

Pós-tratamento de efluente cervejeiro com coagulantes naturais

Post-treatment effluent brewer with natural coagulants

Claudia S. C. de Arruda¹, Isabela G. Ortiz², Renan P. Pacheco³, Rodrigo F. Bueno⁴

Resumo. Na indústria cervejeira a utilização de água de boa qualidade determina a característica do produto e o sabor da cerveja fabricada. O consumo total de água no processo varia entre 4 e 10 hL água para 1 hL bebida, gerando efluentes com alta matéria orgânica e subprodutos da cadeia produtiva, com isso o reuso é uma alternativa de minimizar os gastos nas indústrias de bebidas. A água pode ser utilizada para vários fins como lavagem de pisos, ou no processo como parte do resfriamento e higienização de equipamentos, porém, para o efluente ser reutilizado é necessário um tratamento avançado. Este trabalho buscou avaliar o tratamento de efluentes de cervejarias industriais utilizando um processo de lodos ativados na modalidade de batelada (SBR) e com leito móvel (MBBR) seguido de pós-tratamento usando sementes de Moringa oleífera como coagulante natural visando o possível reuso industrial; o sistema passa a ser operado com base nas características do efluente. Com base nos dados obtidos nas análises laboratoriais, a etapa IV (Reator + Extrato de Sementes) apresentou uma alta eficiência nos parâmetros como, DBO (96,3%) e nitrogênio (95,94%), porém, não se adequou em relação à remoção de fosfato, obtendo 72,8% de fósforo total, sendo necessário um tempo maior para tratamento. Entretanto o uso do extrato de Moringa para a clarificação de água foi comprovado nos resultados de cor e turbidez durante a etapa do pós-tratamento. Além disso, para o reuso em usos gerais o processo atendeu 90% dos valores exigidos pelas legislações aplicadas ao assunto.

Palavras chave: Tratamento de efluentes cervejeiros, reuso, moringa oleífera, SBR.

Abstract. *In the brewery industry the use of water of good quality determines the characteristic of the product and the taste of produced beer, the total consumption of water in the process varies between 4 and 10 hL for 1 hL of beer, generating effluent with high organic material and sub products of the production chain, so reuse it is a way to minimize the wasting of brewery industries. The water can be reused in general application, such as installations washing, and the process for the cooling and cleaning of equipment, however for the effluent reuse advanced treatment is required. This study sought to assess the treatment of effluents of industrial breweries using an activated sludge process in batch mode (SBR) and with mobile bed (MBBR) followed by post-treatment using Moringa seeds oleífera as natural coagulant for industrial reuse; the system will be operated on the basis of the effluent characteristics. On the basis of data*

¹ Graduação em engenharia ambiental pelo Centro Universitário Senac. Email: {claudia.scarruda@gmail.com}

² Graduação em engenharia ambiental pelo Centro Universitário Senac. Email: {renan.pacheco@hotmail.com}

³ Graduação em engenharia ambiental pelo Centro Universitário Senac. Email: {isabela.gotirz@hotmail.com}

⁴ Doutor em engenharia civil pela EPUSP, professor pesquisador do Centro Universitário Senac Av. Eusébio Stevaux, 823 – Santo Amaro, São Paulo – SP. e-mail: {rodrigo.fbueno@sp.senac.br}

obtained in laboratory tests, the step IV (Reactor + seed Extract) showed a high efficiency in parameters such as, for example, DBO (96.3%) and nitrogen (95.94%). However, it didn't fit to phosphate removal and obtained 72.8% of total phosphorus, requiring a longer treatment time. But the use of Moringa extract for water clarification has been proven on the color and turbidity results during the post-treatment step. In addition, for reuse in general uses the process answers for 90% of the values required by the legislation applied to the subject.

Key words: *Breweries effluent treatment, reuse, moringa oleífera, SBR.*

1. Introdução

A água é um recurso natural finito e de extrema importância para a manutenção da vida na Terra, seja como componente bioquímico de seres vivos, como meio de vida de várias espécies, como elemento representativo de valores sociais e culturais, além de importante fator de produção no desenvolvimento de diversas atividades econômicas. Atualmente as atividades antrópicas causam a poluição de mananciais e das águas subterrâneas, o que acarreta sérios danos em relação à oferta e demanda de água (DI BERNARDO, 2000).

Nesse sentido o reuso, a gestão da oferta e da demanda, a redução de perdas e minimização da geração/tratamento de efluentes constituem em associação às práticas conservacionistas, as palavras-chave mais importantes em termos de gestão de recursos hídricos e de redução da poluição (MOGAMI, 2011). Dentro deste âmbito de tratamento e reuso, a indústria cervejeira se caracteriza por altos índices de utilização/captação de água (as grandes cervejarias utilizam quatro litros de água para um litro de cerveja) e altos volumes de geração de efluentes industriais, implicando assim a necessidade de tratamentos de seus efluentes para o reuso interno (FERREIRA, 2011).

A fabricação de cerveja industrial é considerada uma atividade potencialmente poluidora, porque contém inúmeros resíduos como bagaço de malte e cevada gerando efluentes com muita matéria orgânica, fazendo com que haja a necessidade de tratamentos específicos e com alta eficiência (PAIVA, 2011). Os tratamentos de remoção de matéria orgânica variam de físico-químicos a biológicos sendo o último sistema o mais utilizado, por ser um método eficiente e relativamente de baixo custo para remover carga orgânica. Os processos de remoção biológica variam conforme a atividade industrial e as características desejadas (JORDÃO, 2005). Dentro destes processos destacamos o reator biológico de leito móvel (MBBR) que vem sendo muito estudado desde a década de 80, pois possui um alto desempenho de remoção da carga orgânica. Esse tratamento utiliza um material suporte entre 1 a 2 cm de comprimento adicionadas ao reator para que os microrganismos se desenvolvam nas superfícies delas criando um biofilme, fazendo com que os microrganismos tenham contato com todo o efluente, gerando uma maior eficiência do sistema quanto à remoção de matéria orgânica (VON SPERLING, 1997; JORDÃO, 2005). No entanto, mesmo que a indústria siga os padrões de lançamento é vantajoso haver mais uma etapa de pós-tratamento do efluente para o mesmo ser reutilizado. Na indústria cervejeira é possível fazer o reuso nas caldeiras e torres de resfriamento, pois a água para resfriar circuitos internos não precisa ser tão fina, além de poder ser utilizada para a limpeza de pisos fora do espaço de produção, irrigação, lavagem de caminhões e água de descarga de sanitários (RESENDE, 2012). O pós-tratamento geralmente utiliza coagulante como, por exemplo, cloreto férrico, sulfato de alumínio, entre outros para gerar a coagulação na remoção de sedimentos que ainda se encontram presentes na água. Porém, não é biodegradável e em altas concentrações pode gerar problemas à saúde. Com isso, muitos estudos estão buscando um novo coagulante que não seja tão tóxico, utilizando sementes de *Moringa Oleífera*, um componente atóxico e biodegradável para a coagulação natural na purificação de água, a

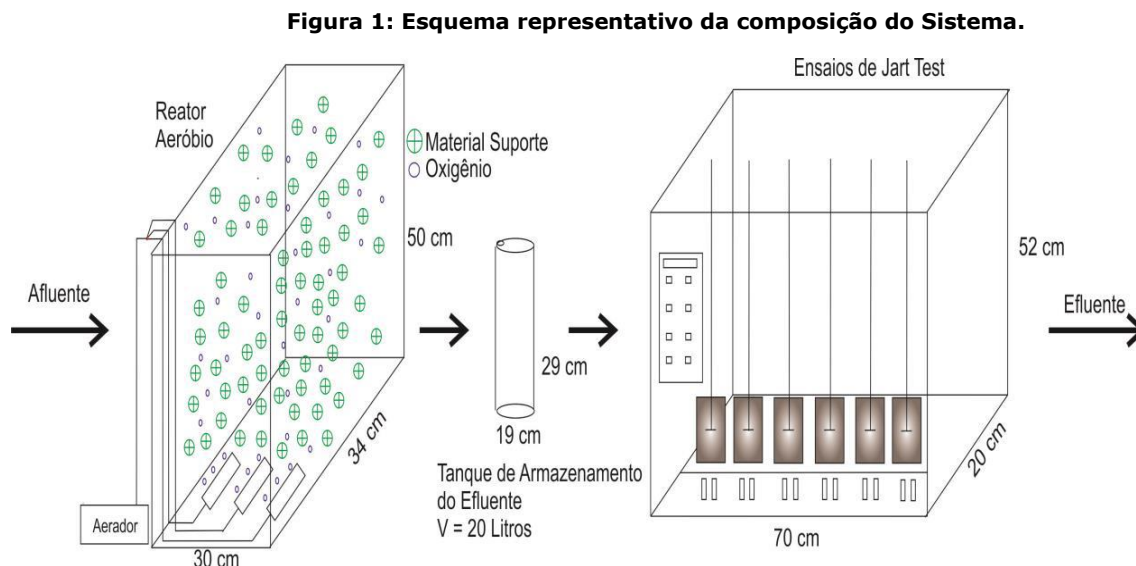
um custo de apenas uma fração do tratamento químico convencional. Além disso, o processo de coagulação é equivalente ao do sulfato (KOCHENBORGER,2012).

Desta forma este trabalho visa contribuir para a aplicabilidade dos conceitos da área de Engenharia Ambiental, utilizando-se para o pós-tratamento do efluente da indústria cervejeira uma semente natural atóxica e biodegradável disponível no Brasil com baixo custo em relação aos tratamentos químicos. A análise de suas possibilidades de aplicação e potencialidades no sistema implantado podem permitir novos avanços na utilização dessa semente para diversos objetivos.

2. Materiais e Métodos

2.1. Descrição geral do experimento

Para avaliar o tratamento de efluentes de cerveja o estudo foi desenvolvido por meio de experimento em escala piloto no laboratório de Química do Centro Universitário Senac. O efluente da indústria cervejeira que alimentou o sistema de tratamento foi proveniente de uma Indústria multinacional do ramo de bebidas, localizada no município de Jacareí – São Paulo. Na indústria o efluente bruto passa por um tratamento preliminar constituído de gradeamento para remoção de sólidos grosseiros e nesse ponto recebe uma contribuição de esgoto sanitário, o que corresponde em média a 10% do volume do efluente industrial. O sistema piloto foi operado em bateladas sequenciais com troca volumétrica de 50% do volume útil do reator, correspondendo a 20 litros de efluente industrial por batelada. Para acelerar o processo e aclimatação do lodo biológico foi utilizado um inóculo proveniente de uma ETE operada sob regime de lodo ativado no Centro Tecnológico de Hidráulica da USP. O sistema piloto foi composto basicamente de um reator construído em acrílico ao qual foram adicionados o material suporte, seguido de um sistema de armazenamento e um equipamento de Jar Test para a realização do pós-tratamento. A Figura 1 mostra a composição do sistema piloto e pós-tratamento.



2.2. Material suporte

Os meios suportes utilizados no experimento foram anéis plásticos do tipo Kaldnes® K1 de área superficial específica estimada em 310 m²/m³ e ocuparam um volume de 50% do volume útil do reator, isso porque com esta razão de recheio é possível operar o sistema sem perdas da hidrodinâmica das biomédias.

2.3. Oxigênio dissolvido

Com base na revisão de literatura a concentração de OD foi mantida na faixa de 2,0 a 3,0 mgO₂/L, o que garante a demanda necessária de OD para a manutenção do sistema. A aeração era ajustada diariamente por meio de um medidor de oxigênio portátil.

2.4. Construção do sistema piloto

O sistema experimental foi instalado no Laboratório de Química do SENAC. O reator foi construído em acrílico nas seguintes dimensões: 0,34 m de largura, 0,30 m de comprimento e 0,50 m de altura, totalizando um volume de 51 litros e volume útil de 40 litros. O sistema de aeração foi feito por meio de um compressor de aquário e pedras porosas (25 cm x 5 cm) instaladas no fundo do reator, o que garantiu uma boa mistura do lodo biológico. O sistema de pós-tratamento foi feito por meio de um Jar Test da marca Nova Ética.

2.5. Metodologia de preparo da semente de moringa

As sementes de moringa, utilizadas como coagulantes naturais, foram doadas pelo Professor Tomas Herrera Vasconcelos da Faculdade Cruzeiro do Sul. As sementes foram descascadas manualmente e transformadas em pó por um sistema de trituração (moedor), uma vez que é necessário se obter diâmetros baixos do coagulante para a utilização no sistema. O pó da semente triturada, misturado à água, libera proteínas solúveis, agindo assim como um polieletrólito catiônico natural durante o tratamento, o tratamento da semente foi baseado em (SILVIA,2001). Para a preparação da solução foram realizados vários testes com pesos diversificados para cada litro de efluente.

2.6. Ensaio de Jar Test para definição das dosagens de coagulante

Os ensaios de coagulação com a semente de Moringa, foram realizados em um Jar Test convencional, equipado com 3 jarros, com volume de 2 litros cada e agitação superior à 300 rpm promovendo a mistura rápida do coagulante com o efluente por 2 minutos e gradiente de 50 rpm para a floculação por 20 minutos. Os testes foram feitos com a adição do coagulante a base de moringa em dois litros de efluente cervejeiro oriundo do processo de lodos ativados (sem o lodo do tanque de aeração). As dosagens testadas de coagulante foram de 100, 250, 350, 450 e 550 mg de moringa/L com base em (SANTOS,2001). Após definição da melhor dosagem a mesma foi dosada diretamente no tanque de aeração, pelo fato da ocorrência de uma zona de alta mistura o que facilita os aspectos construtivos e econômicos das estações em escala real.

2.7. Condições de operação

Para avaliação do comportamento do sistema piloto e do pós-tratamento, o estudo foi dividido em IV etapas. Na primeira etapa foi conduzida a aclimação do lodo biológico ao efluente cervejeiro, afim de se adaptar o processo as condições e as estratégias adotadas no trabalho. Após o sistema entrar em regime foi dado início a segunda etapa onde foi realizado a avaliação do sistema de tratamento em termos de remoção de

material orgânico e nutrientes. Ao término da segunda etapa, o efluente tratado foi levado aos ensaios de Jar test onde foi avaliado diferentes dosagens de coagulante (Etapa III). Após a escolha da melhor dosagem tendo em vista as características do efluente tratado pós Jar test, foi realizada a etapa IV que consistiu na avaliação do sistema piloto com o emprego do coagulante adicionado diretamente no reator.

2.8. Metodologia de ensaios laboratoriais

As análises de caracterização do efluente bem como as de acompanhamento do processo foram realizadas no Laboratório de Química do Centro Universitário Senac. As metodologias analíticas empregadas obedeceram a 21ª Edição do Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, da APHA / AWWA / WEF.

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização do efluente industrial

Durante a fase de aclimação foi realizada a caracterização do efluente cervejeiro, visando verificar suas características e as possíveis necessidades de correção como a relação DBO:N:P e pH. A Tabela 1 mostra a caracterização do efluente cervejeiro utilizado nesse estudo.

Tabela 1: Caracterização do Afluente de alimentação.

Variáveis	Resultado	Unidade
Temperatura	19,7	°C
pH	5,2	-
Oxigênio Dissolvido	4,1	mgO ₂ /L
DQO total	4540	mgO ₂ /L
DBO 5,20	1048	mgO ₂ /L
N-NH ₃ ⁻	12,6	mgN/L
N-NO ₂ ⁻	0,8	mgN/L
N-NO ₃ ⁻	8,4	mgN/L
P-PO ₄ total	180	mgP/L
P-PO ₄ solúvel	128	mgP/L
Cor Aparente	500	mgPt-Co/L
Cor Verdadeira	250	mgPt-Co/L
Turbidez	124	NTU
Sólidos Sedimentáveis	0,5	mg/L
Sólidos Totais	1110	mg/L
Sólidos Suspensos Totais	560	mg/L
Sólidos Suspensos Voláteis	210	mg/L
Sólidos Suspensos Fixos	350	mg/L
Sólidos Dissolvidos Totais	550	mg/L

Com base na tabela 1 e em uma breve comparação com alguns autores como (KOCHENBORGER, 2012) e (VON SPERLING, 2005), a caracterização do efluente cervejeiro se enquadra nos valores esperados para uma indústria produtora de cerveja, como exemplo disso podemos citar a taxa dos Sólidos em Suspensão, que segundo os autores citados deve estar compreendida numa faixa de valor de aproximadamente 100 – 800 mg/L; outro parâmetro é o valor de Nitrogênio Total, onde o mesmo deve estar compreendido na faixa de até 24,3 mg/L. Em relação às possíveis correções, o pH é o parâmetro mais indicado para o mesmo, neste caso foi adicionado 0,0467 L de Hidróxido de Sódio (NaOH) para cada litro de efluente cervejeiro visando atender a faixa ideal entre 6,5 – 8,0 para que os microrganismos não sejam afetados. Para a relação DBO: N:P, a literatura indica que a mesma em tratamento aeróbio deve estar em concentração de 100:5:1, com base nas análises e resultados é possível inferir que a demanda

necessária de N e P no tratamento cervejeiro está de acordo com a relação necessária, uma vez que existe uma contribuição de esgoto sanitário que supre a necessidade de N. Com base na tabela e em uma breve comparação com alguns autores como (KOCHENBORGER,2012) e (VON SPERLING,2005), a caracterização do efluente cervejeiro se enquadra nos valores esperados para uma indústria produtora de cerveja, como exemplo disso podemos citar a taxa dos Sólidos em Suspensão, que segundo os autores citados deve estar compreendida numa faixa de valor de aproximadamente 100 – 800 mg/L; outro parâmetro é o valor de Nitrogênio Total, onde o mesmo deve estar compreendido na faixa de até 24,3 mg/L.

3.2. Etapa II: tratamento aeróbio (MBBR)

3.2.1. DQO e DBO

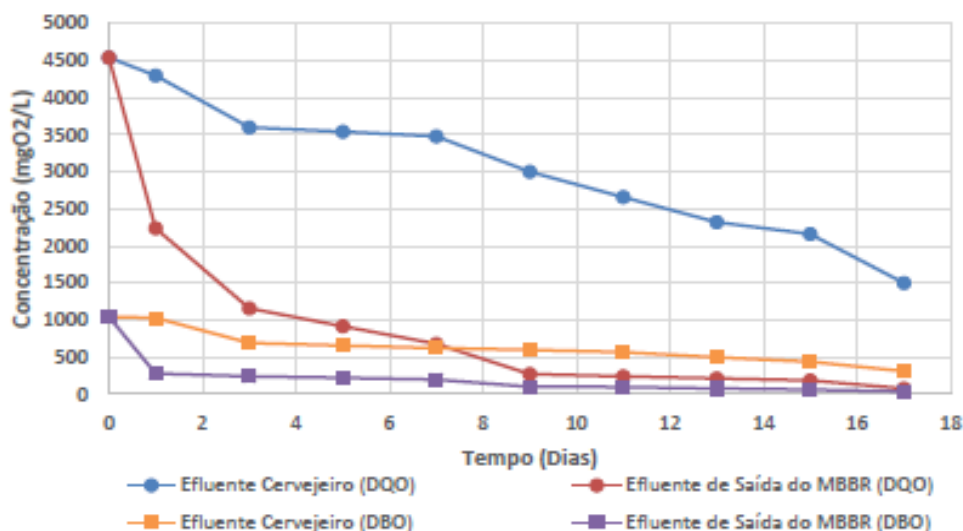
Em relação à matéria orgânica, é possível observar na Tabela 2, que o sistema de MBBR resultou um efluente de saída do MBBR com altas concentrações médias de DQO e DBO, $666 \pm 518,9$ mgO₂/L e $147 \pm 78,5$ mgO₂/L, sendo que estes valores dependendo do desvio padrão podem ou não atender aos padrões, observa-se que os pontos de mínimo apresentados pelos parâmetros são os mesmo de saída, 80,0 para DQO e 40,0 para DBO, que implica no atendimento da Resolução 430/2011 do CONAMA que estabelece valor orientador de 120 mg/L de DBO. No caso do reuso industrial a mesma estaria acima do recomendado pela USEPA,1992 que estabelece valor de 25 mgO₂/L. Como apresentado na Tabela 2 o efluente cervejeiro passou por processo anaeróbio de tratamento enquanto estava estocado para a aplicação da pesquisa, diminuindo sua carga orgânica média (3110 ± 782 mgO₂/L).

Tabela 2: Valores médios de DQO e DBO no Efluente Cervejeiro e Efluente de Saída do MBBR da Etapa II.

Variável	DQO		DBO	
	Efluente Cervejeiro	Saída MBBR	Efluente Cervejeiro	Saída MBBR
Média (mgO ₂ /L)	3110	666	647	147
Mínimo (mgO ₂ /L)	1500	80	310	40
Máximo (mgO ₂ /L)	4540	2240	1048	281
C.V. (%)	25,1	77,9	26	53,4
Desvio Padrão	782	518,9	168,1	78,5

A Figura 2 mostra os resultados da série histórica das concentrações de DQO e DBO, obtidos durante o estudo. Com base nos dados calcularam-se as eficiências de remoção de DQO e DBO durante o experimento. O reator de MBBR obteve uma eficiência 98,3% em DQO e 96,18% de DBO, valor muito próximo ao encontrado na literatura, demonstrando uma alta eficiência do tratamento. Resultados semelhantes foram encontrados (RODRIGUES, et al,2013) operaram um reator de MBBR em quatro fases com tempos variados de TDHs, seus estudos obtiveram uma eficiência de remoção de DQO de 71,2% na Fase 1, 86,5% na Fase 2, 83,9% na Fase 3 e 73,4% na Fase 4. Todavia (RUSTEN, et al,1994) ao tratar efluentes com altas taxas de DQO, 1250 mg/L, em sistema triplo de MBBR e TDHs de 1,9 horas não obtiveram grandes eficiências de remoção, 38%, porém isto se deve aos baixos índices de oxigênio usados. Isso indica que o reator de MBBR apresenta uma eficiência muito maior que os outros tipos de tratamento, aeróbio e anaeróbio, em questão de remoção de carga orgânica, porém mesmo com uma alta eficiência de remoção o efluente de saída do MBBR não está de acordo com as legislações de reuso, o que justifica um pós-tratamento.

Figura 2: Série temporal da concentração da relação DQO e DBO no sistema de tratamento.



3.2.2. Série nitrogenada

A Tabela 3 apresenta os valores de amônia e nitrato obtidos durante o estudo. Nota-se um valor médio de $4,8 \pm 2,2$ mgN/L (amônia) no efluente, este valor médio atende a Resolução CONAMA 357/05 que estabelece valor inferior a 5,6 mgN/L para $pH 7,5 < pH \leq 8,0$, (pH médio do efluente 7,7) para lançamento em corpos hídricos classe 3, porém se analisado seu valor mínimo na tabela 16 que é o mesmo valor de saída do efluente, 0,6 mgN/L, o mesmo estará atendendo o padrão de lançamento em corpos hídricos classe 1 segundo a Resolução CONAMA 357/05 que estabelece valor orientador menor que 2 mgN/L para $pH 7,5 < pH \leq 8,0$, (pH médio do efluente 7,7) e atenderia também o valor desejado pela USEPA, 1992 para reuso industrial que é de 1 mgN/L em caldeiras de resfriamento. Para a NBR 13.969/97 a mesma não estabelece valor orientador para reuso de água.

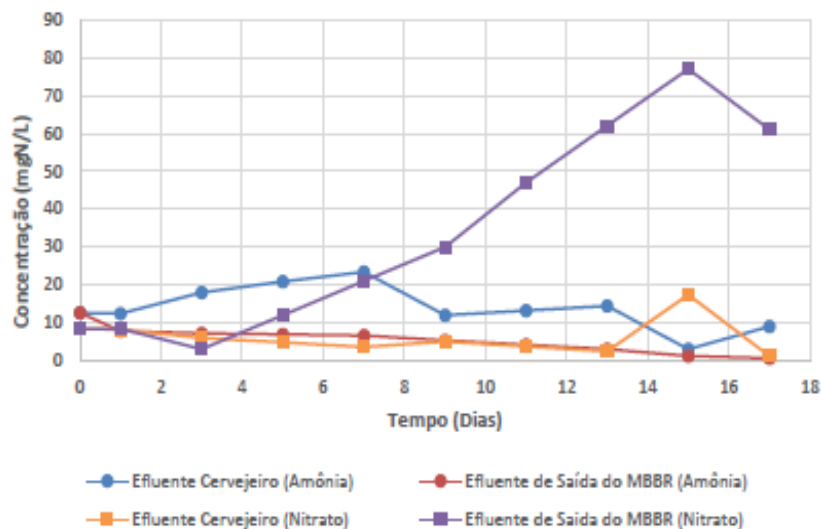
Tabela 3: Valores médios da Série Nitrogenada no Efluente Cervejeiro e Efluente de Saída do MBBR da Etapa II.

Variável	$N-NH_3^+$		$N-NO_3^-$	
	Efluente Cervejeiro	Saída do MBBR	Efluente Cervejeiro	Saída do MBBR
Média (mgN/L)	13,9	4,8	6,0	35,7
Mínimo (mgN/L)	3	0,6	1,2	3
Máximo (mgN/L)	23,4	7,8	17,4	77
C.V. (%)	30,2	45,8	53,3	64,7
Desvio Padrão	4,2	2,2	3,2	23,1

Em relação ao Nitrato, a Tabela 3 mostra um valor médio de $35,7 \pm 23,1$ mgN/L, o que evidencia uma boa nitrificação no sistema da Amônia e um acúmulo de Nitrato, uma vez que não ocorre a desnitrificação. No entanto, essa concentração no efluente é considerada muito alta, o que impossibilita o lançamento de efluente em determinados corpos d'água. Conforme mostra a Resolução CONAMA 357/05 que estabelece valor orientador de 10 mgN/L, uma maneira de se adequar a esse padrão seria acrescentar uma fase anóxica no ciclo de operação do sistema, o qual possibilitaria o desenvolvimento do processo de desnitrificação, onde o NO_3 é reduzido a N_2 e retirado

do sistema por volatilização. No entanto, para uma água de reuso essa etapa poderia ser negligenciada sendo que na NBR 13.969/97 e USEPA as mesmas não estabelecem valor orientador para reuso de água. A Figura 3 mostra os resultados da série histórica das concentrações de Amônia e Nitrato, obtidas durante o estudo.

Figura 3: Série temporal da concentração da série nitrogenada no sistema de tratamento.



Com base nos dados calcularam-se as eficiências de remoção dos parâmetros durante o experimento. O reator de MBBR obteve uma eficiência 95,24% em Amônia e nenhuma redução em Nitrato, estes valores só reforçam a necessidade de uma fase anóxica para a realização da desnitrificação, ou a aplicação de pós-tratamento para o atendimento da legislação de lançamento e reuso.

3.2.3. Fosfato

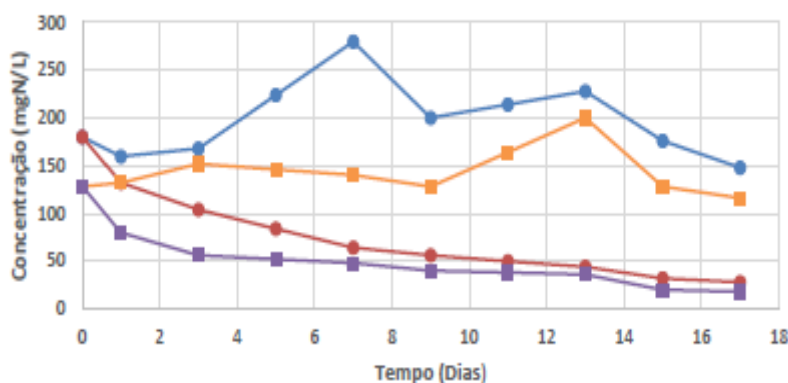
A Tabela 4 mostra os resultados das análises de fosfato. Notam-se concentrações relativamente altas durante todo o experimento com valores médios de $66 \pm 27,1$ mgP/L para o fosfato total e de $43,0 \pm 14,1$ mgP/L para o fosfato solúvel. Esses valores são restritivos, impossibilitando o lançamento de efluente em determinados corpos d'água e reuso. Segundo o CONAMA 357/05 e a USEPA, 1992 os valores de $21,5 \pm 8,8$ mgP/L para Fósforo Total e $14,0 \pm 4,6$ mgP/L para Fósforo Solúvel estariam fora dos padrões aceitáveis para lançamento em corpos hídricos classe 1 e reuso industrial, que possuem valor orientador de 0,1 mgP/L e 1 mgP/L, implicando assim em uma etapa de pós-tratamento para a sua remoção. Estudos aplicados de pós-tratamento para remoção de fosfato indicam altas taxas de degradação do nutriente viabilizando assim seu lançamento ou reuso.

Tabela 4: Valores médios de Fosfato no Efluente Cervejeiro e Efluente de Saída do MBBR da Etapa II.

Variável	P-PO ₄ Total		P-PO ₄ Solúvel	
	Efluente Cervejeiro	Saída do MBBR	Efluente Cervejeiro	Saída do MBBR
Média (mgP/L)	197,8	66	143,4	43
Mínimo (mgP/L)	148	28	116	18
Máximo (mgP/L)	280	132	200	80
C.V. (%)	15,9	41	12,3	32,8
Desvio Padrão	31,4	27,1	17,7	14,1

Como apresentado na Tabela 4 o efluente cervejeiro passou por processo anaeróbio de tratamento enquanto estava estocado para a aplicação da pesquisa, causando assim uma redução do Fosfato Total ($197,8 \pm 31,4$ mgP/L) e Fosfato Solúvel ($143,4 \pm 17,7$ mgP/L). A Figura 4 mostra os resultados da série histórica das concentrações de Fosfato Total e Solúvel, obtidas durante o estudo. Com base nos dados calcularam-se as eficiências de remoção dos parâmetros durante o experimento. O reator de MBBR obteve uma eficiência 84,44% para o Fosfato Total e 85,94% para o Fosfato Solúvel, indicando uma alta taxa de degradabilidade mesmo não atendendo as legislações.

Figura 4: Série temporal da concentração de Fosfato no sistema de tratamento.



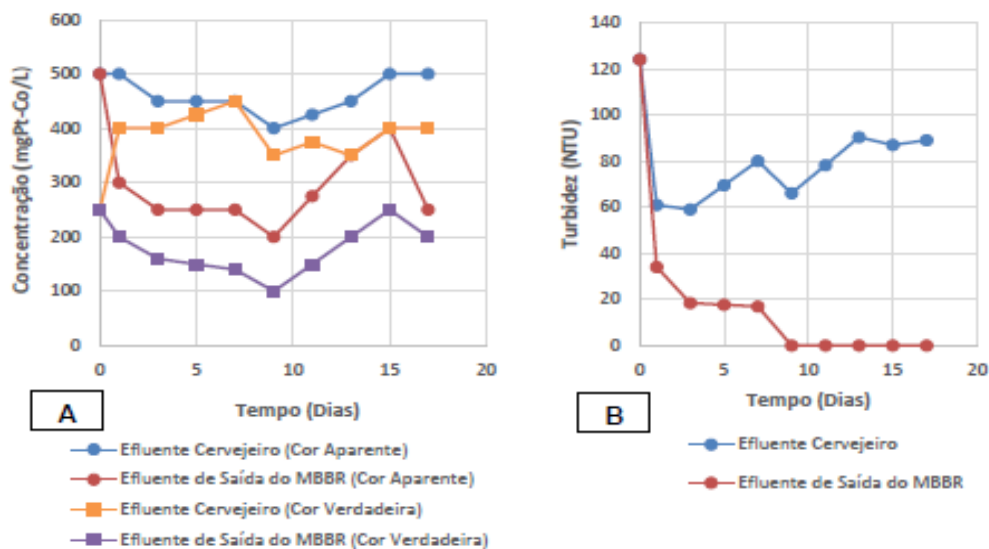
3.2.4. Cor e turbidez

A Tabela 5 indica os valores médios de concentração de Cor Aparente e Verdadeira e Turbidez. Em relação à Cor os parâmetros analisados durante a pesquisa obtiveram valores médios de $280,7 \pm 46,3$ mgPt-Co/L para Cor Aparente e $172 \pm 35,8$ mgPt-Co/L para Cor Verdadeira, o que indica que a mesma estava saindo com uma coloração muito forte do reator de MBBR, não atendendo as legislações como a Resolução CONAMA 357/05 para lançamento em corpos hídricos com valor orientador de 75 mgPt-Co/L; para o reuso não há valores orientadores para o mesmo, porém o ideal é reutilizar águas de coloração incolor para não gerar possíveis problemas. Para este parâmetro o ideal é a aplicação de um pós-tratamento físico-químico para diminuir suas concentrações.

No caso da turbidez, Tabela 5, o mesmo apresentou valor médio de $10,9 \pm 10,8$ NTU, atendendo a todas as legislações vigente de reuso e lançamento. No caso do CONAMA 357/05 para lançamentos em corpos hídricos classe 1 o valor orientador é de 100 NTU, no caso da USEPA,1992 o valor orientador é de 50 NTU para reuso em caldeiras de resfriamento. No caso da NBR 13.969/97, 5 NTU, a mesma é atendida, porém não com seu valor médio e sim com sua concentração de saída do reator que é 0,02 NTU a mesma concentração da água destilada. A Figura 5 mostra os resultados da série

histórica das concentrações de Cor Aparente e Verdadeira, obtidas durante o estudo, obtendo-se eficiências de remoção de 50% para Cor Aparente e 20% para Cor Verdadeira, valores muito abaixo dos verificados na literatura, justificando a necessidade de um pós-tratamento para a redução de sólidos coloidais, que podem apresentar altas taxas de degradação com a desestabilização das partículas por coagulantes.

Figura 5: Série temporal da concentração de Cor (A) e Turbidez (B) no sistema de tratamento.



3.3. Etapa III: pós-tratamento (ensaios de coagulação)

Foram avaliadas diferentes concentrações de coagulantes que variou de 100 a 500 mg/L. A concentração de 250 mg/L resultou em um efluente muito clarificado, com turbidez de 0,02 NTU e cor 40 mgPt-Co/L como apresenta a Tabela 6.

Tabela 6: Resultados das análises dos ensaios de coagulação.

Parâmetros	Efluente do MBBR	Dosagens analisada					Unidade
		100	250	350	450	550	
Cor Aparente	250	60	50	60	50	70	mgPt-Co/L
Cor Verdadeira	200	50	40	50	40	60	mgPt-Co/L
DQO	80	120	130	220	310	480	mgO ₂ /L
DBO	40	60	75	110	155	240	mgO ₂ /L
OD	3,8	5,79	6,18	5,37	5,56	4,99	mgO ₂ /L
Turbidez	0,02	0,02	0,02	0,77	0,02	1,5	NTU
Alcalinidade	150	150	145	140	145	135	mgCaCO ₃ /L
N-NH ₃ ⁻	0,6	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	mgN/L
N-NO ₂ ⁻	0,84	0,86	0,84	0,85	0,85	0,85	mgN/L
N-NO ₃ ⁻	61	59	60	61	61	61	mgN/L
P-PO ₄ total	28	28	28	28	29	28	mgPL
P-PO ₄ solúvel	18	18	19	18	18	18	mgPL
pH	7,5	7,5	7	6,5	7,0	6,0	—
Temperatura	24	23	23	23	23	23	°C
ST	540	220	190	880	1290	1360	mg/L
SST	350	60	50	90	110	310	mg/L
SSV	300	30	40	50	64	89	mg/L
SSF	50	30	10	40	46	221	mg/L
SSD	190	160	140	790	1180	1050	mg/L

Um dos parâmetros que obtiveram uma grande eficiência de remoção foi a cor, aproximadamente 80% na concentração 250, onde a mesma passou a atender a

legislação CONAMA 357/05 para lançamento em corpos hídricos em classe 2 que é 75 mgPt-Co/L; em relação ao reuso não há qualquer legislação que imponha valores para este parâmetro estabelecendo então o valor orientador do CONAMA. Esta remoção de cor é possível, uma vez que o extrato de semente desestabiliza os sólidos presentes no efluente, causando o seu decaimento em concentração, sendo que os principais itens afetados por este parâmetro são as partículas coloidais solúveis. Em relação à turbidez, os resultados mostram uma redução significativa com valores <0,02 NTU. Esse valor atende com folga a NBR 13.969/97 que estabelece o valor 5 NTU para reuso em classe 1 como a resolução CONAMA 357/05 que estabelece turbidez de 40 e 100 NTU para lançamento em corpos hídricos classe 1 e 2 e a USEPA (1992) para reuso em caldeiras com valor de 50 NTU.

No que se refere à matéria orgânica, a mesma apresenta um leve aumento a medida que usamos concentrações maiores de extrato de semente, inviabilizando a utilização de grandes concentrações, mas para a concentração utilizada a mesma atende aos padrões de lançamento da Resolução CONAMA 430/2011 que complementa e altera a 357/2005 que é de <120 mg/L, em relação a NBR 13.969/97 a mesma não estabelece valores. Entretanto, a adição do coagulante não teve impacto em relação a nutrientes e fósforo. Todavia estudos como de (RICO, *et al*, 2007) indicam uma possível redução dos nutrientes, porém para que o mesmo ocorra é necessário um tempo maior de estudo, aproximadamente 16 horas de pós-tratamento ou uma aplicação já na fase de tratamento, foco de análise da etapa IV.

3.4. Etapa IV: verificação de um sistema mais compacto

3.4.1. DQO e DBO

Em relação à DQO e DBO, a Tabela 7 e a Figura 6, mostram uma comparação entre os valores médios encontrados nas Etapa II e IV para a DQO, que durante o tratamento da etapa II apresentou valor médio de $666,3 \pm 518,9$ mgO₂/L com eficiência de remoção de 98,3%, enquanto na etapa IV obteve-se valor médio de $399,8 \pm 271$ mgO₂/L com eficiência de 96,3%; estes valores diferenciados são características da própria mudança do efluente cervejeiro, ou seja, o valor de concentração de entrada é menor na etapa IV causando uma menor eficiência porém se analisados o valor final de saída do efluente já tratado pelo pós-tratamento (Etapa II + Etapa III) e da saída do Etapa IV, 130 e 55 mgO₂/L, a utilização do extrato das sementes dentro da fase inicial do tratamento é mais indicada para a DQO, visto que com sua utilização é possível obter os melhores valores.

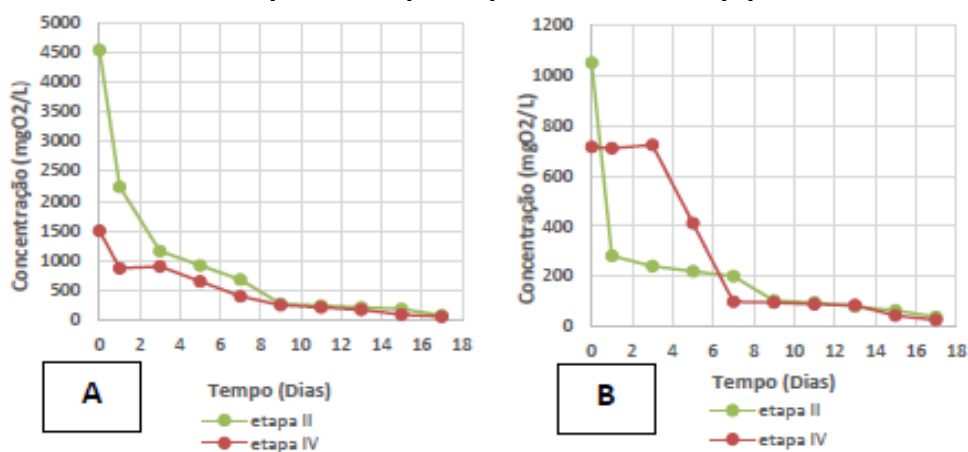
No caso da DBO, a Figura 6 mostra a variação das etapas em concentração. A etapa II variou de 281 – 40 mgO₂/L enquanto a etapa IV variou de 722,1 – 27,5 mgO₂/L, essa diferenciação ocorre por causa da introdução do extrato de semente, que aumenta significativamente os valores máximos de DBO, porém como mostra a Tabela 7 as duas etapas independentes da concentração apresentaram eficiências idênticas de 96,1% e valores de saída melhores para a etapa IV, 27,5 mgO₂/L, indicando que mesmo com o aumento da concentração da matéria orgânica dentro do reator após uma pequena variação de tempo, a mesma estabiliza-se e apresentou altas taxas de degradação. Segundo as legislações referentes ao lançamento e ao reuso, as concentrações estão de acordo com a Resolução CONAMA 357/05 e 450/11 para lançamento em corpos hídricos enquanto em relação à recomendação da USEPA para o reuso o valor esteja 2,5 mgO₂/L acima.

Tabela 7: Valores médios de DQO e DBO para a Etapa II e Etapa IV.

Variável	DQO		DBO	
	Etapa II	Etapa IV	Etapa II	Etapa IV
Média (mgO ₂ /L)	666,3	399,8	146,6	254,3
Mínimo (mgO ₂ /L)	80	55	40	27,5
Máximo (mgO ₂ /L)	2240	869	281,5	722,1
C.V. (%)	77,9	67,8	53,5	94,3
Desvio Padrão	518,9	271	78,5	239,9

Para a relação DQO e DBO a introdução do extrato de sementes direto na etapa do tratamento pelo reator é a mais indicada, uma vez que o efluente estará apresentando os melhores valores de saída para esta relação e diminuindo os valores econômicos visto que não é necessária a construção da etapa de pós-tratamento.

Figura 6: Comparação entre as Etapas II e IV para o parâmetro de DQO (A) e Comparação entre as Etapas II e IV para o parâmetro de DBO (B).



3.4.2. Série nitrogenada

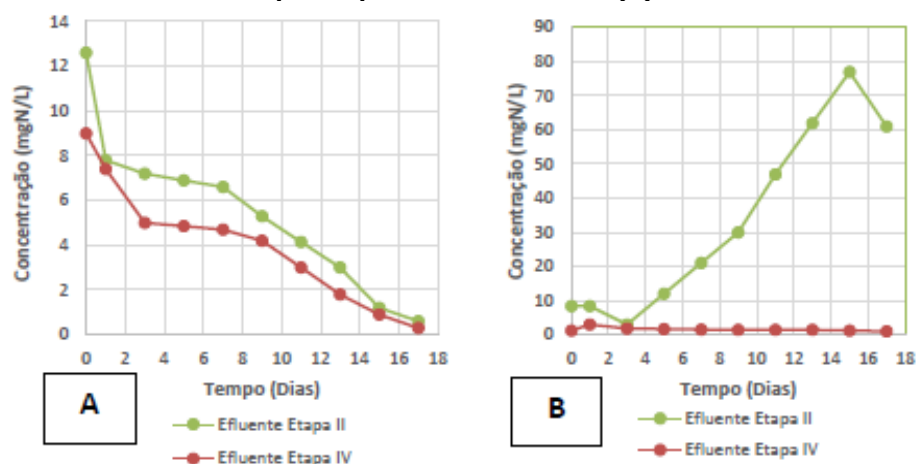
Em relação à remoção de nutrientes de nitrogênio, a introdução do extrato de semente de moringa dentro da fase de tratamento mostrou-se altamente recomendada, pois durante o tempo de estudo da etapa IV verificou-se a remoção de Nitrato (Figura 7), o que não estava ocorrendo nas outras fases. A Tabela 8 mostra claramente esta afirmação com base nos valores médios de Nitrato obtidos na etapa II, 35,7±23,1 mgN/L, e etapa IV, 1,6±0,4 mgN/L. Sendo assim pode-se inferir que a utilização do extrato de semente na fase de tratamento supre a necessidade de fase anóxica para a desnitrificação.

Tabela 8: Valores médios da Série Nitrogenada para a Etapa II e Etapa IV.

Variável	N-NH ₃ ⁺		N-NO ₃ ⁻	
	Etapa II	Etapa IV	Etapa II	Etapa IV
Média (mgN/L)	4,8	4	35,7	1,6
Mínimo (mgN/L)	0,6	0,3	3	1
Máximo (mgN/L)	7,8	7,4	77	3
C.V. (%)	45,8	45	64,7	25
Desvio Padrão	2,2	1,8	23,1	0,4

Em relação à Amônia, a Tabela 8 mostra os valores médios de concentração na etapa II, $4,8 \pm 2,2$ mgN/L, e etapa IV, $4 \pm 1,8$ mgN/L, indicando uma redução de concentração pelo extrato de semente, o que pode ser observado também na Figura 7 que mostra as eficiências de 95,24% na etapa II e 95,94% na etapa IV; neste caso o valor de remoção está diretamente relacionado com a eficiência do reator de MBBR.

Figura 7: Comparação entre as Etapas II e IV para N-NH3 (A) e Comparação entre as Etapas II e IV para o parâmetro de N-NO3 (B).



Segundo as legislações referentes ao lançamento e ao reuso, as concentrações de Amônia e Nitrato estão de acordo com a Resolução CONAMA 357/05 e 450/11 para lançamento em corpos hídricos e as recomendadas pela USEPA em caso de reuso, diferentemente das outras etapas.

3.4.3. Fosfato

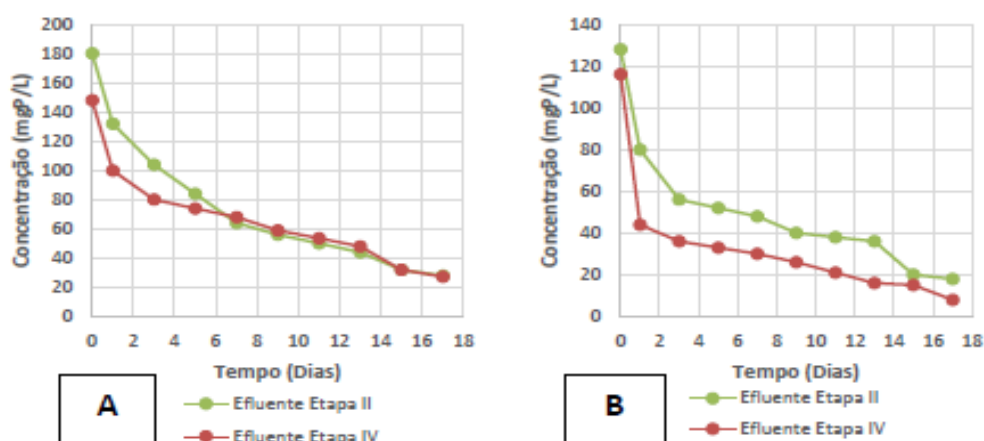
Diferentemente do que observa-se na Série Nitrogenada, a concentração de fosfato se manteve elevada em todas as etapas. A tabela 9 e Figura 8 mostram os valores médios da etapa II e etapa IV para o Fosfato Total e Fosfato Solúvel, dentro desta comparação o Fosfato Total manteve-se praticamente estabilizado para as etapas ($66 \pm 31,4$ mgP/L Etapa II e $60,2 \pm 17,4$ mgP/L Etapa IV), porém a maior variação observa-se no Fosfato Solúvel, o qual teve redução de 41% entre os valores médios ($43 \pm 27,1$ mgP/L para a etapa II e $25,4 \pm 18,1$ mgP/L para a etapa IV) indicando a utilização do extrato como um auxiliar na remoção do nutriente em pequenas escalas.

Tabela 9: Valores médios de Fosfato para a Etapa II e Etapa IV.

Variável	P-PO ₄ Total		P-PO ₄ Solúvel	
	Etapa II	Etapa IV	Etapa II	Etapa IV
Média (mgP/L)	66	60,2	43	25,4
Mínimo (mgP/L)	28	27,2	18	8
Máximo (mgP/L)	132	100	80	44
C.V. (%)				
Desvio Padrão	31,4	17,4	27,1	18,1

Segundo as legislações referentes ao lançamento e ao reuso, as concentrações não estão de acordo com a Resolução CONAMA 357/05 e 450/11 para lançamento em corpos hídricos e a NBR 13969 para o reuso. Neste caso a utilização de semente de moringa direto no tratamento não apresenta qualquer tipo de vantagem, necessitando assim de maiores tempos de tratamento com coagulantes químicos.

Figura 8: Comparação entre as Etapas II e IV para Fosfato Total (A) e Comparação entre as Etapas II e IV para Fosfato Solúvel (B).



3.4.4. Cor e turbidez

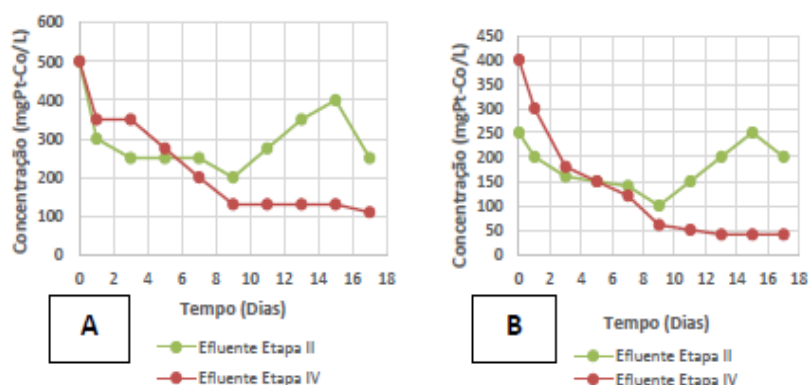
Em relação à Cor, a Tabela 10 e a Figura 9 mostram uma comparação entre os valores médios encontrados nas etapas II e IV para Cor Aparente e Verdadeira. A Cor Aparente (Figura 9) durante o tratamento apresentou valor médio de $280,7 \pm 30$ mgPt-Co/L com eficiência de 50% para a etapa II e 200 ± 83 mgPt-Co/L com eficiência de 68,6% para a etapa IV, indicando uma melhora gradativa em relação à remoção de partículas suspensas com a adição de extrato de sementes no tratamento.

Tabela 10: Valores médios de Cor e Turbidez para a Etapa II e Etapa IV.

Variável	Cor Verdadeira		Cor Aparente		Turbidez	
	Etapa II (mgPt-Co/L)	Etapa IV (mgPt-Co/L)	Etapa II (mgPt-Co/L)	Etapa IV (mgPt-Co/L)	Etapa II (NTU)	Etapa IV (NTU)
Média	172	108	280,7	200	102,2	29,45
Mínimo	140	40	200	110	79,8	0,02
Máximo	250	300	400	350	137,8	112
C.V. (%)	22,7	64,7	10,7	41,5	10,7	95
Desvio Padrão	39	69,9	30	83	10,8	28

No caso da Cor Verdadeira, a Figura 9 e a Tabela 10 mostram a variação das etapas em concentração. A etapa II variou de 250 - 140 mgPt-Co/L com eficiência de 20% enquanto a etapa IV variou de 300 - 40 mgPt-Co/L com eficiência de 90%.

Figura 9: Comparação entre as Etapas II e IV para Cor Aparente (A) e Comparação entre as Etapas II e IV para Cor Verdadeira (B).



Comparando a saída do pós-tratamento e a saída da etapa IV, as duas apresentam valores idênticos de concentração 40 mgPt-Co/L, o que indica a utilização do extrato diretamente no reator, não necessitando de uma etapa a mais.

Em relação à turbidez, tanto a etapa II como a IV obtiveram a mesma ordem de eficiência de remoção de turbidez, 99,99%, e valores de saídas de 0,02 NTU.

4. Conclusão e recomendações

Ao analisar os resultados obtidos nas etapas estudadas é possível concluir que o sistema proposto de lodo ativado com coagulantes naturais (etapa IV) possui altas taxas de eficiência no tratamento de efluentes de cervejarias, principalmente em relação à degradação de matéria orgânica e nutrientes derivados do nitrogênio, atendendo assim às legislações de lançamento e reuso em 90% das concentrações. Em relação ao sistema apenas de MBBR (Etapa II) o sistema se mostrou estável e com elevadas taxas de degradação de matéria orgânica, porém como o efluente de cervejaria contém valores muito acima dos encontrados nos demais efluentes industriais e domésticos, apresentou algumas saídas de concentração que não se enquadram nas legislações de reuso e lançamento em corpos hídricos necessitando de pós-tratamento ou maiores tempos de detenção hidráulica. Após a saída do efluente do MBBR, o mesmo passou pelo pós-tratamento com coagulantes naturais (Etapa III) em Jar Test com diferentes concentrações, sendo que a melhor dosagem de 250 mg/L de extrato de moringa obteve uma eficiência em remoção dos parâmetros como Cor (80%), Turbidez (99,99%) e Sólidos Totais (64,8%), atendendo às legislações brasileiras (CONAMA 357/05 e NBR 13.969) e norte-americanas (USEPA 1992), entretanto a aplicação do coagulante natural nas dosagens estudadas no ensaio de jarros não teve influência significativa na remoção do fosfato necessitando de um estudo mais avançado que foi o foco da etapa IV. Nesta última etapa, não foi possível adequar o parâmetro Fosfato. Sendo assim, como recomendações devem-se realizar estudos específicos para a remoção de fosfato com maiores tempos de estudo, além de análises de playback do sistema proposto.

Referências

- DI BERNARDO, Ângela. **Influência das condições de aplicação de polímeros catiônicos na eficiência da floculação**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- FERREIRA, Rubens *et al.* **Inovação na fabricação de cervejas especiais na região de Belo Horizonte**. Perspectivas em Ciência da Informação, vol 16, no. 4, Belo Horizonte. Out/Dez.2011.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgoto Doméstico**. 4. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

KOCHENBORGER, Guilherme. **Tratamento Físico-Químico para efluente de cervejaria**. Dissertação (Mestrado – Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade de Passo Fundo, Minas Gerais, 2012.

MOGAMI, Sandra. **Reuso de Água no Brasil**. Hydro Especial, Campinas, 29 nov 2011, p. 18 – 29.

PAIVA, Gabriel Mafra. **Estudo do processamento e mercado de cervejas especiais no Brasil**. TCC (Tecnólogo) – Faculdade de Tecnologia Termomecânica, São Bernardo do Campo, 2011.

RESENDE, Letícia Passos. **Reuso de água nas indústrias de alimentos e bebidas**. Revista Hydro, São Paulo, ano 7, n.70, p.16-21, Agosto,2012.

RICO, Thiago Emanuel. SANTOS, Lucas Moreira. **Tratamento de água residuária de curtume com utilização de sementes de moringa (*Moringa oleifera* L.)** Revista Agro@ambiente On-line, v. 4, n. 2, p. 96-101, jul-dez, 2007.

RODRIGUES, Alessandro Urenha; IMAGIIRE, Luis Otavio Kaneioshi Montes; SOUZA, Robson Farias. **Avaliação do tratamento combinado de esgoto e lixiviado do aterro sanitário em um reator sequencial com biofilme em leito móvel**. Monografia (Graduação - Engenharia Ambiental) – Centro Universitário SENAC, São Paulo, 2013.

RUSTEN, Bjorn et al. **Treatment of pulp and paper industry wastewater in novel moving bed biofilm reactors**. Water Science and Technology, v.30, p. 161-171, 1994.

SANTOS, H. R. **Aplicação de coagulantes no afluyente do reator anaeróbio de leito expandido alimentado com esgoto sanitário**. 2001, 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

SILVA, F.J.A.; SILVEIRA NETO, J.W.; MOTA, F.S.B.; SANTOS, G.P. **Descolorização de efluente da indústria têxtil utilizando coagulante natural (*Moringa oleifera* e quitosana)**. In: Anais Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21., 2001, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABES, 2001.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados**. Princípios básicos do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 4. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

Recebido em 29/01/15 e Aceito em 16/03/15.