

I-201 - PRÉ-TRATAMENTO DE ÁGUA DO MAR AO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA EM USINAS TERMELÉTRICAS

Luciano Dias Xavier⁽¹⁾

Doutorando em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela UFRJ. Mestre em Engenharia Ambiental pela UFRJ. Bacharel em Engenharia Química pela UFRRJ. Agente de Saneamento pela CEDAE.

Lídia Yokoyama⁽¹⁾

Professor Associado II do Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Doutorado em Química pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Mestrado em Engenharia Metalúrgica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal do Pará.

Vanessa Reich de Oliveira⁽²⁾

Mestre em Energy Systems and Environment - University of Strathclyde. MBA em Finanças pelo IBMEC. Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Engenheira Química pela ENEVA.

Gabriel Travagini Ribeiro⁽³⁾

Engenharia de Energia, Engenharia Ambiental e Urbana e Bacharelado em Ciência e Tecnologia na Universidade Federal do ABC. Tecnologia em Saneamento Ambiental pela Faculdade SENAI de Tecnologia. Engenheiro nas áreas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação no setor elétrico pela empresa EDP Energias do Brasil

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Av. Athos da Silveira Ramos, 149. Escola de Química, Bloco I Sl E-124 - Ilha do Fundão Rio de Janeiro- Brasil - CEP 21941-909 Tel.: (21) 3938-7346 - e-mail: ldx1982@poli.ufrj.br

RESUMO

Usinas termelétricas requerem uma quantidade significativa de água. Além disso, há uma necessidade de condicionar a qualidade da água para cada uso específico. A usina de estudo não possui fontes de mananciais hídricos próximos, fazendo uso da captação de água da costa oceânica do estado do Maranhão, Brasil, que possui elevada turbidez e variações enormes de marés ao longo do ano. Como a fonte de água é de natureza salina, justifica-se a necessidade de processos de osmose inversa a fim de transformar a fonte de água salina em água ultrapura para alimentação das caldeiras, pois esta água poderia corroer e / ou incrustar ao longo do processo industrial. A água a ser alimentada no sistema de osmose inversa necessita de um pré-tratamento a fim de adequar sua qualidade para uma maior eficiência do processo. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o processo de dessalinização da água do mar através de uma combinação de processos físicos e químicos, como coagulação-floculação, filtração de areia e microfiltração como pré-tratamento à osmose inversa. Testes de coagulação e floculação com PAC (cloreto de polialumínio) e polímeros floculantes foram testados. A combinação de dosagens de PAC de 30 mg / L e 0,3 mg / L de polímero aniônico Nalclear 8173 permitiu a redução dos valores de turbidez para abaixo de 1 NTU. O permeado da microfiltração apresentou melhor qualidade como água de alimentação para a osmose inversa, sendo indicativo de substituição aos atuais projetos de usinas com filtro cartucho, pois garante valores menores de SDI₁₅, indicando maior vida útil para membranas de osmose inversa.

PALAVRAS-CHAVE: Osmose inversa, Coagulação, Floculação, Microfiltração, Água salina.

INTRODUÇÃO

A usina termelétrica Itaqui é o primeiro empreendimento da Eneva no Maranhão. Localizada no Distrito Industrial de São Luis e movida a carvão mineral, a usina está em operação comercial desde fevereiro de 2013. Com capacidade para gerar 360 MW de energia, a Eneva aplica uma significativa parcela de seu investimento total em tecnologias de controle ambiental, que promovem a queima limpa do carvão, reduzindo significativamente as emissões de material particulado, enxofre e óxido de nitrogênio na atmosfera. Em 2015, Itaqui obteve a certificação internacional do Sistema de Gestão de Qualidade (ISO 9001) e do Sistema de

Gestão de Saúde e Segurança (OHSAS 18001) para o processo de descarregamento de graneis sólidos (Operação portuária).

Itaqui capta água salina do mar para utilização em sistemas de caldeira para geração de energia. Esta água passa por etapas de coagulação-floculação, filtro multimídia, filtro cartucho e osmose inversa. No entanto, o sistema de filtro cartucho é repostado várias vezes ao longo do ano, gerando custo para o processo, além do fato das membranas de osmose inversa possuírem tempo de vida útil operacional menor do que o projetado, em decorrência da presença de alumino silicatos, agredindo sua estrutura.

A osmose inversa é de longe o mais difundido tipo de processo de dessalinização. É capaz de rejeitar quase toda a matéria coloidal ou dissolvida a partir de uma solução aquosa, produzindo uma corrente de salmoura concentrada e uma corrente de permeado que consiste de água quase pura. Embora seja usada para concentrar substâncias, o seu uso mais freqüente reside nas aplicações de dessalinização (BAKER, 2004; FRITZMANN et al., 2007; HABERT et al., 2006)

A osmose inversa retém quase todos os solutos dissolvidos, incluindo sais e íons, permitindo a passagem de solvente. O termo osmose inversa se deve ao fato do fluxo de permeado do processo ocorrer no sentido inverso ao do fluxo osmótico normal (BAKER, 2004; HABERT et al., 2006).

Devido à sensibilidade a incrustação em unidades de osmose, a água de alimentação deve ter uma alta qualidade. Para assegurar desempenho estável, em longo prazo, o pré-tratamento deve fornecer água de alimentação de alta qualidade, independentemente da flutuação da qualidade da água bruta, sendo essencial para a operação da usina. O pré-tratamento serve para reduzir o potencial de incrustação, aumentar a vida da membrana da osmose inversa, manter a eficiência do processo e minimizar o fouling na superfície da membrana (AL-MALEK et al., 2005).

A água do mar apresenta elevado teor de sais, devendo ser condicionada para alimentar o processo de osmose inversa em plantas termelétricas. O pré-tratamento é um passo de processo cuidadoso para evitar danos às membranas. A coagulação-floculação é um processo usado para agregar colóides e partículas dissolvidas em flocos maiores, que podem ser removidos por processos de sedimentação ou flotação, dependendo das características dos flocos serem coesivos ou grumosos, respectivamente (JINMING et al., 2002; DI BERNARDO & DANTAS, 2005).

Na coagulação, o objetivo é a desestabilização das partículas que estão em suspensão, proporcionando uma colisão entre eles. Esta desestabilização ocorre pela adição de substâncias químicas conhecidas como coagulantes. As substâncias normalmente utilizadas como coagulantes são sulfato de alumínio, sulfato ferroso, cloreto férrico, sulfato férrico e aluminato de sódio. Auxiliares também podem ser usados para coagulação, sendo o uso mais comum chamado polieletrólitos ou polímeros, por apresentar estrutura química polimérica. A floculação promove a aglomeração e compactação das partículas na formação de flocos capazes de sedimentar. Este processo é favorecido pela agitação suave, que facilita o contato entre os flocos. O processo de coagulação-floculação, no tratamento de água, é utilizado para: Remoção de turbidez; Remoção de cor; Redução de bactérias, vírus e outros agentes patogênicos; Assim como outras algas e organismos planctônicos (KIM et al., 2001; DI BERNARDO & DANTAS, 2005).

No passado, a maioria das usinas de osmose inversa utilizou pré-tratamento convencional, que é definido como pré-tratamento químico e físico sem a utilização de tecnologias de membrana. Pré-tratamento convencional geralmente usa coagulação-floculação, sedimentação, filtro de areia e filtro cartucho. Com o declínio da qualidade da água e diminuição dos custos, surgiram projetos de utilização de pré-tratamento por membrana antes do estágio de osmose inversa como uma alternativa ao pré-tratamento convencional (WOLF & SVERNS, 2004). Membranas de micro e ultrafiltração são opções alternativas consideráveis e estima-se que o pré-tratamento por membrana cresça rapidamente nos próximos anos (VIAL et al., 2003).

O objetivo deste trabalho é simular em escala laboratorial etapas de pré-tratamento que conduzam ao maior tempo de vida útil das membranas de osmose inversa, através de uma combinação de processos físicos e químicos, como coagulação-floculação, filtração de areia e microfiltração, gerando como produto final, um permeado com maior qualidade para alimentação de sistemas de osmose inversa.

MATERIAIS E MÉTODOS

A. Amostra

Foram recebidas amostras oriundas da Usina Termelétrica Itaquí no Laboratório de Tratamento de Águas e Reuso de Efluentes (LabTare) da UFRJ. Os volumes recebidos foram 150L da água de captação em maré baixa e alta do dia 28 de Outubro de 2015.

O parâmetro sólidos foi determinado por meio de análise gravimétrica. A turbidez foi medida com o auxílio de um turbidímetro. Os parâmetros condutividade e pH foram determinados através de método potenciométrico, enquanto a análise de alcalinidade foi realizada através de método titulométrico. Os parâmetros cloro residual livre e total, cor, sílica reativa, DQO e alumínio foram obtidos por colorimetria usando um espectrofotômetro modelo HACH DR 2800. A determinação de carbono orgânico dissolvido foi realizada utilizando-se um analisador de carbono modelo TOC-Vwp acoplado a um amostrador automático modelo ASI-V, ambos da marca Shimadzu® e controlados por software TOC Control-V Shimadzu®. Análises de sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato e dureza total foram realizadas por cromatografia líquida (930 Compact IC Flex 1-Metrohm). O parâmetro Óleos & Graxas foi determinado pelo método de extração em hexano e medido por espectrometria na região de Infravermelho. O equipamento utilizado foi o Infracal TOG/TPH, modelo HATR-T, marca Wilks Enterprise.

B. Coagulação-floculação

Os testes de coagulação foram realizados com o coagulante Cloreto de polialumínio (PACl) por ser o utilizado na Unidade Industrial e por trazer a grande vantagem de não consumir alcalinidade do meio quando adicionado na água e conseqüentemente, provoca pouca variação no pH. Para avaliar as condições de coagulação / floculação / sedimentação, testes foram conduzidos em equipamento de Jar Test.

Os ensaios de Jar test foram realizados a partir dos dados de projeto fornecidos pela ENEVA, com reprodução das condições operacionais do clarificador em relação os tempos de agitação rápida e lenta e as velocidades de agitação rápida e lenta. A partir de testes preliminares, procurou-se trabalhar com concentrações de coagulante de 20, 30, 40, 50, 60 e 70 mg/L, assim como variando as concentrações de polímero floculante de 0,1, 0,2 e 0,3 mg/L. Foram avaliados os seguintes parâmetros:

- Influência do pH para coagulação, com varredura de diferentes faixas de pH;
- Diferentes concentrações de coagulante PACl (Al_2O_3 – 18% m/m);
- Clarificação com polímeros auxiliares de floculação.

B.1. Influência do pH para a coagulação

Inicialmente foram realizadas as medidas de pH e turbidez das amostras brutas (antes do ensaio de clarificação). Após a adição de PAC na concentração de 60 mg/L, o pH das amostras foram corrigidos para os valores na faixa de 5,0 a 10,0, utilizando ácido sulfúrico e hidróxido de sódio 10%. Os ensaios foram realizados nas seguintes condições de operação do Jar Test (Tabela 1).

Tabela 1 – Dados do Jar Test.

Volume de água bruta	500 mL
Velocidade de mistura rápida	100 rpm
Tempo de mistura rápido	1 min
Velocidade de mistura lenta	40 rpm
Tempo de mistura lenta	15 min
Tempo de sedimentação	20 min

B.2. Definição da concentração de PAC

Foram testadas dosagens de PAC varrendo-se faixas de concentração de 20 a 70 mg/L a fim de obter menores valores de turbidez, atentando ao fato de que concentrações de turbidez abaixo de 5 mg/L são requeridas para a planta.

B.3. Clarificação com polímeros auxiliares de floculação

Considerando a influência das características da água a ser tratada na dosagem de coagulante a ser aplicada, estudos adicionais foram conduzidos para determinar a aplicação ótima de auxiliares de coagulação / floculação, juntamente com o coagulante primário. A utilização de polímeros auxiliares de floculação pode ser sugerida para aumentar a eficiência do processo, avaliando a sua turbidez no final do Jar test. Assim, realizaram-se testes preliminares com os polímeros descritos na Tabela 2, variando a sua concentração de 0,1 a 0,3 mg / L.

Tabela 2 – Polímeros floculantes utilizados.

Polímeros	
Aniônico	Nalclear 8173
	Magnafloc LT27
Catiônico	Nalco 8110 pulv

C. Ensaio com filtro de areia

O filtro de areia é um método de tratamento bastante antigo, inicialmente adotado na remoção de turbidez da água potável. O funcionamento deste sistema baseia-se na aplicação de afluente intermitentemente sobre a superfície de um leito de areia. Durante a sua infiltração, ocorre a purificação por meios físicos, químicos e biológicos. O tratamento físico é resultante do peneiramento e o químico se dá pela adsorção de determinados compostos. Mas, a purificação depende principalmente da oxidação bioquímica que ocorre no contato do afluente com a cultura biológica (DI BERNARDO & DANTAS, 2005).

As amostras foram filtradas em coluna de areia com granulometria média no valor de 1,00 mm, utilizando bomba peristáltica com vazão de operação de 0,1 L/min, diâmetro do leito de 2,8 cm e altura de 57 cm. Estas condições foram reduzidas em escala a partir do projeto original.

A tendência de bloqueio das membranas pode ser avaliada em testes específicos como o Índice de elementos siltosos (SDI). O equipamento básico, consiste de um sistema de filtração pressurizada equipado com filtros de 0,45µm de porosidade e diâmetro de 47mm. A amostra é filtrada a uma pressão de 30 psig (TAYLOR & JACOBS, 1996).

O SDI é calculado a partir de três intervalos de tempo: o primeiro intervalo (ti) é o tempo necessário para a coleta dos primeiros 500 mL de permeado, o segundo intervalo de tempo (tt) varia de 5, 10 ou 15 minutos, o qual é intervalo de tempo entre o término da coleta dos primeiros 500 mL de permeado e o início da coleta dos segundos 500 mL de permeado. O terceiro intervalo (tf) é o tempo necessário para a coleta dos últimos 500 mL de permeado. O tempo padrão para o tt é 15 minutos. O SDI é determinado através da Equação (1):

$$SDI = 100 * [1 - (ti/tf)] / tt \quad (1)$$

D. Ensaio com microfiltração

A microfiltração com membranas é um processo relevante, que vem se destacando no vasto mercado de engenharia de processos, permite a separação de partículas tipo bactérias, proteínas, emulsões, dentre outras misturas (BAKER, 2004; FRITZMANN et al., 2007; HABERT et al., 2006).

Realizou-se microfiltração com a membrana MFKTM-618 (Koch) com porosidade de 0,1 µm a 1 bar. A Figura 1 mostra o sistema de microfiltração utilizado nos ensaios de permeação. Este consistia de um tanque de

alimentação com a capacidade de 5 L, retificador de corrente, rotâmetro, manômetro, termômetro, indicador de vazão e bomba de engrenagem.

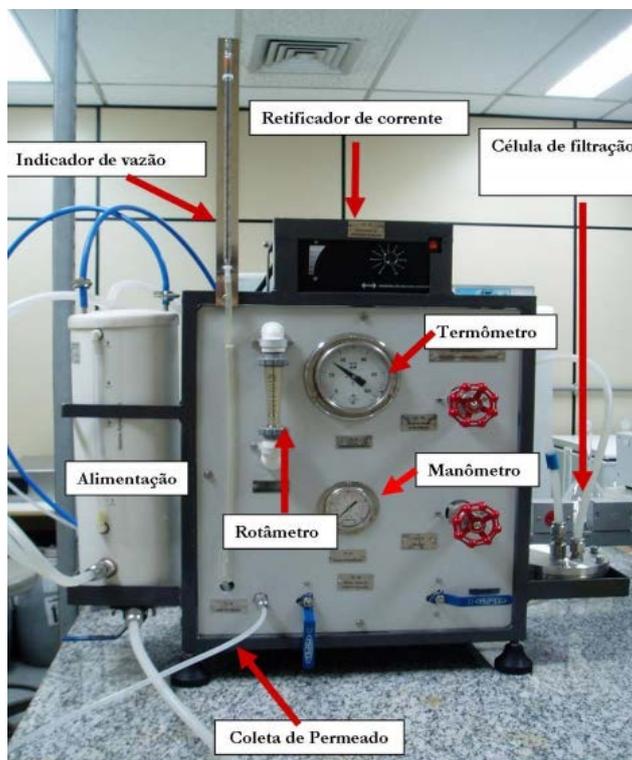


Figura 1 – Sistema de Microfiltração.

E. Ensaio com osmose inversa

A OI vem se tornando uma tecnologia com bastante aceitação no setor industrial e de tratamento de água, cuja aplicação mais comum envolve simplesmente a remoção de contaminantes indesejáveis. Seu principal campo de aplicação é a dessalinização de águas salobras e marinhas, para uso em navios, plataformas de extração de petróleo, em poços artesianos nas regiões áridas, etc. Este processo é também aplicado em larga escala na produção de água ultrapura nas indústrias eletrônicas, nos hospitais, indústrias farmacêuticas, etc (BAKER, 2004; FRITZMANN et al., 2007; HABERT et al., 2006).

A osmose propriamente dita caracteriza-se pelo equilíbrio que se gera espontaneamente através de uma membrana semipermeável, em que há um movimento da água contendo menor salinidade que passa a membrana para o lado contendo a solução de maior salinidade (diluindo-a, portanto), o processo ocorre até as concentrações salinas serem iguais dos dois lados. Se imaginarmos os dois lados da membrana com compartimentos simétricos, quando este equilíbrio é atingido o nível da solução será mais alto num dos lados da membrana, no lado para onde a água se deslocou (a inicialmente mais concentrada), a esta diferença chama-se pressão osmótica. Uma membrana de osmose inversa é operada aplicando uma pressão que exceda a da pressão osmótica e o efeito reverso ocorre, ou seja, a água passa na membrana ao contrário da direção da osmose, obtendo-se a retenção dos sais na superfície afluente da membrana (GREENLEA et al., 2009).

Realizou-se o ensaio de osmose inversa com a membrana BW30-4040 (Dow) a 35 bar. Realizou-se o ensaio com amostras após passarem pelo filtro de areia e amostras após passarem por processo de microfiltração. A Figura 2 mostra o sistema de osmose inversa utilizado nos ensaios de permeação. Este consistia de um tanque de alimentação com a capacidade de 10 L, com capacidade de operação até 40 bar.



Figura 2 – Sistema de Osmose Inversa.

RESULTADOS

A. Amostra

A Tabela 3 apresenta a caracterização das amostras recebidas, seguindo as metodologias de APHA (2012). Observou-se pouca variabilidade na grande maioria dos parâmetros analisados independente do dia e maré. Parâmetros mais influenciados pelo dia e maré são turbidez e sólidos, que exibem uma relação próxima entre eles. Observa-se que não há grandes variações em Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) que está relacionado com a presença de sais dissolvidos. Entretanto, verificam-se variações significativas nos parâmetros Sólidos Suspensos Totais (SST) e na Turbidez que estão relacionados com a presença de particulado suspenso na amostra, sendo um fator determinante para a eficiência de separação no processo de membranas.

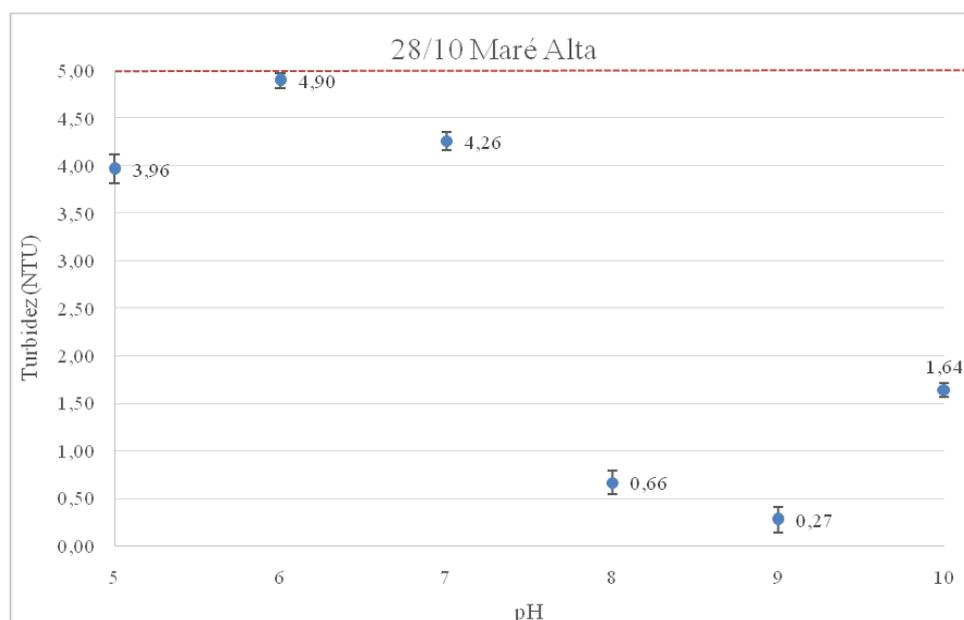
Tabela 3 – Caracterização da água do mar.

Parâmetros	Água do mar			
	Maré Alta		Maré Baixa	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Condutividade (mS/cm)	45,72	0,13	46,04	0,10
Turbidez (NTU)	124	2	135	1
Sílica Reativa (mg/L)	3,47	0,16	3,54	0,04
Silício (mg/L)	3,7	0,1	4,7	0,1
Cor aparente (UC)	288	6	235	3
Cor real (UC)	24	2	60	10
Salinidade (%)	35,1	0,6	31,2	0,9
Cloro Livre (mg/L)	0,12	0	0,13	0,04
Cloro Total (mg/L)	0,13	0,03	0,26	0,03
DQO (mg/L)	28	2	24	2
Alcalinidade (mg/L)	116,3	1,2	119,3	1,2
ST (mg/L)	43008	1163	45556	1251
SST (mg/L)	317	28	328	38
SDT (mg/L)	42691	1626	45228	1551
pH	7,42	0,03	7,32	0,02
COD (mg/L)	6,1	0,3	4,3	0,2
Alumínio (mg/L)	0,023	0,001	0,020	0,002
Sódio (mg/L)	10929	180	10803,5	198
Potássio (mg/L)	441	32	418	25
Cálcio (mg/L)	368,4	28,3	369,1	38,0
Magnésio (mg/L)	1253,7	47,0	1264,0	14,7
Cloreto (mg/L)	19430	314	19297	498
Sulfato (mg/L)	1883,2	40	2402,1	20
Dureza (mg/L)	6073,6	100,4	6117,8	144,8
O & G (mg/L)	0,65	0,05	0,6	0,05

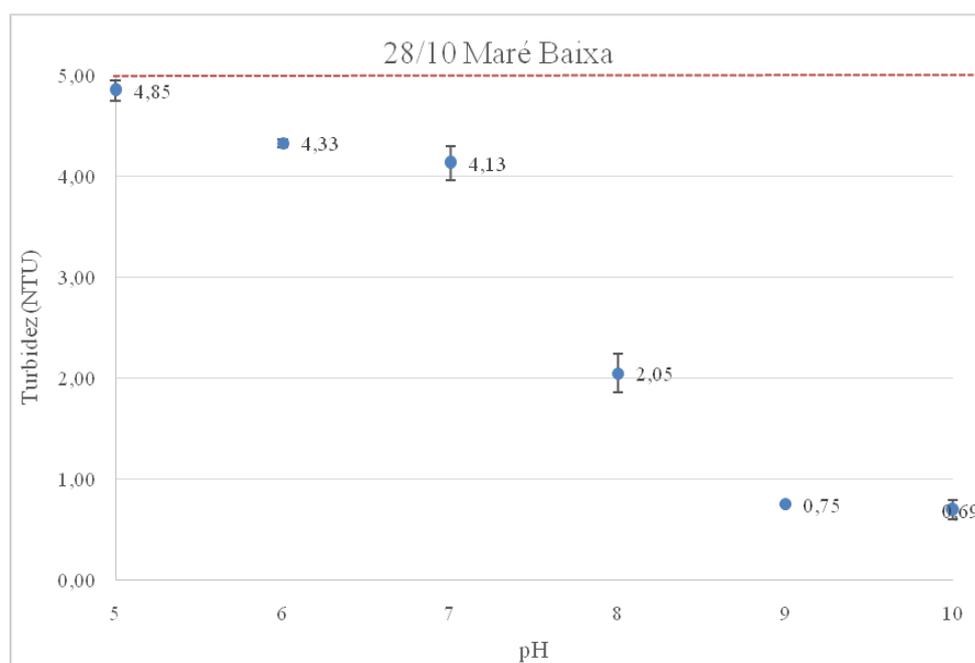
B. Coagulação-floculação

B.1. Influência do pH para a coagulação

A coagulação foi avaliada através das medidas de turbidez da amostra clarificada de acordo com a Figura 3 onde a linha tracejada indica a meta desejada de turbidez abaixo de 5 NTU. Optou-se por não efetuar o ajuste do pH nos próximos Jar Test devido a resultados satisfatórios com o pH da amostra bruta, além do uso de um dispersante em estágios posteriores da osmose inversa cujo desempenho está comprometido acima de pH 7,80. Observa-se que não pode estabelecer uma relação direta entre o nível das marés e as melhores concentrações de PACl, bem como diretamente relacionado ao valor inicial da turbidez.



(a)

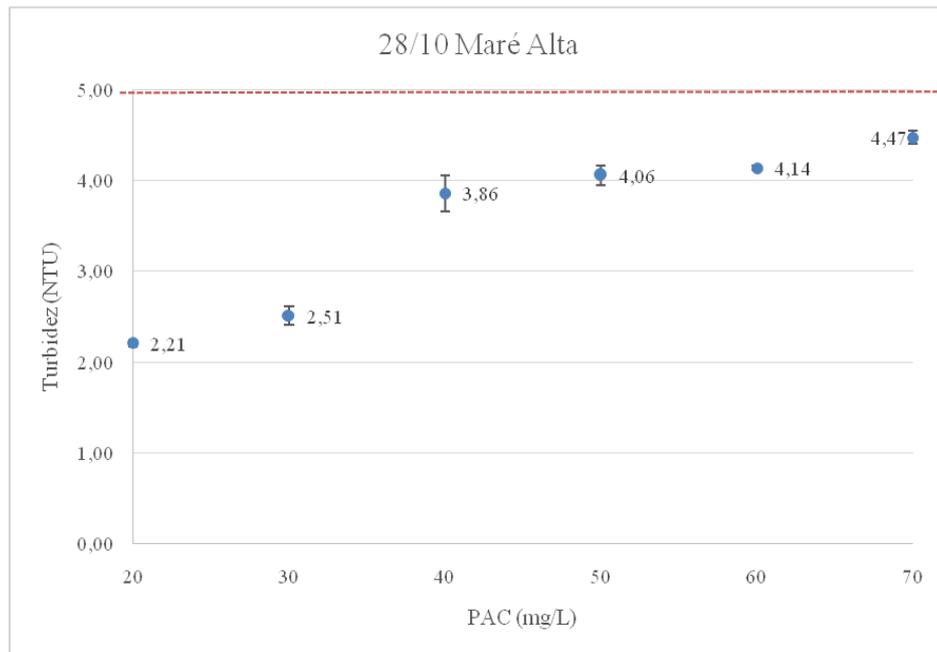


(b)

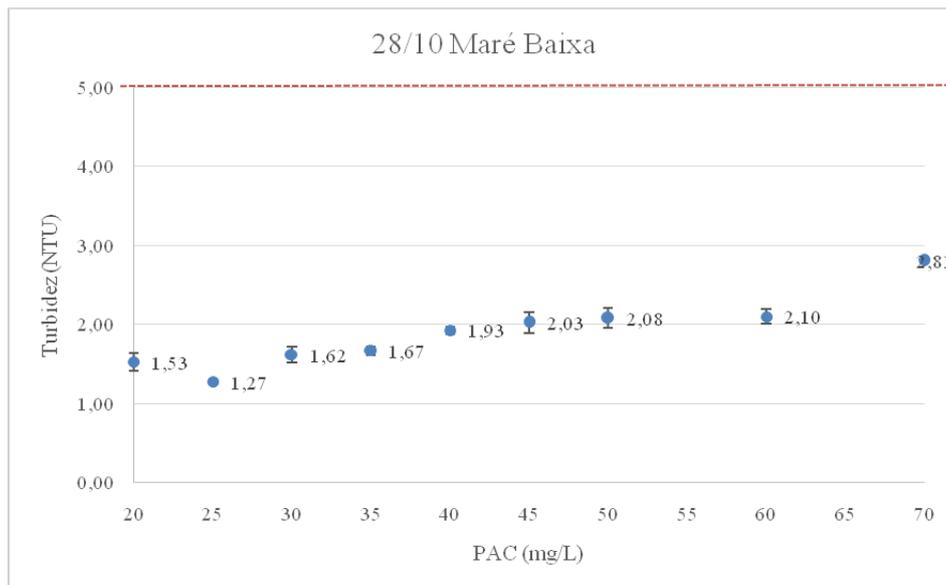
Figura 3 – Avaliação da influência do pH em Jar test realizado com a amostra do dia 28/10/2015 – Maré Alta (a) e Maré Baixa (b).

B.2. Definição da concentração de PACl

A Figura 4 ilustra graficamente os resultados encontrados. As amostras independentemente da maré já atendem a expectativa de turbidez abaixo de 5 NTU.



(a)



(b)

Figura 4 – Avaliação da concentração de PAC (mg/L) em Jar test realizado com a amostra do dia 28/10/2015 – Maré Alta (a) e Maré Baixa (b).

B.3. Clarificação com polímeros auxiliares de floculação

A partir dos resultados apresentados, pode-se sugerir a utilização de polímeros auxiliares para floculação, a fim de aumentar a eficiência do processo, avaliando-se sua turbidez ao fim do Jar test. Assim, realizaram-se testes preliminares com os polímeros descritos na Tabela 2, variando sua concentração de 0,1 a 0,3 mg/L. Os resultados são apresentados na Figura 5, para todas as amostras, onde observa-se o melhor desempenho para o polímero Nalclear 8173, obtendo-se menores valores finais de turbidez.

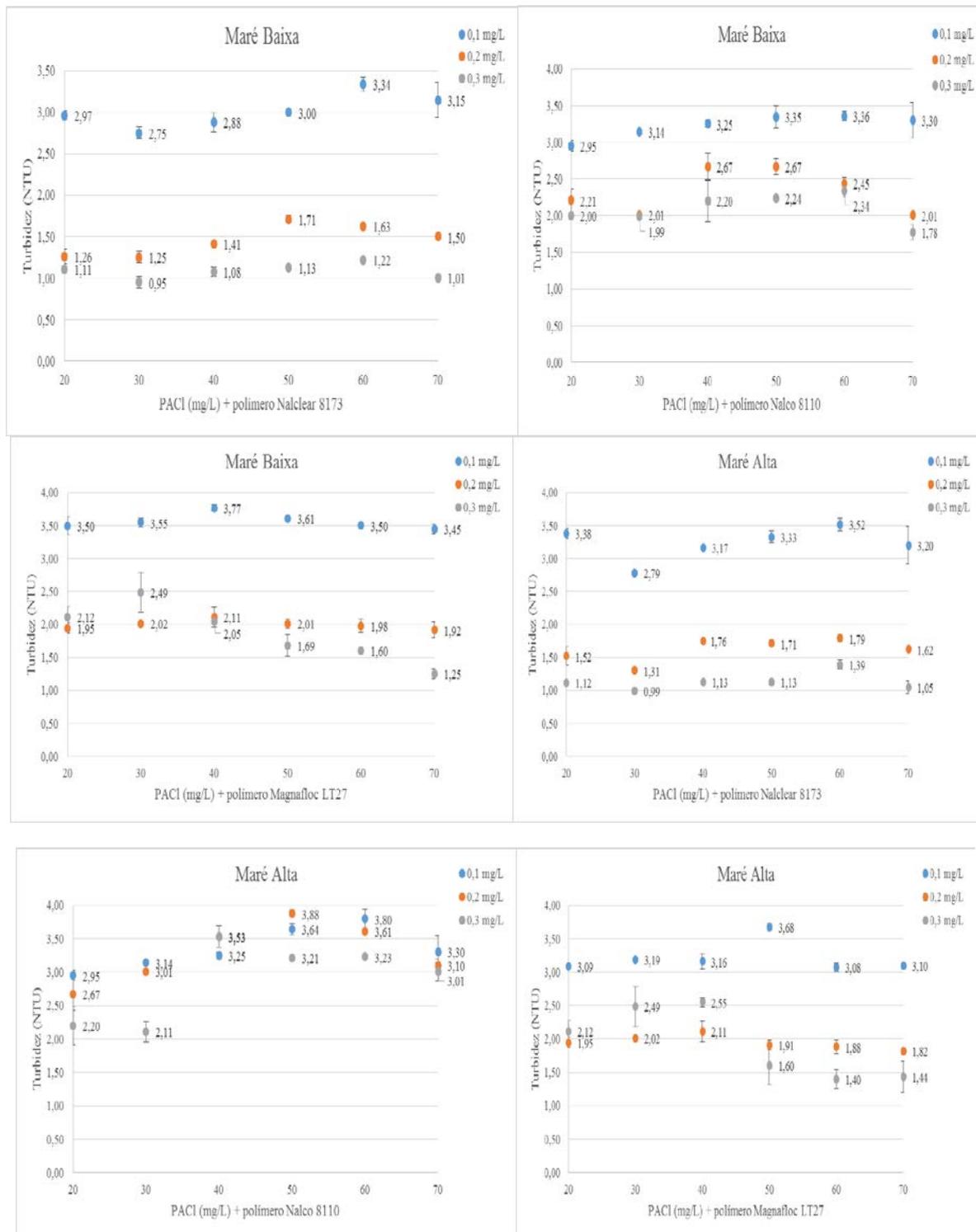


Figura 5 - Resultados com as dosagens de PACI (mg/L) + polímero flocculante (mg/L).

Após escolha das melhores condições de dosagem de PACI e polímero, reportadas na Tabela 4, observou-se valores finais de turbidez abaixo de 2 NTU.

Tabela 4 – Melhores condições experimentais.

Condição	Maré	PACl (mg/L)	Nalclear 8173 (mg/L)	Turbidez (NTU)
1	Baixa	30	0,3	0,95
2	Alta	30	0,3	0,99

C. Ensaio com filtro de areia

Após a clarificação das amostras das condições experimentais apresentadas na Tabela 4, foram realizados ensaios de caracterização, incluindo os ensaios de SDI e alumínio (Kit Hach 8326). Para esta etapa, analisou-se as condições 1 e 2 da Tabela 4, pois representam o maior e menor valor de turbidez alcançado. Os resultados da caracterização das amostras clarificadas e posteriormente filtradas são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização comparativa entre as amostras de água de captação, água clarificada e água após filtro de areia. D.P. = Desvio Padrão.

Parâmetros	Unidade	Maré Alta						Maré Baixa					
		Água Bruta	D.P.	Coagulação	D.P.	Filtro	D.P.	Água Bruta	D.P.	Coagulação	D.P.	Filtro	D.P.
Turbidez	NTU	123,7	2	0,7	0,07	0,4	0,4	135	1	1,41	0,02	0,82	0,02
Alumínio	mg/L	0,023	0,001	0,027	0	0,027	0	0,02	0,002	0,028	0	0,028	0
Cloro Livre	mg/L	0,12	0	0	0	0	0	0,13	0,04	0	0	0	0
Cloro Total	mg/L	0,13	0,03	0,1	0	0,1	0	0,26	0,03	0,1	0	0,1	0
Condutividade	mS/cm	45,72	0,13	43,68	0,05	43,65	0	46,04	0,1	43	0	43	0
Cloreto	mg/L	19430	314	18916	80	18346	39	19297	498	18980	20	18500	12
Sulfato	mg/L	1883,2	40	1863	20	1800	10	2402,1	20	2300	18	2258	20
pH	-	7,42	0,03	7,12	0,02	7	0,1	7,32	0,02	7,2	0,01	7,09	0,05
Cálcio	mg/L	368,4	18,3	201,6	8	200,9	1	369,1	18	204,2	1,8	201	1
Magnésio	mg/L	1253,7	17	136,3	1	135,8	1	1264	14,7	137,0	1	136	1
Dureza Total	mg/L	6073,6	10,4	1064,1	6	1050,3	2	6117,8	14,8	1063,4	3	1051,4	2
ST	mg/L	43008	1163	41695	321	41670	230	45556	1251	42698	300	42680	290
SST	mg/L	317	28	6	0	2	0	328	38	4	0	2	0
SDI	---	---	---	5	0,1	4,8	0,07	---	---	4,58	0,05	4,27	0,03
COD	mg/L	6,1	0,3	2,4	0	2,38	0	4,3	0,2	2,1	0,1	2,1	0

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que para ambas as concentrações de PACl na clarificação das amostras, o valor de alumínio total nas amostras filtradas encontra-se abaixo do estabelecido em projeto (valor máximo de 0,05 mg/L). Observa-se a redução gradual dos outros parâmetros ao longo de cada processo utilizado.

Em relação ao valor de Silt Density Index (SDI), os valores obtidos após clarificação e filtração em leito de areia, se encontram acima de 3 unidades (valor máximo estabelecido em projeto para entrada da água clarificada nos módulos de osmose inversa – O.I.). Este resultado nos permite inferir a necessidade de etapas complementares ou alternativas à filtração em areia para que ocorra a redução do valor de SDI para garantir a maior durabilidade das membranas de O.I. Assim, optou-se pela substituição do processo de filtração em areia por uma microfiltração, a fim de tentar garantir uma maior qualidade de permeado e redução do SDI.

D. Ensaio com microfiltração

Realizou-se o ensaio com amostras após processo de coagulação-floculação (Tabela 4). A Tabela 6 mostra os resultados encontrados, onde se percebe claramente uma redução maior dos parâmetros analisados quando comparados ao processo de filtração em areia ilustrado na Tabela 5, mostrando que o processo de microfiltração foi mais efetivo na remoção de turbidez, cloro livre, condutividade, cloreto, sulfato do que o processo de filtração em areia. Porém o fator mais importante foi o SDI, cujo menor valor encontrado ajuda na prolongação da vida útil da membrana de osmose inversa. Como a microfiltração é operada em sistemas com porosidade inferior ao do filtro de areia, espera-se uma melhor separação de partículas.

Tabela 6 - Caracterização comparativa entre as amostras de água de captação, água clarificada e água após microfiltração. D.P. = Desvio Padrão.

Parâmetros	Unidade	Maré Alta						Maré Baixa					
		Água Bruta	D.P.	Coagulação	D.P.	Microfiltração	D.P.	Água Bruta	D.P.	Coagulação	D.P.	Microfiltração	D.P.
Turbidez	NTU	123,67	2	0,7	0,07	0,33	0	135	1	1,41	0,02	0,44	0
Alumínio	mg/L	0,023	0,001	0,027	0	0,025	0	0,02	0,002	0,028	0	0,027	0
Cloro Livre	mg/L	0,12	0	0	0	0	0	0,13	0,04	0	0	0	0
Cloro Total	mg/L	0,13	0,03	0,1	0	0,1	0	0,26	0,03	0,1	0	0,1	0
Condutividade	mS/cm	45,72	0,13	43,68	0,05	41,98	0	46,04	0,1	43	0	41	0
Cloreto	mg/L	19430	314	18916,2	80	17056,2	19	19297	498	18980	20	17100	32
Sulfato	mg/L	1883,2	40	1863	20	1612	10	2402,1	20	2300	18	2009,1	20
pH	-	7,42	0,03	7,12	0,02	6,8	0,1	7,32	0,02	7,2	0,01	6,88	0,05
Cálcio	mg/L	368,4	28,3	201,6	8	180,3	2,1	369,1	38	204,2	1,8	181,5	1
Magnésio	mg/L	1253,7	47	136,3	1	130,5	2	1264	14,7	137,0	1	129	1
Dureza Total	mg/L	6073,6	100,4	1064,1	6	978,1	2	6117,8	144,8	1063,4	3	974,9	2
ST	mg/L	43008	1163	41695	321	36580	200	45556	1251	42698	300	35200	140
SST	mg/L	317	28	6	0	0	0	328	38	4	0	1	0
SDI	---	---	---	5	0,1	3,1	0,1	---	---	4,58	0,05	2,98	0
COD	mg/L	6,1	0,3	2,4	0	2,1	0,1	4,3	0,2	2,1	0,1	1,98	0

E. Ensaio com osmose inversa

Realizou-se o ensaio com amostras após processo de coagulação-floculação (Tabela 4) e filtração em areia (Tabela 6). A Tabela 7 mostra os resultados encontrados, onde se percebe claramente uma redução maior dos parâmetros analisados quando comparados ao processo de filtração em areia ilustrado na Tabela 5.

Tabela 7 - Caracterização comparativa entre as amostras de água clarificada, após filtro de areia e após osmose inversa (O.I.). D.P. = Desvio Padrão.

Parâmetros	Unidade	Maré Alta						Maré Baixa					
		Água Bruta	D. P.	Filtro	D. P.	O. I.	D. P.	Água Bruta	D. P.	Filtro	D. P.	O. I.	D. P.
Turbidez	NTU	0,7	0,07	0,4	0,4	<0,1	0	1,41	0,02	0,82	0,02	<0,1	0
Alumínio	mg/L	0,027	0	0,027	0	0	0	0,028	0	0,028	0	0	0
Cloro Livre	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cloro Total	mg/L	0,1	0	0,1	0	0	0	0,1	0	0,1	0	0	0
Condutividade	mS/cm	43,68	0,05	43,65	0	13,91	0,1	43	0	43	0	13,98	0,1
Cloreto	mg/L	18916,2	80	18345,9	39	5513,3	10	18980	20	18500	12	5590	4
Sulfato	mg/L	1863	20	1800	10	300,44	3	2300	18	2258	20	326,6	5
pH	-	7,12	0,02	7	0,1	3	0,1	7,2	0,01	7,09	0,05	2,8	0,02
Cálcio	mg/L	201,6	8	200,9	1	77,2	2,3	204,2	1,8	201	1	76,4	3
Magnésio	mg/L	136,3	1	135,8	1	27,8	2,1	137,0	1	136	1	28	1,2
Dureza	mg/L	1064,1	6	1050,3	2	303,4	2	1063,4	3	1051,4	2	302,3	2
COD	mg/L	2,4	0	2,38	0	1,01	0	2,1	0,1	2,1	0	0,99	0

Realizou-se o ensaio com amostras após processo de coagulação-floculação (Tabela 4) e microfiltração (Tabela 6). A Tabela 8 mostra os resultados encontrados, onde se percebe claramente a maior qualidade deste permeado frente aos outros processos, principalmente na redução de condutividade, cloreto, sulfato e dureza total. Isto se deve basicamente a melhor qualidade da água de alimentação da osmose inversa, tornando o sistema mais eficiente, pois diminui a carga de íons que chega ao processo, além do parâmetro SDI já ser menor frente ao pré-tratamento com filtração de areia.

Tabela 8 - Caracterização comparativa entre as amostras de água clarificada, após microfiltração (MF) e após osmose inversa (O.I.). D.P. = Desvio Padrão.

Parâmetros	Unidade	Maré Alta						Maré Baixa					
		Água Bruta	D. P.	MF	D. P.	O. I.	D. P.	Água Bruta	D. P.	MF	D. P.	O. I.	D. P.
Turbidez	NTU	0,7	0,07	0,33	0,4	<0,1	0	1,41	0,02	0,44	0,02	<0,1	0
Alumínio	mg/L	0,027	0	0,025	0	0	0	0,08	0	0,027	0	0	0
Cloro Livre	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cloro Total	mg/L	0,1	0	0,1	0	0	0	0,1	0	0,1	0	0	0
Condutividade	mS/cm	43,68	0,05	41,98	0	12,88	0,1	43	0	41	0	12,7	0,02
Cloreto	mg/L	18916,2	80	17056,2	19	2097,4	8,1	18980	20	17100	32	2087,5	3
Sulfato	mg/L	1863	20	1612	10	179,7	1	2300	18	2009,1	20	170,8	2
pH	-	7,12	0,02	6,8	0,1	2,78	0,1	7,2	0,01	6,88	0,05	2,7	0
Cálcio	mg/L	201,6	8	180,3	2,1	0,55	0,1	204,2	1,8	181,5	1	0,49	0,1
Magnésio	mg/L	136,3	1	130,5	2	0,66	0,3	137,0	1	129	1	0,61	0,2
Dureza	mg/L	1064,1	6	978,1	2	4,1	0,1	1063,4	3	974,9	2	3,71	0,1
COD	mg/L	2,4	0	2,1	0,1	0,88	0	2,1	0,1	1,98	0	0,8	0

CONCLUSÕES

Conclui-se que após o sistema coagulação-floculação, a combinação microfiltração e osmose inversa apresentou a maior redução de todos os parâmetros físico-químicos analisados, no entanto, não é possível ainda adequar esta água permeada ao uso em caldeiras de termelétricas, sendo necessário um segundo passe no sistema de osmose inversa, a fim de garantir o polimento final desta água e conseqüentemente, o atendimento a qualidade para uso em caldeiras.

A partir dos resultados apresentados, pode-se sugerir a utilização de PACl e polímeros auxiliares para floculação, a fim de aumentar a eficiência do processo, diminuindo a turbidez da amostra de 135 NTU para 0,99 NTU. Dentre os ensaios realizados o polímero Nalclear 8173 foi o que alcançou boas taxas de remoção de turbidez.

O projeto ITAQUI contempla etapa de clarificação quimicamente assistida e necessária devido a grande quantidade de SST e Turbidez decorrente da grande variação da maré na costa do Maranhão. Neste caso não se justifica a substituição da primeira etapa de clarificação unicamente por membranas.

Quando se compara as características da água de captação de ITAQUI com a de outras plantas e unidades de dessalinização de água do mar, observa-se que em ITAQUI, a turbidez da água bruta pode atingir valores acima de 100 enquanto na maioria das águas de mar de plantas de dessalinização se encontram abaixo de 20 NTU e consideradas de alta turbidez de 20 a 30 NTU.

Além disso, águas oceânicas geralmente contêm de 1 a 2 mg/L de Carbono Orgânico Total (COT) e em regiões costeiras em torno de 2 mg/L. Entretanto, devido a grande variação de maré na costa do Estado do Maranhão e a existência de manguezais, o COT pode atingir valores acima de 8 mg/L. Sabe-se que as fabricantes de membranas de OI limitam a concentração de COT na alimentação de 2 mg/L para evitar a formação de biofouling. Trabalhos da literatura demonstram que valores de SDI acima de 3 e de COT acima de 2 mg/L tem provocado fouling na membrana, aumentando a frequência da limpeza da membrana e diminuído sua vida útil. Com o intuito da redução de SDI e a remoção e controle de COT, este estudo ainda está em andamento a fim de avaliar a redução da concentração de carbono orgânico dissolvido e do SDI através do uso de microfiltração com a configuração submersa na presença de carvão ativado em pó.

AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos a ENEVA pelo apoio financeiro, técnico e científico, com questionamentos que fomentaram a pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-MALEK, S.; AGASHICHEV, S. P.; ABDULKARIM, M. Techno-economic aspects of conventional pretreatment before reverse osmosis (Al-Fujairah Hybrid Desalination Plant), in IDA World Congress, Singapura, 2005.
2. APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22nd ed. Washington: APHA; AWWA; WEF, 2012.
3. BAKER, R. W. Membrane Technology and Applications, 2ª edição, John Wiley & Sons, 2004.
4. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2. Ed. São Carlos: RiMA, 2005.
5. FRITZMANN, C.; LöWENBERG, J.; WINTGENS, T.; MELIN, T. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, v. 216, p. 1–76, 2007.
6. GREENLEA, L. F.; LAWLER, D. F.; FREEMAN, B. D.; MARROTC, B.; MOULINC, P. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges (Review). *Water research*, v. 43, pp. 2317-2348, 2009.
7. HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. Processos de Separação por Membranas. E-papers Serviços Editoriais Ltda. Rio de Janeiro, pp. 180, 2006.
8. JINMING, D.; JIANHUI, W.; NIGEL, G.; FRANCIS, W. Coagulation of humic acid by aluminium sulphate in saline water conditions. *Desalination*, v. 150, p. 1-14, 2002.
9. KIM, S.; MOON, B.; LEE, H. Effects of pH and dosage on pollutant removal and floc structure during coagulation. *Microchemical Journal*, v. 68, p. 197 – 203, 2001.
10. TAYLOR, J. S.; JACOBS, E. P. Reverse osmosis and nanofiltration. In: Joel Mallevalle et al (eds), *Water Treatment Membrane Processes*, pp. 9.1-9.70. McGraw Hill, New York, 1996.
11. VIAL, D.; DOUSSAU, G.; GALINDO, R. Comparison of three pilot studies using Microza® membranes for Mediterranean seawater pre-treatment, *Desalination*, 156, pp. 43–50, 2003.
12. WOLF, P. H.; SIVERNS, S. The new generation for reliable RO pre-treatment, in *International Conference on Desalination Costing*, Limassol, 2004.