

## II-402 - TRATAMENTO DE ÁGUA DE PURGA DE TORRE DE RESFRIAMENTO VISANDO AO REÚSO

**Nathalia Oliveira dos Santos<sup>(1)</sup>**

Doutorando em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela UFRJ. Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela UFRJ. Licenciada em Ciências Biológicas pela UFRJ. Docente no Centro Tecnológico Celso Suckow da Fonseca (CEFET).

**Lídia Yokoyama<sup>(2)</sup>**

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<sup>(3)</sup>**

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<sup>(4)</sup>**

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<sup>(1)</sup>:** Centro Federal Tecnológico Celso Suckow da Fonseca, Rodovia Mário Covas, Quadra J, Lote J2, s/n - Distrito Industrial de Itaguaí, Itaguaí - Rio de Janeiro- Brasil - CEP 23812-101 - e-mail: oliveiranathalia@eq.ufrj.br

### RESUMO

Sistemas de torres de resfriamento demandam quantidades significativas de água com características de qualidade específicas para proporcionar maiores ciclos de concentração. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o processo de ultrafiltração da purga da torre de resfriamento como pré-tratamento para osmose reversa. As purgas das unidades de torre de resfriamento foram coletadas e caracterizadas e posteriormente misturadas e submetidas a ultrafiltração sob pressões de 1 bar, 2 bar e 3 bar. Os melhores resultados considerando a redução de parâmetros e gasto energético foram obtidos com a membrana de ultrafiltração de 5KDa sob pressão de 1 bar.

**PALAVRAS-CHAVE:** Torre de resfriamento, Reúso, Ultrafiltração.

### INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com grande disponibilidade de recursos hídricos. No entanto, a distribuição heterogênea, a utilização inadequada destes recursos e o descarte incorreto dos efluentes, juntamente com o crescimento da população e os progressos industriais alcançados, comprometem a qualidade da água. A redução significativa na qualidade dos recursos hídricos ocasiona um impacto devastador no meio ambiente, reduzindo a sustentabilidade dos recursos hídricos nos centros urbanos e regiões circunvizinhas (MIERZWA E HESPANHOL, 2005).

Desde os anos 80, as empresas lidam com os efluentes gerados, para atender aos mecanismos regulatórios governamentais, mas ao longo dos anos, a prioridade passou a ser a prevenção na fonte, já que as empresas são avaliadas pela sua eficiência tecnológica (MOGAMI, 2011).

Pode-se observar que, com o aumento da escassez de recursos hídricos, a água de reúso começou a ser produzida para usos diversos, como irrigação, indústrias, empresas de geração de energia, etc (EPA, 2013).

Uma das alternativas para reduzir o volume de captação de água bruta e a minimização de descarte de efluentes é por meio do reúso de água na unidade industrial. Esta prática tem sido cada vez mais usada devido a fatores como: coleta efetiva de água bruta e descarte de efluentes, aumento do custo de água potável, baixa disponibilidade regional e o controle mais restritivo das emissões de efluentes e disposição no ambiente natural (CARVALHO E MACHADO, 2010).

De acordo com Wang e Smith (1994) o reúso ocorre quando o efluente é reaproveitado diretamente sem qualquer tipo de pré-tratamento obedecendo ao nível de contaminantes na corrente de entrada da operação receptora. Esta medida minimiza o consumo de água primária. Já a regeneração com reúso, ocorre quando o efluente sofre algum tratamento no intuito de remover parcialmente a concentração de contaminantes para atingir níveis adequados à entrada de outro processo. Esta medida reduz o consumo de água primária, assim como a geração de efluentes. E a regeneração com reciclo: quando o efluente é tratado, reduzindo parcialmente a concentração de seus contaminantes e reaproveitado no mesmo processo ou operação que o gerou. Embora esta medida reduza o consumo de água e a geração de efluentes, é possível que ocorra o acúmulo de contaminantes que não foram removidos na regeneração, por meio do reciclo de correntes.

De acordo com Leverenz, et al. (2011), a recuperação e reutilização da água proporcionam um novo destino ao efluente, reduzindo a demanda por água limpa e impactando menos os corpos receptores.

Um setor que demanda quantidade significativa de água é o da usina termelétrica, principalmente para os sistemas de ciclo de vapor e de resfriamento. Associado a isso, existe a necessidade de condicionamento da qualidade da água, específica para cada uso. Geralmente, as usinas termelétricas situam-se próximas a grandes centros urbanos e industriais, onde os recursos hídricos disponíveis já se encontram bastante impactados. Além disso, as usinas situadas na região do Nordeste se deparam com a situação de escassez de água doce tendo que lançar mão de fontes de água salgada ou salobra (CARVALHO E MACHADO, 2010).

A Figura 1 apresenta uma ilustração esquemática do funcionamento de uma usina termelétrica. 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 frequente reside nas aplicações de dessalinização (BAKER, 2004; FRITZMANN et al., 2007; HABERT et al., 2006)

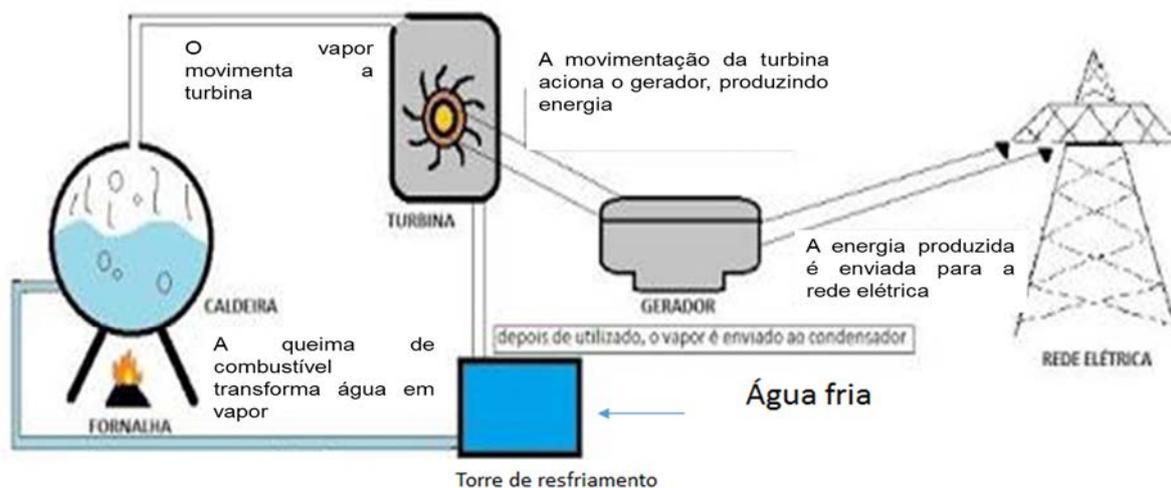


Figura 1 – Ilustração do funcionamento de uma usina termelétrica. Adaptado de (NASCIMENTO E LORA, 2004).

A osmose inversa retém quase todos os solutos dissolvidos, incluindo sais e íons, mas permitindo a passagem de solvente. As torres de resfriamento consistem em sistemas que utilizam a água para absorver o calor gerado pelo processo, transferindo-o por evaporação e, assim, proporcionando a refrigeração do sistema (FRICK, 2013). Estes sistemas de resfriamento podem ser classificados em três tipos: sistemas abertos sem recirculação de água, sistemas abertos com recirculação de água ou sistemas semiabertos, e sistemas fechados com recirculação de água (DANTAS, 1988). Torres de resfriamento empregadas para o resfriamento de água industrial demandam, mesmo quando operadas de forma eficiente, grandes quantidades de água. De acordo com Nascimento e Lora (2004) e Altman et al (2012), o consumo de água para abastecer sistemas de resfriamento semiabertos com recirculação está entre 70% e 90% do consumo total e necessitam de qualidade específica, conforme Tabela 1 (CARVALHO e MACHADO, 2010). Por reutilizar a mesma água várias vezes e associadas as perdas por evaporação e respingos, acarretarão a tendência ao aumento da concentração de sólidos dissolvidos na água, necessitando estabelecer um Ciclo de Concentração (CC) para evitar riscos de corrosão, incrustações e depósitos. Através do seu CC, realiza-se a purga e a reposição de água de reposição (água bruta tratada) de mesma vazão, aumentando a demanda por captação de água bruta (Figura 2). Desta forma, observa-se a importância do desenvolvimento da pesquisa que contemple a reutilização de água em Usinas Termoelétricas principalmente quando situadas em regiões de escassez de água, enfrentando desafios de análises individuais, levando-se em consideração as especificidades das características da água disponível no Nordeste Brasileiro e a localização onde a fonte de água é de açudes. Com isso, possibilidade de propor cenário mais adequado e economicamente viável a fim de evitar paradas operacionais.

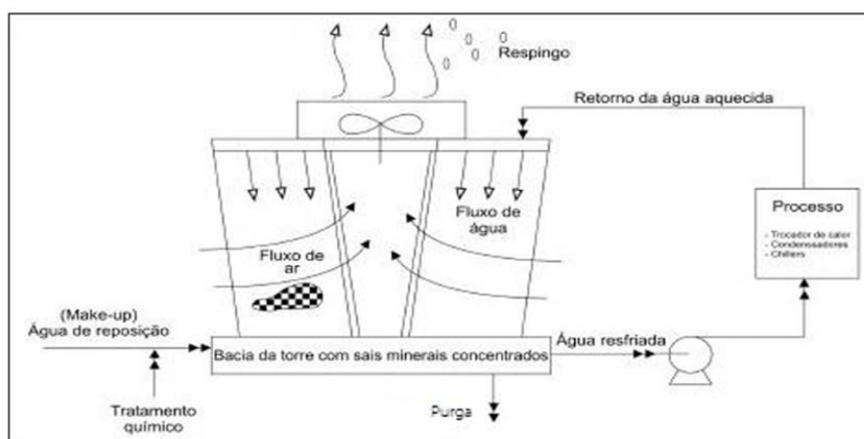


Figura 2- Princípio de funcionamento de uma torre de resfriamento semi aberta (ALTMAN et al., 2011).

**Tabela 1: Valores de referência de qualidade de água de reposição para torres de resfriamento. Fonte: CARVALHO e MACHADO, 2010.**

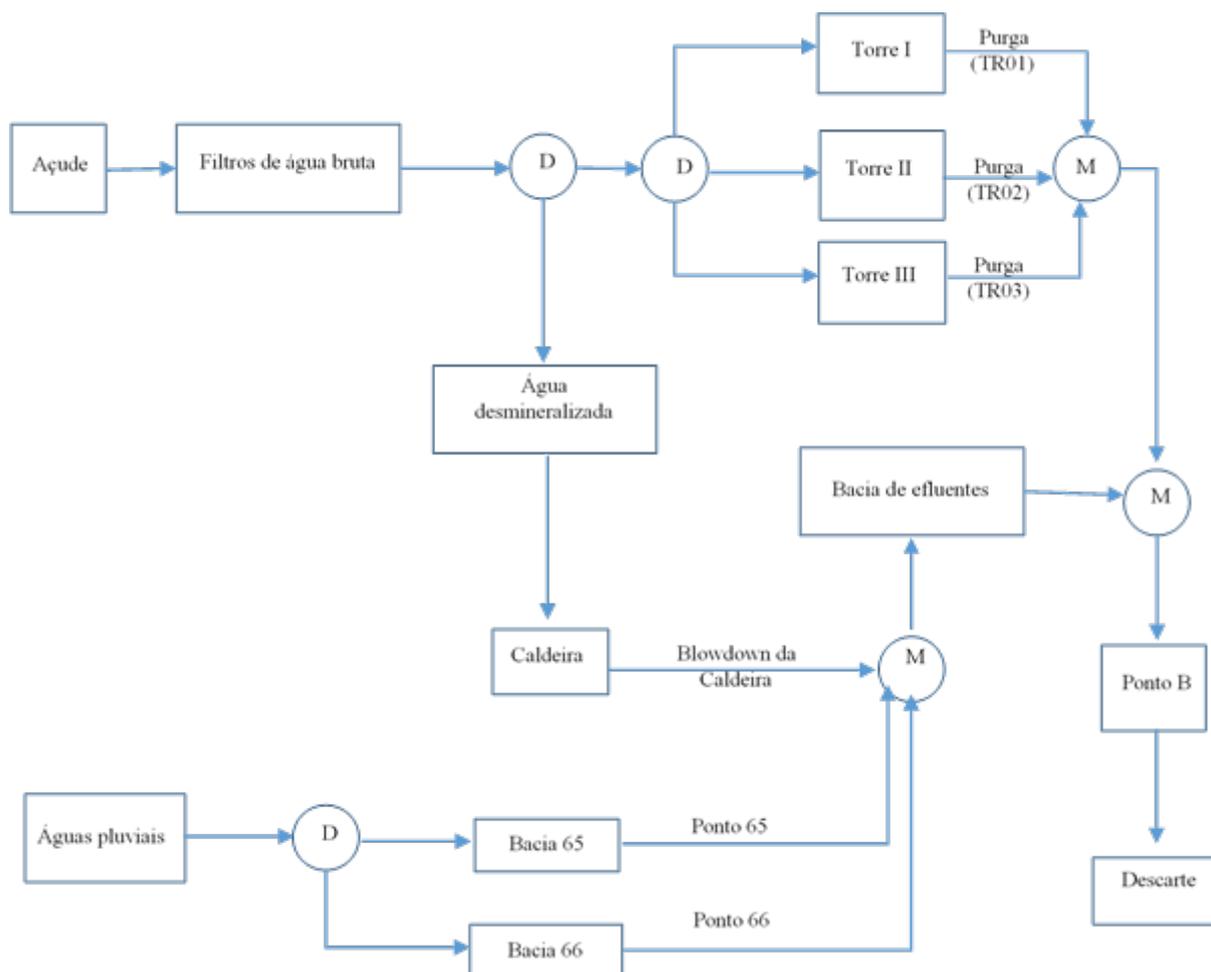
<b>Parâmetro</b>	<b>Limite</b>
Cloretos (mg/L)	500
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	500
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	100
Dureza (mg/L)	650
Alcalinidade (mg/L)	350
pH	6,9 – 9,0
DQO (mg/L)	75
DBO (mg/L)	25
Turbidez (NTU)	50
Fosfato (mg/L)	4,0
Sílica (mg/L)	50
Alumínio (mg/L)	1,0
Ferro (mg/L)	0,5
Manganês (mg/L)	0,5
Cálcio (mg/L)	50
Magnésio (mg/L)	0,5
Sulfato (mg/L)	200

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o tratamento da purga da torre de resfriamento de uma usina termelétrica localizado no Nordeste Brasileiro, com vistas ao reúso e reciclo desta corrente. Em decorrência da grande quantidade de sais dissolvidos o estudo se baseou na remoção de sais por meio de processos de filtração por membranas como pré-tratamento ao processo de osmose inversa. As principais fontes de reúso fixadas neste trabalho foram as purgas das torres em decorrência das maiores vazões existentes do balanço hídrico.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **A. Amostras**

A avaliação das características das correntes hídricas da Usina Termoeletrica Pecém foi realizada pelas análises quantitativas de amostras dos pontos TR01, TR02 e TR03 (referentes às torres de resfriamento, Blowdown da caldeira, bacia 65 e bacia 66 (referentes a captação de águas pluviais e ponto B (que representa a junção de todas as correntes), os quais podem ser identificados no fluxograma a Figura 3. Os estudos foram desenvolvidos pelo Laboratório de Tratamento de Água e Reúso de Efluentes (LabTare), da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).



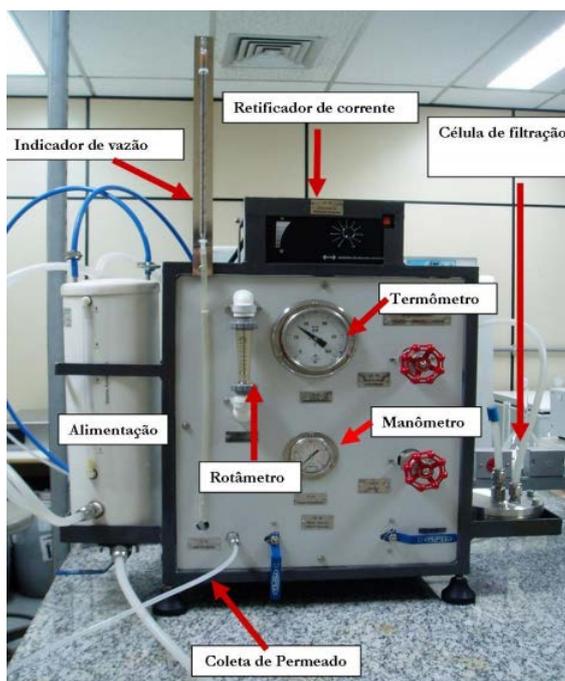
**Figura 3- Fluxograma representativo das amostras utilizadas no presente trabalho.**

O parâmetro sólidos foi determinado através de análise gravimétrica. A turbidez foi avaliada 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 com o auxílio de 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 através de cromatografia líquida (930 Compact IC Flex 1). O parâmetro Óleos & Graxas foi determinado pela técnica de espectrometria na região de Infravermelho. O equipamento utilizado foi o Infracal TOG/TPH, modelo HATR-T, marca Wilks Enterprise.

#### B. Ensaios em membranas de ultrafiltração

A ultrafiltração 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 ultrafiltração com membranas de 5KDa, 10KDa e 20KDa. Figura 4 mostra o sistema de ultrafiltração 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 4 – Sistema de Ultrafiltração.**

#### C. Medidas do SDI

A tendência de bloqueio das membranas pode ser avaliada em testes específicos como o Índice de elementos siltosos (SDI). O equipamento básico, conforme mostra a Figura 5, consiste de um sistema de filtração pressurizada equipado com filtros de 0,45 $\mu$ m de porosidade e diâmetro de 47mm. A amostra é filtrada a uma pressão de 30 psig (TAYLOR & JACOBS, 1996).



**Figura 5 – Equipamento utilizado para a determinação do SDI.**

O SDI é calculado a partir de três intervalos de tempo: o primeiro intervalo ( $t_i$ ) é o tempo necessário para a coleta dos primeiros 500 mL de permeado, o segundo intervalo de tempo ( $t_t$ ) 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 ( $t_f$ ) é o tempo necessário para a coleta dos últimos 500 mL de permeado. O tempo padrão para o  $t_t$  é 15 minutos. O SDI é determinado através da Equação (1):

$$SDI = 100 * [1 - (t_i/t_f)] / t_t \quad (1)$$

#### D. Ensaio em sistema de osmose inversa (OI)

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 ou na remoção de sais. 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, naquela 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 afluyente da membrana (GREENLEA et al., 2009).

Realizou-se o ensaio de osmose inversa com a membrana BW30-4040 (Dow) a 15 bar. Realizou-se o ensaio com amostras após passarem pelo processo de ultrafiltração.

## RESULTADOS

### A. Amostra

A Tabela 2 apresenta a caracterização das amostras analisadas, seguindo as metodologias de APHA observa-se que a amostra TR01 apresenta elevados valores de condutividade, dureza, cloreto. Características semelhantes à Bacia da Torre I são encontradas na amostra Bacia da Torre II.

Tabela 2 – Resultados da caracterização das amostras de agosto de 2015.

PARÂMETROS	Amostras 08/2015						
	TR01	TR02	TR03I	Blowdown da caldeira	Ponto 65	Ponto 66	Ponto B
Alcalinidade (mg/L)	260 ± 3	296 ± 2,5	92 ± 4	76 ± 2	124 ± 2,1	104 ± 3,3	216 ± 6
Cálcio (mg/L)	162,5 ± 9,3	161,5 ± 8,9	188 ± 9,7	18 ± 0,3	38,5 ± 2,0	79 ± 5,0	18,5 ± 0,7
Cloreto (mg/L)	878 ± 15,2	779,5 ± 16,5	1305,5 ± 37,4	70 ± 2,5	146 ± 7,6	473,5 ± 22,1	555 ± 34,5
Cloro Residual Livre (mg/L)	0,012 ± 0,001	0,007 ± 0,001	0,26 ± 0,001	0	0,004 ± 0	0,126 ± 0,002	0,005 ± 0
Condutividade (mS/cm)	4,81 ± 0,1	3,99 ± 0,1	5,92 ± 0,1	0,472 ± 0,1	0,865 ± 0,1	1,67 ± 0,1	2,78 ± 0,1
Cor aparente (UC)	57 ± 1	54 ± 1	139 ± 1	1 ± 1	13 ± 1	79 ± 1	43 ± 1
Cor real (UC)	51 ± 1	46 ± 1	32 ± 1	1 ± 1	3 ± 1	1 ± 1	26 ± 1
DQO solúvel (mg/L)	65 ± 0,7	73 ± 0,7	67 ± 0,6	14 ± 0,2	25 ± 0,2	56 ± 0,6	69 ± 0,3
DQO total (mg/L)	80 ± 1,5	81 ± 0,3	72 ± 1,2	20 ± 0,4	24 ± 1,0	83 ± 0,3	77 ± 0,7
Dureza (mg/L)	916 ± 4,1	684 ± 3,8	180 ± 2	92 ± 1	152 ± 1,2	252 ± 3	460 ± 6,7
pH	8,5 ± 0,05	8,6 ± 0,05	7,1 ± 0,05	8,11	7,81	8,7	8,51
Potássio (mg/L)	85,5 ± 3,8	79,5 ± 4,2	113,5 ± 7,9	13 ± 0,2	13 ± 0,6	46 ± 1,6	62 ± 4,1
SDT (mg/L)	3217 ± 76	2932 ± 201	4174 ± 20	517 ± 158	508 ± 74	910 ± 0	1935 ± 73
SST (mg/L)	23 ± 2	17 ± 1	200 ± 12	19 ± 2	141 ± 11	261 ± 57	29 ± 3
ST (mg/L)	3240 ± 78	2949 ± 202	4374 ± 32	536 ± 160	649 ± 85	1171 ± 51	1964 ± 76
Sílica reativa (mg/L)	9,2 ± 0,4	7,8 ± 0,5	16,9 ± 0,2	0,5 ± 0	1,9 ± 0,1	3,5 ± 0,1	21,8 ± 1
Sódio (mg/L)	553,5 ± 17,3	514 ± 13,4	835,5 ± 34,8	36,5 ± 2,9	82,5 ± 5,6	301 ± 10,2	351,5 ± 9,7
Sulfato (mg/L)	673,5 ± 28,1	483,5 ± 26,0	1077,5 ± 35,8	0	73 ± 2,4	238,5 ± 10,4	362,5 ± 8,6
TOC (mg/L)	80,9 ± 5,1	68,3 ± 4,3	89,8 ± 7,0	9,5 ± 0,1	14,8 ± 0,4	39,9 ± 1,3	50,2 ± 2,1
Turbidez (NTU)	1,1 ± 0,1	0,75 ± 0,02	12,55 ± 0,15	1,42 ± 0,165	1,35 ± 0,18	7,28 ± 0,065	2,32 ± 0,095
O & G (mg/L)	0,2 ± 0	0,2 ± 0	0,9 ± 0,05	1,0 ± 0,05	1,2 ± 0,05	1,4 ± 0,05	1,0 ± 0

Em seguida, nota-se que a amostra Bacia da Torre III apresenta os maiores valores de turbidez, condutividade, sílica e cloreto. Sendo os 2 últimos parâmetros de extrema relevância se considerarmos a proposta de reúso desta corrente.

A amostra Blowdown da caldeira apresenta os melhores resultados, com características mais brandas no que se refere ao potencial de corrosão e/ou incrustação, considerando a possibilidade de reúso. Outras amostras com características favoráveis ao reúso seriam o Ponto 65 e 66, respectivamente. Já o Ponto B apresenta elevada condutividade, dureza, sílica e cloreto. Após análise é possível concluir que não há variações significativas entre as amostras TR01 e TR02, no entanto, a amostra TR03 apresenta-se com alterações significativas se comparadas às demais amostras referentes à purga da torre de resfriamento. A diferença nos valores pode estar relacionada a alguma contaminação decorrente da operação, uma vez que as unidades são idênticas em sua estrutura e composição.

A Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização das amostras recebidas em novembro de 2015 a fim de através de análise comparativa, avaliar possíveis alterações em períodos diferentes de operação.

Tabela 3 - Resultados da caracterização das amostras de agosto de 2015.

PARÂMETROS	Amostras 11/2015						
	TR01	TR02	TR03	Blowdown da caldeira	Ponto 65	Ponto 66	Ponto B
Alcalinidade (mg/L)	490 ± 5	115 ± 5	92,5 ± 3,54	15 ± 0	118,3 ± 11,55	200,0 ± 0	210,7 ± 1,15
Cálcio (mg/L)	93,5±7,2	110,5±3,6	138±9,7	38±2,4	165±9	114±7,3	72,5±2,0
Cloreto (mg/L)	707,6±10,3	559,81±15,1	757,39±16,7	75,65±4,2	335,08±7,9	515,76±20,7	497,51±18,5
Cloro Residual Livre (mg/L)	0,056 ± 0,032	0,411 ± 0,027	0,491 ± 0,044	0,191 ± 0,009	0,474 ± 0,112	0,747 ± 0,016	0,155 ± 0,020
Condutividade (mS/cm)	2,64 ± 0,02	2,67 ± 0,01	3,35 ± 0,01	0,32 ± 0	2,06 ± 0,01	2,55 ± 0,01	2,41 ± 0,01
Cor aparente (UC)	63,7 ± 5,51	44 ± 3,61	47 ± 3,08	39,5 ± 4,95	37 ± 2,83	261,7 ± 8,74	47,3 ± 9,24
Cor real (UC)	53,3 ± 5,66	39 ± 3,0	44 ± 4,36	1,5 ± 0,12	14,7 ± 2,90	28,7 ± 3,06	39,3 ± 1,02
DQO solúvel (mg/L)	67 ± 4,70	73 ± 4,53	64 ± 2,82	14 ± 3,77	30 ± 2,96	272 ± 9,89	74 ± 1,26
DQO total (mg/L)	79 ± 0,46	77 ± 4,06	77 ± 1,04	23 ± 7,23	42 ± 8,13	75 ± 4,77	43 ± 5,65
Dureza (mg/L)	570,0 ± 10	826,67 ± 37,86	893,33 ± 20,86	140 ± 10	510 ± 17,32	656,67 ± 5,77	570,70 ± 5,77
pH	8,5 ± 0,05	6,9 ± 0,05	6,6 ± 0,05	6,3 ± 0,05	7,1 ± 0,05	7,9 ± 0,05	8,2 ± 0,05
Potássio (mg/L)	103,5±4,1	76,5±2,3	178±9,0	22±0,3	121,5±3,7	73±3,2	63,5±4,2
SDT (mg/L)	2001	2668	3055	528	2358	2571	2401
SST (mg/L)	183 ± 0	151 ± 44	118 ± 2	118 ± 5,51	171 ± 35	96 ± 9	67 ± 5
ST (mg/L)	2184 ± 206	2820 ± 126	3173 ± 32	646 ± 42	2530 ± 56	2668 ± 82	2468 ± 70
Sílica reativa (mg/L)	4,12 ± 0,06	6,77 ± 0,08	6,8 ± 0,24	2,47 ± 0,02	3,35 ± 0,03	4,29 ± 0,02	4,52 ± 0,03
Sódio (mg/L)	539,5±22,4	410±15,6	554,5±23,7	57,5±2,0	356,5±18,4	404±16,1	391±17,9
Sulfato (mg/L)	97,9±6,3	538±29,7	607,42±42,1	58,3±3,1	392,94±16,4	366,24±15,8	271±13,4
TOC (mg/L)	70,4±2,5	57,6±3,9	74,6±2,4	8,4±2,1	19±0,6	46,6±1,7	50,6±3,4
Turbidez (NTU)	1,78 ± 0,07	1,15 ± 0,04	1,21 ± 0,12	5,41 ± 0,84	1,42 ± 0,17	26,97 ± 0,85	0,96 ± 0,06
O & G (mg/L)	0,5±0	0,3±0	1,1±0,05	1,8±0,05	1,4±0	1,0±0	1,2±0,05

Após a análise da Tabela 1 é possível observar que os dados das amostras TR01, TR02 e TR03 apresentam divergências entre eles e também se comparados às amostras de novembro. Novamente, estas diferenças podem ser atribuídas a questões operacionais, dada a semelhança estrutural entre as unidades. Sendo as mudanças mais drásticas encontradas nos parâmetros alcalinidade, condutividade, dureza, pH (que está diretamente relacionado à alcalinidade) e sílica. As variações observadas nas concentrações dos íons analisados justificam a variação de condutividade observada entre as amostras.

#### B. Seleção de amostras

Conforme os dados repassados pela usina, as vazões de operação constam na Tabela 4 e foram usadas como critério para a seleção de amostras com vistas ao reúso.

Tabela 4 – Vazões das correntes analisadas.

Amostras	Vazões (m <sup>3</sup> /h)
TR01	95
TR02	95
TR03	95
Blowdown da caldeira	70
Ponto 65	30
Ponto 66	30
Ponto B	415

De acordo com as vazões apresentadas e considerando a necessidade de reúso, as amostras Ponto 65 e Ponto 66 foram descartadas, pois além de apresentarem baixa vazão, sua periodicidade é sazonal, uma vez que são constituídas de águas pluviais. A amostra *Blowdown* da caldeira, a qual possui características favoráveis ao reúso, apresenta vazão menor que a necessária para abastecer uma unidade de torre de resfriamento. E a amostra Ponto B, embora apresente vazão suficiente para abastecer 3 unidades de torre de resfriamento, sua maior vazão requer um maior gasto com tratamento, tornando o processo mais dispendioso. Assim, optou-se por trabalhar apenas com a junção das amostras de purga da torre de resfriamento (TR01, TR02 e TR03), que foi denominada Purga da Torre Composta (PTC).

As características de água de reposição (*make up*) necessárias, segundo a usina, podem ser observadas na Figura 6.

Parâmetro, água bruta	Unidade	Mínimo	Máximo	Média	Junho Ciclo 8,00 Calculado	Julho Ciclo 7,80 Calculado	Agosto Ciclo 7,92 Calculado
pH	-	7,83	8,47	8,07	8,10	8,04	8,07
Condutividade	µS	502	600	535	4278	4171	4235
Cloretos	ppm	82,6	279,2	96,2	770	751	762
Sulfato	ppm	0,0	6,0	3,3	26	25	26
Ferro	ppm	0,02	0,10	0,03	0,255	0,249	0,253
Dur. Total	ppm	90,0	140,0	105,5	844	823	836
Dur. Ca	ppm	24,0	72,0	39,1	312	305	309
Silica	ppm	2,1	7,8	4,3	34	33	34
Turb.	NTU	0,0	0,0	0,0	0	0	0
Alc.total	ppm	90,0	120,0	100,6	805	785	797
PO4 Total	ppm	0,2	0,7	0,3	3	2	3

Figura 6 – Perfil analítico de água de “*make up*” de torre de resfriamento de 2015.

No entanto, para adequar às purgas de torre de resfriamento ao padrão para água de abastecimento são necessárias etapas de tratamento.

#### C. Processos de separação por membranas - Ultrafiltração

O pré-tratamento utilizando UF apresenta resultados satisfatórios, reduzindo a pressão de operação, reduzindo custos com energia e aumentando os intervalos de limpeza do sistema de OI (LAUTENSCHLAGER et al., 2009). O pré-tratamento com UF para a osmose é capaz de reduzir a concentração de diversos parâmetros como: DQO, sílica e substâncias coloidais, que são prejudiciais ao processo de troca térmica.

Segundo Shang et al. (2008), o uso de MF e UF como pré-tratamento para reúso em torres de resfriamento proporciona um permeado de melhor qualidade, com redução de turbidez.

De acordo com Mierzwa e Hespanhol (2004), os processos de filtração por membranas são indicados para a remoção de dureza, nos casos onde a amostra em questão apresenta concentrações deste parâmetro acima de 80mg/L.

Assim, após a formação da amostra Purga da Torre Composta (PTC), a mesma foi submetida a um processo de UF por membranas, com o principal objetivo de remover a dureza da amostra, como forma de pré-tratamento para a osmose inversa, tendo em vista seu elevado potencial corrosivo e incrustante.

No intuito de melhor avaliar a eficiência deste processo, foram testadas 2 membranas (UP005 P e UP010 P) com tamanhos de poros distintos, 5KDa e 10KDa, respectivamente.

A amostra foi avaliada em relação aos parâmetros de dureza, alcalinidade, turbidez e condutividade, por estes serem os parâmetros mais importantes a serem monitorados em torres de resfriamento (CARVALHO e MACHADO, 2010).

Embora o parâmetro de Sólidos Dissolvidos seja importante, o mesmo pode ser inferido, indiretamente através da análise de condutividade ou até mesmo medido em análise posterior a definição da melhor membrana sob a condição de operação mais viável.

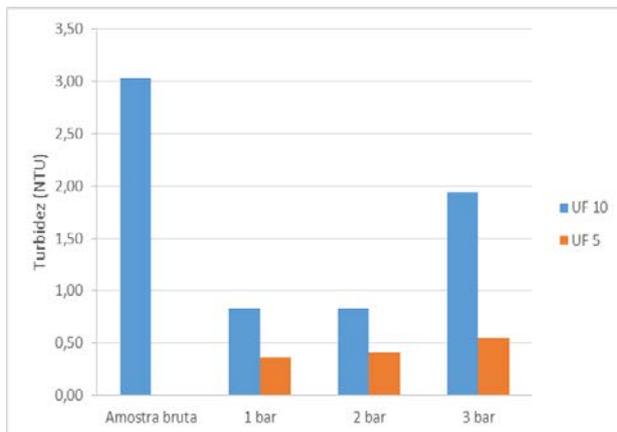
A Tabela 5 apresenta os dados de caracterização dos permeados da amostra PTC

**Tabela 5- Permeados de PTC após ultrafiltração.**

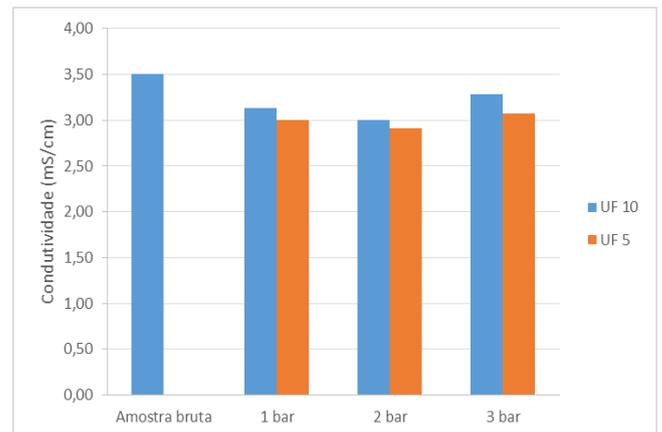
Permeados da amostra PTC						
PARÂMETROS	5 KDa			10 KDa		
	1 bar	2 bar	3 bar	1 bar	2 bar	3 bar
<b>Turbidez (NTU)</b>	0,37±0,04	0,41±0,02	0,53±0,01	0,84±0,05	0,84±0,03	1,95±0,05
<b>Condutividade (mS/cm)</b>	3,0±0,3	2,90±0,04	3,07±0,06	3,14±0,02	3,01±0,07	3,29±0,03
<b>Alcalinidade (mg/L)</b>	400±15	390±18	410±17	440±22	390±19	440±28
<b>Dureza (mg/L)</b>	1150±15	1090±37	1200±28	1260±41	1180±34	1310±42

A análise da Tabela 4 demonstra que a melhor condição é representada pelo uso da membrana de 5KDa sob 1 bar. Embora outras condições também apresentem reduções o gasto de energia empregado não compensaria a redução alcançada.

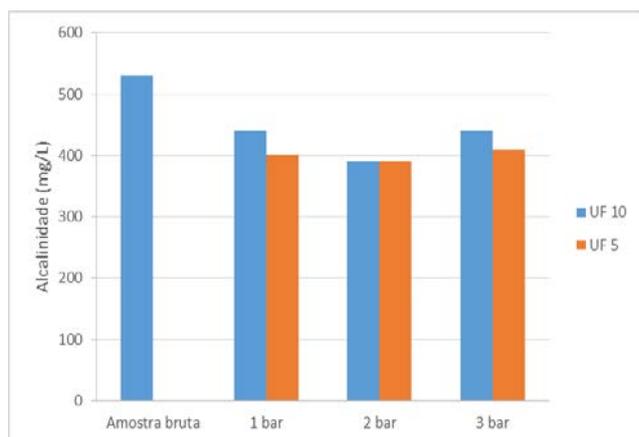
As Figuras 7 a 10 demonstram um comparativo entre a amostra bruta e os permeados oriundos da ultrafiltração por membrana de 5KDa e 10 KDa, representando graficamente os dados mencionados na Tabela 4.



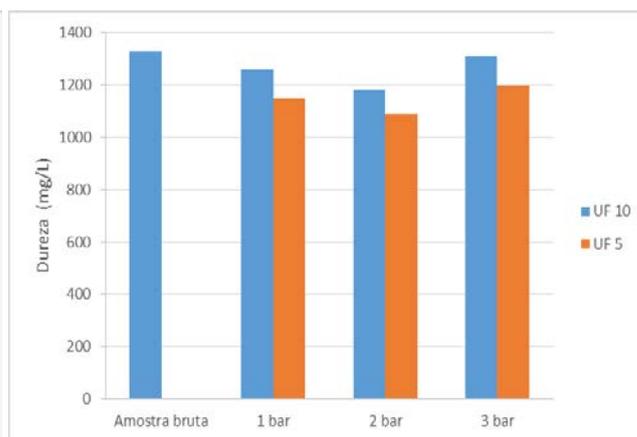
**Figura 7 – Característica de turbidez do permeado da PTC.**



**Figura 9 – Característica de condutividade do permeado da PTC.**



**Figura 8 – Característica de alcalinidade do permeado da PTC.**



**Figura 10 – Característica de dureza do permeado da PTC.**

Após a ultrafiltração foi medido o índice de elementos siltsos da amostra, chamado de SDI (Silt Density Index). O Índice de Sedimentos ou Silt Density Index (SDI) é um dos ensaios mais utilizados para avaliar o potencial de incrustação de uma amostra, uma vez que tais incrustações podem reduzir a eficiência de processos.

#### D. Processos de separação por membranas – Osmose Inversa

Para este trabalho, após ser submetida a UF, a amostra passou por um processo de osmose (DOW FILMTEC™ BW30-4040) sob pressão de 15 bar, tendo seus resultados apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 – Caracterização do permeado de osmose inversa.**

Análises	PTC	Desvio Padrão
Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	55,02	0
Turbidez (NTU)	< 0,1	0
Sílica Reativa (mg/L)	0,241	0,004
Cor aparente (UC)	12	0
Cor real (UC)	12	0
Cloro Residual Livre (mg/L)	0,016	0
Cloro Total	0,017	0,001
Cloreto (mg/L)	21,04	1,2
Dureza Total (mg/L)	5,0	0
Ca (mg/L)	2,5	0
DQO Total (mg/L)	14,3	1,5
DQO solúvel (mg/L)	14,3	1,5
COT (mg/L)	0,05	0
Alcalinidade (mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$ )	4	0
pH	5,55	0,1

O processo de osmose inversa apresentou ótimos resultados, em virtude dos baixos valores encontrados para os parâmetros analisados.

No intuito de melhor definir as possibilidades de reúso dentro da usina, além de conferir caráter inovador ao projeto, pretende-se aplicar a técnica de Diagrama de Fontes de Água (DFA), que se trata de um procedimento algorítmico heurístico, onde são gerados cenários, aos quais vão ilustrar as possibilidades de reúso na planta, para que a empresa possa ter a possibilidade de escolha de qual configuração será melhor aplicar em um determinado momento da operação, considerando as particularidades sazonais e de operação de cada local. A principal inovação neste caso é a ausência da aplicação desta ferramenta para usinas termelétricas, uma vez que a mesma é bem difundida para outros setores, como petroquímico, refinarias, papel e celulose, dentre outros. Além disso o DFA ainda não foi implementado para uso comercial, como é a proposta deste projeto.

## CONCLUSÕES

De acordo com os resultados, podemos concluir que a amostra purga da torre composta apresenta características prejudiciais para o sistema de resfriamento, conforme ilustrado na Tabela 1 e requer pré-tratamento antes do reúso, por ultrapassar valores permitidos nos parâmetros dureza e alcalinidade. Devido aos parâmetros envolvidos apresentarem elevada concentração de íons, o tratamento com membrana é o mais indicado e considerando o tratamento aplicado, a membrana de ultrafiltração de 5KDa demonstrou-se mais eficiente quando combinada a condição operacional de 1 bar, reduzindo mais de 100 mg/L a concentração dos parâmetros de alcalinidade e dureza, o que configura um resultado mais econômico do ponto de vista energético. Contudo, para o reúso desta corrente, ainda é necessário um tratamento complementar de osmose inversa, pois após o tratamento por ultrafiltração as concentrações restantes ainda ultrapassam os valores de referência estabelecidos na Tabela 1.

O tratamento por membrana de osmose listado na Tabela 6 revelou a adequação de todos os parâmetros analisados aos valores de referência sugeridos por Carvalho e Machado (2010), na Tabela 1, demonstrando a eficiência do tratamento combinado de membranas.

## AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos à ENEVA pelo suporte financeiro, apoio técnico e científico, com questionamentos que fomentaram à pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MIERZWA, J. C. and HESPANHOL, I. Água na indústria: uso racional e reúso. Oficina de textos, São Paulo, 2005.
2. MOGAMI, S. “Reuso de água no Brasil”. Revista Hydro. p. 18-26, 2011.
3. EPA-Environmental Protection Agency. Guidelines for water reuse. Washington, D.C., 2012.
4. CARVALHO, D. D. and MACHADO, B. J. F. “Reuso de efluentes em torres de resfriamento – Estudo conceitual: Aeroporto internacional do Rio de Janeiro”. Acta Scientiarum Technology, v. 32, n 3, pp. 295-302, 2010.
5. WANG, Y. P. and SMITH, R. “Wastewater minimization”. Chemical Engineering Science. v. 49, n. 7, p. 981-1006, 1994.
6. LEVERENZ, H. L.; TCHOBANOGLIOUS, G.; ASANO, T.; “Direct potable reuse: a future imperative”. Journal of Water Reuse and Desalination. v. 1, n. 1, p 2-10, 2011.
7. NASCIMENTO, M. A. R.; Lora, E. E. S. Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação. Interciência, 2004.
8. FRICK, J. M. “Avaliação de pré-tratamento de uma corrente de purga para um sistema de filtração por membranas de osmose inversa descartadas”. Dissertação de Mestrado, 109f. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química/ UFRS. Porto Alegre, RS, 2013.
9. DANTAS, E. Tratamento de água de refrigeração e caldeiras. 2ª ed. Rio de Janeiro: Ecolab Química LTDA, p. 123-237, 1988.
10. NASCIMENTO, J. F. “Avaliação de membranas de osmose inversa no tratamento de águas de purga de torres de refrigeração de indústria petrolífera com finalidade de reúso”, Dissertação de mestrado em Química., 2004.

11. S. J. ALTMAN, S. J.; Jensen, R. P.; CAPPELLE, M. A.; SANCHEZ, A. L.; EVERETT, R. L.; ANDERSON JR, H. L.; MC GRATH, L. K. "Membrane treatment of side-stream cooling tower water for reduction of water usage desalination". V. 285, p. 177- 183,2012
12. REVISTA MEIO FILTRANTE. Água de Resfriamento, porquê mantê-la limpa? n. 6, 2003. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br/materias.asp?action=detalhe&id=72>>. Acesso em: 20 de maio de 2016.
13. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater. 22 ed. Washington: APHA, 2012.
14. HABERT, A. C.; BORGES, C. P. and NOBREGA, R. Processos de Separação com Membranas , Ed. E-papers, Rio de Janeiro, 2006.
15. KIM, S. L.; PAUL CHEN, J.; Ting, Y. P. "Study on feed pretreatment for membrane filtration of secondary effluent". Separation and Purification Technology, v. 29, n. 2, p. 171-179, 2002.
16. LAUTENSCHLAGER, S. R.; FERREIRA FILHO, S. S.; Pereira, O. "Modelação matemática e otimização operacional de processos de membrana de ultrafiltração". Engenharia Sanitária e Ambiental. v.14, n. 2, p. 215-222, 2009.
17. SHANG, J.; SENG, H.; YE, C.; YAN, X. "Pilot test of UF pretreatment prior to RO for cooling tower blowdown reuse of power plant". Desalination. v. 222, p. 9-16, 2008.
18. LÖWENBERG, J.; BAUM, J. A.; ZIMMERMANN Yannick-Serge; Groot, C.; VAN DEN BROEK, W. and WINTGENS, T. "Comparison of pre-treatment technologies towards improving reverse osmosis desalination of cooling tower blow down". Desalination. v. 357, p. 140-149, 2015.
19. WANG, F. H.; Hao, H. T.; SUN, R. F.; LI, S. Y.; HAN, R. M.; Papelis, and Y. Zhang, "Bench-scale and pilot-scale evaluation of co-agulation pre-treatment for wastewater reused by reverse osmosis in a petrochemical circulating cooling water system". Desalination. v. 335, p. 64-69, 2014.
20. CARVALHO, D. D.; MACHADO, B. J. F. Reuso de efluentes em torres de resfriamento - estudo conceitual: Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro. Acta Scientiarum Technology. v. 32 , n. 3, p. 295-302, 2010.