

II-129 – PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS PARA REÚSO INDUSTRIAL DO EFLUENTE DE ETE ONÇA – BELO HORIZONTE

André Amaral Horta⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Mestre em Engenharia Ambiental e Infraestrutura Sustentável pelo Instituto Real de Tecnologia (KTH – Suécia), Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG.

Míriam Cristina Santos Amaral

Engenheira Química pela Universidade Federal de Minas Gerais, Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG. Professora Adjunta do DESA da UFMG.

Mariana Gonçalves Dias

Graduanda em Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Endereço⁽¹⁾: André Amaral Horta – Rua Flavita Bretas, 29, apt 1101 CEP: 30380-410 – Belo Horizonte / MG, Brasil – E-mail: andreh86@gmail.com

RESUMO

A escassez hídrica tem sido um dos grandes desafios que enfrentamos. Mesmo o Brasil tendo água em abundância, este recurso é mal distribuído. As indústrias, além de consumirem grande quantidade deste recurso, colaboram com a degradação dos corpos d'água, diminuindo ainda mais a disponibilidade de água. Neste contexto, o reúso se apresenta como uma solução técnica e economicamente viável para o problema. Esta prática gera redução de demanda e diminui a quantidade de efluente a ser descartada, atenuando impactos ambientais. No presente trabalho, é proposto o reúso de efluente da ETE Onça para fins industriais.

A tecnologia que vem se mostrando mais viável para tratamento de efluentes visando o reúso são os processos de separação por membranas. A membrana atua como uma barreira seletiva que impede a passagem dos contaminantes, gerando um permeado de boa qualidade, que pode ser reaproveitado, e um rejeito com maiores concentrações de poluentes.

Existem membranas porosas, que operam a baixa pressão – microfiltração (MF) ou ultrafiltração (UF) – e membranas densas, que operam a alta pressão – nanofiltração (NF) ou osmose inversa (OI). Enquanto as membranas porosas têm maior permeância, as membranas densas apresentam maior rejeição de contaminantes, porém oferecem mais resistência ao fluxo. O arranjo de membranas porosas seguidas por membranas densas permite menos incrustação, pois a primeira etapa atua como um pré-tratamento, removendo sólidos em suspensão, e a segunda etapa proporciona um permeado de boa qualidade, devido à seletividade da membrana.

Foram avaliadas quatro rotas constituídas por uma membrana porosa sucedida por uma membrana densa: MF-NF, MF-OI, UF-NF e UF-OI. A membrana porosa que apresentou a maior permeância foi a de microfiltração; dentre as membranas densas, a de nanofiltração teve a permeância mais elevada. Todas as rotas tiveram um desempenho satisfatório, tanto em relação à operação, quanto no tocante à remoção de contaminantes.

PALAVRAS-CHAVE: Reúso de Água, Microfiltração, Ultrafiltração, Nanofiltração, Osmose Inversa.

INTRODUÇÃO

O Brasil e o estado de Minas Gerais possuem água em quantidade suficiente para atender suas demandas, porém, este recurso é mal distribuído. O crescimento populacional nas grandes cidades, a elevada exploração dos corpos d'água, o descarte de águas residuárias sem o devido tratamento e as mudanças climáticas são elementos que vêm causando modificações e impactos ambientais. Estas alterações vêm afetando a disponibilidade de água para consumo e agravando a escassez em diversas regiões.

Este cenário de escassez poderá se tornar ainda mais severo caso continue ocorrendo a degradação dos corpos d'água devido ao lançamento de efluentes sem tratamento, ou efluentes que não são tratados a um nível

satisfatório de remoção de contaminantes. No Brasil apenas 37,9% dos esgotos produzidos são submetidos a algum tipo de tratamento (SNIS, 2012). Cabe ressaltar que estas estatísticas não levam em conta a qualidade do tratamento.

Os processos de tratamento de esgotos domésticos predominantes no Brasil e em Minas Gerais são os sistemas de lagoas de estabilização, lodos ativados e reatores anaeróbios. Este último, no qual predominam reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor* – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo), pode ser associado a um pós-tratamento. Estes sistemas tratam o esgoto a nível secundário, removendo parte da matéria orgânica; a remoção de nutrientes é limitada.

Os sistemas de reatores UASB seguidos de pós-tratamento vêm sendo amplamente utilizados no país, uma vez que o clima tropical é favorável aos processos anaeróbios, o sistema tem simplicidade construtiva e operacional, baixas demandas de área e, principalmente, menores requisitos energéticos. Em Minas Gerais observa-se a mesma tendência: grande parte das ETE's (Estações de Tratamento de Esgoto) possui reator UASB e o pós-tratamento mais frequente nestes sistemas são filtros biológicos percoladores (FBP) e decantadores secundários. Os projetos de novas estações de tratamento buscam minimizar o gasto com energia, logo, são concebidos, em grande parte, nesta configuração.

Além da necessidade de implantação e melhorias de sistemas de tratamento de esgoto para preservar os corpos d'água, é essencial que haja também uma diminuição de demandas de extração de água dos corpos hídricos. As indústrias são responsáveis por 17% da demanda de água no Brasil (ANA, 2013). Além do elevado consumo, as atividades industriais apresentam um grande potencial poluidor em razão dos efluentes gerados.

Neste contexto, o reúso de água é apontado como uma solução, tanto para o problema relacionado ao meio ambiente quanto para a racionalização do uso deste recurso. O reúso reduz a demanda pela água, aumentando sua disponibilidade, diminuindo a necessidade de captação nos corpos d'água e a quantidade de águas residuárias a serem dispostas no meio ambiente.

APLICAÇÕES E TIPOS DE REÚSO

A reutilização da água é capaz de atenuar a pressão ambiental e de demanda sobre os recursos hídricos. Uma das possibilidades de reúso é o emprego do efluente de estações de tratamento de esgoto como matéria prima para geração de água para aplicação em processos industriais (Figura 1).

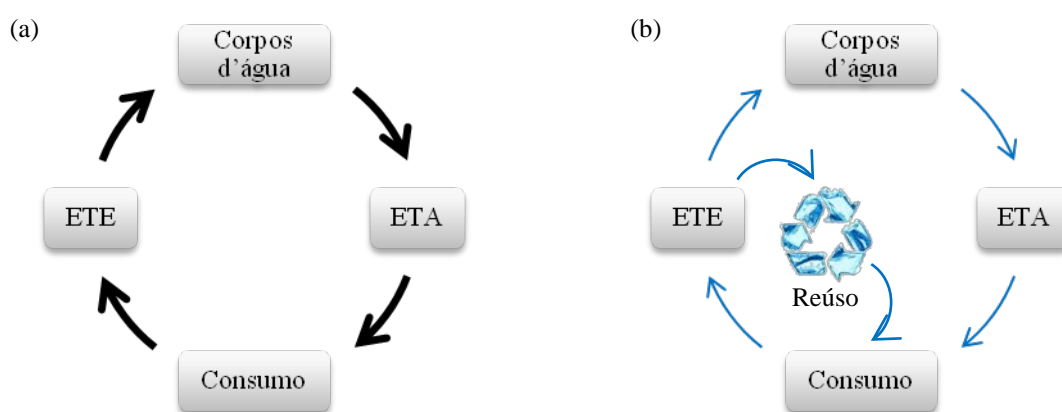


Figura 1: Pressão ambiental e de demanda nos corpos d'água (a) sem reúso e (b) com reúso

O reúso de água ocorre para aplicações distintas. Esta prática se divide em duas categorias: potável e não-potável (Figura 2).



Figura 2: Principais tipos de reúso de água

O reúso de água para fins de potabilização pode ser direto ou indireto. As práticas mais usuais são as de reúso indireto. A diferença básica entre estas duas modalidades consiste na presença de um atenuador entre a produção de água de reúso e sua retirada para consumo. No caso do reúso indireto, este atenuador geralmente é um aquífero, um reservatório ou um curso d'água. Esta diluição e aumento de tempo não é necessariamente benéfica à qualidade da água, mas é importante para a maior aceitação da população. Os projetos de reúso potável direto ainda são raros no mundo, os casos existentes são em locais onde a falta d'água é extremamente severa.

O reúso agrícola consiste na utilização de águas residuárias na irrigação; Esta pratica é antiga e requer menores requisitos de qualidade. Em algumas regiões utiliza-se até mesmo o esgoto bruto. Esta aplicação de reúso pode ser feita para produtos comestíveis e não-comestíveis e os requisitos de qualidade dependem dos tipos de culturas a serem irrigadas.

A aplicação do reúso municipal e do reúso de água para melhorias recreacionais e ambientais consiste na irrigação de praças e jardins, paisagismo, sistemas de proteção contra incêndios, controle de poeira em estradas e lavagem de ruas, entre outros. Em aplicações onde existe a possibilidade de contato com o público, os parâmetros microbiológicos são mais restritivos, sendo necessária a desinfecção.

Na indústria a água pode ser reutilizada para processos, resfriamento, caldeiras e transporte, dentre outros. Esta prática aumenta a segurança hídrica da indústria, garantindo parte do fornecimento de água; possibilita economia, através da redução do consumo de água potável e dos custos com o lançamento de efluentes; além de ser favorável ao meio ambiente e atenuar a escassez de água.

Os requisitos de qualidade para o reaproveitamento de efluentes como água de reúso industrial são específicos para cada finalidade de aplicação. Os parâmetros de qualidade, além de garantirem a saúde da população, devem garantir o a ausência de problemas operacionais. Com o intuito de se obter uma água que possa ser utilizada em uma variada gama de processos, é necessário adotar parâmetros bem mais restritivos que os padrões de lançamento de efluentes de ETE em corpos receptores. Considerando as eficiências médias de remoção de contaminantes dos sistemas mais usuais no Brasil de tratamento de esgoto a nível secundário, para a prática do reúso há necessidade de um pós-tratamento.

A qualidade do efluente da estação de tratamento de esgoto depende de inúmeros fatores. As características do esgoto bruto, os sistemas de tratamento empregado, as condições operacionais e o porte da estação são exemplos destes fatores. Para a prática do reúso, o pós-tratamento deve levar em consideração os parâmetros de entrada e de saída do sistema. Os parâmetros de entrada são as características da alimentação – no caso, o efluente da ETE. Os parâmetros de saída são os requisitos de qualidade para os inúmeros propósitos de reúso.

Um dos problemas relacionados à aplicação da prática da produção de água de reúso é a ausência de uma legislação e de uma normatização técnica específica nacional que define os parâmetros de qualidade necessários para fins de reúso industrial. Neste trabalho são utilizados parâmetros que permitam o reúso de água em diversos processos de diferentes setores da indústria (alimentícia, têxtil, petroquímica e outros). Para tal, é necessário que a água de reúso seja isenta de sólidos em suspensão, tenha baixa concentração de matéria orgânica e de nutrientes. Os parâmetros adotados neste trabalho são:

- **DQO:** inferior a 5,0 mg/L;
- **Cor:** isento (~0,0 mg/L);
- **Condutividade:** inferior a 100 mS/cm²;
- **SST:** isento (~0,0 mg/L);
- **N Total:** inferior a 5,0 mg/L;
- **P Total:** inferior a 1,0 mg/L.
- **pH:** entre 6,0 e 9,0.

Nesta pesquisa é investigado o pós-tratamento para efluentes de ETE's que tratam efluentes domésticos e utilizam sistemas de reatores UASB seguidos por filtros biológicos percoladores e decantadores secundários. A finalidade analisada neste estudo é o aproveitamento como água de processo nas etapas de produção das indústrias. Os tipos de pós-tratamento avaliados são rotas de processos de separação por membranas – PSM.

A hipótese desta pesquisa é que a aplicação de processos de separação por membranas seja um método técnico e economicamente viável para a produção de água para reúso industrial a partir do esgoto tratado. Todavia o processo necessita melhor compreensão e possui limitações; este estudo irá permitir um melhor entendimento e aprimoramento da implantação e operação de sistemas que utilizam separação por membranas.

PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

O uso de processos de separação por membranas é a tecnologia mais promissora para promover o reúso industrial de efluentes de ETE's. A viabilidade técnica e econômica destas membranas é principalmente em função de sua capacidade de ser seletiva e sua eficiência energética (WANG et al., 2009).

A reutilização de água pode proporcionar benefícios econômicos, ambientais e sociais. As indústrias podem diminuir o custo relacionado ao consumo de água, além de possibilitar menor exploração dos corpos d'água, favorecendo o meio ambiente e reduzindo o problema da carência de água em locais onde este recurso é escasso. Vários tipos de membranas podem ser utilizados para a produção de água de reúso; estas tecnologias encontram-se num range que vai da microfiltração até a osmose inversa (RIERA, SUÁREZ e MAURO, 2012).

Para que os processos de separação por membranas gerem um permeado que se enquadre nos requisitos de qualidade propostos para o reúso industrial de água, as membranas devem possuir elevada rejeição de contaminantes, ou seja, devem ser altamente seletivas. Todavia, pretende-se que o sistema tenha baixo custo de implantação, operação e manutenção, para tal é desejável uma membrana com alta permeância. De modo geral, as membranas mais seletivas possuem menor permeância. Como estas duas propriedades são almejadas, muitos sistemas buscam a associação de diferentes tipos de membranas, uma com maior permeância e outra com maior seletividade, buscando uma melhor eficácia do processo.

A combinação de diferentes tipos de membranas geralmente é feita utilizando uma membrana porosa, que opera com elevado fluxo e baixa pressão, seguida de uma membrana densa, que possui alta seletividade. As membranas porosas comumente empregadas neste tipo de configuração são as de microfiltração (MF) e de ultrafiltração (UF). As membranas densas utilizadas para fins de reúso são as de nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI). A Figura 3 mostra a classificação das membranas quanto ao tamanho dos poros, à seletividade e fatores que afetam a separação. As membranas de eletrodialise não são abordadas neste estudo, pois a força motriz do processo de separação dos contaminantes é a diferença de potencial elétrico, a dos demais é o gradiente de pressão.

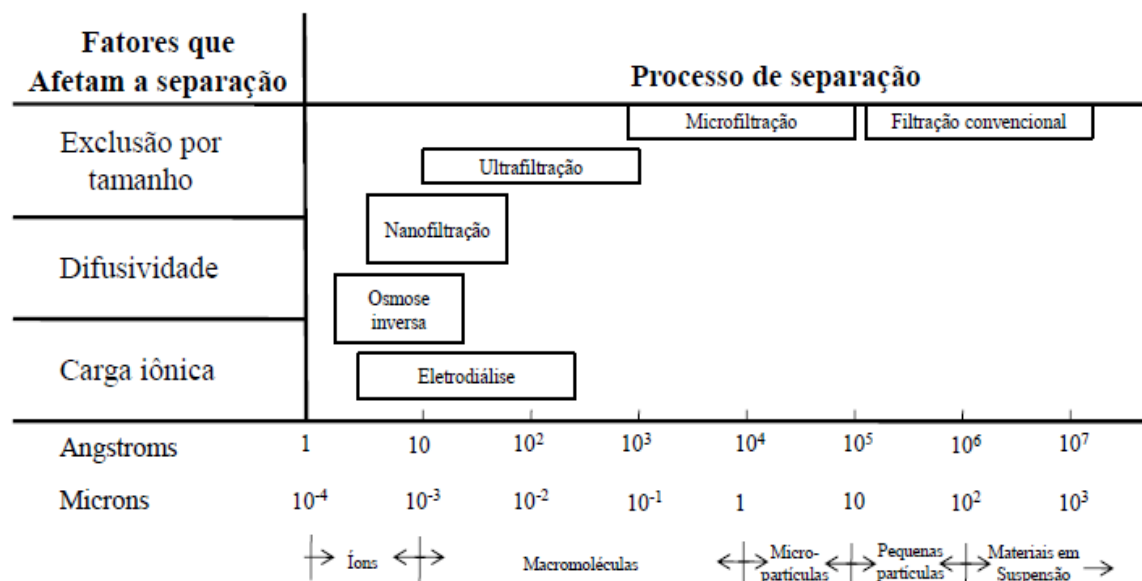


Figura 3: Classificação das membranas

A água de reúso é obtida a partir da fração da alimentação do sistema que transpõe a membrana seletiva, o que denominamos permeado – o qual se espera que esteja dentro dos requisitos de qualidade necessários. A fração retida pela membrana, com uma maior concentração de contaminantes, é denominada concentrado. Este rejeito do processo deve ser abordado com a mesma importância do permeado.

É necessário dar uma destinação correta ao concentrado do processo de produção de água de reúso. Este rejeito possivelmente não poderá ser descartado diretamente no meio ambiente. Esta água residuária possui contaminantes em elevada concentração, principalmente nutrientes: nitrogênio e fósforo. É possível agregar valor ambiental e econômico ao processo através da recuperação dos subprodutos: nitrogênio e fósforo. Sendo assim, passa-se a ter um concentrado menos degradante para o meio ambiente. Ademais, os nutrientes recuperados possuem valor comercial e podem ser utilizados como fertilizantes na agricultura. A corrente remanescente do concentrado após a recuperação de nutrientes pode ser recirculada para o início do tratamento.

O grande empecilho é uma das principais limitações dos processos de separação por membranas é a incrustação, que gera diminuição de fluxo e/ou aumento da pressão do sistema e da periodicidade de limpeza das membranas, resultando em um maior gasto energético e uma menor vida útil do sistema. Tais fatores elevam o custo financeiro do processo. A colmatação da membrana está ligada a vários fatores, tais como características operacionais de fluxo e pressão, parâmetros da alimentação do sistema, tipo de membrana empregada, configuração, dentre outros.

Existem diversas técnicas para minimizar a incrustação. O menor teor de sólidos na alimentação das membranas atenua este problema, sendo assim, o pré-tratamento é essencial. Há também produtos químicos, como anti-incrustantes, que podem ser utilizados. As condições de fluxo no módulo de membrana também são de grande importância, sendo o fluxo perpendicular mais desfavorável que o tangencial, uma vez que o escoamento perpendicular força as partículas contra a membrana, gerando maior deposição e compactação da torta. O fluxo tangencial gera tensões de cisalhamento nas paredes das membranas, que diminuem a deposição de materiais na superfície da mesma. Para promover um cisalhamento ainda maior do material aderido na membrana, podem ser empregadas condições de turbulência, através de aeração, vibração, aumento da velocidade de fluxo, membranas de pontas soltas, dentre outros. Ademais, deve ser determinada a pressão ótima de operação do sistema, que não deve ser ultrapassada.

No presente trabalho, a água para reúso tem elevados requisitos de qualidade, que demandam membranas densas – nanofiltração ou osmose inversa. Por operarem a uma pressão mais alta, estas membranas estão

bastante sujeitas à incrustação. Para minimizar este efeito, pode ser feita a utilização de membranas porosas associadas ao sistema – microfiltração ou ultrafiltração – como pré-tratamento. O intuito de utilizar primeiramente membranas porosas é reter os sólidos suspensos utilizando um processo que opera com baixo custo energético, a baixas pressões, e tem uma elevada eficiência (RIPPERGER e ALTMANN, 2002). Este arranjo melhora o desempenho do sistema de processos de separação por membranas para produção de água de reúso industrial a partir de efluentes de ETE's.

O uso de processos de separação por membranas para tratamento de efluentes vem crescendo exponencialmente por todo o mundo, evoluindo ao longo dos últimos 10-15 anos (KRAEMER *et al.*, 2012) e se apresentando como a tecnologia mais promissora para promover o reúso industrial de efluentes de ETE's. Estes processos possuem elevada eficiência, facilidade e economia na operação (LIU *et al.*, 2011), baixa demanda de área e modulação dos sistemas, o que permite flexibilidade de escala. Todavia, existem algumas limitações, que devem ser compreendidas para sua aplicação de maneira apropriada, sendo a incrustação a principal delas (AMARAL *et al.*, 2013).

No Brasil existem grandes projetos nos quais se pesquisam e se utilizam processos de separação por membranas para o reúso de água, como por exemplo, a ETE Capivari, em Campinas, o Projeto Aquapolo em São Paulo (ETE ABC) e o COMPERJ – Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro. Entretanto, o emprego desta tecnologia no Brasil ainda é recente e pouco difundido, mesmo assim o país desponta como um dos maiores mercados potenciais do mundo.

Os estudos e aplicações de processos de separação por membranas como etapa de pós-tratamento de esgotos visando o reúso industrial, tanto no Brasil como no restante do mundo, são aplicados, na grande maioria dos casos, para o efluente de ETE's que utilizam processos aeróbios, principalmente lodos ativados. Em Minas Gerais, assim como no restante do país, há uma grande tendência de aplicação de processos anaeróbios de tratamento de esgotos, principalmente reatores UASB.

A geração de água de reúso a partir de efluentes de processos que utilizam reatores anaeróbios é pouco estudada, havendo necessidade de pesquisa para avaliar o comportamento e eventuais adaptações necessárias aos processos de separação por membranas. O intuito deste trabalho é investigar rotas de tratamento utilizando membranas para reúso industrial do efluente da ETE Onça – Belo Horizonte.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho a matéria prima para a produção da água de reúso é o efluente da ETE Onça. Esta seleção foi baseada nos objetivos da pesquisa e vislumbrando a possibilidade da prática em escala real da reutilização da água por indústrias. O tipo de tratamento empregado, o porte da estação e a localização geográfica foram fatores que influenciaram a escolha. A referida ETE pode atender uma demanda futura de água de reúso para o polo industrial da região metropolitana de Belo Horizonte.

AMOSTRAGEM

A ETE Onça trata uma vazão média da ordem de 1,8 m³/s, o que equivale ao esgoto gerado por uma população de aproximadamente 1 milhão de habitantes. O tratamento de esgoto é a nível secundário; a ETE é constituída pelo tratamento preliminar, por reatores UASB e filtros biológicos percoladores (FBP) seguidos de decantadores secundários (Figura 4).

Para a realização dos ensaios de bancada foram coletados aproximadamente 50 litros do efluente tratado da ETE Onça. A coleta foi feita na saída dos decantadores secundários. A bombona utilizada para armazenar o efluente foi mantida em câmara fria.

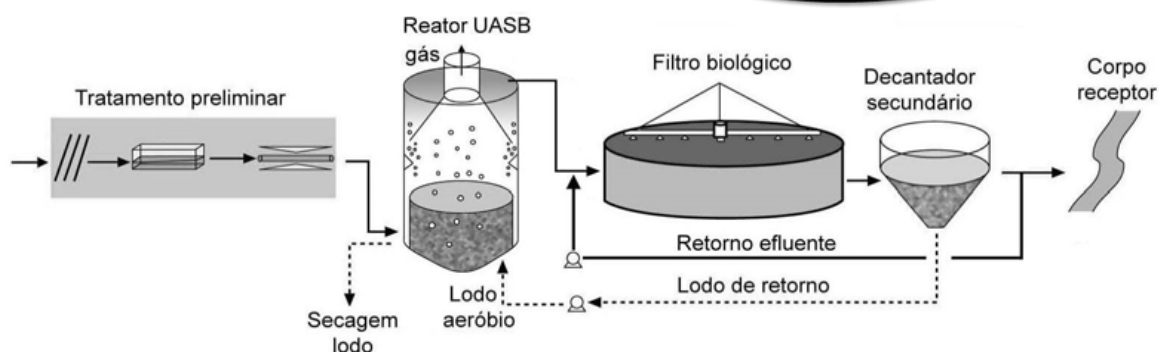
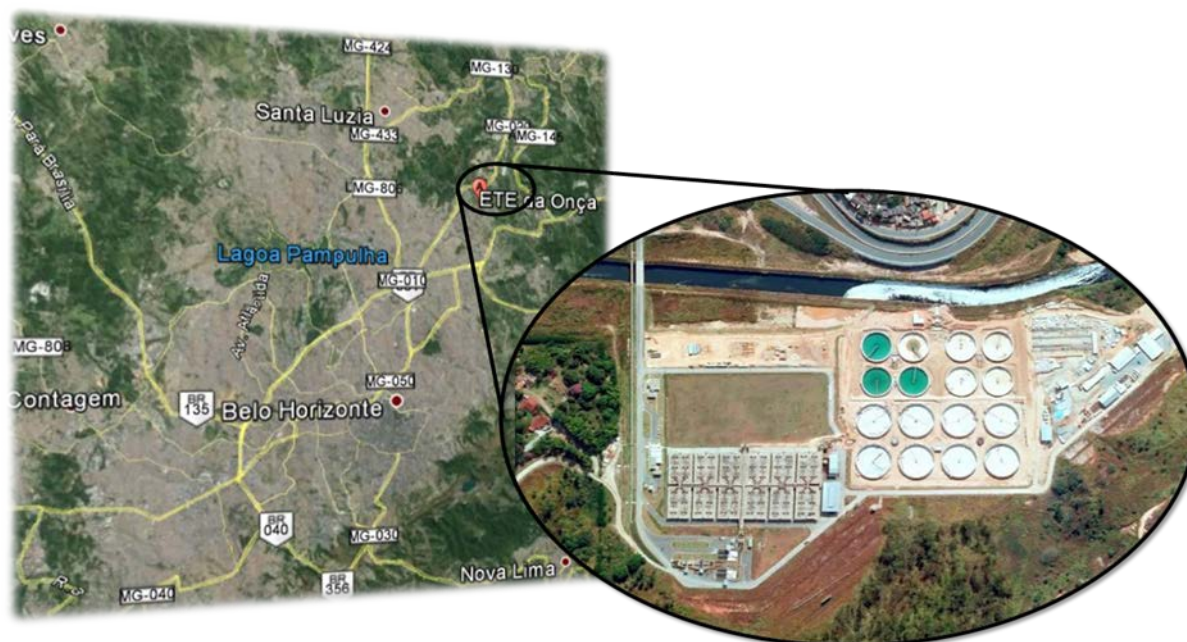


Figura 4: ETE Onça – Imagens de satélite (Fonte: Google) e fluxograma (Fonte: GONÇALVES et al. (2001))

DESCRIÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS

Para os testes em escala de bancada são utilizadas duas unidades experimentais: uma para os testes de microfiltração e ultrafiltração, outra para os testes de nanofiltração e osmose inversa. As unidades possuem o mesmo arranjo esquemático (Figura 5).

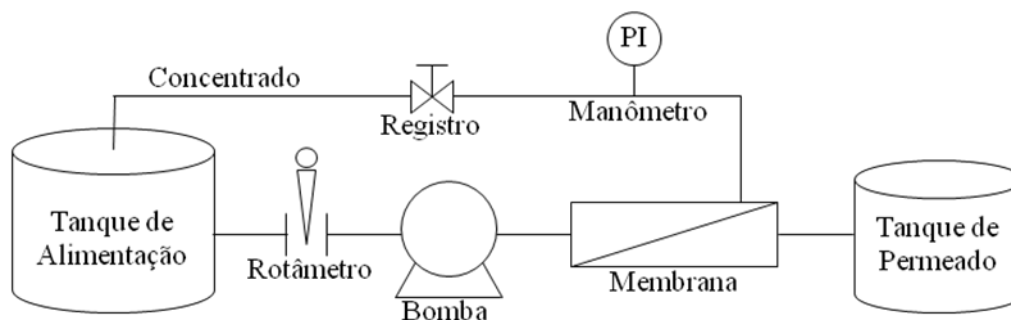


Figura 5: Desenho esquemático das unidades de bancada dos processos de separação por membranas

ROTAS DE TRATAMENTO

Visando estudar a rota de tratamento por membranas mais adequada para tratar o efluente da ETE Onça para produção de água de reúso, foram analisadas quatro rotas de tratamento. Estas rotas buscaram a associação membranas porosas seguidas por membranas densas:

- Microfiltração seguida de nanofiltração;
- Microfiltração seguida de osmose inversa;
- Ultrafiltração seguida de nanofiltração;
- Ultrafiltração seguida de osmose inversa.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de bancada dos processos de separação por membranas seguem o seguinte procedimento: inicialmente a membrana é submetida a uma limpeza química; em seguida é realizado o ensaio de permeância hidráulica; na sequência é feita a permeação; após permear o efluente, a permeância hidráulica é medida novamente; ocorre outra limpeza química e faz-se mais uma medição da permeância hidráulica (Figura 6).

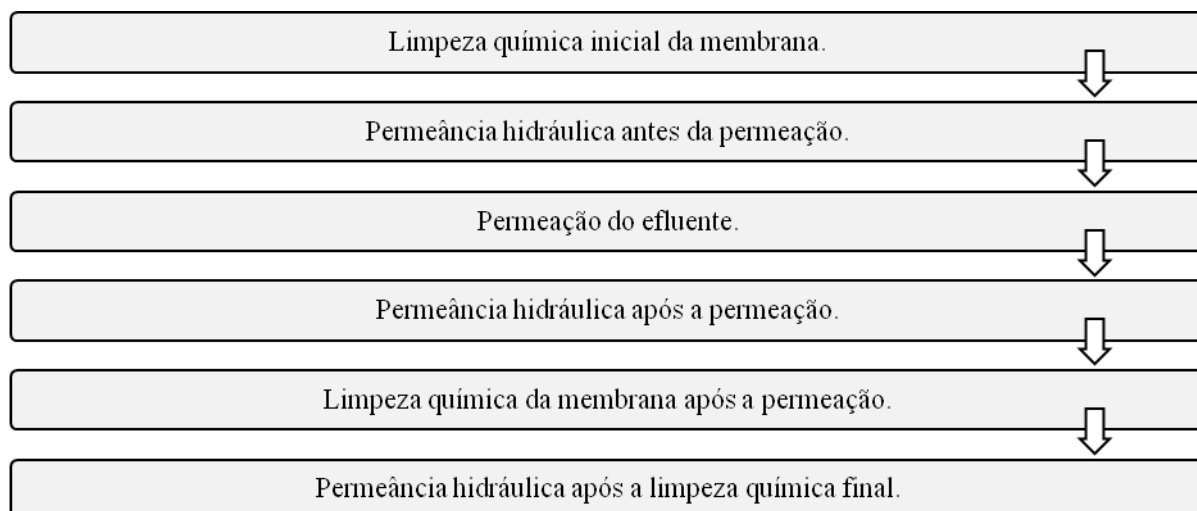


Figura 6: Fluxograma dos testes de bancada.

A limpeza química das membranas de microfiltração e de ultrafiltração é realizada com hipoclorito de sódio, na concentração de 1.000 ppm, recirculando no módulo sem pressurização durante o período de 1 hora; a vazão é de 2,4 L/min. Em seguida a solução de limpeza é removida através da recirculação de água limpa (potável, da torneira).

A limpeza química das membranas de nanofiltração e de osmose inversa é feita primeiramente em solução de ácido cítrico ao pH 2,5 e em seguida em solução básica de hidróxido de sódio na concentração de 0,4%. As membranas são imersas nas soluções, cada solução é colocada em ultrassom por 20 minutos.

No ensaio de permeância hidráulica o fluxo de permeado é medido, em diferentes valores de pressão, até que se estabilize. Os valores de fluxo de permeado em função da pressão são plotados graficamente e a inclinação da reta de regressão linear fornece o valor da permeância hidráulica da membrana com água. O fluxo é calculado dividindo-se a vazão de permeado pela área útil de membrana do módulo. A vazão de alimentação adotada é de 2,4 L/min.

As pressões adotadas para cada tipo de membrana na realização dos testes de permeância com água, para os quais são medidos os respectivos fluxos são:

- **Microfiltração:** 1,5; 1,0; 0,75 e 0,5 bar;
- **Ultrafiltração:** 2,0, 1,5; 1,0 e 0,5 bar;
- **Nanofiltração:** 10,0; 8,0 e 6,0 bar;
- **Osmose inversa:** 10,0; 8,0 e 6,0 bar.

Na permeação do efluente o concentrado retorna ao tanque de alimentação e o permeado é coletado no tanque de permeado. As características das membranas utilizadas nos testes de bancada são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características das membranas

Classificação	Microfiltração	Ultrafiltração	Nanofiltração	Osmose Inversa
Fabricante	Pam Membranas	GE Water Processes	Dow Filmtec	Dow Filmtec
Modelo	-	ZeeWeed	NF90	BW30
Material	Polimérica	Polimérica	Polimérica	Polimérica
Configuração	Fibra oca	Fibra oca	Plana	Plana
Tamanho de poros ou massa molar de corte	0,45 μm	0,45 μm	200-300 Da ¹	Não disponível
Módulo	Vaso de pressão	Vaso de pressão	Célula de aço inox	Célula de aço inox
Fluxo	Tangencial	Tangencial	Perpendicular	Perpendicular
Área útil	0,04 m ²	0,04 m ²	0,0075 m ²	0,0075 m ²

¹ Referência: WANG e TANG, 2011

Os procedimentos de permeação do efluente nas membranas de microfiltração e de ultrafiltração são similares. Também é análoga a metodologia da permeação do efluente na nanofiltração e na osmose inversa (Tabela 2). Cabe ressaltar que os procedimentos de microfiltração e de ultrafiltração devem ser repetidos, para gerar permeado suficiente para os testes de nanofiltração e osmose inversa.

Tabela 2: Procedimento de permeação do efluente

Processo	Microfiltração e Ultrafiltração	Nanofiltração e Osmose Inversa
Alimentação	Efluente da ETE Onça	Efluente microfiltrado ou ultrafiltrado
Volume de efluente	4,0 L	3,0 L
Grau de recuperação	80%	60%
Volume de permeado	3,2 L	1,8 L
Volume de concentrado	0,8 L	1,2 L
Vazão de alimentação	2,4 L/min	2,4 L/min
Pressão de operação	1,0 bar	10,0 bar
Temperatura	20-25 °C	20-25 °C

METODOLOGIAS ANALÍTICAS

A análise dos parâmetros de qualidade é feita para a alimentação e para os permeados de cada rota. Estes dados permitem avaliar se o permeado de cada rota se enquadra nos requisitos para reuso industrial e comparar as eficiências de remoção de cada rota investigada. A análise é feita para os seguintes parâmetros: DQO; cor; condutividade; pH; sólidos totais; nitrogênio amoniacal (N-NH_3) e fósforo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados são os parâmetros operacionais e de qualidade das rotas investigadas em escala de bancada. Os parâmetros operacionais se referem à permeância hidráulica das membranas. Os parâmetros de qualidade são obtidos a partir da caracterização da alimentação (efluente da ETE Onça), do permeado (água de reúso) e da eficiência de remoção em cada rota avaliada.

PERMEÂNCIA HIDRÁULICA

Para cada batelada de testes com membranas em escala de bancada, são realizadas três medições da permeância hidráulica (ver fluxograma dos testes de bancada – Figura 6). A permeância com água é medida: (i) após a limpeza química inicial, antes da permeação; (ii) depois da permeação, antes da limpeza química posterior à permeação e (iii) após a limpeza química que ocorre após a permeação. A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de permeância hidráulica realizados para as bateladas de testes com membranas feitos para as rotas investigadas.

Tabela 3: Ensaios de permeância hidráulica

Tipo de membrana e Alimentação	Permeância hidráulica (L/h.m ² .bar)		
	Antes da permeação	Após permeação, antes da limpeza química final	Após a limpeza química final
Microfiltração Efluente da ETE Onça	75,0	33,3	47,2
Ultrafiltração Efluente da ETE Onça	47,3	22,8	39,2
Nanofiltração Efluente microfiltrado	7,6	3,9	6,5
Nanofiltração Efluente ultrafiltrado	6,6	3,3	5,6
Osmose inversa Efluente microfiltrado	2,1	2,0	2,0
Osmose inversa Efluente ultrafiltrado	2,1	1,7	1,7

Espera-se a permeância decrescente da microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração até a osmose inversa. Todavia, existem outros fatores além do tamanho de poros ou densidade da membrana que influenciam tal parâmetro. A permeância hidráulica é afetada pela configuração, composição química, hidrofobicidade, homogeneidade, e outros; estas características variam muito para os diferentes fabricantes, mesmo para o mesmo tipo de membrana. O histórico de utilização e o estado de conservação da membrana também são de extrema importância. Uma membrana que já foi empregada no tratamento de efluentes com alto potencial incrustante pode ter sua permeância reduzida em função das incrustações irreversíveis. Os testes realizados apontaram resultados coerentes, sendo a membrana de microfiltração a de maior permeância, seguida pela de ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa, na respectiva ordem.

Dentro de uma mesma batelada de testes, espera-se que o maior valor de permeância seja medido antes da permeação. A permeação do efluente gera incrustações na membrana que reduzem a permeância, logo o menor valor esperado é o verificado após a permeação. A limpeza química após permear o efluente remove parte da incrustação, todavia algumas incrustações são permanentes e não são removidas por este procedimento; sendo

assim, espera-se um valor intermediário para a permeância após esta limpeza. Os resultados estão dentro do esperado para todas as bateladas de testes realizadas.

A membrana de osmose inversa sofreu menor incrustação devido a depósitos superficiais, em função das características da membrana e das condições hidrodinâmicas do módulo. Em razão disto, a diminuição da permeabilidade medida após a permeação foi mais sutil e o efeito da limpeza química na recuperação permeância foi menos perceptível para esta membrana.

PERMEÇÃO DO EFLUENTE

As membranas porosas, de microfiltração e ultrafiltração foram alimentadas com o efluente da ETE Onça. As membranas densas, de nanofiltração e osmose inversa foram alimentadas com o efluente microfiltrado e com o efluente ultrafiltrado. As Figuras 7 a 10 apresentam os resultados dos ensaios de permeância das membranas para cada efluente testado. O grau de recuperação (GR) foi de 80% para MF e UF e de 60% para NF e OI.

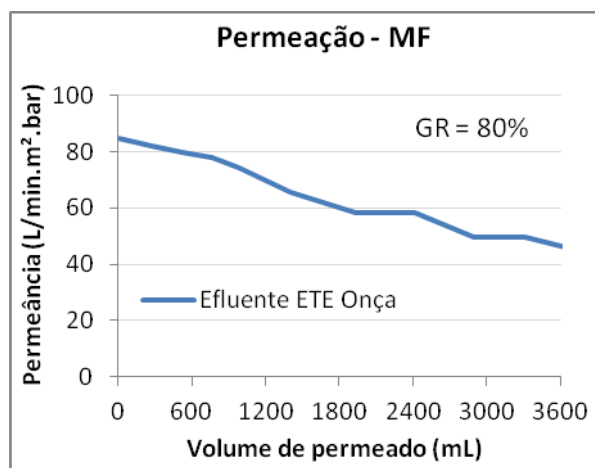


Figura 7: Permeância do efluente da ETE Onça na microfiltração

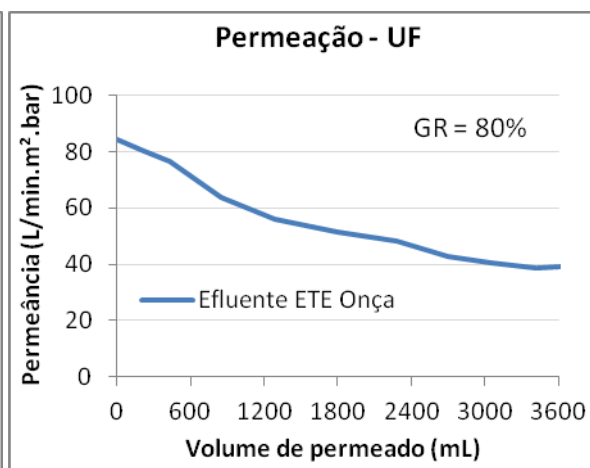


Figura 8: Permeância do efluente da ETE Onça na ultrafiltração

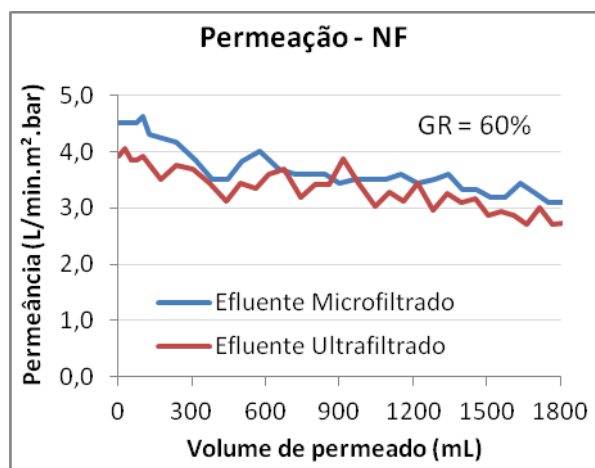


Figura 9: Permeância dos efluentes microfiltrado e ultrafiltrado na nanofiltração

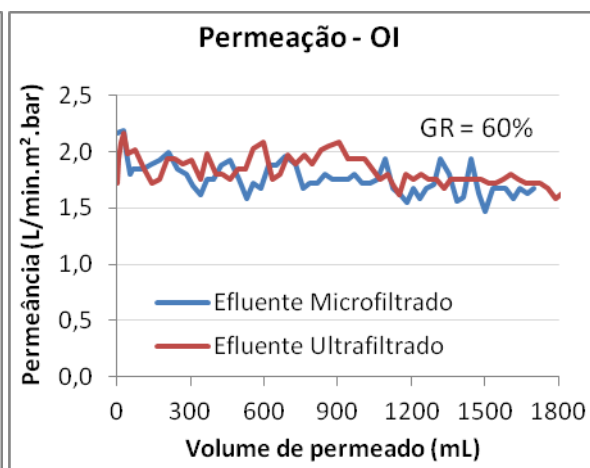


Figura 10: Permeância dos efluentes microfiltrado e ultrafiltrado na osmose inversa

Na permeação do efluente da ETE Onça nas membranas porosas, a microfiltração e a ultrafiltração tiveram valores próximos de permeância no início do processo. Porém a ultrafiltração apresentou um maior decaimento de fluxo ao longo da permeação.

A permeância da osmose inversa foi menor que a da nanofiltração, o que é esperado em razão das características das membranas. Não houve diferença relevante nos valores de permeância para o efluente microfiltrado em relação ao efluente ultrafiltrado; ademais, as membranas densas apresentaram um baixo decaimento da permeância ao longo da filtração. Isto sugere que houve baixa incrustação devido a um bom desempenho das membranas porosas (tanto microfiltração, quanto ultrafiltração) como pré-tratamento.

CARACTERIZAÇÃO

Outra característica das membranas que deve ser observada, além da permeância, é a seletividade. Este parâmetro está diretamente relacionado à qualidade do permeado, que reflete a capacidade da membrana em reter os contaminantes. A seletividade das membranas associadas, ou seja, de cada rota avaliada, pode ser observada através da comparação dos parâmetros de qualidade da alimentação bruta (efluente da ETE Onça) e dos parâmetros de qualidade do permeado e eficiências de remoção ao final do processo (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores finais e eficiência global de remoção de contaminantes em cada rota

Tipo de membrana e Alimentação	Efluente ETE Onça	Valores e eficiência de remoção em cada rota			
		MF-NF	MF-OI	UF-NF	UF-OI
DQO (mg/L)	153	< 0,1 (100%)	< 0,1 (100%)	< 0,1 (100%)	< 0,1 (100%)
Cor (mg/L)	0,04	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Condutividade (mS/cm ²)	761	27,6 (96%)	84,6 (89%)	32,6 (96%)	52,9 (93%)
pH	7,1	8,1	8,8	8,9	8,7
SST (mg/L)	500	~0,0 (100%)	~0,0 (100%)	~0,0 (100%)	~0,0 (100%)
N-NH ₃ (mg/L)	43,3	2,7 (94%)	3,2 (93%)	2,7 (94%)	1,9 (96%)
Fósforo (mg/L)	5,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Para o pH a eficiência de remoção não se aplica. Para Cor e Fósforo as eficiências de remoção não foram calculadas pois a concentração deu abaixo do limite de detecção; porém não se pode afirmar que a remoção foi de 100%.

Todas as rotas geraram um permeado dentro dos requisitos de qualidade considerados neste estudo para água de reúso industrial, (DQO < 5,0 mg/L; N-NH₃ < 5,0 mg/L e P < 1,0 mg/L). O pH encontra-se na faixa recomendada, entre 6,0 e 9,0 e o permeado é praticamente isento de cor e sólidos, a condutividade é baixa em todas as rotas investigadas. Diante destes resultados, entende-se que todas as rotas têm desempenho satisfatório na remoção de contaminantes do efluente da ETE Onça para produção de água de reúso.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para atingir a eficiência de remoção requerida para água de reúso industrial a partir do efluente da ETE Onça é necessário uma membrana densa, de alta seletividade, de nanofiltração ou de osmose inversa. A associação com um pré-tratamento utilizando membranas porosas é essencial para garantir o bom desempenho do sistema. Membranas de microfiltração ou ultrafiltração possuem maior permeância hidráulica e são capazes de rejeitar parte dos sólidos suspensos e da matéria orgânica, reduzindo o problema da incrustação na membrana densa.

A membrana de osmose inversa tem uma seletividade maior que a de nanofiltração, rejeita mais contaminantes. Todavia, a nanofiltração também apresenta boa seletividade, gera o permeado a um nível de

qualidade satisfatório para a produção de água de reuso. A membrana de nanofiltração possui maior permeância, permitindo um maior fluxo de permeado e conferindo melhor eficiência energética ao sistema. Das rotas analisadas, todas produziram um permeado dentro dos requisitos de qualidade de água para reuso industrial proposto no estudo. A rota de menor custo energético é a microfiltração seguida da nanofiltração, uma vez que estas membranas permitem maior fluxo.

A sequência deste estudo contempla testes em escala piloto para monitoramento do sistema funcionando em maior grandeza e por um período de tempo mais extenso. O concentrado do processo de separação por membranas também merece consideração. Deve ser feito um estudo de viabilidade de recuperação de nutrientes e o cumprimento da legislação de descarte de efluentes. A destinação ambientalmente correta deste rejeito deve ser avaliada; uma sugestão é recircular o concentrado para o início da ETE.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao GEAPS Membranas – Grupo de Estudos e Aplicações de Processos de Separação por Membranas, à COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais, e ao DESA/UFMG – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, pela colaboração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013. Brasília: ANA, 432 p. : il., 2013.
2. AMARAL, M.C.S.; ANDRADE, L.H.; LANGE, L.C.; BORGES, C.P. Avaliação do emprego de microfiltração para remoção de fibras do efluente de branqueamento de polpa celulósica. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 18, n. 1, p. 65-74, 2013.
3. GONÇALVES R.F., CHERNICHARO C.A.L., ANDRADE NETO C.O, ALEM SOBRINHO P., KATO M.T., COSTA R.H.R., AISSE M.M. & ZAIAT M. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por reatores com biofilme. Cap. 4. In: CHERNICHARO C.A.L. (coordenador). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro, Brasil, 544 p., 2001.
4. KRAEMER, J.T.; MENNITI, A.L.; ERDAL, Z.K.; CONSTANTINE, T.A.; JOHNSON, B.R.; DAIGGER, G.T.; CRAWFORD, G.V. A practitioner's perspective on the application and research needs of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment. Elsevier – Bioresource Technology 122:2-10, 2012.
5. LIU, M.; LÜ, Z.; CHEN, Z.; YU, S.; GAO, C. Comparison of reverse osmosis and nanofiltration membranes in the treatment of biologically treated textile effluent for water reuse. Elsevier – Desalination 281:372-378, 2011.
6. RIERA, F. A.; SUÁREZ, A.; MAURO, C. Nanofiltration of UHT flash cooler condensates from a dairy factory: Characterizations and water reuse potential. Elsevier – Desalination 309:52-63, 2013.
7. RIPPERGER, S.; ALTMANN, J. Crossflow microfiltration – state of the art. Elsevier – Separation and Purification Technology 26:19-31, 2002.
8. SNIS. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2010. Brasília: SNSA/MCIDADES, 448 p. : texto, tabelas, 2012.
9. WANG, X. L.; SHANG, W. J.; WANG, D. X; WU, L.; TU, C. H. Characterization and applications of nanofiltration membranes: State of the art. Elsevier – Desalination 236:316-326, 2009.
10. WANG, Y. N.; TANG, C. Y. Protein fouling of nanofiltration, reverse osmosis, and ultrafiltration membranes—The role of hydrodynamic conditions, solution chemistry, and membrane properties. Journal of Membrane Science, v. 376, p. 275–282, 2011.