com o valor de 27,6 m<sup>3</sup>/tsa. Sendo assim, é possível afirmar que a aplicação das BATs, bem como suas tecnologias, melhora o desempenho ambiental sendo que o Grupo 2, possui melhor desempenho ambiental do que as empresas do Grupo 1.

Os indicadores dos parâmetros inorgânicos de poluição hídrica são Fósforo Total, Mercúrio Total e Nitrogênio Total (STYLES et al., 2009; CHEN et al., 2012). O indicador de Fósforo Total possui como parâmetro mais restritivo o valor de 1,0 mg/l P. A média do indicador no Grupo 1 é de 0,05 mg/l e a média do indicador no Grupo 2 foi 0 mg/l. A técnica de Fosforo Total da BAT Monitoramento das emissões para a água é aplicada em todas as empresas dos dois grupos. Considerando que as medias de ambos grupos estão abaixo do valor de referência conclui-se que a aplicação das BATs pode melhorar o desempenho ambiental. Como a média do Grupo 1 é um pouco maior que a média do Grupo 2, pode-se concluir que o Grupo 2, que possui aplicação de mais tecnologias ambientais possui parâmetros melhores que o Grupo 1. O indicador de Mercúrio Total possui como parâmetro mais restritivo o valor de 0,01 mg/l Hg. A média do indicador em ambos os grupos foi 0 mg/l. O indicador de Nitrogênio Total, possui como parâmetro mais restritivo o valor de 10,0 mg/l. A média do indicador no Grupo 1 é de 1,0 mg/l e a média do indicador no Grupo 2 foi em torno de 0 mg/l. Mesmo ambos grupos estando abaixo do valor de referência, a média do Grupo 1 é um pouco maior que a média do Grupo 2 evidenciando que quanto maior a aplicabilidade de tecnologias ambientais, melhor o indicador de desempenho. De forma complementar a técnica de Nitrogênio Total da BAT de Monitoramento das emissões para a água foi aplicada na maioria das empresas de ambos os grupos mantendo-os abaixo do valor de referência.

Os indicadores dos parâmetros orgânicos de poluição hídrica são AOX, Fenol, DBO, DQO, Sulfeto de Carbono e Substâncias tenso ativas (SUHR et al., 2015; SOUZA, 2008; SOLOMAN et al., 2009; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015). O indicador de AOX tem como parâmetro mais restritivo da legislação ser menor que 0,20 Kg/tsa. Todas as empresas dos dois grupos aplicam a Técnica AOX da BAT Monitoramento das emissões para a água. Como ambos os grupos possuem como média de 0,04 Kg/tsa, abaixo do padrão determinado conclui-se que a aplicação da BAT pode melhorar o desempenho ambiental mantendo-o abaixo do parâmetro mais restritivo. Com relação às substâncias tenso ativas, o Grupo 1 possui a média de 1,6 mg/l e o Grupo 2 possui como média o valor de 0 mg/l. Apesar de ambos grupos possuírem média abaixo do padrão, o Grupo 1 apresenta a média maior que o Grupo 2. No indicador de Fenol, o parâmetro mais restritivo apresenta o valor de 0,5 mg/l. A média do indicador no Grupo 1 é de 0,03 e a média do indicador no Grupo 2 foi 0. Mesmo

ambos os grupos estando abaixo do valor de referência, a média do Grupo 1 é um pouco maior que a média do Grupo 2. No indicador de DBO, apesar de uma empresa exceder o parâmetro mais restritivo de 1,5 kg/tsa, no máximo, a média das empresas do Grupo 1 foi de 1,21 kg/tsa enquanto que a média do Grupo 2 foi de 0,28 kg/tsa, sendo que nenhuma empresa do segundo grupo excedeu o parâmetro mais restritivo. Na BAT Monitoramento das emissões para água, a técnica de DBO é aplicada na maioria das empresas dos dois grupos. Com relação ao indicador DQO, o parâmetro mais restritivo estabelecia até 20 kg/tsa. Mais uma vez, apenas uma empresa do Grupo 1 excedeu este valor, sendo a média do Grupo 1 de 11,47 Kg/tsa. Já a média do Grupo 2 foi de 4,44 Kg/tsa. Apesar da média de ambos os grupos ter sido menor que o parâmetro mais restritivo, a média do Grupo 2 foi menor que a média do Grupo 1. A técnica de DQO também é aplicada pela maioria das empresas de ambos grupos.

Ainda na BAT de monitoramento das emissões para a água (SUHR et al., 2015; SOUZA, 2008) há a técnica de monitoramento de metais relevantes, como por exemplo Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, sendo aplicados em todas as empresas dos dois grupos. Também a técnica Monitoramento dos principais parâmetros de processo relevantes para as emissões para a água (SUHR et al., 2015; SOUZA, 2008) da BAT Monitorando parâmetros-chave do processo tem a sua aplicabilidade em todas as empresas de ambos os grupos.

Apesar da média dos grupos estar abaixo dos parâmetros restritivos, em alguns indicadores a média do Grupo 1, relacionado às empresas mais antigas da pesquisa, é maior que a média das empresas do Grupo 2, que são empresas mais modernas já construída com base nas melhores práticas. Desta forma conclui-se que empresas do Grupo 2, com projeto tecnologicamente mais recente, tem menor potencial de poluição de efluentes do que empresas que alteraram sua planta mais antiga com inovações tecnológicas de processo para melhorar seu desempenho ambiental.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O objetivo geral foi analisar como a inovação ambiental tecnológica de processo contribui para mitigar impactos ambientais dos efluentes das indústrias do setor de celulose. Os resultados evidenciam que as inovações ambientais presentes nas plantas industriais trazem melhorias ao desempenho ambiental e reduzem o impacto ambiental gerado pelos efluentes permitindo, assim, um maior entendimento sobre o impacto das inovações tecnológicas de processo no desempenho ambiental das indústrias de celulose e papel. Respondendo a pergunta de pesquisa, as inovações ambientais aplicadas são responsáveis pela mitigação de impactos ambientais do setor de celulose, sendo muitas delas tecnologias importantes para a aplicação das BATs nas empresas.

A identificação das inovações ambientais tecnológica de processo para mitigar impactos ambientais das indústrias do setor de celulose foram as tecnologias de captação e dispersão de efluentes, tecnologias que melhoram a qualidade do efluente, as tecnologias para tratamento específico de efluentes, as tecnologias de tratamento químico de efluentes. As tecnologias identificadas em entrevistas apoiam diretamente as BAT para as indústrias do setor de celulose. Nesse estudo foram utilizadas duas BATs de efluentes com um total de 12 técnicas associadas.

Para o objetivo secundário relacionado aos parâmetros mais restritivos da legislação federal, estadual e municipal das localidades em que as plantas estão instaladas foram pesquisadas legislações Federais, Estaduais e Municipais além das legislações acima foram utilizados os parâmetros BAT dos anos de 2001 e 2014.

As plantas industriais mais modernas possuem menor possibilidade de gerar impacto ambiental gerado pelos efluentes do que as plantas mais antigas. Já com base nas BATs pode-se observar que a maior parte das técnicas está sendo aplicadas em empresas de ambos os grupos, sendo uma constante tanto em empresas antigas com melhorias das tecnologias

ambientais, quanto em empresas mais recentes já implantadas de acordo com os novos critérios tecnológicos. Apesar da preocupação em adaptar novas tecnologias às unidades antigas, as BATs e as inovações tecnológicas de processos estão mais frequentes nas empresas mais modernas que também possuem menor média de indicadores de poluição. Desta forma pode-se concluir que, com relação a efluentes, as empresas que possuem a aplicação de BATs e implementação de inovações tecnológicas ambientais possuem menor potencial de poluição.

As tecnologias de processos, que trazem melhorias no desempenho ambiental, permitem medições mais precisas e um maior controle do processo haja vista que a maioria das empresas visitadas possuem recentes centros de controle e das condições ambientais possibilitando ações mais assertivas em caso de desvios. Para esse controle, além dos indicadores comuns a comparação de indicadores de consumo e emissões antes e depois da implantação da tecnologia permitiria mensurar os ganhos da empresa. Em uma análise mais ampliada, a comparação com os gastos de tratamento antes e depois das tecnologias também poderia ser aplicada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)

## REFERÊNCIAS

- ALDA, Jesus AG Ochoa de. Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 7, p. 965–972, mar. 2008. DOI <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.02.005>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344908000347>.
- ARDITO, Lorenzo; CARRILLO-HERMOSILLA, Javier; RÍO, Pablo del; PONTRANDOLFO, Pierpaolo. Corporate Social Responsibility and Environmental Management Invites Contributions for a Special Issue on ‘Sustainable Innovation: Processes, Strategies, and Outcomes’. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 25, p. 106–109, fev. 2018. DOI 10.1002/csr.1487. Disponível em: [https://www.researchgate.net/journal/1535-3958\\_Corporate\\_Social\\_Responsibility\\_and\\_Environmental\\_Management](https://www.researchgate.net/journal/1535-3958_Corporate_Social_Responsibility_and_Environmental_Management).
- ASHFORD, Nicholas A.; AYERS, Christine; STONE, Robert F. Using regulation to change the market for innovation. **Harvard Environmental Law Review**, v. 9, n. 2, p. 419–466, 1985. Disponível em: [http://heinonline.org/hol-cgi-bin/get\\_pdf.cgi?handle=hein.journals/helr9&section=19](http://heinonline.org/hol-cgi-bin/get_pdf.cgi?handle=hein.journals/helr9&section=19).
- ASHRAFI, Omid; YERUSHALMI, Laleh; HAGHIGHAT, Fariborz. Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission. **Journal of environmental management**, v. 158, p. 146–157, ago. 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.010>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479715300621>.
- BAI, Shunwen; WANG, Xiuheng; ZHAO, Xinyue; REN, Nanqi. Characterizing Water Pollution Potential in Life Cycle Impact Assessment Based on Bacterial Growth and Water Quality Models. **Water**, v. 10, n. 1621, p. 1–14, nov. 2018. DOI <https://doi.org/10.3390/w10111621>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/11/1621>.
- BRASIL. Lei nº 10.165, de 27 de Dezembro de 2000 (L10165/2000). Palácio do Planalto - Presidência da República. 2000. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L10165.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L10165.htm).
- BUYUKKAMACI, Nurdan; KOKEN, Emre. Economic evaluation of alternative wastewater treatment plant options for pulp and paper industry. **Science of the total environment**, v.

408, n. 24, p. 6070–6078, nov. 2010. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.045>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971000906X>.

CARRILLO-HERMOSILLA, Javier; DEL RÍO, Pablo; KÖNNÖLÄ, Totti. Diversity of eco-innovations: Reflections from selected case studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 10, p. 1073–1083, 2010. .

CARVALHO, Paulo Gonzaga Mibielli de. A construção de indicadores ambientais para a indústria: potencial poluidor e intensidade do consumo de energia elétrica. **Martins, Clitia Helena Backx & Oliveira, Naia. Indicadores econômico-ambientais na perspectiva da sustentabilidade - Documentos FEE n. 63**. Porto Alegre: FEE - FEPAM, 2005. p. 122. Disponível em: [www.fee.rs.gov.br](http://www.fee.rs.gov.br).

CHARTER, Martin; CLARK, Tom. **Sustainable Innovation**. England: The Centre for Sustainable Design, 2007.

CHEN, Jienan; ZHAN, Peng; KOOPMAN, Ben; FANG, Guigan; SHI, Yingqiao. Bioaugmentation with *Gordonia* strain JW8 in treatment of pulp and paper wastewater. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 14, n. 5, p. 899–904, fev. 2012. DOI 10.1007/s10098-012-0459-4. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10098-012-0459-4>.

CHENG, Colin CJ; YANG, Chen-lung; SHEU, Chwen. The link between eco-innovation and business performance: a Taiwanese industry context. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 81–90, fev. 2014. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.050>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261300663X>.

COENEN, Lars; LÓPEZ, Fernando J. Díaz. Comparing systems approaches to innovation and technological change for sustainable and competitive economies: an explorative study into conceptual commonalities, differences and complementarities. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 12, p. 1149–1160, ago. 2010. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.04.003>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261000140X>.

COMISSÃO EUROPEIA. Diretiva 96/61/CE do conselho de 24 de Setembro de 1996 relativa à prevenção e controlo integrados da poluição (JO L 257 de 10.10.1996, p. 26). fev. 1996. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1996L0061:20060224:PT:PDF>.

EISENHARDT, Kathleen M. Building theories from case study research. **Academy of management review**, v. 14, n. 4, p. 532–550, out. 1989. DOI <https://doi.org/10.5465/amr.1989.4308385>. Disponível em: <http://amr.aom.org/content/14/4/532.short>.

FRONDEL, Manuel; HORBACH, Jens; RENNINGS, Klaus. Discussion Paper No. 04-82. End-of-pipe or cleaner production? An empirical comparison of environmental innovation decisions across OECD countries. 2007. Disponível em: <ftp://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp0482.pdf>.

GARCÍA-GRANERO, E.M.; PIEDRA-MUÑOZ, L.; GALDEANO-GÓMEZ, E. Eco-innovation measurement: A review of firm performance indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 191, p. 304–317, ago. 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.215>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618312514>.

GÖNDER, Z. Beril; ARAYICI, Semiha; BARLAS, Hulusi. Advanced treatment of pulp and paper mill wastewater by nanofiltration process: Effects of operating conditions on membrane fouling. **Separation and purification technology**, v. 76, n. 3, p. 292–302, jan. 2011. DOI <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.10.018>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586610004417>.

HUYBRECHTS, D.; DERDEN, A.; ABEELE, L. Van den; AA, S. Vander; SMETS, T. Best available techniques and the value chain perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 847–856, fev. 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.346>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617326203>. Acesso em: 11 nov. 2019.

JOVÉ-LLOPIS, Elisenda; SEGARRA-BLASCO, Agustí. Eco-innovation strategies: A panel data analysis of Spanish manufacturing firms. **Business Strategy and the Environment**, v. 27, n. 8, 2018. DOI <https://doi.org/10.1002/bse.2063>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.2063>.

KEMP, Rene; ARUNDEL, Antony. **Survey indicators for environmental innovation**. Oslo: IDEA Group, 1998.

KEMP, Rene; PEARSON, Peter. **Measuring Eco-innovation - Final Report**. [S. l.]: DG Research of the European Commission, 2008. Disponível em: <http://www.merit.unu.edu/MEI>.

KEMP, Rene; PONTOGLIO, Serena. The innovation effects of environmental policy instruments—A typical case of the blind men and the elephant? **Ecological Economics**, v. 72, p. 28–36, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800911003909>.

KIEFER, Christoph P.; GONZÁLEZ, Pablo Del Río; CARRILLO-HERMOSILLA, Javier. Drivers and barriers of eco-innovation types for sustainable transitions: A quantitative perspective. **Business Strategy and the Environment**, v. 28, n. 1, nov. 2018. DOI <https://doi.org/10.1002/bse.2246>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/329044034\\_Drivers\\_and\\_barriers\\_of\\_eco-innovation\\_types\\_for\\_sustainable\\_transitions\\_A\\_quantitative\\_perspective](https://www.researchgate.net/publication/329044034_Drivers_and_barriers_of_eco-innovation_types_for_sustainable_transitions_A_quantitative_perspective).

LI, Bo; ZHANG, Guoquan; YE, Maosheng; DU, Jing; XIANG, Xuemin; QUAN, Xie; YANG, Fenglin; XU, Xiaochen; MA, Shuming. Network optimization and performance evaluation of the water-use system in China's straw pulp and paper industry: a case study. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 18, n. 1, p. 257–268, jan. 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10098-015-1013-y>.

LIAO, Yi-Chuan; TSAI, Kuen-Hung. Innovation intensity, creativity enhancement, and ecoinnovation strategy: The roles of customer demand and environmental regulation. **Business Strategy and the Environment**, set. 2018. DOI 10.1002/bse.2232. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/327406935\\_Innovation\\_intensity\\_creativity\\_enhancement\\_and\\_eco-innovation\\_strategy\\_The\\_roles\\_of\\_customer\\_demand\\_and\\_environmental\\_regulation](https://www.researchgate.net/publication/327406935_Innovation_intensity_creativity_enhancement_and_eco-innovation_strategy_The_roles_of_customer_demand_and_environmental_regulation).

MARKUSSON, Nils. **Drivers of environmental innovation**. Stockholm: Vinnova - Swedish Governmental Agency for Innovation System, 2001.

MARTÍNEZ-ROS, Ester; KUNAPATARAWONG, Rasi. Green innovation and knowledge: The role of size. **Business Strategy and the Environment**, v. 28, n. 6, p. 1045–1059, abr. 2019. DOI 10.1002/bse.2300. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/332116586\\_Green\\_innovation\\_and\\_knowledge\\_The\\_role\\_of\\_size](https://www.researchgate.net/publication/332116586_Green_innovation_and_knowledge_The_role_of_size).

OLTRA, Vanessa; SAINT JEAN, Maider. Sectoral system of environmental innovation: An application to the french automotive industry. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 76, n. 4, p. 567–583, maio 2009. DOI <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2008.03.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004016250800108X>.

PELLINI, Tiago; MORRIS, Joe. A framework for assessing the impact of the IPPC directive on the performance of the pig industry. **Journal of Environmental Management**, v. 63, n. 3, p. 325–333, nov. 2001. DOI <https://doi.org/10.1006/jema.2001.0501>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479701905018>.



POPP, David; HAFNER, Tamara; JOHNSTONE, Nick. Environmental policy vs. public pressure: Innovation and diffusion of alternative bleaching technologies in the pulp industry. **Research Policy**, v. 40, n. 9, p. 1253–1268, nov. 2011. DOI <https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.05.018>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733311000990>.

RENNINGS, Klaus; ZIEGLER, Andreas; ANKELE, Kathrin; HOFFMANN, Esther. The influence of different characteristics of the EU environmental management and auditing scheme on technical environmental innovations and economic performance. **Ecological Economics**, v. 57, n. 1, p. 45–59, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800905001230>.

SILVO, Kimmo; JOUTTIJÄRVI, Timo; MELANEN, Matti; RUONALA, Seppo. Best Available Techniques (BAT) in the Finnish Pulp and Paper Industry – a Critical Review. **European Environment**, v. 15, p. 175–191, maio 2005. <https://doi.org/10.1002/eet.373>.

SOLOMAN, P. A.; BASHA, C. Ahmed; VELAN, M.; BALASUBRAMANIAN, N.; MARIMUTHU, P. Augmentation of biodegradability of pulp and paper industry wastewater by electrochemical pre-treatment and optimization by RSM. **Separation and Purification Technology**, v. 69, n. 1, p. 109–117, set. 2009. DOI <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.07.002>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586609002810>.

SOUZA, Andre Heli Coimbra Botto. **Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose**. São Paulo: CETESB, 2008. Disponível em: [http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia/producao\\_limpa/documentos/papel.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia/producao_limpa/documentos/papel.pdf). Acesso em:

STYLES, David; O'BRIEN, Phillip; O'BOYLE, Shane; CUNNINGHAM, Peter; DONLON, Brian; JONES, Michael B. Measuring the environmental performance of IPPC industry: I. Devising a quantitative science-based and policy-weighted Environmental Emissions Index. **Environmental Science & Policy**, v. 12, n. 3, p. 226–242, maio 2009. DOI <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.02.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901109000379>.

SUHR, Michael; KLEIN, Gabriele; KOURTI, Loanna; GONZALO, Miguel Rodrigo; SANTOJA, Germán Giner; ROUDIER, Serge; SANCHO, Luis Delgado. Best Available Techniques (BAT) - Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board - Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). 2015. .

TSENG, Ming-Lang; WANG, Ray; CHIU, Anthony SF; GENG, Yong; LIN, Yuan Hsu. Improving performance of green innovation practices under uncertainty. **Journal of Cleaner Production**, v. 40, p. 71–82, fev. 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.009>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611003805>.

VDI. Determination Of Costs For Industrial Environmental Protection Measures. Guideline VDI 3800. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). 2001.

YIN, Robert K. **Estudo de Caso - Planejamento e Métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.