

## **TECNOLOGIA AMBIENTAL DE PROCESSOS PARA REDUZIR EMISSÕES EM INDÚSTRIA DE CELULOSE**

**PATRICIA LIMA NOGUEIRA**

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO EDUCACIONAL INACIANA PE SABÓIA DE MEDEIROS (FEI)

**MARIA TEREZA SARAIVA DE SOUZA**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO - PPGA/FEI/SP

Agradecimento à órgão de fomento:

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

# TECNOLOGIA AMBIENTAL DE PROCESSOS PARA REDUZIR EMISSÕES EM INDÚSTRIA DE CELULOSE

## 1 INTRODUÇÃO

Os problemas ambientais se agravam de acordo com o setor de atuação da empresa, uma vez que algumas atividades podem causar maior impacto ambiental do que outras. A classificação das atividades potencialmente poluidoras (MARTINS; OLIVEIRA, 2009) depende, dentre outros, do Grau de Utilização dos recursos naturais (GU) (CONAMA, 1997; BRASIL, 1981; BRASIL, 2000). O setor de celulose é considerado um dos setores potencialmente poluente tanto nos acordos internacionais (BERGQUIST; KESKITALO, 2016). É um segmento industrial competitivo, tendo um aumento de crescimento de produção (SOUZA, 2008; OBIDZINSKI; DERMAWAN, 2012). Em especial, o processo de produção de celulose é o principal gerador dos impactos ambientais do setor (GHOSE; CHINGA-CARRASCO, 2013) a partir da geração de aspectos ambientais, a exemplo das emissões atmosféricas (DESHMUKH et al., 2014; HARRIS et al., 2008; FAUBERT et al., 2016).

As Melhores Técnicas Disponíveis (*Best Available Technologies ou Best Available Techniques* - BAT) para o processo de fabricação de celulose incluem as melhores práticas para tratamento de emissões para a atmosfera incluindo a redução de gases odoríferos concentrados, redução das emissões do forno de cal, redução das emissões a partir de queimador para gases odoríferos (SUHR *et al.*, 2015).

A relação entre tecnologias ambientais e redução de impactos ambientais se mostra relevante uma vez que as tecnologias ambientais têm sido utilizadas nas empresas de diversos segmentos para mitigar impactos ambientais significativos. Desta forma, este estudo busca responder a seguinte questão de pesquisa: “como as inovações ambientais tecnológicas de processo contribuem para reduzir as emissões nas indústrias do setor de celulose?”

O objetivo deste trabalho é analisar como a tecnologia ambiental de processo contribui para reduzir as emissões nas indústrias do setor de celulose. Os objetivos secundários relacionados a este trabalho são:

- a) identificar as tecnologias ambientais de processos para reduzir emissões em indústrias do setor de celulose;
- b) verificar a aplicabilidade das Melhores Práticas (BAT) relacionadas a emissões das indústrias do setor de celulose;
- c) mapear os parâmetros mais restritivos da legislação federal, estadual e municipal relacionados a emissões para comparar com os resultados das empresas estudadas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

As inovações ambientais podem apoiar a redução do consumo de recursos e sumidouros, independentes da medição utilizada, como intensidade ambiental específica por unidade de produção ou o consumo como média por produto, ou mesmo em volumes totais. Essas tecnologias são projetadas para tornar a produção limpa por meio da implantação de novas estruturas em vez de minimizar os impactos apenas com a redução do consumo ou da produção (HUBER, 2004). A mudança ou inserção de tecnologias para controle da poluição pode ser gerada a partir de incentivos tais como impostos sobre as emissões e licenças negociáveis. De um modo geral estes incentivos são maiores que os subsídios e os compromissos voluntários tornando-o importante na determinação e implantação da inovação tecnológica ambiental (KEMP; PONTOGLIO, 2011). Uma vez implantada a inovação, ela pode ser difundida para outras organizações através de relatórios ambientais promovendo uma

disseminação das tecnologias ambientais mais comumente utilizadas (RENNINGS *et al.*, 2006). A inovação ambiental tecnológica de processo pode ser subdividida em seis tipos: tecnologias de controle de poluição, que impedem a liberação direta de produtos ambientalmente perigosos, emissões para o ar, a água de superfície ou no solo; gestão de resíduos, que trata do manuseio, tratamento e eliminação de resíduos tanto no local como fora da empresa; tecnologia em produção limpa, com alterações integradas no processo e na tecnologia de produção para a redução da quantidade de poluentes e de material residual gerado; reciclagem, com a minimização de resíduos através da reutilização de materiais recuperados nos fluxos de resíduos; produtos limpos com baixos níveis de impacto ambiental em todo o ciclo de vida do projeto, produção, utilização e eliminação; e a tecnologia *clean-up*, que são as tecnologias de saneamento, como purificadores de ar (KEMP; ARUNDEL, 1998)

Investir em tecnologias ambientais tem sido dificultado por questões práticas como o custo do investimento e o alto risco envolvido no comprometimento de capital com tecnologia não comprovada. Fatores como a responsabilidade social corporativa, a pressão das partes interessadas e a pressão do público em geral, também afetam a decisão final que acabam considerando estudos e projetos já testados na indústria de aplicação (PAJUNEN *et al.*, 2012)

As BAT (*Best Available Techniques*) são as melhores práticas na indústria de celulose e tem como objetivos prevenção da poluição, a concessão de licenças de operação às instalações, gerar informações sobre aspectos físicos, técnicos e de gerenciamento de instalações, registro público das informações sobre as instalações e análise das questões locais que podem determinar as medidas mais adequadas para a implementação das orientações nacionais e da União Europeia (PELLINI; MORRIS, 2001). O grupo de BAT para indústria de celulose e papel inclui emissões de odor proveniente do sistema de águas residuais (BAT 07), monitoramento dos parâmetros-chave do processo (BAT 08), monitoramento das emissões para o ar (BAT 09), monitoramento das emissões para a água (BAT 10), monitoramento das emissões difusas de redução total de enxofre (*Total Reduced Sulphur – TRS*) (BAT 11) (SUHR *et al.*, 2015; CEPI, 2015).

O processo de produção de celulose no Brasil é a polpação *kraft* e tem como etapas principais: a extração, seleção e preparação da madeira; a transformação da madeira em polpa marrom, pelo processo de digestão e recuperação de reagentes químicos; a transformação da polpa celulósica marrom em branqueada; e a produção do produto final, podendo ser papel ou papelão ou a própria polpa (SOUZA, 2008; SUHR *et al.*, 2015). O grupo de BAT para processo de polpa Kraft inclui redução das emissões em gases fortes e fracos odoríferos 13 (BAT 20), emissões de SO<sub>2</sub> e TRS das caldeiras de recuperação (BAT 21), emissões de NO<sub>x</sub> das caldeiras de recuperação (BAT 22), emissões de pó das caldeiras de recuperação (BAT 23), emissões de SO<sub>2</sub> provenientes de fornos de cal (BAT 24), emissões de TRS provenientes de fornos de cal (BAT 25), emissões de NO<sub>x</sub> dos fornos de cal (BAT 26), emissões de poeiras provenientes de fornos de cal (BAT 27), emissões de queimadores para gases com forte odor (BAT 28), emissões de NO<sub>x</sub> dos queimadores para gases com forte odor (BAT 29) (SUHR *et al.*, 2015; CEPI, 2015).

São considerados possíveis parâmetros de emissão de poluição do ar em indústria de celulose: Particulados, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, Carga Orgânica Total, Metano, Amônia, Metais Pesados Totais, CO e CH<sub>4</sub> (STYLES *et al.*, 2009) e os principais parâmetros para o ar são partículas em suspensão, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos (CARVALHO, 2005). Com relação às emissões, a indústria de celulose pode gerar odores e particulados (DESHMUKH *et al.*, 2014; FAUBERT *et al.*, 2016) e gases do efeito estufa (GHOSE; CHINGA-CARRASCO, 2013; ASHRAFI; YESHALMI; HAGHIGHAT, 2015). Os odores industriais desagradáveis gerados pelas indústrias de celulose e papel têm sido a causa de incômodos nas comunidades circunvizinhas às fábricas desde a sua implantação. O grau de incômodo associada com as emissões gasosas originárias destas indústrias é devido à presença

de Compostos de Enxofre Reduzido (*Reduced Sulfur Compounds* - RSC), Dimetil Sulfeto [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S], Dissulfeto de Dimetil [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>], Metilmercaptano (CH<sub>3</sub>SH) e sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) (GIRI *et al.*, 2010). Os principais aspectos e impactos ambientais gerados por emissões atmosféricas são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Aspectos e impactos ambientais gerados por emissões da indústria de celulose

Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Remediação	Processos Associados
Emissões de composto de enxofre total reduzido (ETR)	Odor Contaminação	Redução do metilmercaptano Sistema de tratamento de gases não condensáveis	Digestão de polpa Kraft Caldeira de recuperação Evaporador Equipamentos de processos
Emissão de compostos organoclorados voláteis	Danos à camada de ozônio	Lavadores de gases	Branqueamento
Emissão de Sulfeto	Intoxicação	Precipitadores eletrostáticos Lavadores de gases Filtros Bags	Digestão de polpa Kraft Sistema de tratamento
Emissão de CO <sub>2</sub> fóssil	Alterações climáticas Poluição do ar	Precipitadores eletrostáticos Lavadores de gases Filtros Bags	Branqueamento de papel TCF
Emissão de dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	Odor		Digestão da polpa Kraft Caldeira de recuperação
Emissão de óxidos de nitrogênio (NOX)	Danos à camada de ozônio		Caldeiras a gás
Dioxinas e furanos	Contaminação do ar		Caldeira de biomassa Caldeira de recuperação Forno de cal
Emissão de particulado	Poluição do ar		Caldeira de biomassa Caldeira de recuperação Forno de cal
Emissão de Cloro gasoso	Poluição do ar		Branqueamento de massa

Fonte: Autoras adaptado de Suhr et al ( 2015) e Souza (2008)

Dentre diversos métodos de medição de gases ambientais tem-se o colorímetro, e cromatografia, que são métodos analíticos mais caros e têm limitações para a análise no local dificultando a sua utilização em nível industrial (DESHMUKH *et al.*, 2014). Além das emissões de particulados, outra questão ambiental importante é a emissão de gases de efeito estufa (GEE). A redução de GEE ajuda a indústria a proteger o meio ambiente e proporcionar benefícios financeiros ao trocar, por exemplo, créditos de CO<sub>2</sub> no mercado. Apesar do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC) determinar que o CO<sub>2</sub> gerado a partir de fontes biogênicas não deve ser considerado na estimativa dos gases de efeito estufa (ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015). Devido a dificuldades em estimar a emissão total de GEE, muitas empresas realizam a estimativa a partir da análise dos compostos nas unidades de tratamento, em separado.

Nas estações de tratamento de águas residuais (ETARs) da indústria de celulose, ocorrem diversos processos de tratamento biológico, químico e mecânico que produzem gases principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). A extensão com que a emissão dos GEE ocorre depende das concentrações de nutrientes nas águas residuais, as concentrações de DBO, a temperatura de operação do reator, do tipo de processos de tratamento empregados e da eficiência de remoção de contaminantes. Também impactam na emissão de GEE as concentrações calculadas de substrato e biomassa, a utilização de cloreto férrico (FeCl<sub>3</sub>) para a redução de DBO e o metano gerado nos processos aeróbicos. O custo operacional, a emissão de GEE e o consumo de energia de um sistema híbrido dependem do tipo de processo de tratamento empregado. Um sistema híbrido comum

utilizado para tratamento de águas residuárias é composto por um processo biológico anaeróbico seguido de um processo biológico aeróbio. Os sistemas híbridos de tratamento de águas residuais beneficiam-se das vantagens dos processos anaeróbios, como a geração de energia pelo metano produzido e a baixa produção de lodos ao mesmo tempo em que oferecem eficiências de remoção de DBO comparáveis às obtidas em processos aeróbios. A principal fonte de geração de GEE em um sistema híbrido é a queima de biogás (GHOSE; CHINGA-CARRASCO, 2013; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015).

Uma inovação ambiental tecnológica é a utilização de tecnologias livres de cloro elementar (*Elemental Chlorine Free* - ECF) e tecnologias totalmente isentas de cloro (*Totally Chlorine Free* - TCF) para a redução ou eliminação do cloro no processo de branqueamento da produção de celulose. A grande questão é que o cloro utilizado no branqueamento além de ficar no produto é liberado, em parte, nas águas residuais, impactando tanto no produto quanto ao meio ambiente. O ECF atua na fase de processo de pré-branqueamento com dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>), substituindo o cloro elementar, uma vez que o ECF gera a deslignificação com o oxigênio. Já o uso do TCF elimina completamente o cloro elementar e o dióxido de cloro utilizando agentes de branqueamento alternativos tais como peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e o ozônio (O<sub>3</sub>). No entanto, apesar do TCF apresentar um desempenho ambiental melhor que o ECF, a qualidade do papel gerado em ambos os processos possui qualidade inferior aos papéis branqueados com cloro. Mesmo assim, a tecnologia TCF ainda é muito utilizada em alguns países da Europa e do Atlântico Norte (POPP; HAFNER; JOHNSTONE, 2011).

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Este estudo é classificado como um estudo de casos múltiplos (YIN, 2015). A análise dos dados utiliza a síntese cruzada de dados permitiu entender o panorama do setor de celulose com relação à aplicação das tecnologias ambientais no seu processo para reduzir as emissões.

Os critérios de escolha da amostra teórica devem-se ao volume de produção das empresas pesquisadas e a existência de relatórios de sustentabilidade, que possibilitou a obtenção de dados complementares. 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.

Foram utilizadas múltiplas fontes de evidências garantindo a validade e confiabilidade da pesquisa com as diversas fontes de informação (YIN, 2015), a saber: documentos, registros em arquivos, entrevistas e observação.

As empresas foram visitadas entre os anos de 2017 e 2018. Os cargos, tempos de entrevista são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Perfil e Tempo das Entrevistas

Empresa	Cargos	Tempo de entrevista
EMP1	Gerente de Qualidade e Meio Ambiente	3 h e 30 min
EMP2	Gerente de Meio Ambiente Industrial	3 hs
EMP3	Especialista de Meio Ambiente	3 hs
EMP4	Coordenador de Controle Ambiental	4 hs e 20 min
EMP5	Engenheiros Ambientais Coordenador de meio ambiente	6 hs
EMP6	Gerente de Controle técnico Coordenador de Licenciamento Especialista de Controle Técnico Analista de Meio Ambiente Coordenador de Utilidades	4 h

EMP7	Especialista de Meio Ambiente Engenheiro	5 h
EMP8	Gerente de Meio Ambiente Analista de sustentabilidade	3 hs e 30 min

Fonte: Autoras

Para a análise e tratamento de dados foi realizada a triangulação de dados e da análise de conteúdo. As plantas estudadas foram agrupadas por data de instalação para um comparativo entre as 3 empresas mais antigas, nomeadas de Grupo 1 e as 5 empresas mais modernas, denominadas de Grupo 2. O objetivo da comparação dos grupos das empresas foi verificar se as unidades adaptadas com inovações ambientais podem reduzir potencial poluidor 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.

Foi feito o mapeamento dos parâmetros mais restritivos da legislação federal, estadual e municipal das localidades em que as plantas estão instaladas de acordo com a legislação CONAMA 382/2006, CONAMA 430/2011, CONAMA 436/2011, Decreto 8.468/176 (SP), Deliberação CECA 36/2012, CECA NT 202.R-10/1986 (RJ), FEPAM 01/2018 (RS), Portaria 05/89 (RS), Portaria SEMA 105/2011 (MA), Resolução CEPRAM 1/1974 (BA), SEMA 16/2014 (PR) e os parâmetros BAT dos anos de 2001 e 2014. Os principais indicadores utilizados foram SOX, NOX, Material Particulado e TRS e as técnicas BAT e tecnologias organizadas de acordo com a influência nos indicadores.

#### 4 RESULTADOS DA PESQUISA

Para a organização dos resultados, os dados utilizados foram coletados na pesquisa sobre BAT de emissões, tecnologias e indicadores. Sendo assim, para este tópico a análise das técnicas BAT e tecnologia ocorrerão relacionadas aos indicadores analisados. Nas emissões tóxicas foram avaliados os indicadores de SOX, NOX e Material particulado, sendo que para odor foi avaliado o TRS. As principais BATs e técnicas que impactam no indicador de SOX são Monitoramento das emissões para o ar e dos parâmetros-chave do processo; Emissões de queimadores para gases com forte odor, Emissões de SO<sub>2</sub> e TRS das caldeiras de recuperação, de SO<sub>2</sub> proveniente de fornos de cal, Medidas para reduzir as emissões de SO<sub>2</sub> e Redução das emissões de poeiras e de SO<sub>2</sub> das caldeiras de recuperação.

No caso de SOX, apesar das empresas não citarem todas as tecnologias identificadas na literatura, há muita Alteração de processos de produção com ganho ambiental que não são consideradas inovações ambientais. Para reduzir a emissão de SOX, as técnicas de Controle de SO<sub>2</sub>, Monitoramento dos principais parâmetros de processo, aumento do teor de sólidos secos do licor negro, combustão otimizada, lavagem de gases, seleção dos combustíveis com baixo teor de enxofre são aplicadas em todas as empresas dos dois grupos de estudo utilizando como principais tecnologias Estação de monitoramento da qualidade do ar, analisadores de chaminés, lavadores de gases, sistema de capturas de gases, tecnologias de queima, precipitadores eletrostáticos e alterações de processos com ganho ambiental. Este último muito citado em ambos os grupos evidencia que as melhorias de processos estão cada vez mais ligadas a melhoria do desempenho ambiental. As técnicas BAT relacionadas a SOX, bem como suas respectivas tecnologias, são mais aplicadas no Grupo 2 do que o Grupo 1.

Com relação à NOX, as principais BATs associadas são monitoramento das emissões para o ar, monitorando parâmetros-chave do processo, emissões de NOX dos queimadores para gases com forte odor, emissões de NOX das caldeiras de recuperação, emissões de NOX proveniente de fornos de cal e redução das emissões de NOX das caldeiras de recuperação. As técnicas Monitoramento dos principais parâmetros de processo relevantes para as emissões

para a atmosfera, Controle computadorizado da combustão, Otimização da mistura combustível-ar, Sistemas de alimentação de ar distribuído, Otimização e controle da combustão, Otimização da mistura combustível-ar, Seleção dos combustíveis ou combustíveis com baixo teor de N e Otimização das caldeiras de recuperação mediante o controle das condições de combustão são aplicadas em todas as empresas de ambos os grupos pesquisados aplicando como principais tecnologias estação de monitoramento da qualidade do ar, digestores de alta performance, Alteração de processos de produção com ganho ambiental, medidor na caldeira de recuperação, no forno de cal e queimador LowNox. As técnicas de Incineração por fases, Utilização de queimadores com baixo nível de NOX e Injeção faseada do licor foram aplicadas em todas as empresas do Grupo 2, com Alteração de processos de produção com ganho ambiental, e pela minoria das empresas do Grupo 1, com Digestor de alta performance. A técnica de Controle de Nox foi aplicada em todas as empresas do Grupo 2 e na maioria das empresas do Grupo 1, utilizando a tecnologia de estação de monitoramento da qualidade do ar. Somente duas técnicas são aplicadas por todas as empresas do Grupo 1: Técnica de otimização de queima, com a tecnologia de Digestor de alta performance, e Redução não catalítica seletiva (SNCR), com Alteração de processos de produção com ganho ambiental, sendo que a primeira foi aplicada também na maioria das empresas do Grupo 2 e a segunda foi aplicada em apenas uma empresa do Grupo 2, com as tecnologias de Alteração de processos de produção com ganho ambiental e o uso de medidor na caldeira de recuperação respectivamente. Logo, com relação à NOX, há maior aplicabilidade de técnicas e tecnologias ambientais no Grupo 2

As principais BATs e técnicas que impactam no indicador de Particulado são: Monitorando parâmetros-chave do processo, Emissões de pó das caldeiras de recuperação, Monitoramento das emissões para o ar e Emissões de Poeiras provenientes de fornos de cal. As técnicas de Monitoramento dos principais parâmetros de processo relevantes para as emissões para a atmosfera, Utilização de precipitador eletrostático (ESP) e Monitoramento das emissões para o ar são aplicadas em todas as empresas de ambos os grupos. Na BAT de emissão de poeiras, a técnica de utilização de precipitadores eletrostáticos ou uma combinação destes com lavadores de gases é aplicada em todas as empresas do Grupo 2 e na maioria das empresas do Grupo 1. A técnica Combinação de ESP e depurador úmido da BAT Emissões de pó das caldeiras de recuperação foi aplicada na minoria das empresas de ambos os grupos. Sendo assim, foi evidenciado que o Grupo 2 aplicou mais BATs e tecnologias ambientais do que o Grupo 1

Além das tecnologias identificadas algumas tecnologias citadas em entrevistas não puderam ser associadas às BATs. A implantação de chaminés altas aumenta a dispersão das emissões evitando impactos à comunidade. A tecnologia de detectores de H<sub>2</sub>S mapeia fontes fugitivas e a tecnologia de Medição de CO<sub>2</sub> tem como objetivo calcular o CO<sub>2</sub> emitido a partir do lançamento da quantidade de óleo 3A e 1A e da quantidade de gás natural usada em forno e caldeira. Todas estas tecnologias foram citadas em entrevistas com empresas do Grupo 2. Já a tecnologia de cortina de vento aplicado apenas por uma empresa no Grupo 1, por exemplo, evita que cavacos e serragens sejam levados a comunidade.

As principais BATs e técnicas que impactam no odor são: emissões de odor proveniente do sistema de águas residuais, monitorando parâmetros-chave do processo, monitoramento das emissões para o ar, redução das emissões em gases fortes e fracos odoríferos, medidas para reduzir as emissões de S difusas, monitoramento das emissões difusas de TRS, emissões de TRS das caldeiras de recuperação, emissões de TRS proveniente de fornos de cal, monitoramento das emissões para o ar e redução das emissões em gases fortes e fracos odoríferos. As técnicas de capacidade de aeração, evitar a armazenagem das águas residuais nas bacias de derrames, monitoramento dos principais parâmetros de processo relevantes para as emissões para a atmosfera, sistemas de coleta de gases mal odorosos de

alta e baixa concentrações, incineração em caldeira de recuperação, incineração numa caldeira de biomassa, um forno de cal ou um queimador específico para gases TRS, aumento do teor de sólidos secos da licor negro, combustão otimizada, lavagem de gases, controle do excesso de oxigênio, incineração de gases não condensáveis e registo da indisponibilidade do sistema de incineração são aplicados em todas as empresas de ambos os grupos, sendo as principais tecnologias aplicadas a secagem do lodo e a ETE. Com relação às tecnologias para emissão de odores provenientes de outras fontes, a técnica de lavagem de gases é aplicada na maioria de empresas de ambos os grupos. As técnicas de utilização de biocidas dispersantes, instalação de processos de tratamento interno para reduzir a concentração de matéria orgânica, instalação de sistema de efluentes fechados com respiradouros, Combinação de um precipitador eletrostático e de um lavador de gases com meio alcalino, tratamento de gases em exaustão da secagem térmica de lodos não são aplicados ou são aplicados em minoria em ambos os grupos. As técnicas de Dimensionamento dos processos, evitar sobre arejamento, funcionamento do sistema de coleta, limitar tempo de retenção de lodos e monitoramento de TRS são aplicados na totalidade das empresas do Grupo 2 e na maioria das empresas do Grupo 1. A técnica de Controle do teor de Na<sub>2</sub>S de lodos de cal de alimentação é aplicada na totalidade das empresas do Grupo 1 e na maioria das empresas do Grupo 2. As técnicas Evitar a utilização de torres de refrigeração para as águas residuais não tratadas, monitorar NH<sub>3</sub> são aplicadas na maioria das empresas do Grupo 1 na minoria do Grupo 2. Sendo assim, o Grupo 2 aplica mais técnicas BAT e tecnologias ambientais do que o Grupo 1.

As técnicas de monitoramento, dos parâmetros que podem gerar odor, aplicadas em todas as empresas de ambos os grupos são: Monitoramento dos principais parâmetros de processo relevantes para as emissões para a atmosfera, com a tecnologia de rede de percepção de odores, Detectores de odores na saída de chaminé, Estação de monitoramento da qualidade do ar; e Incineração numa caldeira de recuperação, um forno de cal ou um queimador específico para gases TRS, com as tecnologias de Queima de gases na caldeira de recuperação, Estação de monitoramento da qualidade do ar. O monitoramento de TRS é aplicado por todas as empresas do Grupo 2 e pela maioria das empresas do Grupo 1 utilizando sistema de captura de gases, detectores de odores e Estação de monitoramento da qualidade do ar. Por fim, o monitoramento de NH<sub>3</sub> do Grupo 1 pode ser feito aplicando como tecnologia Estação de monitoramento da qualidade do ar e a Rede de percepção de odores. As BATs de monitoramento são aplicadas tanto em empresas do Grupo 1 quanto em empresas do Grupo 2.

Com relação às tecnologias não relacionadas à BAT, a tecnologia de Dessulfurização é aplicada apenas no Grupo 1 e reduz o enxofre consumido sem precisar fazer *make up* de sulfeto de sódio e Redução de metano como gás de efeito estufa. Já o Grupo 2, aplica a Impregnação de cavaco com vapor limpo para a redução do odor proveniente do enxofre do vapor flash utilizado no silo de cavaco.

As BATs que não foram classificadas de acordo com os parâmetros de indicadores estabelecidos foram gases de efeito estufa e a processos. Com relação a gases do efeito estufa, as principais tecnologias são Sequestro de CO<sub>2</sub> com emissão zero, aplicada no Grupo 2. Com relação a processos, a Alteração de processo, principalmente na etapa de branqueamento com dióxido de cloro foi aplicado em empresas nos dois grupos. As alterações do processo produtivo, com etapas de processo de pré-branqueamento, foram mencionadas apenas em entrevistas do Grupo 1 enquanto que Alteração do processo para não utilização do Ozônio e a Revisão dos equipamentos na parada geral foram mencionados nas entrevistas do Grupo 2.

Foi realizada pesquisa sobre os principais parâmetros legais para a identificação dos mais restritivos e com base nas entrevistas e nos relatórios de sustentabilidade foram identificados indicadores de emissões a serem comparados com os parâmetros mais

restritivos. Um resumo das médias e parâmetros mais restritivos relacionados a emissões é apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Médias e Parâmetros Restritivos de Emissões

Classificação	Indicadores	Media G1	Media G2	Restritivo
Emissões Tóxicas	SOX	505,35	90,27	100
	NOX	1547,39	1623,67	940
	Material Particulado	394,40	423	700
Odor	TRS	3,41	33,7	15

Fonte: Autora

No indicador de poluente gasoso SOX, como o parâmetro mais restritivo da legislação foi identificado o valor de 100, apenas a média do Grupo 2 estaria atendendo a legislação. Com relação ao indicador NOX, ambos os grupos estariam fora dos parâmetros restritivos da legislação. Com relação a material particulado, ambos os grupos possuem média menor que o parâmetro restritivo de 700. Com relação a odor, o principal indicador envolve o TRS (Enxofre Reduzido Total). O Grupo 1 possui média muito inferior ao estabelecido pela legislação, enquanto que o Grupo 2 possui maior média ultrapassando o parâmetro mais restritivo.

No indicador de poluente gasoso SOX, o Grupo das unidades mais antigas apresenta como média o valor de 197,58 contra a média do indicador das unidades mais modernas, no valor de 90,27. Como o parâmetro mais restritivo da legislação foi identificado o valor de 100, apenas a média do Grupo 2 estaria atendendo a legislação. Nos indicadores dos poluentes gasosos SOX a média do Grupo 2 é menor que a média do Grupo 1, evidenciando que para as emissões, a presença de tecnologias ambientais reduz potencial de poluição. Essa conclusão é reforçada pelo dado de que o Grupo 2 aplica mais BATs e Técnicas do que o Grupo 1. Sendo assim, empresas que aplicam mais BATs e implantam mais tecnologias ambientais tem um melhor indicador de desempenho ambiental.

Com relação ao indicador NOX, ambos os grupos estariam fora dos parâmetros restritivos da legislação. Foi observado também que no cálculo das médias dos grupos sobre as emissões de NOX, a média do grupo de plantas mais antigas indica menos emissões de NOX com 1547,39 toneladas contra a média do Grupo das empresas mais modernas que foi 1623,67. No entanto, caso o cálculo da média considere a produção de celulose nas plantas a média do Grupo 1 passa a ser 0,003 t/tsa (toneladas por toneladas de celulose seca) enquanto que a média do Grupo 2 passa a ser 0,0013 t/tsa evidenciando que a emissão de NOX por tsa é menor no Grupo 2, que aplica mais BATs e tecnologias ambientais do que o Grupo 1.

Com relação ao indicador de material particulado, ambos os grupos possuem média menor que o parâmetro restritivo de 700 sendo a média do grupo1 de 394,40 t e a média do Grupo 2 em 423 t. Apesar de em primeira análise a média do Grupo 1 ser menor que a média do Grupo 2, se for considerada a quantidade de celulose produzida, a média do Grupo 1 será de 0,0013 t/tsa e a média do Grupo 2 será de 0,0003 t/tsa, portanto menor que a média do Grupo 1. Considerando que o Grupo 2 com menor média de emissões aplica mais tecnologias do que o Grupo 1, pode-se concluir que a aplicação de tecnologias ambientais produz um melhor desempenho ambiental.

Com relação a odor, o principal indicador envolve o TRS (Enxofre Reduzido Total). O Grupo 1 possui média de 12 t enquanto que o Grupo 2 possui média de 33,99 t. No entanto, considerando a produção, a média do Grupo 1 passa a ser 0,000068 t/tsa e a média do Grupo 2 passa a ser 0,000031 t/tsa, bem inferior a média do Grupo 1. Considerando que o Grupo 2 utiliza mais técnicas BAT e tecnologias do que o Grupo 1, conclui-se que com relação a TRS a utilização de tecnologias melhora o desempenho ambiental.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

As tecnologias ambientais de processo para tratamento de emissões podem ser classificadas, de acordo com as entrevistas, em tecnologias de queima, tecnologias de processos, tecnologias de monitoramento e controle e tecnologias comuns.

As principais tecnologias de queima têm como objetivo queimar gases para evitar que eles sejam disseminados: Queima de gases na caldeira de recuperação para melhorar o sistema de gases condensáveis (SUHR et al., 2015; SILVO; JOUTTIJÄRVI; MELANEN, 2009); Queima de lignina, para evitar a emissão de CO<sub>2</sub> (SUHR et al., 2015; SOUZA, 2008); Queima de TRS concentrado para minimizar a emissão de odores (SUHR et al., 2015; SOUZA, 2008); e o queimador *LowNox* na caldeira de recuperação para reduzir a emissão de NOX (SUHR et al., 2015; SOUZA, 2008). As tecnologias de queima são mais utilizadas por empresas mais recentes do que por plantas e empresas mais recentes.

Alterações no processo de fabricação de celulose podem trazer melhoria no desempenho ambiental tais como Alteração de processo com etapa de branqueamento com dióxido de cloro, sem cloro livre ou elementar (POPP; HAFNER; JOHNSTONE, 2011), alteração do processo com etapas de processo de pré-branqueamento (SOLOMAN et al., 2009; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015) e alteração do processo para não utilização do Ozônio (SOUZA, 2008; SUHR et al., 2015). Estas tecnologias reduzem a liberação de AOX (SOLOMAN et al., 2009; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015), TCF (SOUZA, 2008; SUHR et al., 2015) e emissões tóxicas (GHOSE; CHINGA-CARRASCO, 2013; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015). Outras tecnologias identificadas em entrevistas foram: depurador úmido (CHEN *et al.*, 2012), para reduzir as emissões tóxicas; dessulfurização (DESHMUKH et al., 2014; FAUBERT et al., 2016), para reduzir o consumo de enxofre; impregnação de cavaco com vapor limpo (SUHR *et al.*, 2015), para reduzir o odor; sistema de tratamento de condensado (SOLOMAN et al., 2009; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; SUHR et al., 2015), para minimizar odores; digestor de alta performance (SUHR *et al.*, 2015), para reduzir a liberação de NOX; e secagem de lodo (SUHR *et al.*, 2015) para reduzir o odor; implantação de cortina de ventos, implantação de chaminé com 160 metros e revisão dos equipamentos na parada geral. As tecnologias de processos são aplicadas tanto em unidades mais antigas quanto em unidades mais modernas.

As tecnologias de monitoramento e controle têm como objetivo identificar as emissões e possíveis vazamentos e são utilizadas basicamente nas empresas das plantas mais modernas. São elas: detector de dióxido de cloro, analisador e detector de chaminés, para identificar vazamentos e odores; Detector de H<sub>2</sub>S (DESHMUKH et al., 2014; FAUBERT et al., 2016), para mapear fontes fugitivas; Estação de monitoramento da qualidade do ar (VDI, 2001), para controlar emissões; Medidores de CO<sub>2</sub>, opacidade, caldeira de força, caldeira de recuperação, forno de cal (SUHR *et al.*, 2015) para monitorar NOX, SOX e material particulado; analisador de material particulado (CARVALHO, 2005; DESHMUKH et al., 2014; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; FAUBERT et al., 2016) Sistema de coleta de dados (SUHR *et al.*, 2015) para monitorar online as operações; e ferramentas de gestão para monitorar as variáveis e os padrões legais muitas vezes presentes em estações meteorológicas.

A literatura evidenciou que a identificação do potencial poluidor de uma empresa pode ocorrer com base na capacidade de dissipação de poluentes no local. Caso o Potencial Meteorológico da Capacidade Dissipativa da Atmosfera (MAPP) seja menor que 0,8, a região é uma Zona com condições favoráveis à dissipação de poluentes; caso o MAPP seja entre 0,8 e 1,2, a região é considerada uma zona de amortecimento cuja dissipação ocorre lentamente;

se o MAPP for entre 1,2 e 2,4 o local é uma zona com condições desfavoráveis para a dissipação de poluentes sendo a detecção destes mais acentuada; por fim, caso o MAPP seja maior que 2,4, a região é considerada zona com condições extremamente desfavoráveis para a dissipação de poluentes, fazendo com que seja mais possível a percepção da poluição atmosférica (SELEGEI; FILONENKO; LENKOVSKAYA; 2015). Esse tipo de cálculo normalmente é utilizado em softwares de estações meteorológicas presentes nas unidades estudadas e que permitem analisar e verificar a pertinência das reclamações da comunidade com relação a odor ou emissões tóxicas.

As tecnologias comuns são as tecnologias utilizadas nas indústrias de celulose em geral, tais como: Lavadores de gases, para redução de odor e neutralização de gases; precipitadores eletrostáticos, para redução de material particulado e controle de emissões; sistema de captura de gases e sistema de backup de queima, direcionadores para queima de gases e rede de percepção de odores que visa o reconhecimento do odores fora dos padrões, pela comunidade e funcionários (SUHR *et al.*, 2015). Estas tecnologias são utilizadas em empresas de ambos os grupos.

As técnicas e inovações que permitem a redução dos indicadores de emissões (ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; GHOSE; CHINGA-CARRASCO, 2013) para níveis abaixo dos parâmetros mais restritivos baseiam-se nas melhores práticas para prevenção de poluição aplicadas às empresas do estudo (SUHR *et al.*, 2015). Para a análise dos resultados, os dados utilizados foram coletados na pesquisa sobre BAT de emissões, tecnologias e indicadores sendo que as técnicas BAT relacionadas à NOX, SOX, material particulado e odores (CARVALHO, 2005; DESHMUKH *et al.*, 2014; ASHRAFI; YERUSHALMI; HAGHIGHAT, 2015; FAUBERT *et al.*, 2016) foram aplicadas mais em plantas mais modernas do que em plantas mais antigas.

Outra opção de cálculo de potencial poluidor é através do cálculo total de emissões (CETESB, 1991) sendo considerado potencial poluidor alto se o total de emissões for maior que 0,7 t/dia; médio se a estimativa de emissões for menor que 0,7 e maior que 0,2 t/dia e baixo se a estimativa for menor que 0,2 t/dia. No entanto, nos relatórios de sustentabilidade não é evidenciado o valor total de emissões das unidades estudadas para fim de comparação.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Objetivo geral foi analisar como as inovações ambientais de processos contribuíram para reduzir emissões em indústrias do setor de celulose. Os resultados mostram que as inovações ambientais nas plantas industriais melhoram o desempenho ambiental e, conseqüentemente, reduzem o impacto ambiental gerado. Este trabalho permitiu um maior entendimento sobre a influência das inovações tecnológicas de processo no potencial de poluição das indústrias de celulose e papel. Em resposta à pergunta de pesquisa, as inovações ambientais aplicadas em parte do processo são responsáveis pela redução das emissões do setor de celulose, sendo muitas delas tecnologias importantes para o alcance das BATs nas empresas.

O primeiro objetivo específico foi a identificação das inovações ambientais tecnológica de processo para redução de emissões em indústrias do setor de celulose. As tecnologias relacionadas às emissões identificadas em entrevistas apoiam diretamente as BAT para as indústrias do setor de celulose. Nesse estudo foram utilizadas 19 BATs de emissões, com o total de 61 técnicas associadas, sendo a maioria delas aplicadas nas plantas mais modernas.

Todos os indicadores evidenciaram menor média do grupo das empresas mais jovens mostrando que a aplicação das tecnologias ambientais possibilitou a redução dos valores do

indicador abaixo dos limites legais em alguns casos. Destaca-se o desempenho dos indicadores, a maioria muito abaixo dos requisitos legais vigentes. Com base nas BATs pode-se observar que a maior parte das técnicas estão sendo aplicadas em empresas de ambos grupos, sendo um diferencial do grupo das empresas mais modernas possuir mais tecnologias aplicadas do que o grupo das empresas mais antigas concluindo que as plantas mais novas inovam mais.

Este estudo de casos múltiplos teve como contribuição teórica o entendimento de que as tecnologias ambientais impactam no potencial de poluição das empresas. Outra contribuição foi à elaboração de uma classificação das tecnologias nos grupos de análise. Relacionado à poluição atmosférica, as tecnologias podem ser agrupadas em tecnologias de queima, tecnologias de processo, tecnologias de monitoramento e controle e as tecnologias comuns.

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

## REFERÊNCIAS

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>. Acesso em: 16 nov. 2016.

BERGQUIST, Ann-Kristin; KESKITALO, E. Carina H. Regulation versus deregulation. Policy divergence between Swedish forestry and the Swedish pulp and paper industry after the 1990s. **Forest Policy and Economics**, v. 73, p. 10–17, dez. 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.07.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389934116301757>. Acesso em: 10 jun. 2018.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981 (L6938/1981) - Política Nacional do Meio Ambiente. Palácio do Planalto - Presidência da República. 1981. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L6938.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm). Acesso em: 2 nov. 2016.

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). Acesso em: 2 nov. 2016.

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).

CEPI. Best Available Technique (BAT) Conclusions for the Production of Pulp, Paper and Board - Implementation guide Discussion on the BAT conclusions for the pulp and paper sector. ago. 2015. Disponível em: <http://www.cepi.org/node/19413>. Acesso em: 10 jun. 2016.

CETESB. Lei nº 7.641, de 19 de dezembro de 1991 - Dispõe sobre a proteção ambiental das bacias dos Rios Pardo, Moji Guaçu e Médio Grande, estabelece critérios pa-para o uso e ocupação do solo nesta área e dá outras providências. CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 19 dez. 1991. Disponível em: [https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/legislacao/estadual/leis/1991\\_Lei\\_Est\\_7641.pdf](https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/legislacao/estadual/leis/1991_Lei_Est_7641.pdf). Acesso em: 9 abr. 2019.

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>. Acesso em: 16 nov. 2016.

CONAMA. Resolução nº 237, de 19 de Dezembro de 1997 - Sistema de licenciamento como instrumento de gestão ambiental. Conselho Nacional do Meio Ambiente. 1997. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res97/res23797.html>. Acesso em: 2 nov. 2016.

DESHMUKH, Sharvari; JANA, Arun; BHATTACHARYYA, Nabarun; BANDYOPADHYAY, Rajib; PANDEY, R. A. Quantitative determination of pulp and paper industry emissions and associated odor intensity in methyl mercaptan equivalent using electronic nose. **Atmospheric Environment**, v. 82, p. 401–409, jan. 2014. DOI <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.041>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231013007942>. Acesso em: 16 nov. 2016.

FAUBERT, Patrick; BARNABÉ, Simon; BOUCHARD, Sylvie; CÔTÉ, Richard; VILLENEUVE, Claude. Pulp and paper mill sludge management practices: What are the challenges to assess the impacts on greenhouse gas emissions? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 108, p. 107–133, abr. 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916300088>. Acesso em: 10 jun. 2018.

GHOSE, Agneta; CHINGA-CARRASCO, Gary. Environmental aspects of Norwegian production of pulp fibres and printing paper. **Journal of Cleaner Production**, v. 57, p. 293–301, out. 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.019>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613004009>. Acesso em: 16 nov. 2016.

GIRI, B. S.; MUDLIAR, S. N.; DESHMUKH, S. C.; BANERJEE, S.; PANDEY, R. A. Treatment of waste gas containing low concentration of dimethyl sulphide (DMS) in a bench-scale biofilter. **Bioresource technology**, v. 101, n. 7, p. 2185–2190, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409015375>. Acesso em: 19 jan. 2017.

HARRIS, A. T.; RIDDLESTONE, S.; BELL, Z.; HARTWELL, P. R. Towards zero emission pulp and paper production: the BioRegional MiniMill. **Journal of cleaner production**, v. 16, n. 18, p. 1971–1979, dez. 2008. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.02.005>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260800036X>. Acesso em: 16 nov. 2016.

HUBER, Joseph. New Technologies and Environmental Innovation. **Technovation**, , p. 1011–1013, dez. 2004. DOI 10.1016/j.technovation.2004.07.022. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/257002560\\_New\\_Technologies\\_and\\_Environmenta\\_l\\_Innovation](https://www.researchgate.net/publication/257002560_New_Technologies_and_Environmenta_l_Innovation). Acesso em: 15 out. 2016.

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

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>. Acesso em: 28 maio 2016.

MARTINS, Clitia Helena Backx; OLIVEIRA, Naia. Textos para Discussão N° 68 - Potencial poluidor da indústria no RS: dimensionamento e espacialização do risco. 2009. Disponível

em: <https://www.fee.rs.gov.br/wp-content/uploads/2014/03/20140324068.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2019.

OBIDZINSKI, Krystof; DERMAWAN, Ahmad. Pulp industry and environment in Indonesia: is there sustainable future? **Regional Environmental Change**, v. 12, n. 4, p. 961–966, set. 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10113-012-0353-y>. Acesso em: 16 nov. 2016.

PAJUNEN, Nani; WATKINS, Gary; WIERINK, Maaria; HEISKANEN, Kari. Drivers and barriers of effective industrial material use. **Minerals Engineering**, v. 29, p. 39–46, mar. 2012. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.12.008>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687511004493>. Acesso em: 16 nov. 2016.

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>. Acesso em: 13 abr. 2018.

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>. Acesso em: 16 nov. 2016.

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>. Acesso em: 6 set. 2016.

SELEGEI, T. S.; FILONENKO, N. N.; LENKOVSKAYA, T. N. On the technique for determining the meteorological air pollution potential. **Atmospheric and Oceanic Optics**, v. 28, n. 6, p. 561–565, nov. 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1134/S1024856015060159>. Acesso em: 11 set. 2017.

SILVO, Kimmo; JOUTTIJÄRVI, Timo; MELANEN, Matti. Implications of regulation based on the IPPC directive – A review on the Finnish pulp and paper industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 8, p. 713–723, maio 2009. DOI [10.1016/j.jclepro.2008.11.011](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.011). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652608002850>. Acesso em: 24 out. 2016.

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>. Acesso em: 16 nov. 2016.

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: 20 nov. 2016.

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>. Acesso em: 21 jul. 2019.

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. .

VDI. Determination Of Costs For Industrial Environmental Protection Measures. Guideline VDI 3800. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). 2001. . Acesso em: 6 set. 2016.

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