REVISTA CONEXÃO ELETRÔNICA

UTILIZAÇÃO DE REATORES BIOLÓGICOS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES ORIUNDOS DE INDÚSTRIAS DE CELULOSE E PAPEL

Ricardo Cesar da Rocha Laurindo[1]; Júnior da Silva Camargo[2]*

[1] Engenheiro Químico – FITL/AEMS; [2] Químico Industrial – UEMS, Mestre em Ciência dos Materiais na Área de Química dos Materiais – UNESP, Docente da Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS
* autor correspondente: junior572@hotmail.com

RESUMO
O descarte inadequado de efluentes industriais pode causar sérios danos ambientais, que afeta a qualidade da água, do solo e do ar. A contaminação resultante da falta de tratamento adequado das águas residuárias traz uma série de problemas para a fauna aquática, como a morte de peixes e outros organismos vivos decorrente de uma elevada taxa de oxigênio dissolvido proveniente dos processos industriais, além de gerar problemas a vida humana. Além disso, atividades como agricultura e pesca dependem diretamente da qualidade da água e do meio ambiente, sendo impactados diretamente, portanto, com a falta do tratamento desses resíduos. Portanto, é imprescindível processos para remoção dos contaminantes gerados pelas indústrias, que trate o efluente de acordo com as normativas e legislações ambientais vigentes, para que possa ser devidamente descartado em local apropriado e com todos os parâmetros dentro das conformidades legais, sem causar danos ao meio ambiente. Para isso, existem diversos processos de tratamento, como: físicos (sedimentação, decantação, gradeamento), químicos (eletrocoagulação, clarificação química) e biológicos (lodo ativado, lagoas de aeração), cada método possui especificidades, sendo aplicável de acordo com o tipo de contaminante presente. Neste artigo de revisão tem como objetivo levantar informações relevantes sobre o tratamento biológico, com a utilização de reatores biológicos aplicados em indústrias de celulose e papel, sendo um grande aliado no tratamento dos contaminantes.

PALAVRAS-CHAVE: descarte; águas residuárias; vida marinha; qualidade da água.

1 INTRODUÇÃO

O setor de produção de polpa celulósica tem fomentado cada vez mais o mercado brasileiro, principalmente no Vale da Celulose, localizado na região de Três Lagoas-MS, que contribui de maneira expressiva no crescimento da economia e proporciona forte desenvolvimento socioeconômico (BRACELPA, 2006; IBGE, 2006).

O eucalipto é a principal matéria-prima utilizada para a produção de celulose e papel. Apresenta diferentes constituintes lignocelulósicos, e é definido como compósito de fibra celulósica constituída por substâncias macromoleculares formadas de polissacarídeos (hemi-

celulose e celulose), lignina, extrativos orgânicos e minerais inorgânicos (CAMARGO, 2023; YOGALAKSHMI et al., 2022; FERREIRA-LEITÃO et al., 2010; MIMMS, 1993; FENGEL E WEGENER, 1989).

A celulose é o principal constituinte da madeira e de maior interesse das indústrias de celulose e papel, trata-se de um polímero com alto peso molecular, composto por unidades monoméricas de βD-glucose, com a finalidade de estruturar a parede celular do material lignocelulósico (SJÖSTRÖM, 1981).

O segmento industrial de celulose e papel cresceu consideravelmente desde a produção da primeira folha de papel pelo chinês Ts'ai Lun (HUNTER, 1978). Este setor tem desenvolvido indústrias cada vez mais versáteis, com a produção de uma ampla variedade de produtos, desde a exportação de celulose até produtos acabados como papéis sanitários, de impressão e embalagens (KLINE, 1991).

O processo Kraft é o mais utilizado e difundido no mundo para a produção de celulose branqueada. É utilizado reagentes como o hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na_2S), para converter a madeira em polpa. A principal vantagem desse processo é a obtenção de polpa de melhor qualidade, com elevada resistência térmica. Isto evita perda excessiva de matéria-prima, além de apresentar excelente possibilidade de recuperação do licor negro residual, que pode ser reutilizado no processo e evitar elevado consumo de produtos químicos (DUEÑAS, 1997; MIMMS, 1993; KLINE, 1991; IPT, 1988; WENGER, 1984).

A produção de celulose branqueada requer a utilização de uma quantidade considerável de solventes químicos, como o metanol. Portanto, o tratamento dos efluentes gerados por esse ramo industrial se torna um grande desafio (SUN; TOMKINSON, 2003).

O setor de celulose e papel tem uma gama variada de contaminantes, como geração de resíduos sólidos que são prejudiciais ao meio ambiente e de resíduos químicos sendo fonte de contaminação de corpos d'água, com uma elevada carga de nitrogênio e fósforo. Além do uso excessivo de água nas diferentes etapas do processo produtivo, que varia entre 15-100 m³/t. Ela é utilizada nos processos de decantação, lavagem, dispersão da celulose, lavagem da polpa, produção de vapor, preparação de aditivos, entre outros. Sendo assim, capaz de gerar um elevado potencial de contaminação em águas residuárias. Esses efluentes têm a presença de nitrogênio, fósforo, sólidos suspensos, metais pesados e compostos fenólicos que são extremamente prejudiciais ao meio ambiente (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2008).

Atualmente, tecnologias de tratamento de efluentes vêm sendo estudadas, desenvolvidas e adotadas, baseadas principalmente em processos físicos, químicos e biológicos, que muitas vezes acabam tornando-se ineficientes no tratamento de compostos recalcitrantes, fenólicos e coloidais, responsáveis pela coloração. Portanto, o uso de técnicas alternativas, em junção com as clássicas, visa alto rendimento de remoção e propicia uma melhor eficiência da estação de tratamento e adequação aos padrões de conformidade com a legislação ambiental (FOLLMANN, 2017; BONFIM et al., 2013; POKHREL; VIRAGHAVAN, 2004).

Uma possibilidade bastante abrangente e eficaz no tratamento de efluentes das indústrias de celulose e papel é a utilização do reator biológico, também conhecido como MBBR. O MBBR foi desenvolvido no final dos anos de 1980 na Noruega, e vem sendo amplamente utilizado para o tratamento de águas residuais de diversos ramos industriais (RUSTEN et al., 2006).

O funcionamento desse modelo de reator consiste em manter em suspensão o efluente industrial, que no interior

suportes de plásticos são submetidos à agitação pelo sistema de aeração, que apresenta elevada mobilidade e exposição com a massa líquida suspensa (VANZETTO, 2012).

No reator biológico os microrganismos decompositores são mantidos junto a massa líquida, mas também podem estar aderidos aos meios dos suportes. Consequentemente, é possível manter um volume constante no reator, com uma maior quantidade de material. Sendo assim, possibilita uma enorme porção de substrato para biodegradação, que facilita o tratamento do efluente (OLIVEIRA, 2008).

Dentre as principais vantagens de um reator biológico pode-se destacar a estabilidade operacional, a redução de etapas no processo (reciclo do lodo), um menor espaço físico para instalação da planta de tratamento quando comparado com outras tecnologias disponíveis no mercado, flexibilidade de operação, aproveitamento do volume útil do reator que é utilizado para o crescimento dos microrganismos, alta área de contato entre o biofilme e o substrato, além de elevada resistência a inserção de carga orgânica (VANZETTO, 2012; AYGUN et al., 2008; RUSTEN et al., 2006; SALVETTI et al., 2006; JAHREN et al., 2002). Contudo os efeitos negativos causados ao ecossistema, junto com a contaminação dos recursos naturais finitos e essenciais para a vida humana e o impacto ambiental gerado pela agressividade dos produtos químicos utilizados para a obtenção da polpa celulósica branqueada, faz-se necessário a utilização de um tratamento de efluente mais eficaz (FOLLMANN, 2017; BONFIM et al., 2013; POKHREL; VIRAGHAVAN, 2004; SUN; TOMKINSON, 2003).

2 USO DO EUCALIPTO COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE CELULOSE E PAPEL

A madeira é o material biológico mais utilizado como matéria-prima em diversos setores produtivos na sociedade por ser renovável, principalmente para fabricação de móveis, utilitários de beleza, entre outros (ANDRADE et al., 2005).

A madeira mais utilizada atualmente em larga escala nos processos produtivos e tem se destacado amplamente devido aos aspectos físico-químicos é o eucalipto. A produção de polpa celulósica está ligada diretamente ao uso de madeira proveniente das plantações do gênero *Eucalyptus* (pertencente à família *Myrtaceae*) (SILVA, 2011). Essa árvore é a principal espécie utilizada devido a fácil adaptação em diferentes regiões, climas e solos, além de possuir uma boa resistência à falta de água, tempo de crescimento vantajoso quando comparado com outras espécies, tendo o crescimento estipulado entre seis e sete anos (BASSA et al., 2007), e pode alcançar 25 metros de altura na idade de sete anos (Figura 1). Além disso, o eucalipto tem a capacidade altamente produtiva, sendo uma árvore com material genético com um retorno altamente satisfatório em rendimento e qualidade (MOSCA, 2010).

Figura 1. Altura de uma árvore de eucalipto aos sete anos de idade.

Fonte: Extraído de FIBRIA, 2013.

O gênero *Eucalyptus* foi descoberto em 1798 na Austrália por ingleses. Em 1823, o Chile foi o primeiro país a iniciar a produção, acompanhado logo em

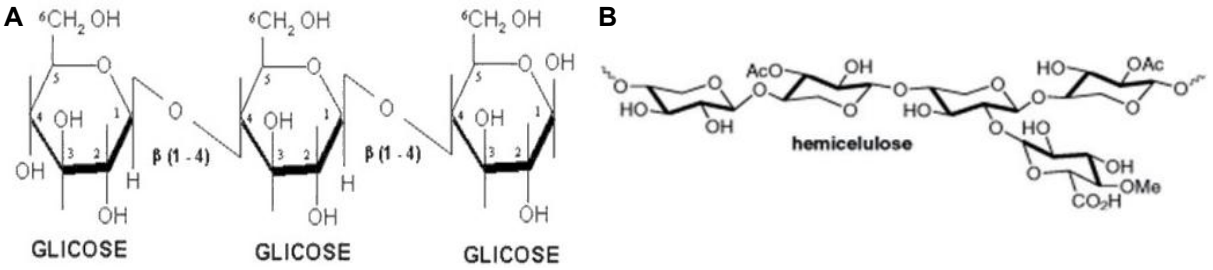
seguida por Argentina e Uruguai. No Brasil, essa espécie era utilizada apenas para a arborização das ruas. Entretanto, devido ao interesse nas propriedades físico-químicas, no início do século XX foi inicialmente utilizada para outros fins, como na produção de tecidos, através de estudos orientados pela Companhia Paulista Estradas de Ferro. O plantio no Brasil dessa madeira para produção de celulose, ocorreu inicialmente no ano de 1967, quando a Aracruz Celulose S.A. começou a plantação no estado do Espírito Santo (BARBOSA, 2010).

Os principais constituintes do eucalipto são hemicelulose, lignina e celulose, que afeta diretamente nas propriedades físico-químicas e morfologias desse material (DEMUNER, 2011).

A celulose é um dos constituintes químicos mais abundantes do planeta, pode ser encontrada em todas as plantas na forma de microfibrilas, sendo as fibras de algodão as com maior teor de pureza, aproximadamente 99,8% da estrutura, com elevado valor de alvura e de mercado (DEMUNER, 2011).

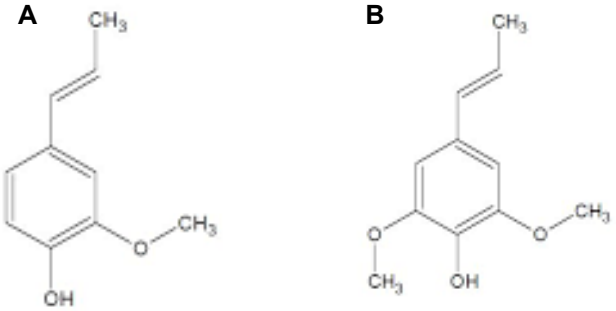
A estrutura da celulose é composta por homopolímero de moléculas de glicose, em que os grupos hidroxilas interagem com o hidrogênio e com o oxigênio da mesma cadeia ou de cadeia vizinha (Figura 2A), força uma tensão devido à formação de microfibrilas, que gera assim maior rigidez às paredes celulares das plantas, entre elas, o próprio eucalipto (SILVEIRA, 2010).

Figura 2. Estrutura química. A. Celulose. B. Hemicelulose.



Fonte: Extraído de A. Revista Angewandte Chemie, 2008. B. Benedetto, 2015.

Figura 3. Estrutura química. A. Guaiacil. B. Sinrigil.



Fonte: Extraído de Hernandez, 2008.

A hemicelulose pode ser definida como polissacarídeos não constituídos de glicose, que apresenta na maioria da estrutura ramificações, interligadas por meio de interações de hidrogênio, como mostra a Figura 2B. As ligações são relativamente fracas, que possibilitam assim a deslignificação (retirada da lignina que está ligada firmemente às fibras da celulose) por meio da água ou de soluções básicas, como o hidróxido de sódio (SILVEIRA, 2010).

Outro constituinte químico presente na estrutura do eucalipto é a lignina, que

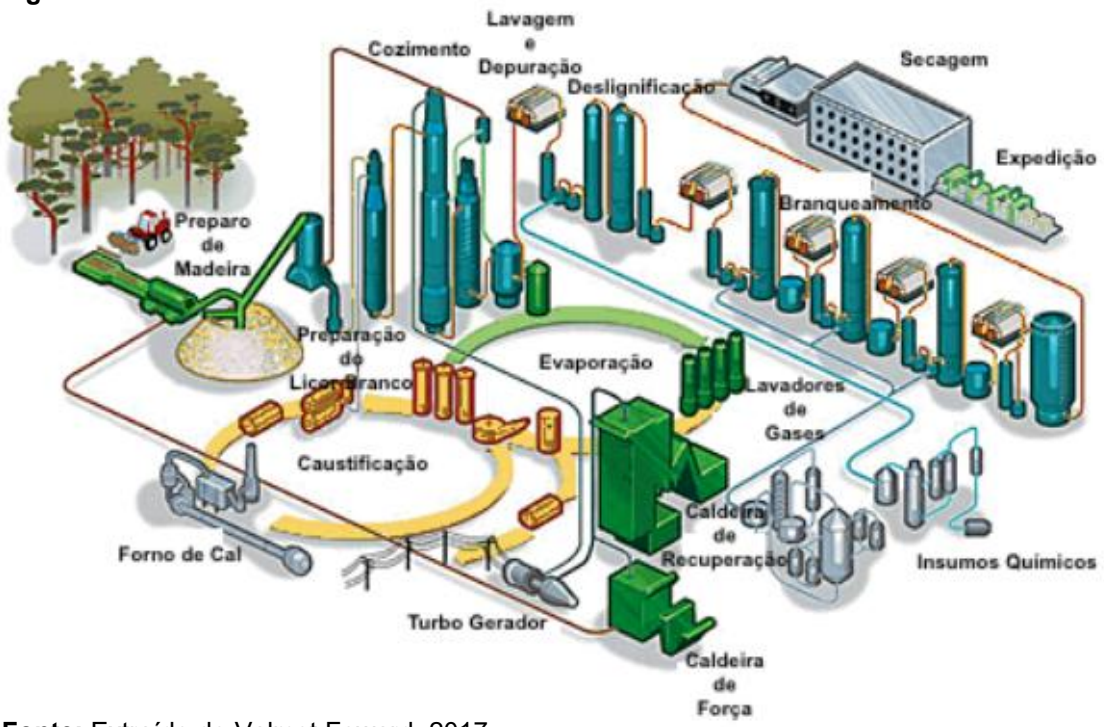
são compostos polifenólicos insolúveis formados pela polimerização do guaiacil (Figura 3A) e sinrigil (Figura 3B). Apresenta uma rede de ligações cruzadas entre os polímeros de celulose e hemiceluloses, responsáveis pela rigidez das paredes da estrutura celular (SILVEIRA, 2010).

O teor de lignina presente no eucalipto corresponde a cerca de 30 a 35% da estrutura da madeira, sendo esse composto de cor marrom, responsável pela cor escura da polpa de celulose, sendo assim necessário acometer a polpa à um processo de branqueamento (SILVEIRA, 2010).

3 EXTRAÇÃO DA CELULOSE DA MADEIRA DE EUCALIPTO

Embora a madeira do eucalipto seja rica em diversos componentes, o de interesse comercial para as indústrias de papel é a celulose. Para isso, é necessário submeter a madeira à diversos processos físico-químicos, mecânicos e biotecnológicos, muitos deles agressivos para a estrutura molecular do eucalipto, para que se possa obter o produto desejado como apresentado na Figura 4.

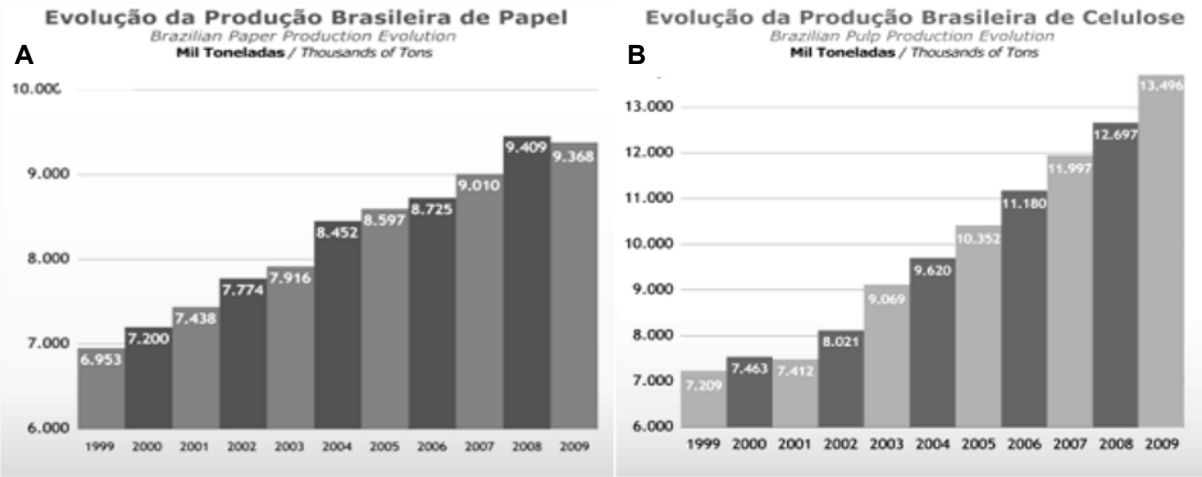
Figura 4. Processo Kraft de celulose.



Fonte: Extraído de Valmet Foward, 2017.

O Brasil tem se destacado com as expansões e instalações de indústrias do segmento de celulose e papel em várias regiões do país. Isso proporciona uma elevada geração de empregos e um aumento considerável no PIB local. A estimativa da Associação Brasileira de Celulose e Papel é de que nos próximos anos a implantação de novas indústrias pelo país permita aumentar a produção anual de celulose em 57% (BRACELPA, 2010a). No Gráfico 1A, é possível observar o crescimento da produção de papel e no Gráfico 1B da celulose, em um período de dez anos. Porém, com tantos avanços em termos de produção e rentabilidade, cresce também a preocupação de órgãos ambientais a respeito do tratamento dos efluentes gerados por essas indústrias, que passam por processos tão agressivos para a obtenção do produto desejado (BRACELPA, 2010).

Gráfico 1. Crescimento da produção de papel e celulose no Brasil. A. Evolução da produção brasileira de papel. B. Evolução da produção brasileira de celulose.



Fonte: Extraído de BRACELPA, 2010.

4 EFLUENTES ORIUNDOS DAS INDÚSTRIAS DE CELULOSE

As indústrias de celulose são caracterizadas pelo alto consumo de água no processo produtivo, é utilizado cerca de 60 metros cúbicos de água para cada tonelada de celulose produzida. Sendo assim, o processo gera uma quantidade significativa de efluentes oriundos da produção como um todo (DIEZ et al, 2007; NAVIA et al, 2006; THOMPSON et al, 2001).

Dentre as principais características do efluente gerado por esse segmento, podem ser citadas as elevadas concentrações da demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos, sólidos voláteis, fósforo, nitrogênio amoniacal, coloração, turbidez e grau de toxicidade para a vida marinha (KHANSORTHONG; HUNSOM, 2009; KREETACHAT et al, 2007; XAVIER, 2006).

Quadro 1. Resumo das fontes de geração de resíduos sólidos.

Fonte	Resíduo
Sistemas de tratamento de águas residuárias	Logos primários (físicos-químicos) e lodos do tratamento secundário (biológicos)
Sistemas de tratamento de água potável	Lodos primários
Caldeiras de vapor (carvão e biomassa)	Cinzas
Depuração de massa	Nós e palitos
Peneiras classificatórias	Refugos de cavacos (madeira) e outros refugos (bambu, sisal,bagaço)
Apagador de cal (Slaker)	Grits
Clarificador de licor verde	Dregs
Clarificador de licor branco	Lama de cal (quando não há forno de cal)
Central de aparas	Resíduos de plásticos, arames, pedras, etc.
Cozinha	Lixo doméstico
Pisos (varredura)	Diversos
Escritórios	Papel
Beneficiamento de madeira	Cascas, serragem
Beneficiamento de biomassas com bambu e bagaço	Medulas

Fonte: Extraído de Roteiro Complementar de Licenciamento e Fiscalização, 1998.

Diversos relatos de estudiosos observam a presença de efeitos tóxicos sobre peixes, como estresse respiratório, efeitos mutagênicos e carcino-

gênicos, bioacumulação em tecidos, biomagnificação e efeitos letais (ORREGO et al, 2009; HEWITT et al, 2006; POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004). Além disso, é relatado também a redução da diversidade e abundância do fitoplâncton, além de processos de eutrofização nos ambientes aquáticos (KARRASCH et al, 2006).

A resolução brasileira n° 430 de 2011 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) define padrões, normas e parâmetros para o lançamento de efluentes em corpos receptores, quando não apresentar efeitos tóxicos à vida marinha, cor, turbidez, sólidos suspensos, DQO, DBO, entre outros parâmetros (CONAMA, 2011). Nos Quadros 1 e 2, é possível visualizar os resíduos gerados por cada etapa da produção em uma indústria de celulose e papel, além de suas emissões para a atmosfera.

Quadro 2. Resumo das fontes de geração de resíduos líquidos.

Fonte	Tipo de Emissão
Obtenção de polpa	
Blow Tank (tanque de descarga)	Condensados dos recuperadores de calor
Lavagem de massa	Águas de lavagem
Engrossador (espessador)	Águas de prensagem
Depuração	Águas de diluição
Refrigeração	Águas de refrigeração
Branqueamento	
Pré-deslignificação (cloração ou oxigenação)	Águas ácidas de lavagem
Extração alcalina	Águas alcalinas de lavagem
Recuperação de produtos químicos	Condensados dos gases
Evaporadores de múltiplo efeito	Águas de lavagem de Dregs
Clarificador de licor verde	Águas de lavagem de gases
Forno de cal	Águas de lavagem no caso de haver lavagem de gás antes do precipitador eletrostático
Fabricação de papel	
Tanque de água branca filtrada (falta de capacidade)	Água branca filtrada
Centricleaners	Água da centrifugação
Depuradores	Água contendo finos
Seção de prensagem da máquina de papel	Água branca
Central de aparas	
Equipamentos (hidrapupers, depuradores e engrossadores)	Águas de lavagem (água branca e água recuperada)
Paradas por problemas de manutenção	Água branca e recuperada

Fonte: Extraído de Roteiro Complementar de Licenciamento e Fiscalização, 1998.

5 TRATAMENTO DOS EFLUENTES GERADOS PELAS INDÚSTRIAS DE CELULOSE E PAPEL

As estações de tratamento de efluentes (ETEs) das indústrias de celulose aplicam diversos métodos na remoção de diferentes compostos presentes nas águas residuárias, como processos físico-químicos, entre eles: gradeamento, sedimentação, floculação e decantação. Porém, esses procedimentos têm sido ineficientes na remoção de compostos de elevado peso molecular, coloração, toxicidade, sólidos suspensos, DQO e DBO, e não adequarem os resíduos as normas regulamentadoras ambientais. Outra desvantagem é custo elevado de implantação dessas técnicas para o tratamento (SINGH; THAKUR, 2006). Por isso, muitas fábricas têm aderido a combinação de metodologias físico-químicas e biológicas, que utilizam processos de ozonização, ultrafiltração e coagulação (WONG et al., 2006).

Outros métodos usados nos

tratamentos de efluentes industriais são adsorção, oxidação avançada, precipitação, filtração por membrana, sendo considerados importantes no pré e pós-tratamento para redução de coloração, toxicidade e compostos recalcitrantes presentes nos resíduos (BALCIOGLU et al., 2007; MALAVIYA; RATHORE, 2007). Entretanto, dentre os processos de tratamento, tem obtido destaque a utilização de reatores biológicos para essa finalidade (MINEGATTI, 2008).

6 USO DE REATORES BIOLÓGICOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Os processos biológicos têm ganhado destaque no tratamento de efluentes, devido a eficiência do processo, que permite tratar uma larga variedade de contaminantes, tantos industriais, quanto domésticos. Um dos principais fatores que proporciona esse avanço é a utilização de biofilmes suportados em materiais inertes, denominado como reator biológico com leito móvel (MINEGATTI, 2008).

O reator biológico, desenvolvido na Noruega (final dos anos 1980), tem se tornado uma alternativa promissora no tratamento de efluentes domésticos e industriais. Instalados e utilizados em mais de 22 países e com operação em mais 400 plantas de tratamento de águas residuárias (RUSTEN et al., 2006).

O MBBR surge devido à necessidade de aperfeiçoar o desempenho e promover aumento na capacidade de tratamento das estações que utilizam a metodologia do lodo ativado, sem necessidade de ampliação da estrutura física do reator (VAN HAANDEL; VAN DER LUBE, 2012).

O desenvolvimento da tecnologia MBBR consiste na ideia de unir, em um único sistema, as melhores características do processo de tratamento por lodo ativado e do processo com biofilme, que preenchem as lacunas deixadas por cada processo quando usados individualmente, sem o auxílio de um outro tipo de alternativa (RUSTEN et al., 2006). Neste tipo de reator, a biomassa cresce aderida aos suportes, que se movem livremente no volume do reator, que acontece de forma aeróbia, anóxica e anaeróbia (ØDEGAARD, 2006).

O funcionamento consiste em manter no interior, meios suportes plásticos de densidade menor que a água, que quando submetidos à agitação proveniente do sistema de aeração apresenta uma satisfatória condição de mobilidade, que faz com que o meio entre em exposição constante, que proporciona um melhor contato com a massa líquida em suspensão (MINEGATTI, 2008).

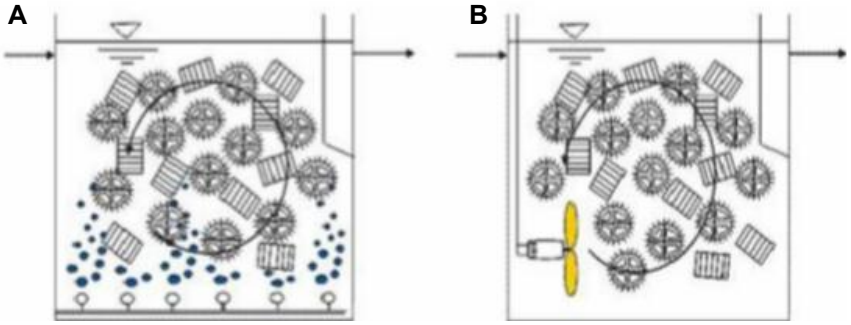
O equipamento funciona como um reator biológico híbrido, devido aos organismos decompositores serem mantidos tanto na massa líquida em suspensão, quanto aos meios suporte. Devido à essa capacidade, é possível manter uma maior quantidade de biomassa e assim e uma maior quantidade de substrato para biodegradação, que gera uma maior velocidade da carga orgânica e redução do tempo de detenção hidráulico (MINEGATTI, 2008).

Dentre as principais vantagens do uso desse reator, pode-se citar (i) todo o volume dentro do reator é utilizado para o crescimento microbiano, (ii) entre o biofilme e os substratos tem uma alta área interfacial, (iii) a biomassa aderida pode ser utilizada de uma forma mais especializada, (iv) alta resistências a choques de carga, (v) flexibilidade na operação, (vi) espaço reduzido para operação, (vii) não há necessidade de reciclar o lodo e (viii) estabilidade de operação (AYGUN et al., 2008; CHEN et al, 2007; ODEGAARD, 2006; RUSTEN et al, 2006; SALVETTI et al, 2006; JAHREN et al, 2002).

As desvantagens de utilização do reator estão relacionadas aos elevados custos de instalação, implantação e operacionais, estrutura interna robusta dos dispositivos de aeração do processo e

projetos complexos para impedir zonas estagnadas dentro do reator (SCHNEIDER, 2010). Esse tipo de reator pode ser utilizado em processos aeróbios e anaeróbios, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5. Esquema operacional do MBBR. A. Aeróbio. B. Anaeróbio.



Aeróbio Anaeróbio

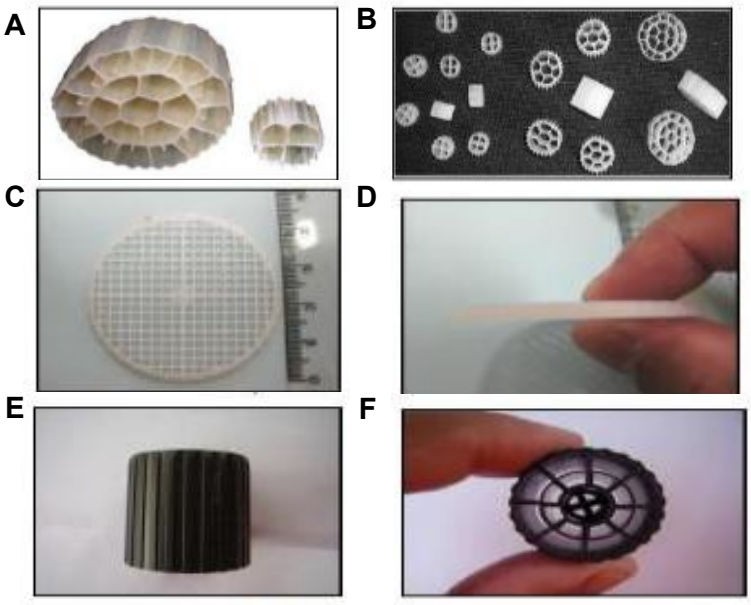
Fonte: Extraído de Veolia, 2008.

No processo aeróbio, os suportes com biofilme são movimentados pelo aporte de ar ao reator, e é exigido boas condições de transferência de oxigênio, pois esse fator pode influenciar diretamente no processo. No processo anaeróbio, a agitação ocorre de forma mecânica (SCHNEIDER, 2010).

O reator biológico utiliza alguns suportes no sistema, como os biomídias, suportes plásticos utilizados para maximizar a área superficial disponível para o crescimento de biofilme ativo no reator (SCHNEIDER, 2010).

O biofilme é uma estrutura formada por microrganismos e polímeros fixos sobre um suporte sólido e que possui um ciclo de vida bem estabelecido, como mostra a Figura 6. Em sua estrutura é possível observar a ação de muitos mecanismos biológicos e físicos, como forças de cisalhamento, competição bacteriana e difusão interna (WU, 2005).

Figura 6. Fotos de meios suportes (biomídias). A. Kaldnes K3 e K1. B. Kaldnes K1, K2 e K3. C. Veolia visão superior. D. Veolia visão lateral. E. Ambio visão superior. F. Ambio visão lateral.



Fonte: Extraído de Minegatti, 2008.

A difusão dos componentes para dentro e fora do biofilme faz com que a espessura desse papel possua relevância, isso porque o biofilme ideal precisa ser fino e uniformemente distribuído por toda a superfície do suporte. Para isso, é necessário observar à turbulência no reator, sendo importante para transportar o substrato para o biofilme e manter a fina espessura através da força de cisalhamento (ODEGAARD, 2006). É necessário entender o perfil de difusão no biofilme para que as condições de processo possam ser definidas, e que possibilite a redução da aeração sem que se perca eficiência no tratamento (LIU, 1993). Caso haja perda na eficiência, pode tentar melhorar com aumento da vazão de ar, que melhora a hidrodinâmica do reator, porém, o custo energético desse processo é elevado (RUSTEN et al., 2006).

No mercado existem diversos tipos de biomídias, que variam de formato, diâmetro, altura, massa específica e área superficial (SCHNEIDER, 2010). No Quadro 3 apresenta detalhes das configurações geométricas dos suportes mais utilizados nos reatores MBBR.

Quadro 3. Configurações geométricas dos meios suporte empregados no MBBR.

Característica	Kaldnes (K1)	Kaldnes (K2)	Kaldnes (K3)	Veolia	Ambio
Forma	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica	Disco	Cilíndrica
Diâmetro (mm)	10	15	25	2,2	14
Altura (mm)	7	15	10	45	14
Massa específica (g/cm^3)	0,95	0,95	0,95	0,99	0,99
Área específica superficial (m^2/m^3)	500	350	500	-	-

Fonte: Extraído de Schneider, 2010.

Os principais parâmetros que devem serem considerados são a área superficial específica e o volume. A área superficial corresponde à razão entre a área de meio suporte e o volume por ele ocupado, enquanto o volume é o espaço ocupado pelo meio suporte na faixa de 30-70% do volume total do reator. O recomendável é que esse espaço ocupado não ultrapasse os 70%, para que não haja um comprometimento na movimentação dos suportes, evitando assim problemas hidrodinâmicos e consequentemente a eficiência do equipamento (AYGUN et al., 2008).

As principais aplicações do reator MBBR ocorrem na remoção de matéria orgânica, além da nitrificação e desnitrificação em estações de tratamento de efluentes industriais (ODEGAARD, 2006), como apresentado no Quadro 4.

Quadro 4. Aplicações do MBBR no tratamento de efluentes.

Sistema	Efluente	Objetivo
MBBR	Indústria de Papel	Remoção DQO
2 MBBR em série	Doméstico sintético	Remoção DQO e nitrificação
MBBR	Doméstico sintético	Remoção DQO
MBBR	Indústria de borracha sintética	Nitrificação
MBBR	Indústria de celulose Kraft	Remoção DQO e DBO
MBBR	Indústria de celulose Kraft	Remoção DQO e DBO

Fonte: Extraído de Odegaard, 2006.

Os reatores MBBR apresentam uma vasta gama de aplicações para os diversos processos de tratamentos de efluentes, sejam eles industriais ou domésticos. São muito empregados em indústrias de celulose e papel para o tratamento do resíduo gerado pelo processo Kraft (ODEGAARD, 2006).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos dados levantados

neste artigo de revisão, é possível verificar que os efluentes oriundos da produção de celulose em indústrias de papel são bastante nocivos ao meio ambiente, devido as suas características físico-químicas e com elevada carga residual. Além disso, importante ressaltar a obrigação que as empresas deste seguimento têm com os órgãos ambientais fiscalizadores, sendo assim, necessário um rígido acompanhamento por parte dessas instituições à fim de assegurar que todas as normas ambientais sejam rigorosamente obedecidas e aplicadas em toda a planta industrial.

Para garantir a conformidade com todos os parâmetros pré-estabelecidos, o uso dos reatores biológicos surge como uma alternativa no tratamento de efluentes. Sendo esse processo biológico eficaz para remoção de contaminantes que não são completamente retirados no tratamento convencional, como peneiramento, gradeamento etc.

O futuro é desafiador, com a demanda de indústrias de grande porte e elevada geração de efluentes, se faz necessário a utilização de novas tecnologias à fim de diminuir consideravelmente a poluição e contaminação do meio ambiente por meio desses resíduos. Por isso, a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico vêm como alternativa para utilização de novas tecnologias visando a redução e maximizando a eficiência dos tratamentos industriais de efluentes.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. S. de et al. Química da madeira. 3 ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005.

AYGUN, A.; NAS, B.; BERKTAY, A. Influence of high organic loading rates on COD removal and sludge production in moving bed biofilm reactor. Environmental Engineering Science, v. 25, n. 9, p. 1311-1316, 2008.

BALCIOĞLU, I. A. et al. Merits of ozonation and catalytic ozonation pre-treatment in the algal treatment of pulp and paper mill effluents. Journal of Environmental Management, v. 85, n. 4, p. 918-926, 2007.

BARBOSA, T. L. Influência do local de crescimento na qualidade da madeira para celulose e na susceptibilidade aos ventos. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

BASSA, A. G. M. C.; SILVA JUNIOR, F. G. de; SACON, V. M. Misturas de madeira de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla e Pinus taeda para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids®. Scientia Forestalis. Piracicaba. 2007.

BONFIM, L. T. et al. Análise da eficiência do conjunto coagulação/precipitação no pós-tratamento de efluente de uma indústria de papel e celulose. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 5, n. 3, p. Páginas 15-24, 2013.

BRACELPA. O setor brasileiro de celulose e papel. Associação Brasileira de Celulose e Papel. São Paulo. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br>. Acesso em: jan. de 2006.

BRACELPA., 2010 (a). Companhia Brasileira de Celulose e Papel. Evolução da produção brasileira de celulose e papel. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/139>. Acesso em: 15 fev. 2011.

CAMARGO, J. D. S. Avaliação e Comparação do Potencial das Biomassas e dos Biochars de Macrófitas Aquáticas para Adsorção de Azul de Metileno. 2023. 82f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha

Solteira., 2023.

CHEN, S.; SUN, D.; CHUNG, J. S. Treatment of pesticide wastewater by moving-bed biofilm reactor combined with Fenton-coagulation pretreatment. Journal of Hazardous Materials, v. 144, n. 1-2, p. 577-584, 2007.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (SP). Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose, Série P+L. São Paulo, 2008p. 49.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução n° 430/2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, out 2011.

DEMUNER, W. P. Predição do impacto da madeira em fábrica Kraft de eucalipto. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

DIEZ, M. C. et al. Recovery and characterization of the humate-like salified polymeric organic fraction (lignimerin) from Kraft cellulose mill wastewater. Chemosphere, v. 68, n. 9, p. 1798-1805, 2007.

DUEÑAS, R. S. Obtención de pulpas y propriedades de las fibras para papel. Guadalajara. Universidad de Guadalajara. ed, v. 1, 1997.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood. Chemistry: Ultrastructure: Reactions. Berlin. Walter de Gruyter. 1989.

FERREIRA-LEITAO, V. et al. Biomass residues in Brazil: availability and potential uses. Waste and Biomass Valorization, Dordrecht, v. 1, n. 1, p. 65-76, 2010.

FIBRIA. Resumo do Plano de Manejo: Unidade Florestal MS. Três Lagoas. 6. ed. 2013.

FOLLMANN, H. V. D. M. Avaliação da ultrafiltração e da adsorção em carvão ativado no tratamento avançado de efluente de uma indústria de papel e celulose. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati., 2017.

HEWITT L. M.; PARROTT J. L.; MCMASTER M. E. A decade of research on the environmental impacts of pulp and paper mill effluents in Canada: sources and characteristics of bioactive substances. J Toxicol Environ Health Part B, v. 9, p. 341-356, 2006.

HUNTER, D. Papermaking, The history and technique of an ancient craft. Courier Dove Publications. 672 p. 1978.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Brasil. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acessado em: mar. 2006.

Ilustração do Processo Kraft. Disponível em: <https://www.valmet.com/automation/applications/process-optimization/pulp/>. Acesso em 02 de dezembro de 2023.

IPT. Celulose e Papel. São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. v.1, ed.2, 1988.

JAHREN, S. J.; RINTALA, J. A.; ØDEGAARD, H. Aerobic moving bed biofilm reactor treating thermomechanical pulping whitewater under thermophilic conditions. Water research, v. 36, n. 4, p. 1067-1075, 2002.

KARRASCH, B. et al. Effects of pulp and paper mill effluents on the microplankton and microbial self-purification capabilities of the Biobio River, Chile. Science of

the Total Environment, v. 359, n. 1-3, p. 194-208, 2006.

KHANSORTHONG S.; HUNSOM M. Remediation of wastewater from pulp and paper mill industry by the electrochemical technique. Chemical Engineering Journal, v. 151, p. 228-234, 2009

KLINE, J. E. Paper and paperboard, manufecturing and converting fundamentals. San Francisco. ed.2, 245 p. 1991.

KREETACHAT, T. et al. Effects of ozonation process on lignin-derived compounds in pulp and paper mill effluents. Journal of Hazardous Materials, v. 142, p. 250-257, 2007.

LACORTE, S. et al. Organic compounds in paper-mill process waters and effluents. TrAC Trends in Analytical Chemistry, v. 22, n. 10, p. 725-737, 2003.

LIU, H. W.; LO, S. N.; LAVALLEÉ. H. C. Study of the performance and kinetics of aerobic biological treatment of CMTP effluent. Pulp Pap. Can., v. 94, p. 172-176, 1993.

MALAVIYA, P.; RATHORE, V. S. Bioremediation of pulp and paper Mill effluent by a novel fungal consortium isolated from polluted soil. Bioresource Technology, v. 98, n. 18, p. 3647-3651, 2007.

MIMMS, A. Kraft pulping, a compilation of notes. Atlanta. TAPPI PRESS. ed.2, 181 p. 1993.

MINEGATTI, D. V. O. DE., 2008. Caracterização dos Parâmetros de Controle e Avaliação de Desempenho de um Reator Biológico com Leito Móvel (MBBR). XII, 91 p. COPPE/UFRJ, MSc., Engenharia Civil, 2008.

MOSCA, Y. Avaliação da qualidade da madeira de três clones Eucalyptus, aos cinco anos de idade. 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2010.

NAVIA, R. et al. Irrigation model of bleached Kraft mill wastewater through volcanic soil as a pollutants attenuation process. Chemosphere, v. 63, p. 1242-1251, 2006.

ODEGAARD, H. Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process. Wat. Sci. Technol, v. 53, n. 9, p. 17-33, 2006.

OLIVEIRA, D. V. M. Caracterização dos Parâmetros de Controle e Avaliação de Desempenho de um Reator Biológico com Leito Móvel (MBBR). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008.

ORREGO R. et al. Pulp and paper Mill effluent treatments have differential endocrine-disrupting effects on rainbow trout. Environ Toxicol Chem, v. 28, p. 181-188, 2009.

POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN, T. Treatment of pulp and paper mill wastewater: a review. Science of the total environment, v. 333, n. 1-3, p. 37-58, 2004.

REVISTA ANGEWANDTE CHEMIE, v. 47, n. 42, p. 8047-8050, 2008.

ROTEIRO COMPLEMENTAR DE LICENCIAMENTO E FISCALIZAÇÃO, p.72, 1998.

RUSTEN, B. et al. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. Aquacultural engineering, v. 34, n. 3, p. 322-331, 2006.

SALVETTI, R. et al. Effects of temperature on tertiary nitrification in moving-bed

biofilm reactors. Water Research, v. 40, n. 15, p. 2981-2993, 2006.

SCHNEIDER, E. E. Avaliação de um reator de leito móvel com biofilme para tratamento de efluente da indústria do petróleo, com posterior ozonização acoplada a carvão ativado granular com biofilme. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, M. G. Produtividade, idade e qualidade da madeira de Eucalyptus destinada à produção de polpa celulósica branqueada. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2011.

SILVEIRA, R. F. de M. Atividades biológicas de xilana de sabugo de milho. 2010. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2010.

SINGH, P.; THAKUR, I. S. Colour removal of anaerobically treated pulp and paper mill effluent by microorganisms in two steps bioreactor. Bioresource technology, v. 97, n. 2, p. 218-223, 2006.

SJÖSTRÖM. E. Wood Chemistry fundamentals and applications. New York. Academic Press. 223 p. 1981.

SUN, R. C.; TOMKINSON, J. Comparative study of organic solvent and water-soluble lipophilics extractives from whear straw I: yield and chemical composition. Journal of Wood Science, v. 49, p. 47-52, 2003.

THOMPSON, G. et al. The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. Bioresource technology, v. 77, n. 3, p. 275-286, 2001.

VAN HAANDEL, A. C.; VAN DER LUBBE, J. Handbook biological wastewater treatment: design and optimization of activate sludge systems. Londres: IWA Publishing, 2012.

VANZETTO, S. C. Controle do Tratamento de efluentes de indústria de celulose kraft e estudos de viabilidade de tratamento destes por MBBR. 2012. Dissertação (mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

VON SPERLING, M. Lagoas de estabilização: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. DESA-UFMG, 134 p., 2006

WENGER, K.F. Forestry handbook. Wiley-IEEE. ed.2, 1360 p., 1984.

WONG, S. S. et al. Treatment of pulp and paper mill wastewater by polyacrylamide (PAM) in polymer induced flocculation. Journal of Hazardous Materials, v. 135, n. 1-3, p. 378-388, 2006.

WU, J.; XIAO, Y. Z.; YU, H. Q. Degradation of lignin in pulp mill wastewaters by white-rot fungi on biofilm. Bioresource Technology, v. 96, n. 12, p. 1357-1363, 2005.

XAVIER, C. R. Influencia de la tecnología de tratamiento en la eliminación de fitoesteroles contenidos en efluentes de celulosa kraft y en la toxicidad de estos compuestos en organismos acuáticos. Tese de Doutorado, Centro de Ciências Ambientais – EULA – Chile, Universidade de Concepción – Chile 2006.

YOGALAKSHMI, K. N. et al. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. Chemosphere, Oxford, v. 286, p. 131824, 2022.