

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL

PAULO SERGIO MENDES GAMA

**CLARIFICAÇÃO, DESSALINIZAÇÃO E DESMINERALIZAÇÃO DA ÁGUA DO
MAR PARA GERAÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRAS.**

São Luís

2017

PAULO SERGIO MENDES GAMA

**CLARIFICAÇÃO, DESSALINIZAÇÃO E DESMINERALIZAÇÃO DA ÁGUA DO
MAR PARA GERAÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Química Industrial da Universidade
Federal do Maranhão, para obtenção do grau de
Bacharel em Química Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Arão Pereira da Costa Filho

São Luís

2017

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Mendes Gama, Paulo Sergio.

Clarificação, dessalinização e desmineralização da água do mar para geração de vapor em caldeiras / Paulo Sergio Mendes Gama. - 2017.

65 f.

Orientador(a): Arão Pereira Da Costa Filho.

Curso de Química Industrial, Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2017.

1. Clarificação. 2. Desmineralização. 3. Dessalinização. 4. Tratamento de água. I. Da Costa Filho, Arão Pereira. II. Título.

PAULO SERGIO MENDES GAMA

**CLARIFICAÇÃO, DESSALINIZAÇÃO E DESMINERALIZAÇÃO DA ÁGUA DO
MAR PARA GERAÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Química Industrial da Universidade
Federal do Maranhão, para obtenção do grau de
Bacharel em Química Industrial.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arão Pereira da Costa Filho (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Nestor Everton Mendes Filho
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Msc. Geysel Adriana Corrêa ribeiro
Universidade Federal do Maranhão

Ao meu pai Paulo Gama, à minha mãe Celia Maria, aos meus irmãos Yasmine e Hugo, e à minha esposa Carla Jeanne com todo meu amor e respeito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo amor incondicional, que me levou a realização desta etapa da vida, me sustenta e renova as minhas forças a cada dia que amanhece. A Ele toda Honra; Glória e Louvor;

A meus pais Paulo Sergio Carvalho Gama e Celia Maria Mendes Gama pelo amor, carinho, ajuda e presença, quando sempre precisei;

Aos meus colegas de curso pelo companheirismo na vida acadêmica e que com o passar dos anos se tornaram amigos verdadeiros e parte da minha vida,

A todos os professores e coordenadores que durante esta caminhada contribuíram para meu aprendizado e crescimento, em especial aos professores Herberth Vera Cruz Furtado Marques, Arão Pereira da Costa Filho, Nestor Everton Mendes Filho e Victor Elias Mouchreck Filho.

“Com a sabedoria se edifica a casa e com a inteligência ela se firma. E pelo conhecimento se encherão as câmaras de todas as substâncias preciosas e deleitáveis.”

(Prov. 24: 3,4).

RESUMO

A água é dos recursos renováveis, que tem um papel fundamental na sobrevivência das espécies, de maior abundância na Terra. A indústria é um dos setores onde o seu uso tem sido indispensável, nos sistemas de resfriamento e na geração de vapor. Desta forma o presente trabalho tem como objetivo apresentar a avaliação do comportamento físico-químico da água nas diferentes etapas para produção de vapor, com base nas análises realizadas, além de descrever os processos de clarificação, dessalinização e desmineralização desenvolvidos. Os referidos processos foram realizados na Empresa UTE Porto do Itaquí Geração de Energia S/A, no período de Dezembro de 2015 a Março de 2016, por ocasião do Estágio Curricular Obrigatório. As atividades realizadas foram análises Físico-Químicas nas amostras provenientes de diferentes etapas do processo, com o intuito de determinar a eficiência do tratamento da água da planta de dessalinização, planta de desmineralização e alimentação da caldeira. Este estudo ainda apresenta a importância no controle de análises físico-químicas para continuidade do processo e a garantia da eficiência da unidade.

Palavras-chave: Tratamento de água. Clarificação. Dessalinização. Desmineralização.

ABSTRACT

Water is of the renewable resources, which plays a fundamental role in the survival of the species, of greater abundance in the Earth. The industry is one of the sectors where its use has been indispensable, in the systems of cooling and the generation of steam. In this way, the present work aims to present the evaluation of the physical-chemical behavior of the water in the different steps for steam production, based on the analyzes carried out, besides describing the processes of clarification, desalination and demineralization developed. These proceedings were carried out at the UTE Porto do Itaqui Geração de Energia S / A Company from December 2015 to March 2016, on the occasion of the Compulsory Curricular Internship. The activities carried out were physical-chemical analyzes in the samples from different stages of the process, in order to determine the efficiency of the water treatment of the desalination plant, demineralization plant and boiler feed. This study also shows the importance in the control of physical and chemical analyzes for the continuity of the process and the guarantee of the efficiency of the unit.

Keywords: Water treatment. Clarification. Desalination. Demineralization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Exemplo de incrustações de Ca/Mg	18
Figura 2	–	Relações de Alcalinidade\pH.....	19
Figura 3	–	Vista Aérea da UTE Itaquí	22
Figura 4	–	Fluxograma do Processo da UTE Itaquí	23
Figura 5	–	Construção de uma adutora	24
Figura 6	–	Neutralização de cargas, coagulação e floculação	26
Figura 7	–	Taxa relativa de decantação em relação à temperatura	27
Figura 8	–	Coagulantes comuns e auxiliares de coagulação	28
Figura 9	–	Floco formado	29
Figura 10	–	Processo de decantação	30
Figura 11	–	Bacia de Decantação Horizontal.....	31
Figura 12	–	Clarificador Ascendente de Lençol de Lodo.....	32
Figura 13	–	Esquema operacional.....	33
Figura 14	–	Processo de Osmose Inversa.....	34
Figura 15	–	Planta de Osmose Inversa	35
Figura 16	–	Diferenças entre as membranas de Osmose Inversa	35
Figura 17	–	Valores típicos de pressão osmótica	36
Figura 18	–	Esquema de módulo de membrana.....	37
Figura 19	–	Módulos com elementos enrolados em espiral	38
Figura 20	–	Foto do Sistema de Osmose Inversa.....	38
Figura 21	–	Esquema do fluxograma básico de membranas	39
Figura 22	–	Faixa de aplicação da Osmose Inversa.....	40
Figura 23	–	Resinas de Troca Iônica.....	42
Figura 24	–	Resinas de Troca Iônica RC-H.....	43
Figura 25	–	Resinas de Troca Iônica RC-OH	43
Figura 26	–	Regeneração da Resina RC-H	44
Figura 27	–	Regeneração da Resina RC-OH	44
Figura 28	–	Tubulão superior.....	48
Figura 29	–	Tubo de caldeira incrustado(óxido férrico).....	48
Figura 30	–	Peagômetro HANNA	49
Figura 31	–	Turbidímetro HACK	49

Figura 32	–	Medidor de cloro livre	50
Figura 33	–	Condutivímetro HANNA.....	50
Figura 34	–	Vidrarias	51
Figura 35	–	Medição do Índice de Sedimentação.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Resultados das análises do pH na água de saída do pré-tratamento de água do mar	54
Gráfico 2	– Resultados das análises do pH na água de saída da osmose reversa	55
Gráfico 3	– Resultados das análises do pH na água de saída da planta de desmineralização.....	55
Gráfico 4	– Resultados das análises de turbidez da água de saída de saída do pré tratamento para a planta de dessalinização.....	56
Gráfico 5	– Resultados das análises de Cloro livre de saída do pré-tratamento para a planta de dessalinização.....	57
Gráfico 6	– Resultados das análises de condutividade na saída do pré-tratamento	58
Gráfico 7	– Resultados das análises de condutividade na saída da osmose reversa	58
Gráfico 8	– Resultados das análises de condutividade na saída do leito misto.....	59
Gráfico 9	– Resultados das análises de alcalinidade da bacia da torre de resfriamento	61
Gráfico 10	– Resultados das análises de sílica na saída dos leitos mistos	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1	Água	16
3.2	A água e suas impurezas	16
3.2.1	Sólidos em suspensão	17
3.2.2	Dureza	17
3.2.3	pH	18
3.2.4	Alcalinidade	19
3.3	Processo de tratamento de água do mar para geração de energia	20
3.3.1	Adução e captação	23
3.3.2	Pré-tratamento de água	24
3.3.3	Processo de clarificação e filtração	25
3.3.4	Coagulação	25
3.3.5	Coagulantes e auxiliares de coagulação	27
3.3.6	Floculação	29
3.3.7	Decantação	30
3.3.8	Osmose inversa	33
3.3.9	Membranas de osmose inversa	35
3.3.10	Sistemas de osmose inversa	38
3.3.11	Limitações	39
3.3.12	Aplicações	40
3.3.13	Processo de desmineralização	41
3.3.14	Resinas de troca iônica	41
3.3.15	Regeneração de trocadores iônicos	43
3.3.16	Leito misto	44
3.3.17	Controle da qualidade da água desmineralizada	45
3.3.18	Água para geração de vapor	46
3.3.19	Incrustação	47

4	MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1	Peagômetro	49
4.2	Turbidímetro	49
4.3	Cloro Livre	50
4.4	Condutímetro	50
4.5	Vidrarias	51
4.6	Índice de sedimentação	51
4.7	Coleta das amostras	52
4.8	Análises físico-químicas da água	52
4.8.1	Determinação do pH	52
4.8.2	Determinação da turbidez	52
4.8.3	Determinação do cloro livre	52
4.8.4	Determinação de condutividade	52
4.8.5	Determinação de SDI.....	53
4.8.6	Determinação de alcalinidade	53
4.8.7	Determinação da sílica.....	53
5	RESULTADOS E DISCURSSÕES	54
5.1	Análises físico-químicas	54
5.2	Potencial Hidrogeniônico pH	54
5.3	Turbidez	56
5.4	Cloro Livre	57
5.5	Condutividade	57
5.6	Índice de sedimentação	59
5.7	Alcalinidade	60
5.8	Sílica	61
6	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A fonte de energia não renovável mais importante para a manutenção da vida na Terra é a água, tendo em vista que está se encontra em maior abundância na superfície terrestre, cerca de 70% é coberta por água, sempre foi e continuará sendo o principal pilar de sustentação da vida humana. No entanto, nos dias atuais a água possui extrema importância nos setores socioeconômico mundiais, devido a sua vasta utilização nas atividades da agricultura, domestica geração de energia, atividade pesqueira e industrial. (BRAILE; CAVALCANTE, 1993).

Neste contexto, a preocupação com as gerações futuras tem sido temas bastante discutidos em nossa sociedade, onde a sustentabilidade deve ser primordial, visando satisfazer as necessidades atuais, e das gerações futuras. Com isso, na indústria a água é utilizada em vários setores, como na geração de vapor, lavagem de tubos, máquinas e pisos, utilizada diretamente no processo, encorpadas ao produto e em sistemas de resfriamento. A prática de reuso tem sido muito utilizado nas indústrias visando um maior volume de água disponível para outros usos, onde no aspecto econômico possibilita uma redução de custos, pois a reutilização com a captação e o tratamento de águas de efluentes minimiza consideravelmente o consumo neste setor. (BRAILE; CAVALCANTE, 1993).

A água é o principal fluido nas plantas de geração de energia, pois ela é de longe, o meio de transferência de calor mais comum encontrado nos processos industriais. Está prontamente disponível, não é tóxica e é um dos melhores meios de transferência de calor porque possui alta capacidade térmica além de permanecer líquida em amplos intervalos de pressões e temperaturas.

A água utilizada para a geração de energia é extremamente importante para o bom funcionamento da usina, ela influencia fortemente no programa químico a ser utilizado, por isso é importante conhecer a sua origem e quais são suas características físicas e químicas.

Os constituintes geralmente encontrados junto com a água são os sais inorgânicos e orgânicos dissolvidos, matéria orgânica em suspensão, materiais coloidal, gases dissolvidos e microrganismos. (CARVALHO, 2011).

Para água atender as especificações do fabricante são precisos inúmeros processos para adequar a água a sua necessidade.

Em uma termelétrica, a água passa por diversos processos de tratamento na Estação de Tratamento de Água (ETA), cujo objetivo é produzir água tratada para atender às seguintes demandas:

- a) Combate a incêndio;
- b) Reposição dos circuitos de resfriamento (make up);
- c) Água industrial, para processos e serviços;
- d) Água potável;
- e) Água desmineralizada, para reposição das caldeiras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Prever possíveis problemas encontrados em sistemas de clarificação, dessalinização e desmineralização.

2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar análises físico químicas de ferro, sílica, alcalinidade total, dureza total dureza de cálcio, pH e condutividade;
- b) Avaliar a qualidade da água de alimentação para caldeira;
- c) Comparar os resultados obtidos nas análises físico-químicas com os padrões estabelecidos pelo fabricante da caldeira (DOSSAN);
- d) Realizar análise para comprovar a qualidade do tratamento de água na planta de pré-tratamento de água;
- e) Realizar análise para comprovar qualidade do tratamento de água na planta de dessalinização;
- f) Realizar análise para comprovar qualidade do tratamento de água na planta de desmineralização.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Água

A água é a substância mais abundante e também a mais importante na vida vegetal e animal. Além disso, tem grande aplicação nos processos industriais e, por isso, a existência de uma fonte de água abundante para suprimento do processo é um dos fatores básicos na seleção do local para instalação de uma indústria.

3.2 A água e suas impurezas

A água em seu estado natural nunca é pura. Mesmo quando proveniente de uma precipitação pluviométrica, só é considerada pura na condensação em grande altitude. À medida que desce através do ar, a água da chuva dissolve oxigênio, nitrogênio e dióxido de carbono (gases normalmente encontrados na atmosfera) em quantidades proporcionais às suas pressões parciais. A água da chuva também encontra poeira, fumaça e vapores, que, por sua vez, são dissolvidos ou retidos em suspensão. As bactérias, germes e microrganismos são também arrebatados por ela.

Após contato com o solo, seja por percorrer a superfície terrestre, seja por percolar pelas camadas rochosas, as impurezas contidas na água são aumentadas, devido ao grande poder de dissolução que possui. Deste modo, pode ser dissolvida certa quantidade de matéria mineral do solo ou das pedras com as quais entra em contato. A presença de argila e outros sólidos em suspensão na água de rios e córregos produzem turbidez na mesma. Além disso, as águas de superfície ficam sujeitas à poluição pelos animais, seres humanos, esgotos das cidades e resíduos das indústrias. Daí a necessidade de purificação e condicionamento antes de seu uso como água potável ou para fins industriais.

Tendo-se uma análise completa de uma água natural ou bruta indicaria a presença de mais de cinquenta constituintes dissolvidos ou em suspensão. Em geral esses constituintes são sólidos dissolvidos ionizados, gases dissolvidos, compostos orgânicos dissolvidos, matéria em suspensão, microrganismos e matéria coloidal. (SANTOS FILHO, 1989).

Uma análise completa de uma água potável poderia indicar a presença de mais de 50 constituintes nela dissolvidos ou em suspensão. Estas impurezas podem ser enquadradas nos seguintes grupos:

- a) Sólidos em suspensão;
- b) Gases dissolvidos;
- c) Sais dissolvidos;
- d) Sílica;
- e) Matéria orgânica.

3.2.1 Sólidos em suspensão

São as impurezas que não se dissolvem na água, como areia, argila, sílica, algas, bactérias, resíduos industriais, vegetais e animais de diversos tipos, etc. provocando turbidez. As matérias em suspensão podem ser divididas em dois grupos: matérias decantáveis e matérias coloidais.

Matérias decantáveis ou sedimentos são as partículas em suspensão que, quando a água mantida em repouso, depositam-se espontaneamente. Como exemplo, podem ser citados: sólidos de dimensões relativamente grandes, areia, entre outros.

3.2.2 Dureza

A maior parte dos minerais presentes na água são solúveis, até que usemos a água numa aplicação industrial, tal como o aquecimento ou resfriamento. Alguns minerais, tais como o cloreto de sódio, permanecem bem solúveis e não são classificados como formadores de incrustação. Naturalmente, mesmo as soluções de cloreto de sódio formam cristais se toda a água for removida. Porém, em circunstâncias normais, não é um problema.

Os sais de cálcio e magnésio (Ca e Mg) são um problema. Eles estão presentes na maior parte das águas subterrâneas porque os aquíferos são frequentemente constituídos de calcário, uma mistura de carbonatos de magnésio e cálcio. A água dissolve o calcário lentamente e incorpora os sais de magnésio e cálcio como minerais dissolvidos, formando soluções límpidas.

Infelizmente, os sais de magnésio e cálcio não são muito solúveis, especialmente se a água for aquecida ou a concentração de minerais for aumentada. Eles se tornam insolúveis, um processo que chamamos de precipitação.

A precipitação de cálcio e magnésio está fortemente ligada à temperatura. O processo de precipitação geralmente ocorre nos trocadores de calor, onde a água fresca está sendo aquecida como parte do processo de resfriamento. Os cristais incrustantes produzidos pelo cálcio e magnésio são fisicamente muito duros; conseqüentemente, chamamos o teor de cálcio e magnésio na água de dureza. Exemplos de incrustação de cálcio e magnésio são mostrados na figura 1. A remoção ou redução da dureza da água por um processo chamado de abrandamento produz água abrandada, água esta extremamente importante em sistemas de geração de vapor.

Figura 1 – Exemplo de incrustações de Ca/Mg



Fonte: Ramos (2015)

É muito importante monitorar a quantidade de dureza na água de reposição de um sistema de resfriamento e na água de recirculação. Isso determina até que ponto a água pode ser aquecida sem formar cristais incrustantes e indica o quanto os minerais podem ser concentrados, antes de serem removidos do sistema pela descarga.

3.2.3 pH

O pH é uma medida fundamental para controlar a química de qualquer sistema que utiliza água, tanto sistemas de clarificação, resfriamento, geração de

vapor como também os sistemas de efluentes. Todos os problemas mais importantes do sistema de resfriamento (corrosão, formação de incrustação, crescimento microbiológico) estão ligados de uma forma ou de outra ao pH.

Existem métodos bem convenientes de medir o pH, os medidores de pH. Muitas das confusões associadas ao pH provavelmente vêm do fato de o mostrador de um medidor de pH mostrar os valores de pH em espaços regulares de 0 a 14. Isso implica que o pH é linear, significando que o valor de 2 é o dobro do que o valor de 1 seria. Cada número no mostrador representa dez vezes a concentração seguinte.

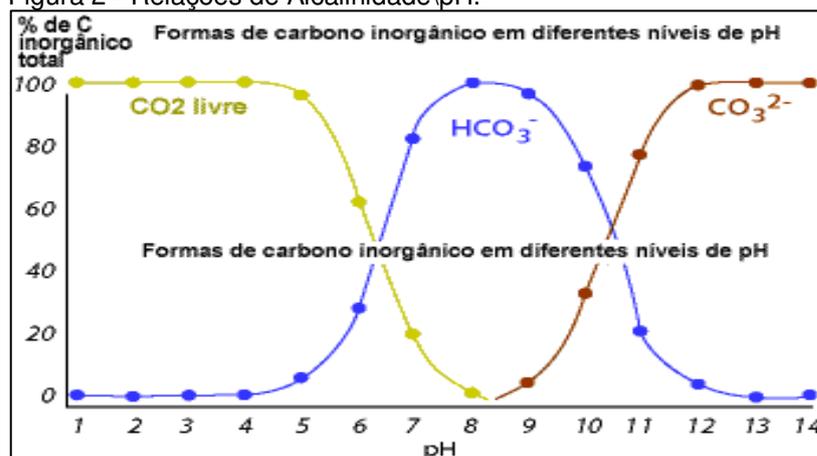
3.2.4 Alcalinidade

A alcalinidade surge da interação da água líquida com o gás de dióxido de carbono (CO_2). O CO_2 dissolve-se na água, reagindo com ela e formando um ácido fraco, o ácido carbônico. As relações são mostradas na figura 2.

Depois de se formar o ácido carbônico, se fôssemos elevar o pH adicionando soda cáustica ou algum outro agente alcalino, o ácido carbônico se converteria em íon bicarbonato, HCO_3^- . A conversão completa-se quando o pH atinge 8,3. O bicarbonato frequentemente aparece em águas subterrâneas e superficiais como resultado de uma solubilização lenta do calcário pela água.

Há ainda outra reação: se o pH continua a subir (significa menos H^+), o H no íon bicarbonato desaparece, formando o íon carbonato, CO_3^{2-} . Essa reação não é completada até que o pH esteja bem alto, acima de 10 ou 11.

Figura 2 - Relações de Alcalinidade\pH.



Fonte: Carbono (2017)

O problema tanto com os íons carbonato quanto bicarbonato é que eles são formadores potenciais de incrustação nos sistemas de resfriamento e geração de vapor. Eles juntam-se ao cálcio para formar incrustação muito dura.

3.3 Processo de tratamento de água do mar para geração de energia

A matriz energética brasileira é baseada na energia proveniente das usinas hidrelétricas devido ao nosso grande número de bacias hidrográficas, porém ela é extremamente dependente das estações chuvosas e dos níveis pluviométricos. Esse é um grande problema, pois existe uma escassez de chuvas em determinadas localidades/regiões do país ocasionando um déficit de energia (LORA; MARCO 2004).

Sendo assim o Governo Federal criou no ano de 2000 o Programa Prioritário de Termelétricas – PPT3 desse modo antevendo a crise energética no país em 2001-2002, esse programa previa a implantação de usinas termelétricas em caráter emergencial com algumas considerações (prerrogativas). Esse foi declarado o ponto inicial do crescimento e expansão térmica ocorrida no Brasil (Criado pelo Decreto 3.371, de 24/02/2000).

Temos ainda a Lei 9.478 de 6 de agosto de 1997, regulamentado pelo Decreto nº 3.520, de 21 de junho de 2000, vinculado a Presidência da República foi criada para o assessoramento do Presidente da República para a formulação de políticas e diretrizes de energia e, assegurar o suprimento de insumos energéticos às áreas mais remotas ou de difícil acesso do país.

Todo aspecto referente à matriz energética brasileira essa Lei 9.478 é responsável pela revisão periódica das políticas e diretrizes, mas também estabelece diretrizes para programas específicos, tais como os de uso do gás natural, do etanol, de biomassas, do carvão e da energia termonuclear.

Já quando tratamos do funcionamento das centrais (usinas) termelétricas podemos afirmar que é similar, havendo algumas especificidades dependendo do combustível utilizado. O combustível (óleo diesel, óleo pesado, carvão mineral, gás natural, biomassa entre outros) é armazenado em pátios, tanques ou depósitos adjacentes, de onde é enviado para a central termoelétrica, onde será usado na queima dentro da caldeira. O vapor (superaquecido e com alta pressão) produzido do aquecimento da água que corre pelos extensos feixes de tubos da caldeira

quando aquecidos tem a função de movimentar as pás (palhetas) de uma turbina, esta tem um rotor gira juntamente com o eixo de um gerador que satisfeitas algumas condições (fase, ângulo de fase, frequência) produz a energia elétrica, depois disso o vapor é resfriado através de um condensador e transformado novamente condensado (água), que volta a circular nos tubos da caldeira e desse modo reiniciando um novo ciclo (LORA; MARCO, 2004).

Em resumo, podemos afirmar que as usinas termoelétricas fazem simplesmente a conversão de energia química (térmica) em energia mecânica e desse modo produzindo energia elétrica. A importância das usinas termoelétrica para o nosso sistema elétrico é fundamental uma vez que elas atendem à demanda nos meses de escassez de chuvas onde os níveis dos reservatórios das hidrelétricas estão baixos, isto é, no sistema hidrotérmico brasileiro a participação da geração térmica é complementar (GUERREIRO et al., 2006).

Apesar dos novos rumos do setor elétrico e impulsionamento da importância do carvão dentro da matriz energética brasileira, tem-se notado o lado dos impactos ambientais causados pelas usinas e por esse motivo têm-se também pesquisado e desenvolvido novas tecnologias de mitigação/remoção de impurezas (limpeza), tratamentos mais eficientes e combustão eficiente do carvão, para atender especificamente leis ambientais. Vale ressaltar que as usinas termoelétricas a carvão mineral têm um grande potencial poluidor e devem tratar e descartar seus resíduos sejam eles sólidos, líquidos e gasosos de forma ambientalmente correta e sustentável.

Podemos destacar com o investimento e aplicação das tecnologias para redução das emissões nas usinas termoelétricas a carvão algumas vantagens no mundo: o carvão é o maior energético produtor de eletricidade do mundo; o carvão está distribuído por 75 países; apresenta reservas mundiais para 200 anos (WORLD COAL INSTITUTE, 2007); possui tecnologia limpa com perspectiva de forte desenvolvimento; representa apenas 25% do custo total de produção de eletricidade; possui níveis declinantes de impacto ambiental. (LEITE, 2007).

No caso específico do Brasil podemos também destacar algumas vantagens: representa a maior reserva de combustível fóssil; ocorre, principalmente, na superfície, reduzindo os custos de extração (MONTEIRO et al., 2004 apud BARREIRO JÚNIOR, 2008); apresenta oportunidade de redução de custo via economia em escala; o carvão é estocável e transportável; apresenta baixa

volatilidade nos custos (SIECESC, 2007); seu relativo alto custo de investimento é compensado pelo baixo custo do combustível (TOLMASQUIM, 2005).

Podemos também destacar a origem e formação do carvão mineral:

O carvão mineral vem de troncos, raízes, galhos e folhas de árvores que viveram a centenas e milhões de anos, as quais ficaram submersas em ambiente pantanoso. É um combustível não renovável originado da fossilização da biomassa, em um longo processo, no tempo geológico. Sua qualidade depende da natureza da matéria vegetal, do clima, da localização geográfica e da evolução geológica da região onde é encontrado (MONTEIRO et al., 2004 apud BARREIRO JUNIOR, 2008, p. 32).

Além dessas vantagens já temos em operação comercial usinas com as tecnologias de queima limpa de carvão (nos estados do Maranhão e Fortaleza) e ela vem se apresentando como uma boa oportunidade de diversificação para a matriz energética nacional uma vez que utiliza processos modernos de tratamentos de seus resíduos.

A usina termelétrica Itaqui é o primeiro empreendimento da ENEVA no Maranhão e consiste na geração de Energia Elétrica despachada no sistema nacional Brasileiro. Localizada no Distrito Industrial de São Luís, movida a carvão mineral, a usina está em operação comercial desde fevereiro de 2013. A Figura 3 mostra a usina termoelétrica UTE Itaqui em vista aérea.

Figura 3 – Vista Aérea da UTE Itaqui

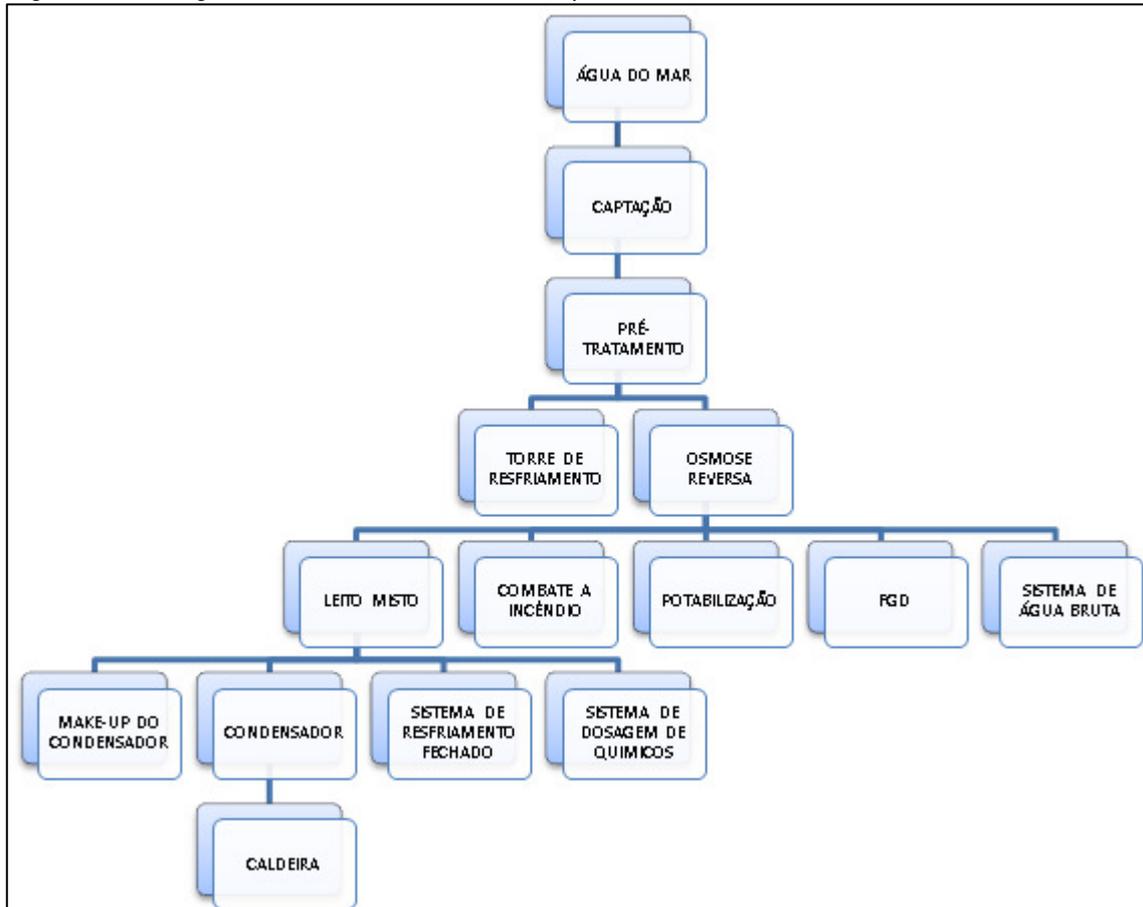


Fonte: ENEVA (2017)

Realiza a captação da água da Bacia do São Marcos no Norte do Estado do Maranhão para utilização no processo de geração de energia. Para a utilização da água captada é necessário à utilização de diversos processos para a utilização,

sendo necessária a clarificação, dessalinização e a desmineralização. A Figura 4 demonstra o processo de geração e o ciclo da água na usina.

Figura 4 - Fluxograma do Processo da UTE Itaqui



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.3.1 Adução e captação

A adução é o conjunto de encanamentos e peças especiais destinados a promover o transporte da água da baía de São Marcos em um sistema de abastecimento entre o Porto do Itaqui e a captação. A figura 5 ilustra como funciona a construção de uma adutora.

Figura 5 - Construção de uma adutora



Fonte: ENEVA (2017)

A captação é um conjunto de estruturas e dispositivos, construídos ou montados, para a retirada de água destinada ao abastecimento da planta da UTE Itaquí.

As obras de captação devem ser projetadas e construídas para:

- a) Funcionar ininterruptamente em qualquer época do ano;
- b) Permitir a retirada de água para o sistema de abastecimento em quantidade suficiente ao abastecimento e com a melhor qualidade possível;
- c) Facilitar o acesso para a operação e manutenção do sistema.

3.3.2 Pré-tratamento de água

O sistema de pré-tratamento de água do mar tem por finalidade realizar o processo de filtração e clarificação da água do mar para especifica-lo para osmose reversa.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros recomendados para o controle físico químico de água de alimentação osmose reversa.

Tabela 1 – Parâmetro para controle físico-químico de água de alimentação da osmose reversa

Item de Controle	Parâmetros
pH	5 a 10
Ferro Total (mg\L)	máx 50
Condutividade (mS\cm)	máx 250
Turbidez (NTU)	máx 5
Sílica (mg\L)	máx 50

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.3.3 Processo de clarificação e filtração

A água contém várias impurezas como resultado do contato com o ar e a terra. Esses sólidos suspensos e dissolvidos devem ser removidos para proporcionar água adequada para uso doméstico e industrial. Os sólidos dissolvidos são aqueles naturalmente solúveis na água e que não podem ser removidos com simples filtragem. Os sólidos suspensos são partículas que não se dissolvem em água, tais como a lama, o limo, o barro e os materiais microbiológicos. A remoção de sólidos suspensos geralmente se consegue com a coagulação, a floculação e a decantação, frequentemente referidas como clarificação convencionalmente.

3.3.4 Coagulação

Se a água que contém sólidos suspensos pudesse ficar parada calmamente numa bacia de decantação, os sólidos decantariam devido à força da gravidade. A maioria das partículas iria eventualmente se decantar; todavia, o tempo envolvido ou o tamanho do equipamento de decantação podem não ser práticos ou econômicos.

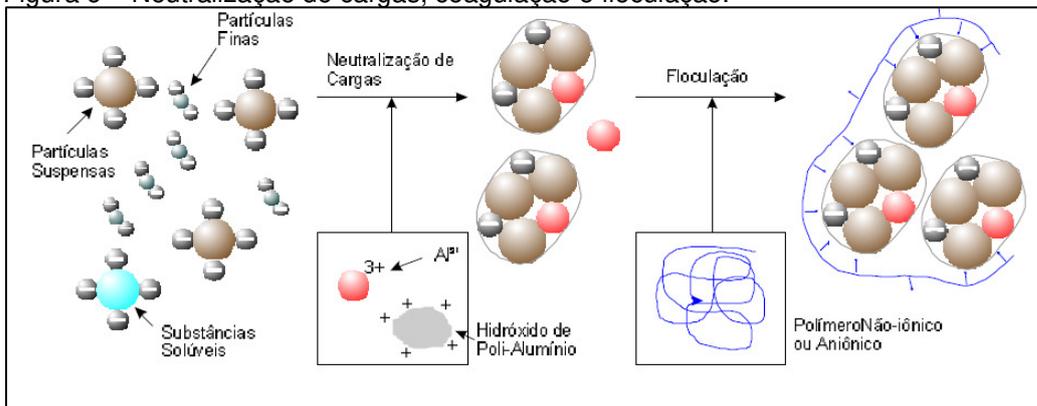
Tabela 2 - Relação entre o tamanho das partículas e o tempo de decantação

<i>Diâmetro da Partícula, mm</i>	<i>Ordem do tamanho</i>	<i>Área total da superfície</i>	<i>Tempo necessário para decantar 30 cm</i>
10	Pedregulho	0.487 in ²	0.3 seg
1	Areia grossa	4.87 in ²	3 seg
0.1	Areia fina	48.7 in ²	38 seg
0.01	Limo	3.38 ft ²	33 min
0.001	Bactéria	33.8 ft ²	55 hr
0.0001	Partículas coloidais	3.8 yd ²	230 dias
0.00001	Partículas coloidais	0.7 acres	6.3 anos
0.000001	Partículas coloidais	7.0 acres	63 anos (min.)

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

As partículas suspensas em águas superficiais e efluentes podem permanecer em suspensão na água durante longos períodos de tempo devido às forças eletrostáticas que as afetam e ainda ao tamanho relativo da partícula. A maioria das partículas na água tem uma carga de superfície levemente negativa que, como os polos similares de um ímã, se repelem. Se as cargas superficiais pudessem ser neutralizadas, as partículas se agregariam e formariam uma partícula levemente maior, que se decantaria mais rapidamente. Em palavras simples, a coagulação é o processo de neutralizar as cargas de modo que as partículas possam não mais se repelir umas às outras, mas possam se juntar umas com as outras.

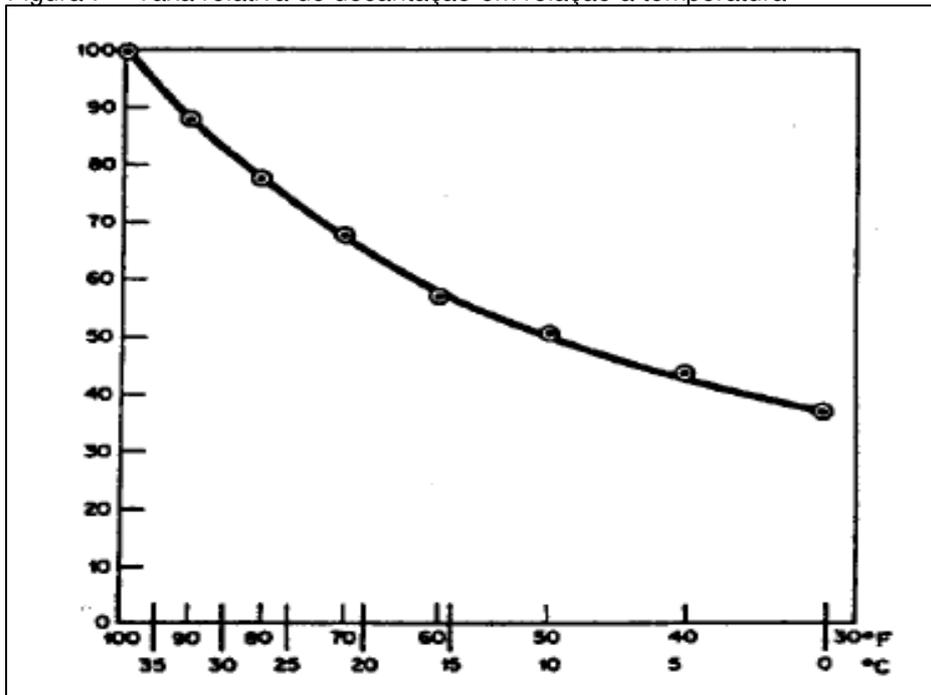
Figura 6 – Neutralização de cargas, coagulação e floculação.



Fonte: Kurita (2017).

À medida que o tamanho da partícula ou o diâmetro aumenta, a taxa da decantação aumenta. Ou seja, quanto maior a partícula, mais rápida a decantação. Uma segunda variável, a temperatura, também afeta o tempo de decantação, presumindo-se que a densidade da partícula não se altera. A água fria é mais densa e mais viscosa que a água quente, o que resulta em maior taxa de decantação.

Figura 7 – Taxa relativa de decantação em relação à temperatura



Fonte: Kurita (2017)

3.3.5 Coagulantes e auxiliares de coagulação

Muitos sais inorgânicos comuns, assim como os polímeros orgânicos solúveis em água, são usados para neutralizar as cargas das partículas, o que leva à formação de pin floc (flocos tipo cabeça de alfinete) flocos apenas visíveis. Fatores como o pH, a turbidez, a temperatura e a mistura afetam a atuação desses coagulantes.

Figura 8 - Coagulantes comuns e auxiliares de coagulação

Nome	Fórmula	Forma Comercial	Graus Disponíveis	Peso, Lb / cu ft	Materiais Indicados para Manipular	Diversos
Sulfato de Alumínio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	17% Al_2O_3	Fragmento Pó Grânulos	Pó, 38-45 Outro, 57-67	Chumbo Borracha Ferro de Silício	pH (1% solução) = 3.4
Aluminato de Sódio	$NaAlO_2$	55% Al_2O_3	Cristais	60	Ferro Aço Borracha Plásticos	Estabilizado com cerca de 6% de excesso de NaOH
Alúmen de Amônio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$	11% Al_2O_3	Fragmento Pó	60-68	Chumbo Borracha Ferro de Silício Faiança	pH (solução de 1%) = 3.5
Sulfato Ferroso	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	55% $FeSO_4$	Cristais Grânulos	63-68	Chumbo Estanho Madeira	Eflorescente
Sulfato Férrico	$Fe_2(SO_4)_3$	90% $Fe_2(SO_4)_3$	Pó Grânulos	60-70	Chumbo Borracha Aço Inoxidável Plásticos	Higroscópico
Cloreto Férrico	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	60% $FeCl_3$	Cristais	45-55	Borracha Vidro Plásticos	Higroscópico
Óxido de Magnésio	MgO	95% MgO	Pó	25-35	Ferro Aço	Essencialmente insolúvel, alimentado em forma de pasta fluida
Bentonita	-----	-----	Pó	60	Ferro Aço	Essencialmente insolúvel, alimentado em forma de pasta fluida
Silicato de Sódio	$Na_2O \cdot 3 \cdot 22SiO_2$	41% Be	Solução	87	Ferro Aço Borracha	As gradações sólidas são disponíveis com coeficientes variados de $Na_2O:SiO_2$

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Salvo o aluminato de sódio, todos os coagulantes comuns de ferro e alumínio são sais ácidos que diminuem o pH da água tratada. Dependendo da alcalinidade inicial da água natural e do pH, devem ser adicionados cal ou soda cáustica para contrabalançar a queda de pH causada por tais coagulantes inorgânicos. O pH pode afetar tanto a carga da superfície da partícula como a precipitação durante a coagulação. Existe uma faixa ideal de pH para cada coagulante inorgânico, que pode ser diferente da faixa de solubilidade do sal. O pH pode também afetar os polímeros orgânicos, mas não tanto, quanto, afeta os coagulantes inorgânicos.

Em geral, um aumento no conteúdo de turbidez ou de sólidos suspensos exige um aumento na taxa da alimentação do coagulante. Contudo, águas de alta turbidez às vezes requerem dose de coagulante relativamente baixa, porque há mais chances de partículas neutralizadas entrarem em colisão e se agruparem. Em águas de baixa turbidez, onde há uma baixa probabilidade de colisão, frequentemente se usa alúmen ou barro para adicionar mais sólidos, o que aumenta a chance de

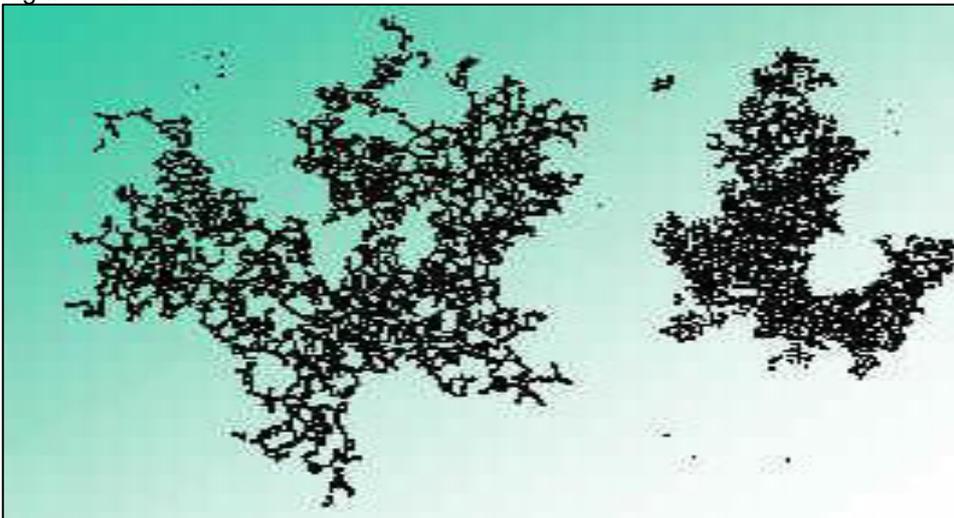
colisão.

Uma mistura rápida e completa do coagulante com a água não-tratada aumenta o número de colisões das partículas, o que, por sua vez, aumenta a velocidade do processo de neutralização de carga das partículas. O resultado é partículas maiores em menor tempo. Geralmente, a baixa turbidez requer mais mistura ou mais tempo para as partículas entrarem em contato umas com as outras.

3.3.6 Floculação

A floculação é o processo de juntar as partículas neutralizadas ou coaguladas para formar uma aglomeração muito maior ou floco. Pode ser visualizada como um mecanismo de montagem do tipo de uma ponte ou semelhante a uma teia de aranha.

Figura 9 - Floco formado



Fonte: Kaisha (1985)

A floculação ocorre com o uso de moléculas de alto peso molecular que formam flocos mais pesados do que na fase de coagulação. O tamanho do floco é normalmente determinado pela sua capacidade de suportar o cisalhamento causado pela mistura ou turbulência.

Enquanto a mistura rápida é importante para a coagulação, a floculação precisa de uma mistura mais lenta para converter pequenos pin floc em flocos maiores e visíveis que vão se decantar prontamente. Se a mistura for demasiada ou muito violenta, o floco será desfeito ou se romperá, tornando-se muito difícil de

modificar e se decantar.

Exatamente como acontece com os coagulantes, os floculantes também são afetados pela temperatura, pH e turbidez; todavia, a taxa da alimentação é fundamental. Uma dose excessiva pode formar um floco grande de decantação rápida que não arrastará as partículas finas e deixará os sólidos em suspensão.

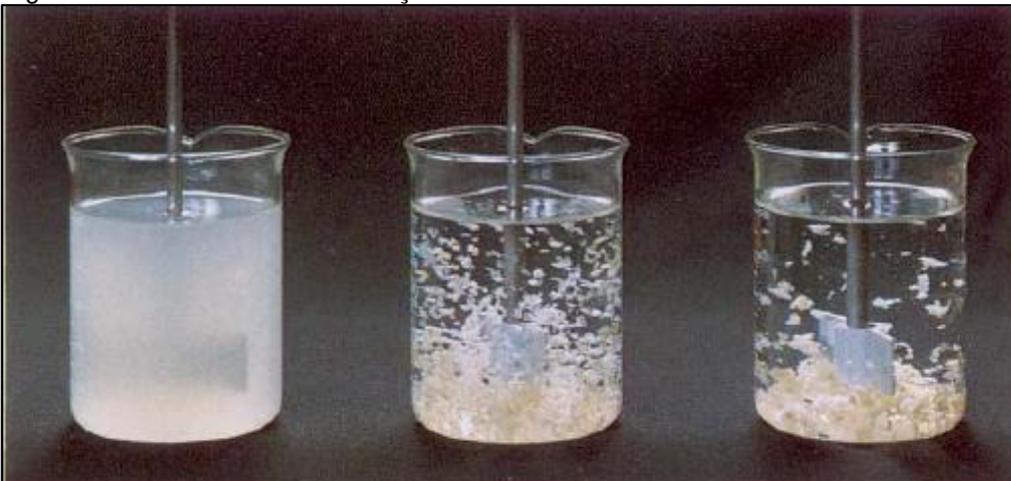
3.3.7 Decantação

A decantação se refere à remoção química de partículas que foram coaguladas e floculadas. A decantação sem coagulação anterior é chamada de assentamento e resulta na remoção de sólidos suspensos relativamente grosseiros.

Fatores como a temperatura da água, correntes hidráulicas e térmicas, alterações na vazão e na concentração de sólidos podem afetar a decantação e partículas floculadas. Esses fatores são levados em consideração quando o equipamento principal é projetado.

A figura 10 representa o processo de decantação. O primeiro frasco, da esquerda para a direita, apresenta amostra “*in natura*”. No segundo frasco já ocorreram os processos de coagulação e floculação e observa-se o início da decantação. No último frasco nota-se o final do processo de decantação.

Figura 10 – Processo de decantação



Fonte: Kurita (2017)

O processo de coagulação-decantação necessita de três processos unitários distintos:

- a) Mistura rápida para coagulação;
- b) Mistura moderada para floculação;
- c) Separação de água e flocos.

Originalmente, as unidades convencionais de clarificação consistiam em grandes bacias retangulares de concreto divididas em duas ou três seções. Cada estágio do processo de clarificação ocorria numa seção separada da bacia. O fluxo da água era horizontal nesses sistemas.

Figura 11 – Bacia de Decantação Horizontal



Fonte: Engenharia Soluções Ambientais (2016)

As unidades de fluxo horizontal ainda são usadas em plantas industriais muito grandes e também para clarificar a água municipal, uma vez que são projetadas para bacias de grande capacidade. O tempo de retenção é normalmente longo, geralmente leva de quatro a seis horas e, principalmente, voltado à decantação.

A retenção demorada permite tempo de reação suficiente para fazer os ajustes necessários na alimentação química e de polímeros se as condições da água não-tratada se alterarem bruscamente. No entanto, exceto no caso de demandas muito grandes de água tratada, as unidades horizontais não são eficazes em termos de custos devido à necessidade de terreno grande e elevados custos de construção.

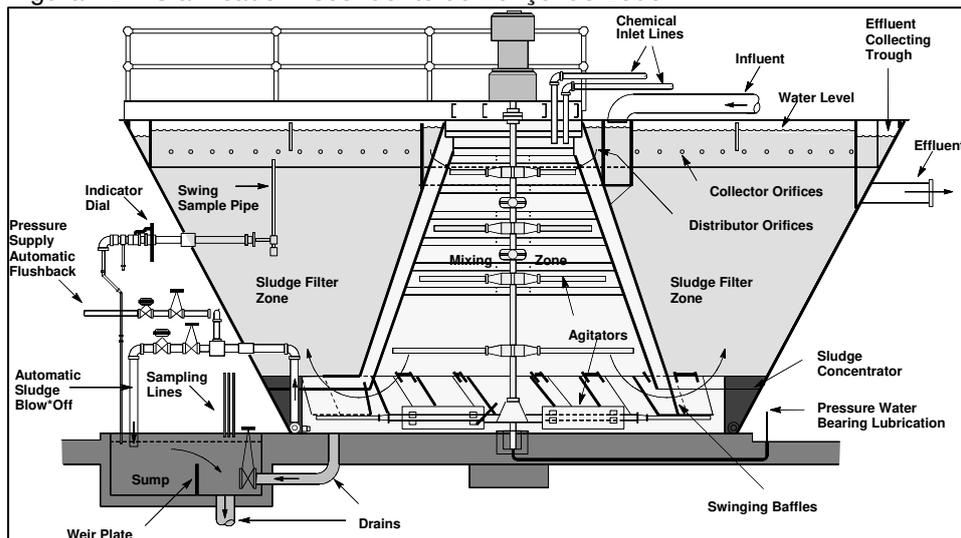
Clarificadores de fluxo ascendente compactos e relativamente econômicos acomodam a coagulação, floculação e decantação num único tanque, geralmente circular, de aço ou concreto. Esses clarificadores são denominados de

ascendentes porque a água corre para cima enquanto os sólidos suspensos se sedimentam. Uma característica fundamental para manter um efluente de alta limpidez é o aumento de contato de sólidos através da recirculação interna do lodo.

Em vista de o tempo de retenção de uma unidade ascendente ser de aproximadamente uma a duas horas, as bacias ascendentes podem ser muito menores em tamanho ou em capacidade de retenção do que as bacias horizontais de capacidade de passagem igual. Uma taxa de elevação de 0,75 a 1,25 galões por minuto (gpm) por pé quadrado de área de superfície é normal na clarificação. As unidades combinadas de abrandamento/clarificação frequentemente podem operar até 1.5 gpm por pé quadrado de área de superfície devido ao tamanho da partícula e às densidades.

A maioria dos modelos ascendentes são chamados clarificadores de lençol de lodo ou de contato com sólidos. Após a coagulação e/ou floculação nas unidades de lençol de lodo, a água que chega passa através da camada suspensa do floco formado anteriormente.

Figura 12 – Clarificador Ascendente de Lençol de Lodo

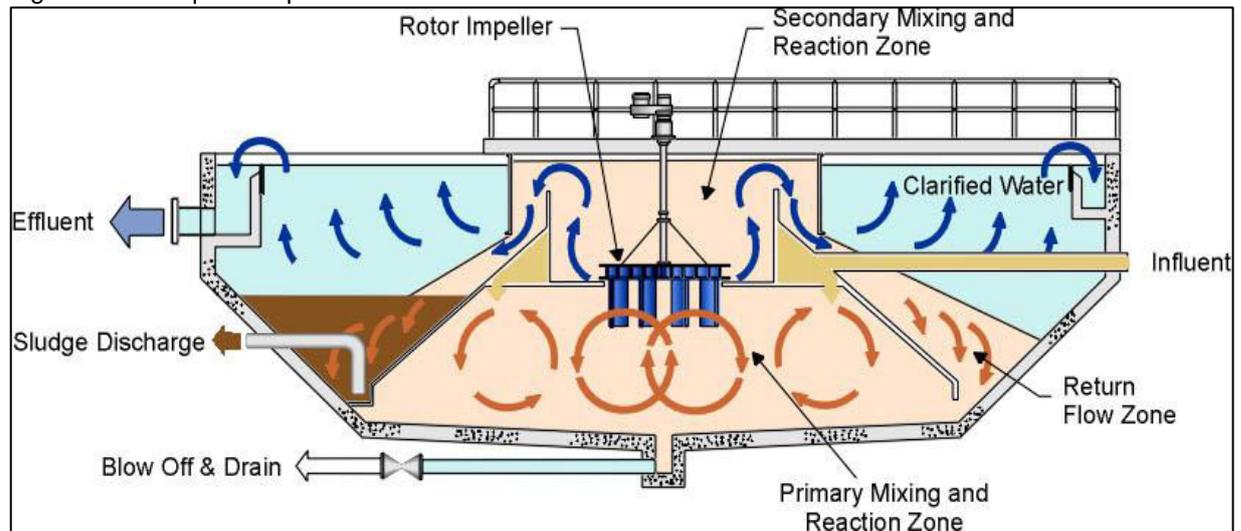


Fonte: Kaisha (1985).

A eficiência do lençol de lodo depende da ação da filtração à medida que a água recém-coagulada ou floculada passa pelo floco suspenso. Níveis mais elevados de lodo aumentam a eficiência da filtração. Na prática, a interface com a parte de cima do lodo é feita com segurança máxima para evitar transtornos que possam resultar no arraste de grandes quantidades de flocos no transbordamento. Da mesma maneira, deve-se evitar a remoção excessiva de lodo ou descarga. O

lençol de lodo é, em geral, altamente sensível a alterações de passagem da água, adição de coagulante e alteração na química da água não-tratada e na temperatura.

Figura 13 – Esquema operacional

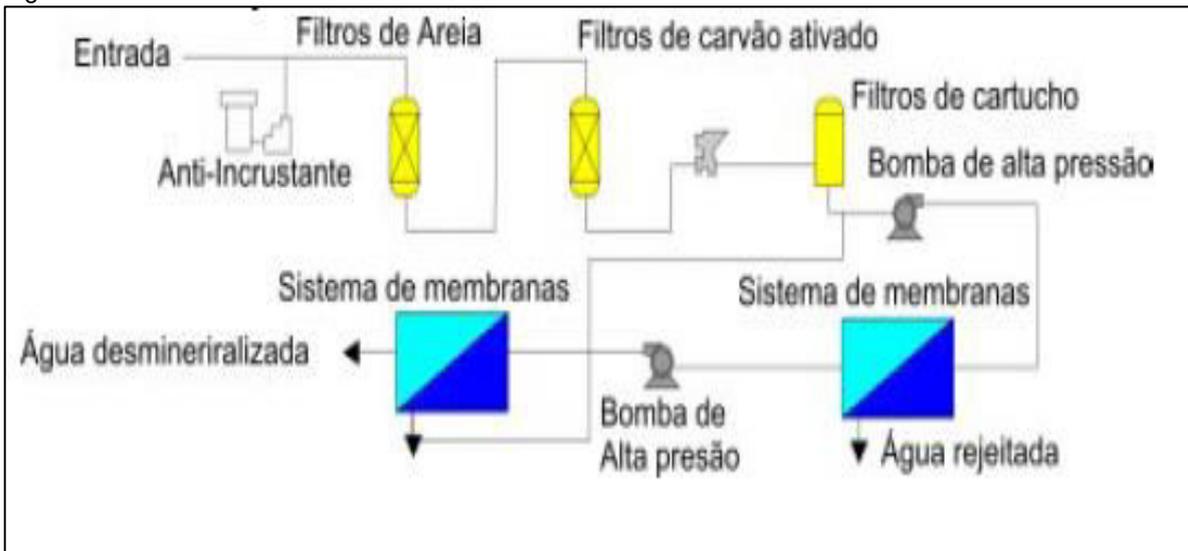


Fonte: Kaisha (1985).

3.3.8 Osmose inversa

O processo de Osmose Inversa (Reverse Osmosis – RO) consiste em aplicar sobre uma solução (água salgada) uma pressão superior à sua pressão osmótica contra uma membrana semipermeável, fazendo com que só a água (sem sal) passe pela membrana deixando retidos nela os íons de sal. A Osmose Inversa pede um pré-tratamento da água salgada, filtrando-a e desinfetando-a, a fim de tirar os elementos em suspensão e os organismos que nela estão presentes, minimizando assim o entupimento das membranas. Embora este processo ocorra à temperatura ambiente, não envolve mudança de fase e o princípio envolvido é fácil e simples, tem um grande inconveniente que são as altas pressões exigidas pelas bombas sobre grandes volumes de água.

Figura 14 – Processo de Osmose Inversa



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A figura 14 mostra esquematicamente o funcionamento básico de uma instalação de Osmose Inversa. A pressão exigida pela bomba de água do mar varia entre 60 e 80 bar dependendo da salinidade da água e do tipo de membrana. Nos módulos de membranas, a água bruta pressurizada escoar pelas membranas enquanto parte da água pura contida nela passa através da membrana para o compartimento que recolhe a água doce. A salmoura é rejeitada a uma pressão que varia de 50 a 65 bar e por isso são usadas turbinas hidráulicas para recuperar mais de 35% da energia consumida pela bomba de alta pressão.

A Osmose Inversa é um processo puramente elétrico. A maior parte da energia elétrica consumida é na bomba de alta pressão, mas existem outras bombas e equipamentos auxiliares que também consomem energia elétrica.

É importante salientar que neste processo ao contrário da Eletrodialise, só a água pura passa pela membrana e não o sal. A Osmose Inversa não pode ser considerada um processo de filtração, já que a água bruta escoar paralelamente à membrana e não perpendicularmente, motivo pelo qual apenas parte da água pura, contida na água bruta, passa pela membrana e o sal não fica retido na membrana porque é arrastado pela salmoura.

Na figura 15 são mostradas fotos de duas unidades de dessalinização com capacidade de 30.000 m³/dia: a da esquerda ilustra os cilindros contendo as membranas e a da direita mostra as bombas de alta pressão.

Figura 15 – Planta de Osmose Inversa



Fonte: Dow Water & Process Solutions (2016)

3.3.9 Membranas de osmose inversa

Existem, atualmente, dois tipos de membranas de Osmose Inversa no mercado:

- a) Membranas de acetato de celulose, uma mistura de mono, di e tri-acetato de celulose;
- b) Membrana de poliamida aromática.

As diferenças entre as mesmas podem ser observadas na figura 16.

Figura 16 – Diferenças entre as membranas de Osmose Inversa

Membranas	Aplicação em tratamento de água com salinidade < 15 g/L (15.000 ppm)	
1. Material	B-9 poliamida aromática	Acetato de celulose
2. Forma	Fibra oca	Elemento em espiral
3. Dados físicos: Pressão normal de operação Temp. de operação (máx.) Temp. de estocagem (máx.)	28,6 kg/cm ² 35°C 40°C	30,6 a 42,8 kg/cm ² 30°C 30°C
4. Características químicas pH aceitável ataque bacteriológico cloro livre (dose contínua máxima aceitável)	4 a 11 não afeta pH < 8 = 0,1 ppm pH > 8 = 0,25 ppm	4,5 a 6,5 alta sensibilidade 0,5 a 1,0ppm

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O sistema de Osmose Inversa tem utilizado membranas semipermeáveis que retêm cerca de 90 a 99% das substâncias inorgânicas; cerca de 95 a 99% de substâncias orgânicas e 100% de matéria coloidal e finos (bactérias, vírus, sílica coloidal, etc.).

As membranas são colocadas em tubos modulares (módulos), que podem posteriormente sofrer ampliações, tanto no sentido horizontal como no sentido vertical o que torna este sistema muito flexível.

A água passa através das membranas sob a ação da pressão, enquanto o rejeito concentrado é extraído continuamente do sistema através de válvula de controle de vazão, conforme o seguinte esquema:

- 1) Alimentação de água a ser tratada.
- 2) Água permeada.
- 3) Rejeito.
- 4) Bomba de alta pressão.
- 5) Módulo de Osmose Inversa.
- 6) Membrana semipermeável.
- 7) Válvula de descarga de rejeito.

A razão entre o fluxo de água permeada e o fluxo de água de alimentação é denominada de taxa de conversão deste sistema, expressa em percentagem.

Na figura 17 podem ser observados alguns valores típicos de pressão osmótica de alguns sais em solução aquosa.

Figura 17 - Valores típicos de pressão osmótica

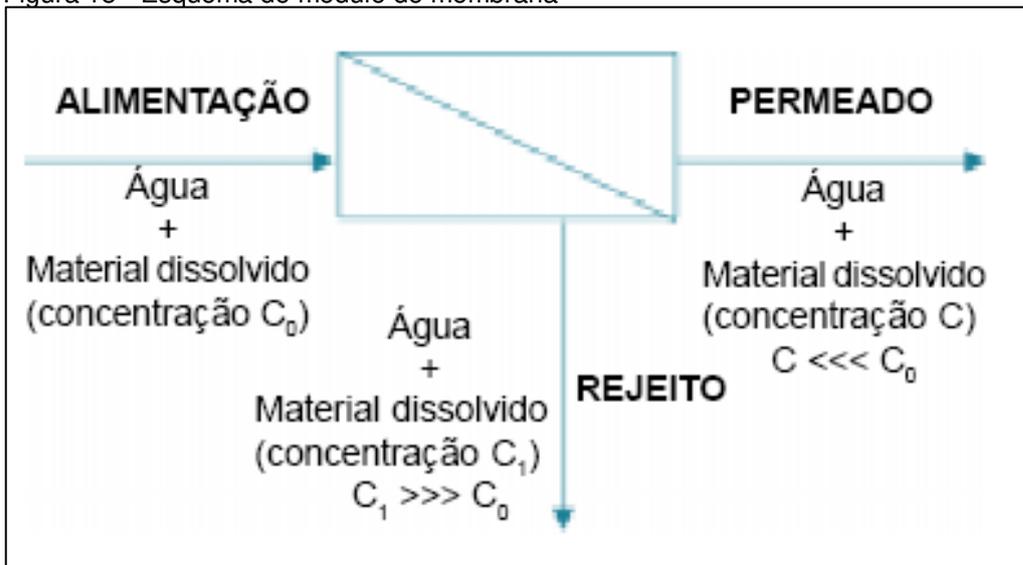
Sal	Concentração (mg/L)	Pressão osmótica (kg/cm ²)
NaCl	35.000	28,42
NaCl	1000	0,81
Na ₂ SO ₄	1000	0,43
MgSO ₄	1000	0,26
CaI ₂	1000	0,59
NaHCO ₃	1000	0,91
MgCl ₂	1000	0,68

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

As membranas são montadas em elementos chamados módulos. O esquema mais simples de utilização consiste em colocar em série uma bomba de alta pressão e um módulo: a água pura atravessa a membrana, sob o efeito da pressão enquanto que um rejeito concentrado é evacuado continuamente.

Um sistema de Osmose Inversa consiste basicamente, de uma bomba de alimentação, um permeado e uma válvula na saída do rejeito para controlar a conversão do sistema, como mostra a figura 18.

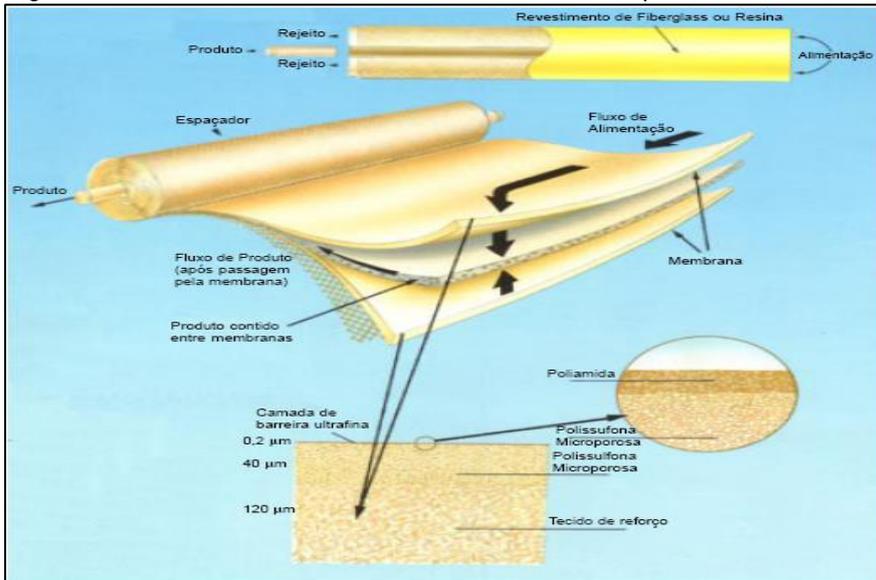
Figura 18 - Esquema de módulo de membrana



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Neste arranjo, pares de membranas são enrolados circularmente a um tubo central que coleta o permeado. O fluxo de água a ser tratado entra paralelamente ao tubo central, através de lacunas produzidas por espaçadores que ficam entre as duas faces ativas da membrana. O permeado é coletado em um material poroso, através do qual, flui ao tubo central de onde é coletado, como pode ser visto na figura 19.

Figura 19 – Módulos com elementos enrolados em espiral



Fonte: Dow Water & Process Solutions (2016)

3.3.10 Sistemas de osmose inversa

Um sistema de Osmose Inversa consiste, basicamente, de uma bomba de alimentação, um permeador e uma válvula na saída do rejeito para controlar a conversão do sistema.

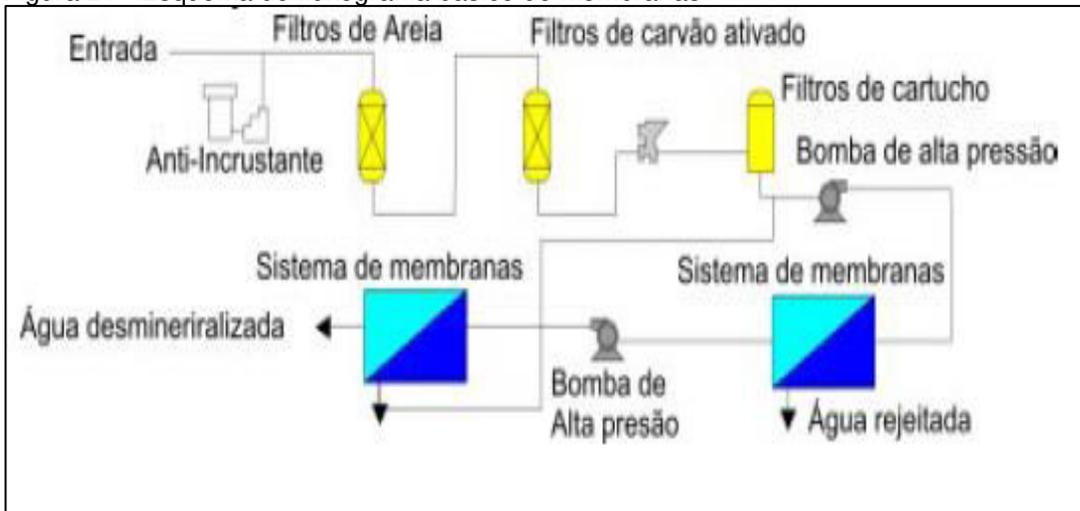
Figura 20 – Foto do Sistema de Osmose Inversa



Fonte: GABCO - Soluções para tratamento de água (2016)

De uma maneira mais completa, a figura 21 mostra um fluxograma básico para um sistema com um único permeador.

Figura 21 - Esquema do fluxograma básico de membranas



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.3.11 Limitações

Apesar das inúmeras vantagens da Osmose Inversa, o processo tem suas limitações. Na prática a pressão aplicada excede a pressão osmótica em 14 kg/cm² ou mais; dessa forma, normalmente, é evitado para soluções com alta concentração de sais.

Os limites superiores de temperatura para o acetato de celulose, aramida e película composta são de 30 a 40°C, 35 a 45°C e 45 a 50°C, respectivamente. Acima desses limites, as perdas de produtividade são excessivas devido à compactação da membrana.

Como o sistema é sensível a incrustações, geralmente, é requerido um pré-tratamento. Todos os tipos de permeadores são severamente afetados pela presença de óleos ou graxas e, portanto é necessária sua prévia remoção.

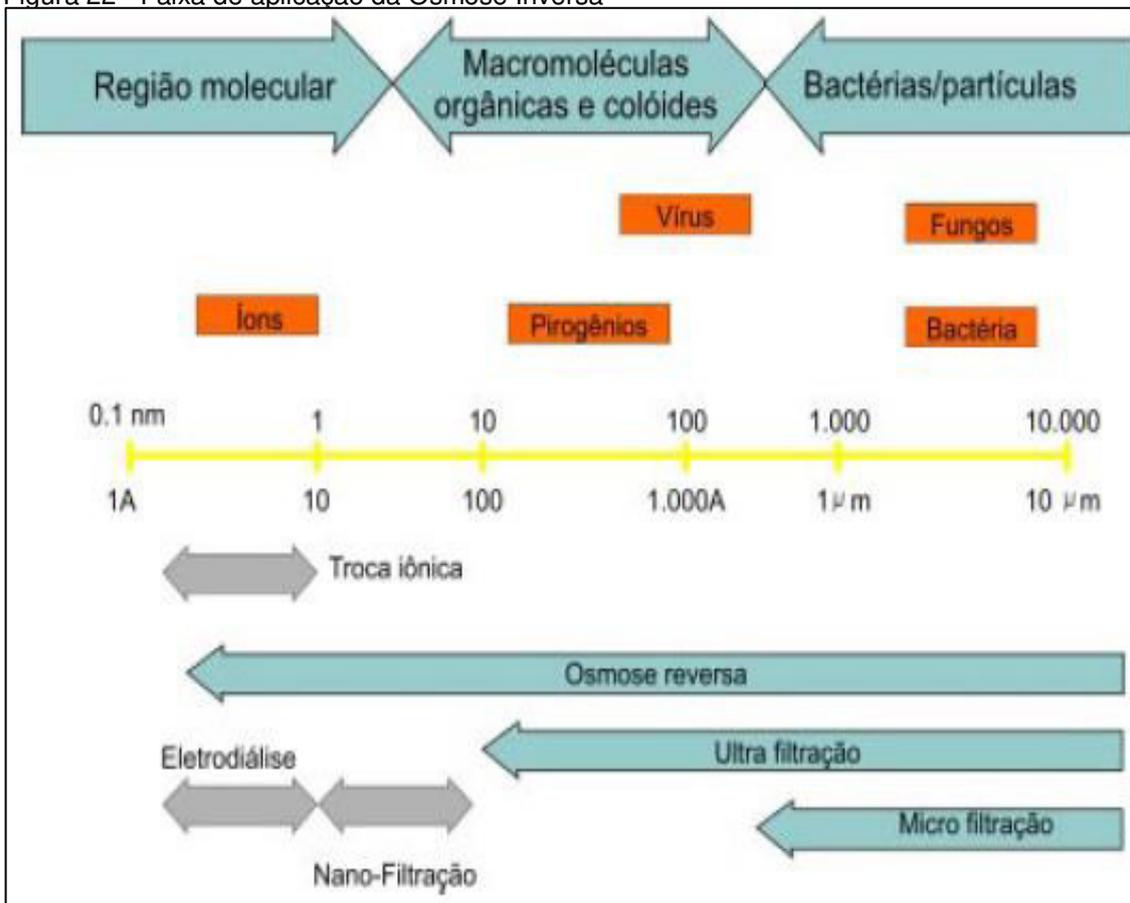
Para atingir uma vida útil desejada, as soluções devem ser compatíveis com as membranas e os componentes utilizados. Muitas vezes, a natureza de um efluente ou solução a ser tratada não é totalmente conhecida, exigindo testes pilotos para medir sua eficiência e compatibilidade.

3.3.12 Aplicações

Sistemas de Osmose Inversa produzem água potável para as mais diferentes aplicações, servindo cidades, indústrias, comércio, bem como pequenos sistemas para plataformas de petróleo, condomínios, fazendas, hospitais, hotéis, motéis, laboratórios e outras indústrias. A capacidade dessas plantas varia de alguns litros por hora até plantas para 95.000 m³/dia.

A figura 22 mostra a faixa de aplicação da Osmose Inversa comparada com outras tecnologias.

Figura 22 - Faixa de aplicação da Osmose Inversa



Fonte: WGM Sistema (2016)

Na água de alimentação de caldeiras de alta pressão, o sistema tradicional de troca iônica é substituído com vantagens pelo sistema de Osmose Inversa, seguido de um leito misto para polimento. O custo dessa alternativa é reduzido drasticamente pela redução no consumo de produtos químicos na regeneração e neutralização dos efluentes.

O sistema tem se mostrado útil para a preparação de água de processo, na indústria química, o uso inclui a produção de água com alta pureza para laboratórios, para lavagem de filtros, de metais e em reações de polimerização.

A Osmose Inversa também tem sucesso na reciclagem e recuperação de rejeitos industriais e no tratamento de efluentes.

3.3.13 Processo de desmineralização

Os processos de clarificação, filtração e desinfecção adequam a água ao consumo humano e a alguns processos industriais básicos, tais como: reposição dos circuitos de resfriamento e água industrial para uso geral em processos e serviços.

Para o fluxo da água de alimentação das caldeiras de alta pressão, ainda precisam ser removidos os sais minerais e os gases dissolvidos, pois devido às condições severas de pressão e temperatura, a presença de tais substâncias provoca sérios danos ocasionados por incrustações e corrosão nos tubos internos.

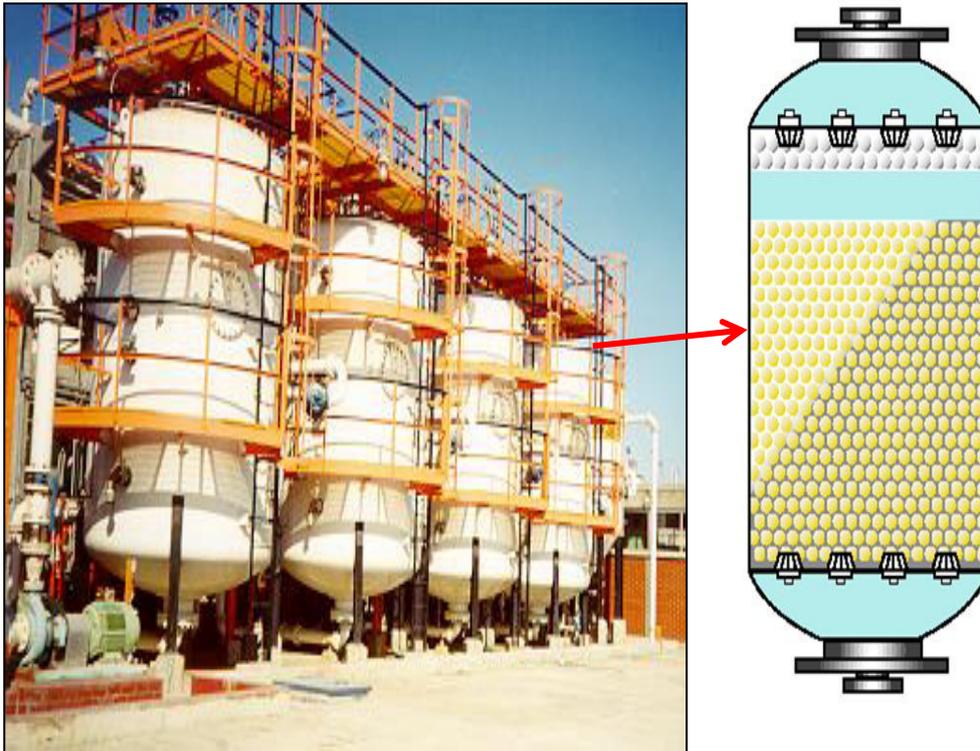
Assim sendo, uma parte do fluxo e do sistema de águas passa pelos processos de desmineralização.

3.3.14 Resinas de troca iônica

A desmineralização da água é o processo que permite a remoção total dos sais dissolvidos, através da passagem da água por produtos que substituem os íons dos sais presentes por íons de hidrogênio (H^+) e hidroxila (OH^-).

Consegue-se a desmineralização da água fazendo-a atravessar, sucessivamente, uma camada de resina catiônica de tipo R-H (que retém os cátions dissolvidos, trocando-os por íons H^+) e uma camada de resina aniônica (que retém os ânions, trocando-os por íons OH^-), ou então uma só coluna que contenha esses dois tipos de resinas (leito-misto). No primeiro caso, deve-se passar a água primeiramente pelas resinas catiônicas, pois estas são mais resistentes que as aniônicas, tanto química como fisicamente. Deste modo, as resinas catiônicas podem proteger as aniônicas, funcionando como um filtro e aparando certos constituintes danosos a resinas aniônicas.

Figura 23 - Resinas de Troca Iônica



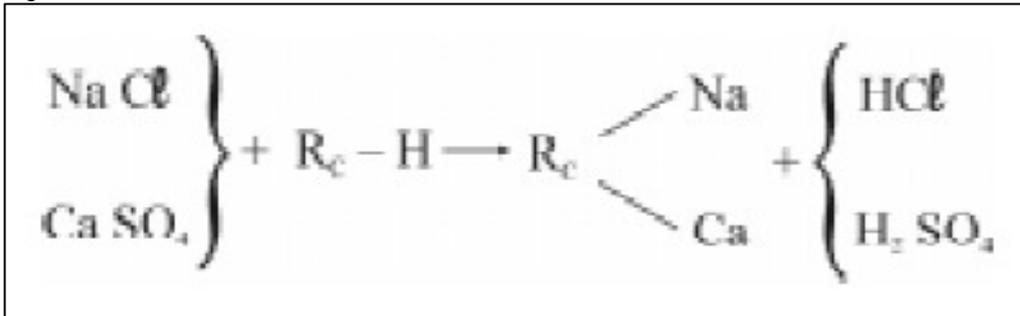
Fonte: Adaptado pelo autor (2017)

Resinas de troca iônica são materiais trocadores de íons são substâncias (resinas) sólidas e insolúveis que têm propriedade de, quando em contato com soluções de eletrólitos, permutar íons de sua própria estrutura por íons da solução, sem que haja mudança de suas propriedades estruturais. A troca só se verifica entre íons cujas cargas elétricas tenham o mesmo sinal. Quando a troca é verificada entre cátions, as substâncias recebem o nome de trocadores ou resinas catiônicas e, no caso de ânions, são designados trocadores ou resinas aniônicas.

Representando por $Rc-H$ a molécula de uma resina catiônica, e por $RA-OH$ a de uma resina aniônica, pode-se visualizar o processo de desmineralização de uma água através de duas reações de troca iônica:

- 1) Na primeira reação, a água a ser tratada passa através de uma resina trocadora catiônica, onde os cátions presentes (Na^+ , Ca^{2+}) são adsorvidos pela substância sólida da resina, liberando quantidade equivalente de íon H^+ :

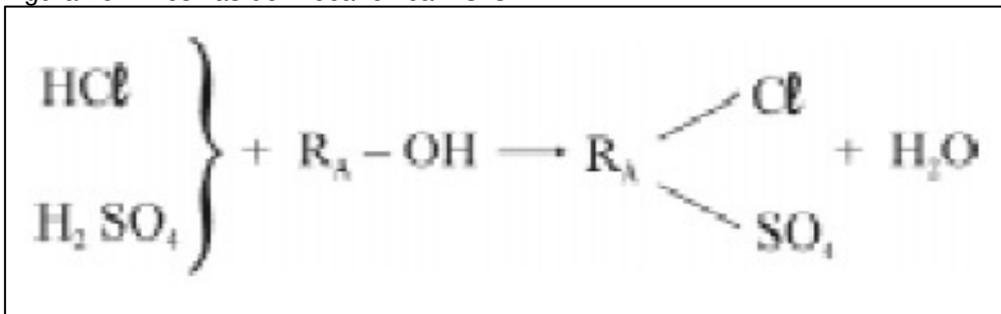
Figura 24 – Resinas de Troca Iônica RC-H



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

- 2) Na segunda reação, a água ácida (chamada decationizada) passa pela resina trocadora aniônica, onde os ânions presentes (Cl^- , SO_4^{2-}) são adsorvidos e permutados por íons OH^- :

Figura 25 – Resinas de Troca Iônica RC-OH



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Como se pode ver, o processo de desmineralização substitui os sais minerais presentes na água por moléculas de água, tornando-a desmineralizada.

3.3.15 Regeneração de trocadores iônicos

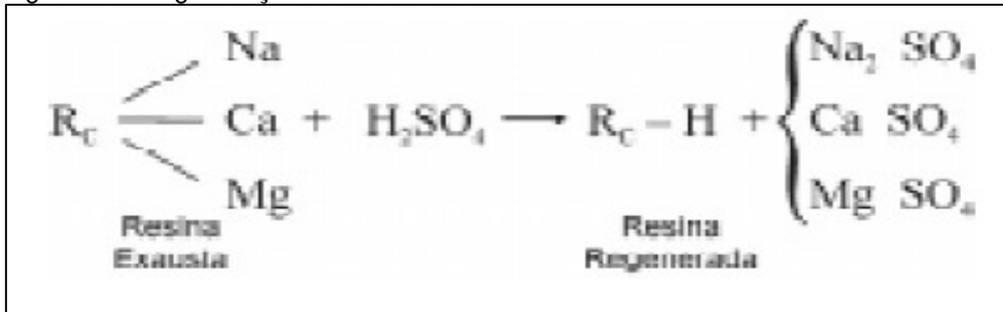
A fase de operação de um trocador iônico consiste, como foi visto na passagem de água a ser tratada através do leito de resina. Nesta fase, os íons existentes na água são retirados pela resina que, por sua vez, vai esgotando a sua capacidade de troca. Quando a resina esgota-se, os íons não mais serão retidos e a resina deve ser regenerada.

A regeneração consiste na passagem de solução regenerante pelo leito de resina com finalidade de restabelecer a sua capacidade de reter íons.

Como as reações de troca iônica são reversíveis, a regeneração da resina é feita passando através dela uma solução contendo íons H^+ ou OH^- em excesso, devolvendo assim sua capacidade de troca.

A regeneração das resinas catiônicas é feita com solução de um ácido forte, como sulfúrico (o mais usado) ou clorídrico. As reações que ocorrem são:

Figura 26 - Regeneração da Resina RC-H

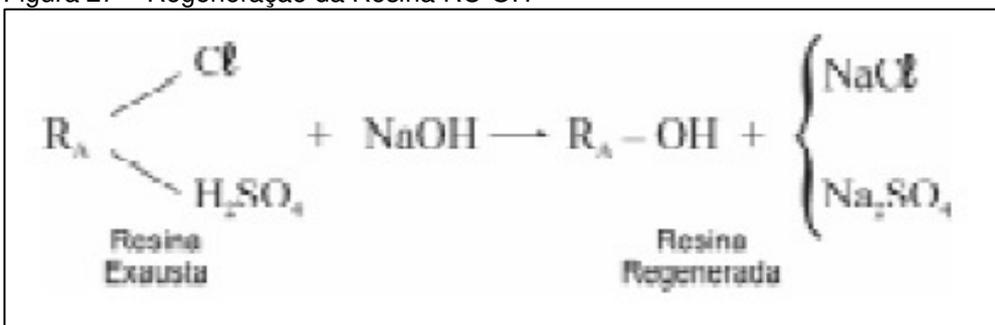


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O ácido sulfúrico é mais usado pela maior facilidade de manuseio, pois não é corrosivo quando concentrado. Tanto a água descationizada como a solução regenerante são ácidas e, por isto, o vaso é revestido com borracha, ou feito de aço inoxidável ou plástico. As mesmas precauções valem para bombas, linhas, válvulas, etc.

A regeneração das resinas aniônicas é feita com solução de soda cáustica, de acordo com as reações:

Figura 27 – Regeneração da Resina RC-OH



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.3.16 Leito misto

O princípio operacional do leito misto consiste na passagem da água a

ser tratada através de um leito, contendo resinas catiônicas e aniônicas fortes, intimamente misturadas.

Assim, o ácido formado pelo contato inicial de um sal com uma partícula trocadora catiônica será imediatamente neutralizado pela vizinhança do trocador aniônico. A alcalinidade formada pelo contato inicial do sal com o trocador aniônico será removida imediatamente pela resina trocadora catiônica.

Por este motivo, um leito misto é equivalente a um número quase infinito de unidades desmineralizadoras de dois estágios em série, eliminando praticamente todas as impurezas da água.

Os leitos mistos servem, portanto, como elementos de polimento final e de segurança, absorvendo qualquer escape anormal de sais das unidades de intercâmbio catiônico e aniônico.

3.3.17 Controle da qualidade da água desmineralizada

O controle de qualidade da água desmineralizada pode ser efetuado através de três análises:

- 1) pH: Na saída de um leito aniônico seria de se esperar um pH neutro, isto é, próximo a 7.
- 2) Sílica: Toda resina trocadora de íons sempre deixa passar pequena quantidade dos íons pelos quais tem menor afinidade. No caso de resinas aniônicas, o íon menos afim é o silicato.
- 3) Condutividade: Ao sair do leito aniônico, a condutividade da água deveria ser muito baixa, já que a água, teoricamente, encontra-se desmineralizada.

O ensaio do teor de sílica é importante porque uma parte dela geralmente não se encontra sob forma eletrolítica (íon silicato, SiO_3^{2-}) e assim não influencia a condutividade.

Entretanto, como a reação de troca iônica não se processa totalmente, sempre existe uma fuga de íons, tanto na resina catiônica (sódio) quanto na aniônica (sílica), e esta fuga mantém uma determinada condutividade na água.

3.3.18 Água para geração de vapor

A operação segura e eficiente de uma caldeira é extremamente dependente da qualidade da água disponível para alimentação da mesma. De nada adianta a instalação de um equipamento ultramoderno, com todos os acessórios/periféricos disponíveis e automatizado totalmente se não é levada em consideração a qualidade da água e o tratamento químico aplicado.

Como sabemos, a água tem uma tendência a dissolver uma série de substâncias, tais como sais, óxidos/ hidróxidos, diversos materiais e inclusive gases, motivo pelo qual nunca é encontrada pura na natureza. Além das espécies dissolvidas, pode apresentar material em suspensão, tais como argila, material orgânico, óleos, etc. A presença de todas estas impurezas muitas vezes causa problemas no uso da água para geração de vapor, podendo formar incrustações e/ou acelerar os processos corrosivos.

O ideal para geração de vapor uma água com as seguintes características:

- a) Menor quantidade possível de sais e óxidos dissolvidos;
- b) Ausência de oxigênio e outros gases dissolvidos;
- c) Isenta de materiais em suspensão;
- d) Ausência de materiais orgânicos;
- e) Temperatura elevada;
- f) pH adequado (faixa alcalina).

A alimentação de água com boa qualidade elimina, antecipadamente, grande parte dos problemas que normalmente ocorrem em geradores de vapor. Posteriormente, fica a cargo do tratamento químico interno a manutenção da qualidade da água no interior da caldeira.

3.3.19 Incrustação

Com a vaporização de água na caldeira, há um aumento na concentração das substâncias dissolvidas que permaneceram na fase líquida. Se forem ultrapassados os limites de solubilidade destas substâncias, as mesmas podem se

precipitar de forma aderente nas superfícies de troca térmica (tubos do feixe de convecção, tubos de parede d'água, tubo da fornalha, tubulões, etc.) constituindo as incrustações. Outras substâncias também podem se incrustar ou depositar na caldeira, tais como produtos de corrosão na seção pré e pós-caldeira, sólidos em suspensão, material orgânico advindo de contaminações e produtos insolúveis originados de reações químicas na água (incluindo excesso de produtos para condicionamento químico).

Normalmente esta precipitação ocorre sob a forma de cristais bem ordenados, capazes de se fixarem firmemente às superfícies internas da caldeira. A ordenação existente na estrutura cristalina permite um rápido desenvolvimento da incrustação, aumentando a intensidade e o risco dos problemas associados.

As principais consequências da presença de incrustações em caldeiras são:

- a) Diminuição das taxas de troca térmica na caldeira, devido ao efeito isolante que a incrustação proporciona ao fluxo de calor (tem baixa condutividade térmica);
- b) Aumento do consumo de combustível, decorrente do item anterior;
- c) Diminuição da produção de vapor, também decorrente do primeiro item;
- d) Devido à restrição ao fluxo de calor, a presença de incrustações pode causar superaquecimento de um tubo e sua ruptura, parando a funcionamento do equipamento e podendo até causar acidentes fatais;
- e) Obstrução de tubos, válvulas, descargas e coletores da caldeira, comprometendo o fluxo de água e acentuando ainda mais a formação das incrustações;
- f) Possibilidade de ruptura de tubos, carcaça e danificação na estrutura da caldeira, comprometendo sua integridade e podendo até inutilizar o equipamento;
- g) Incrustações em instrumentos e dispositivos de controle (pressostatos, visores e controles de nível, etc.) podem comprometer o funcionamento adequado e seguro do equipamento, aumentando o risco de acidentes;
- h) Aumento dos processos corrosivos que ocorrem sob os depósitos/incrustações.

Para a remoção de incrustações já consolidadas, despende-se um grande esforço, muitas vezes através de limpezas químicas (normalmente com soluções de álcalis e/ou ácidos apropriados, devidamente inibidos) ou limpezas mecânicas de grande intensidade, tais como hidrojateamento a altas pressões, martelletes, impactos diretos com ferramentas, etc.

Os principais responsáveis pela formação de incrustações em caldeiras são:

- a) Sais de cálcio e magnésio (dureza), principalmente o carbonato de cálcio (CaCO_3) e o sulfato de cálcio (CaSO_4);
- b) Sílica solúvel (SiO_2) e silicatos (SiO_3^{2-}) de vários cátions. A sílica solúvel é oriunda da dissolução de parte da própria areia e rochas com as quais a água mantém contato;
- c) Óxidos de ferro, tais como o Fe_2O_3 e de outros metais (cobre, zinco) originado principalmente de processos corrosivos nas linhas de condensado e seção pré-caldeira;
- d) Materiais orgânicos contaminantes, tais como fluidos envolvidos no processo (sucos, licor, caldo, xaropes, etc.). Muitas vezes a contaminação se dá pelos condensados.

Nas figuras a seguir são mostrados inúmeros casos de incrustação em geradores de vapor.

Figura 28 – Tubulão superior



Fonte: Trovati ([2015])

Figura 29 - Tubo de caldeira incrustado (óxido férrico)



Fonte: Trovati ([2015])

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Peagômetro

Para realização da análise de pH foi utilizado o pHmetro HANNA, modelo HI 2315.

Figura 30 – Peagômetro HANNA



Fonte: Hanna Instruments (2017)

4.2 Turbidímetro

Para realização da análise de turbidez foi utilizado o condutivímetro HACK, modelo 210Q/is.

Figura 31 – Turbidímetro HACK



Fonte: HACH (2017)

4.3 Cloro Livre

Para realização da análise de cloro residual foi utilizado o medidor de cloro HANNA, modelo HI 96710C.

Figura 32 – Medidor de cloro livre



Fonte: Splabor (2017a)

4.4 Condutivímetro

Para realização da análise de condutividade foi utilizado o condutivímetro HANNA, modelo HI 9835N.

Figura 33 – Condutivímetro HANNA



Fonte: Splabor (2017b)

4.5 Vidrarias

Para realização das análises foram utilizadas diversas vidrarias de acordo com a necessidade.

Figura 34 - Vidrarias



Fonte: Nicésio (2014)

4.6 Índice de sedimentação

Para realização da análise de SDI foi utilizado o HICTEKORS, modelo N354.

Figura 35 – Medição do Índice de Sedimentação



Fonte: Arquivo pessoal (2017)

4.7 Coleta das amostras

As amostras foram coletadas no site da UTE Itaquí Geração de Energia S/A.

4.8 Análises físico-químicas da água

4.8.1 Determinação do pH

A determinação é realizada em um pH-metro. Retira-se a proteção do eletrodo de vidro, lava-se o mesmo com água destilada. Em seguida utiliza-se o pH-metro da seguinte forma:

- a) Coloca-se o eletrodo em uma solução tampão pH 4,00 verificando a calibração;
- b) Coloca-se o eletrodo em uma solução tampão pH 10,00 verificando a calibração;
- c) Coloca-se o eletrodo na amostra de água a ser analisada e lê-se o pH indicado no visor.

4.8.2 Determinação da turbidez

Transfere-se uma pequena quantidade da amostra de água para a cubeta, não ultrapassando a linha limitante, coloca-se no Turbidímetro e fazemos a leitura, o valor é indicado no visor.

4.8.3 Determinação do cloro livre

Transfere-se uma pequena quantidade da amostra de água para a cubeta, é realizado o zero da amostra, após e adiciona o DPD 01 e realizada a mensuração, o valor é indicado no visor.

4.8.4 Determinação de condutividade

Transfere-se uma pequena quantidade da amostra de água para um

recipiente, apenas para cobrir o eletrodo, coloca-se o condutivímetro e fazemos a leitura, o valor é indicado no visor.

4.8.5 Determinação de SDI

Retira-se a proteção do equipamento, em seguida utiliza-se equipamento da seguinte forma:

- a) Conecta-se o equipamento a rede de alimentação de água;
- b) Liga-se o equipamento e ajusta-se a pressão em 2,5 bar;
- c) Inicia-se a mensuração dos tempos de 5, 10 e 15 min em função da vazão e do volume de água permeada pela membrana.

4.8.6 Determinação de alcalinidade

Retira-se 100 mL da amostra e adiciona-se 3 gotas de fenolftaleína, caso a coloração da amostra não fique rosa, o T.A é nulo

Se ao adicionarmos a fenolftaleína e a cor muda para rosa, titula-se a amostra com H_2SO_4 0,02N até que se torne transparente, anotando-se o volume utilizado do ácido. Após ficar incolor adiciona-se duas gotas de metil orange e continua a titulação com o ácido até a mudança de coloração de amarela para laranja.

4.8.7 Determinação da sílica

A determinação de sílica é realizada online pelo instrumento ABB Navigatior 600.

5 RESULTADOS E DISCURSÕES

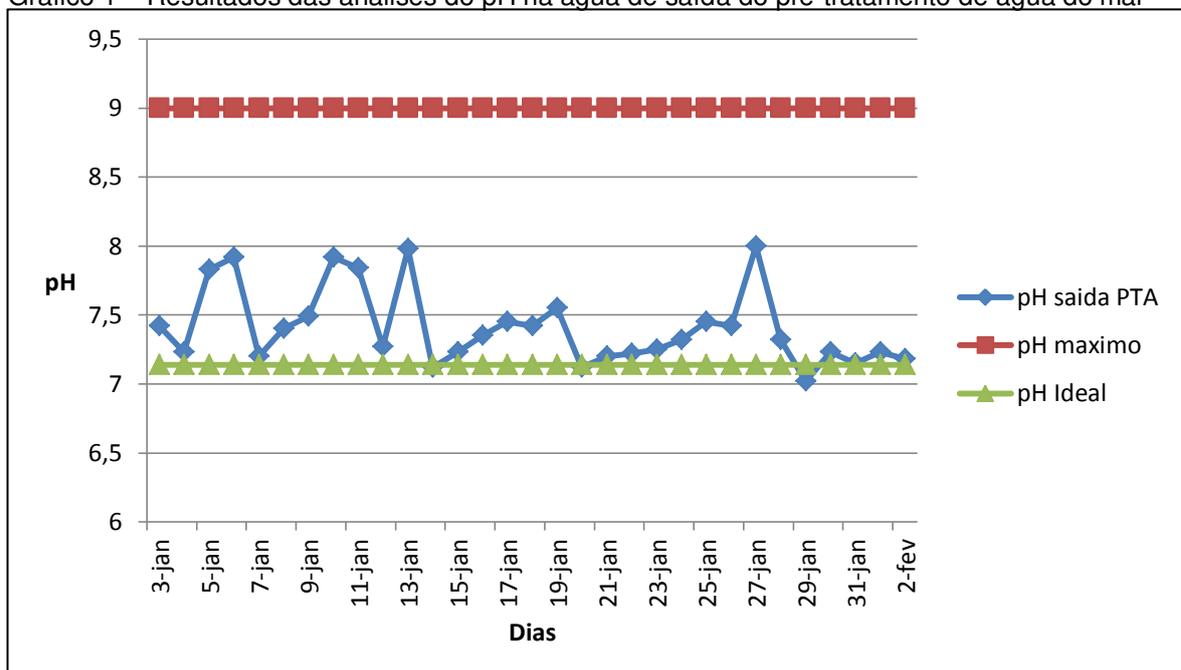
5.1 Análises físico-químicas

As análises físico-químicas das águas após cada processo são de fundamental importância para verificar e identificar qual a constituição da água de parâmetro, permitindo identificar algum desvio que possa interferir na operação da alimentação e efluente produzido para determinar as concentrações de cada.

5.2 Potencial Hidrogeniônico pH

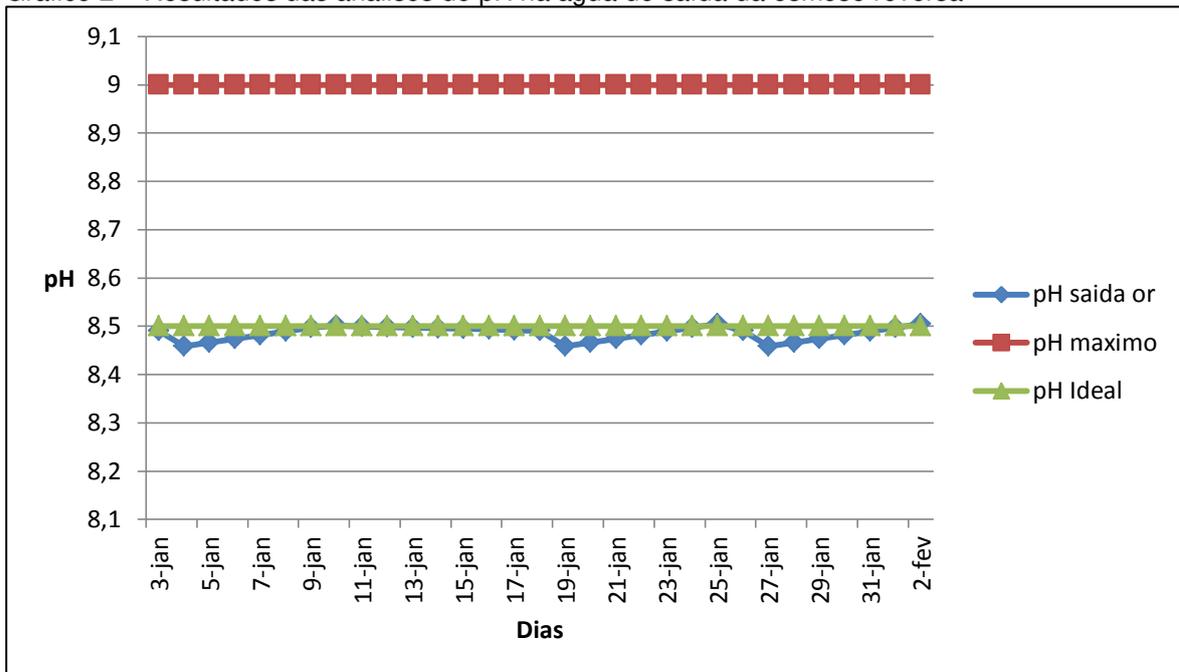
O termo pH é usado universalmente para expressar a intensidade de uma condição ácida ou alcalina de uma solução. Mede a concentração de íons de hidrogênio ou a sua atividade. De modo geral, águas de pH baixo tendem a ser corrosivas ou agressivas a certos metais, enquanto que águas de pH elevado tendem a formar incrustações. O pH também determina a percentagem de carbono inorgânico que está presente na água na forma de dióxido de carbono, bicarbonato ou carbonato, além de prever o nível de dióxido de carbono presente na água de alimentação e após os processos de dessalinização e desmineralização.

Gráfico 1 – Resultados das análises do pH na água de saída do pré-tratamento de água do mar



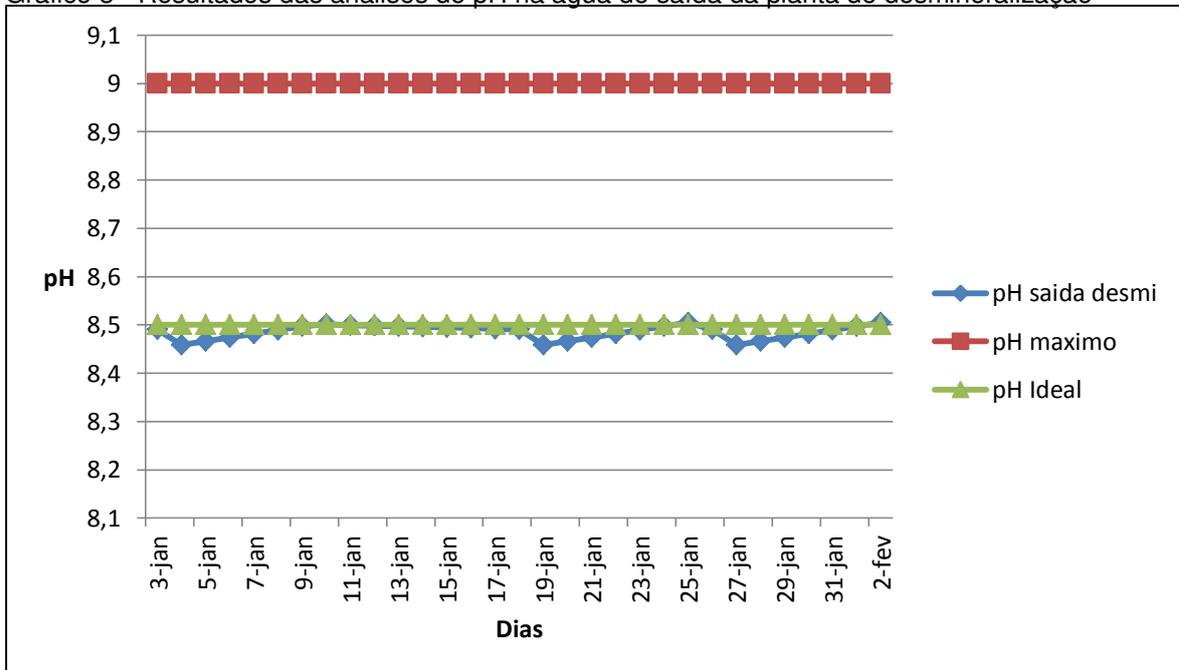
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Gráfico 2 – Resultados das análises do pH na água de saída da osmose reversa



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Gráfico 3 - Resultados das análises do pH na água de saída da planta de desmineralização



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Os resultados apresentados encontram-se dentro dos limites de controle médios estabelecidos segundo recomendações dos fabricantes e da empresa responsável pelo tratamento da água de processo de no máximo nove.

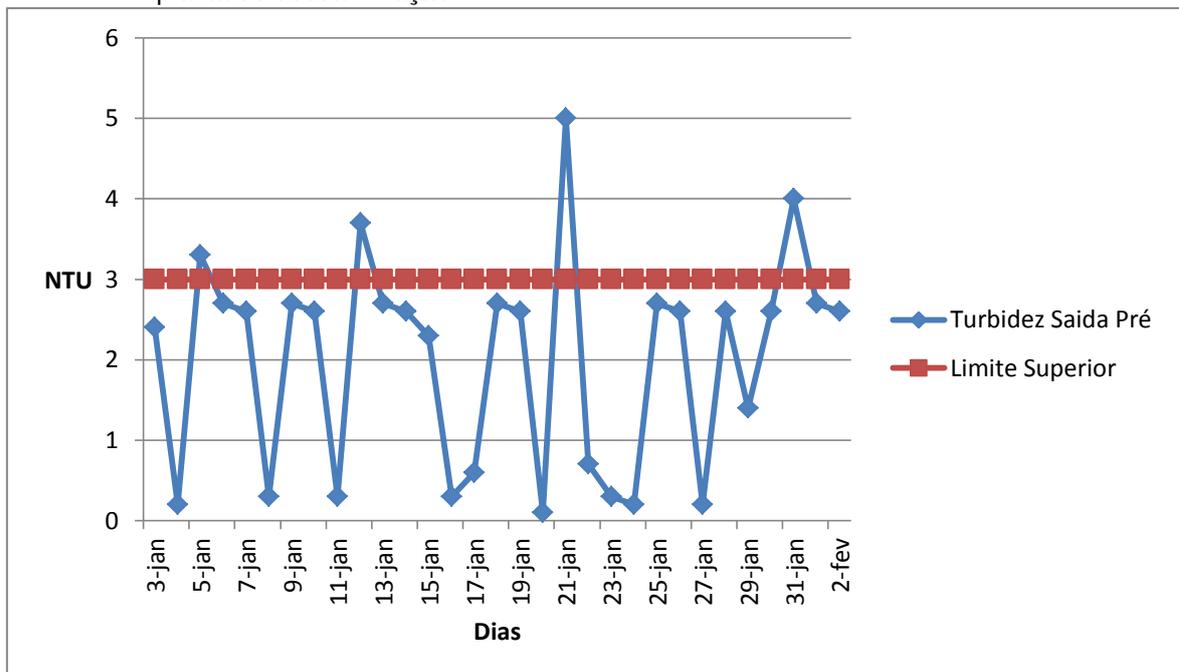
No gráfico 1 pode-se observar uma dificuldade para controle do pH, esta dificuldade é proveniente da variação de maré que acarreta em variações de vazões

do processo.

5.3 Turbidez

A turbidez é a quantidade de material em suspensão na água. O processo responsável pela retenção desse material é a clarificação, pois é de extrema importância o seu controle para otimização do processo de dessalinização, pois a elevação acentuada da turbidez pode causar danos irreversíveis para a planta de dessalinização ocasionando até mesmo a morte das membranas.

Gráfico 4 – Resultados das análises de turbidez da água de saída de saída do pré tratamento para a planta de dessalinização



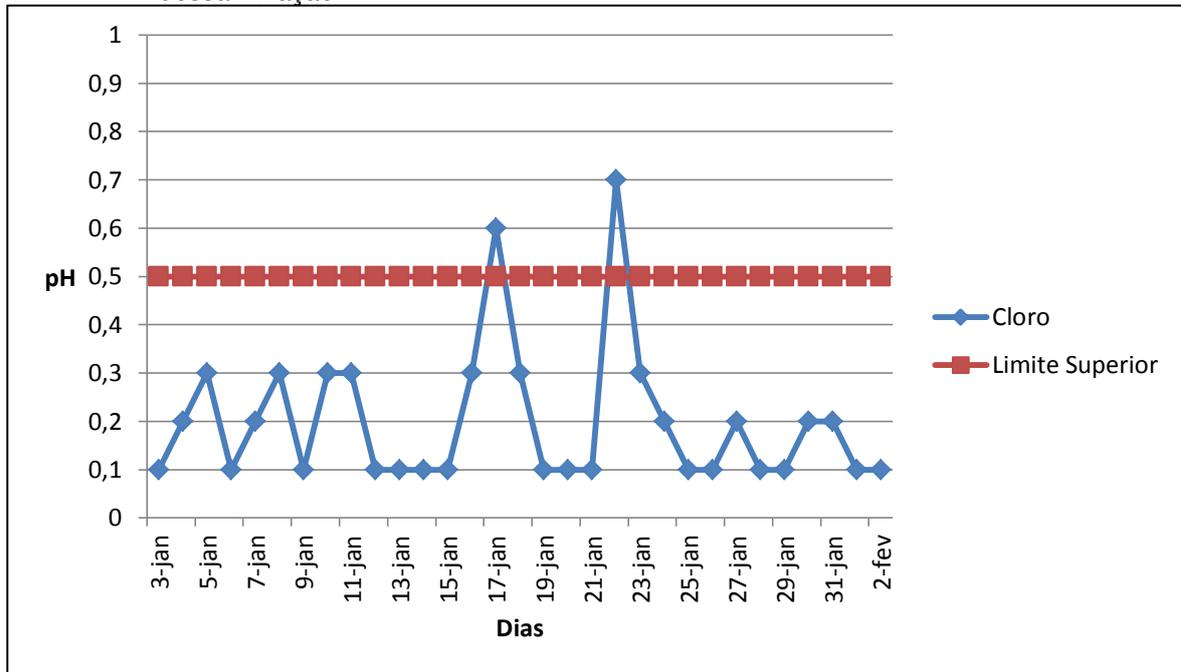
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Os resultados apresentados encontram-se dentro dos limites de controle médios estabelecidos segundo recomendações dos fabricantes, sendo que os resultados obtidos acima do valor não causaram danos diretos as membranas, porém foram necessários a substituição dos filtros cartuchos com vida útil de 1000 h de operação, sendo substituídos com cerca de 350 h causando um prejuízo para a empresa. Realizada a análise da causa da elevação de turbidez foi verificado o desarme da bomba dosadora de policloteto de alumínio por cerca de 2 horas sem atuação do operador.

5.4 Cloro Livre

O resultado do cloro livre indica a não proliferação de algas e microrganismos, que na indústria é de essencial importância o seu controle.

Gráfico 5 - Resultados das análises de Cloro livre de saída do pré-tratamento para a planta de dessalinização



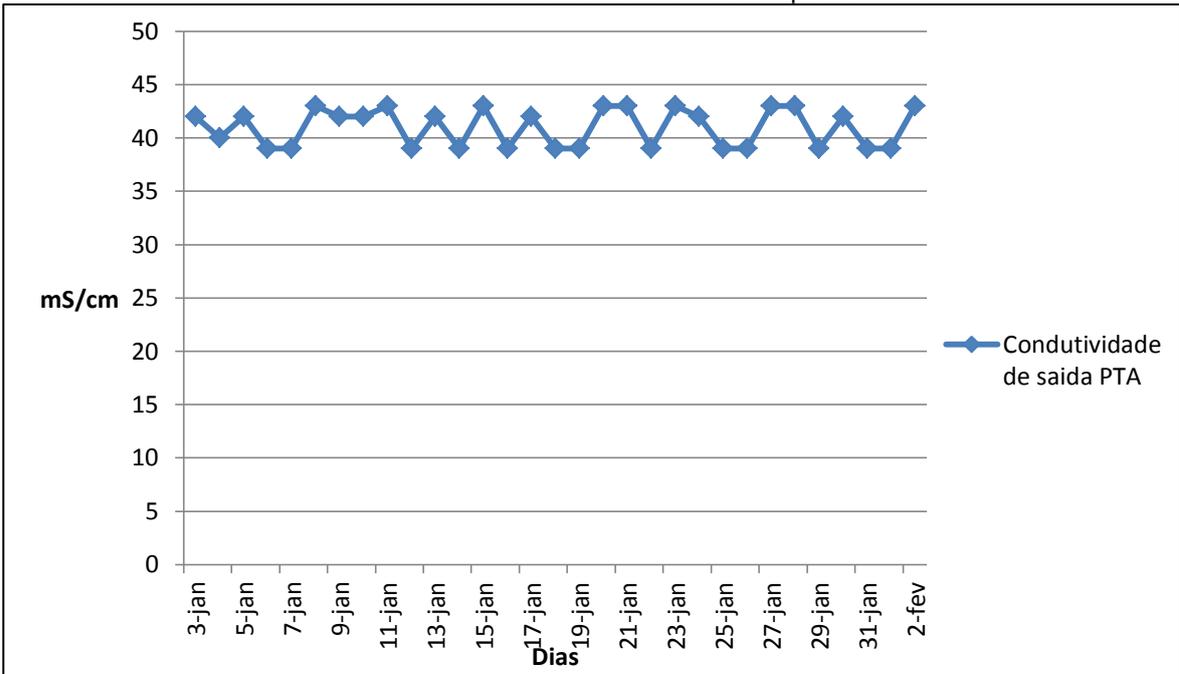
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

5.5 Condutividade

A condutividade elétrica depende da quantidade de íons dissociados na água e é, aproximadamente, proporcional a sua quantidade, sendo expressa em $\mu\text{S}/\text{cm}$. Quando a condutividade aumenta, aumenta o potencial de corrosão e incrustação, por isso deve ser um parâmetro controlado durante toda a operação de tratamento da água. É importante ressaltar que como a condutividade elétrica varia de forma linearmente proporcional à concentração total de sais em solução, sendo uma medida mais eficiente de que se realizar a concentração de íons na solução.

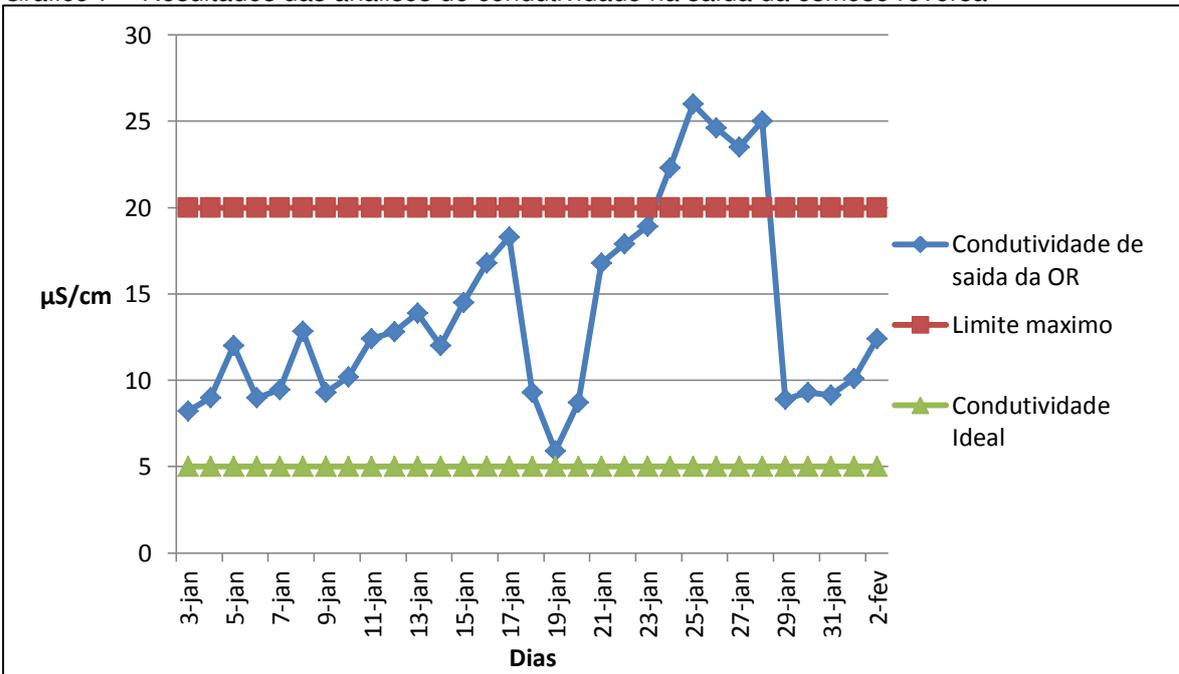
Na planta da UTE Itaquí os principais processos para retirada dos íons dissociados são a osmose reversa e o leito misto, responsável pelo polimento final na água de alimentação da caldeira.

Gráfico 6 - Resultados das análises de condutividade na saída do pré-tratamento



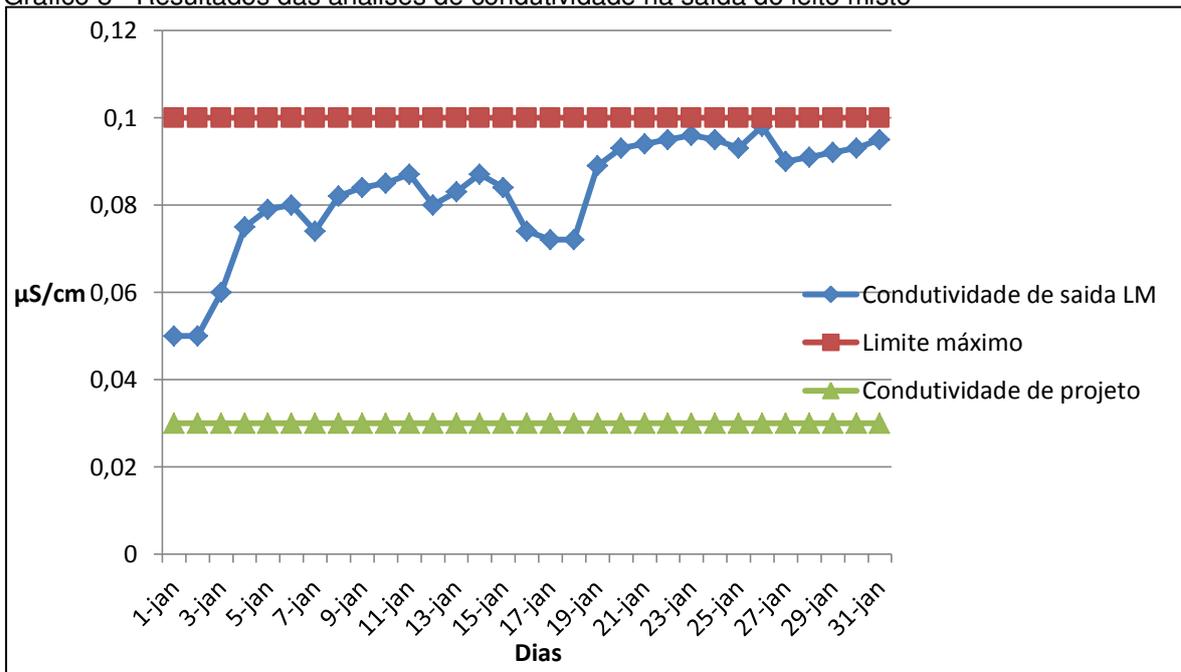
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Gráfico 7 – Resultados das análises de condutividade na saída da osmose reversa



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Gráfico 8 - Resultados das análises de condutividade na saída do leito misto



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Podemos verificar que à medida que ocorre a elevação da condutividade na saída da planta de dessalinização ocorre simultaneamente a elevação da condutividade na planta de desmineralização.

Foi verificado que a elevação da condutividade na planta de dessalinização foi ocasionada pela ruptura de um oringe de conexão das membranas e por sequência exauriu o leito misto.

Contudo os valores encontrados apresentam-se dentro dos parâmetros de controle e recomendações do fabricante da caldeira.

5.6 Índice de sedimentação

A capacidade de depósitos de sais e substâncias orgânicas nas superfícies das membranas de sistemas de dessalinização pode ser medida através de um teste rápido, o Índice de Densidade de Sedimentos (IDS). Este teste não especifica quais os tipos específicos de precipitação podem ocorrer, tais como: o Índice de Saturação de Langelier (ISL) para o Carbonato de Cálcio (CaCO_3), Capacidade de Incrustação por Sílica e por Sulfato de Cálcio, entre outros. Com o intuito de observar se a água possui potencial de incrustação, são realizados experimentos na tomada de amostra da saída do tanque de água clarificada para

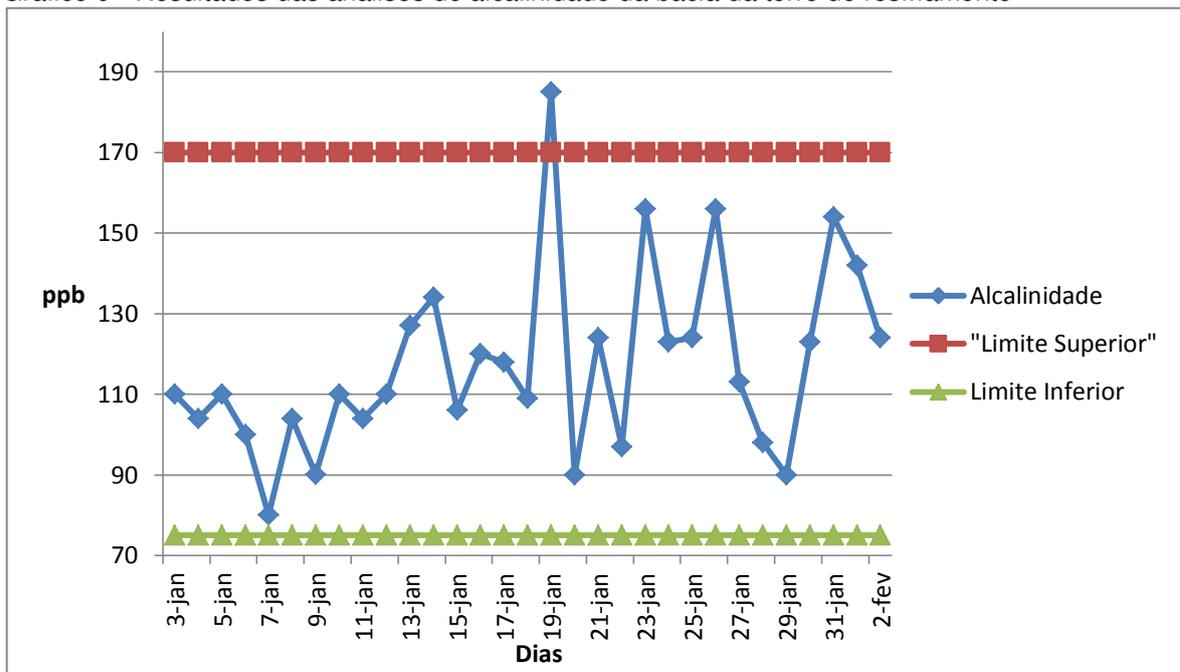
osmose para a determinação de outros tipos de incrustação. Geralmente, as incrustações deve a presença de carbonatos e bicarbonatos de metais, tais como cálcio, magnésio, sódio e potássio. A combinação destes compostos com cátions presentes na água pode resultar em deposição nas tubulações e outros equipamentos. Os bicarbonatos têm também o inconveniente de liberar gás carbônico quando submetidos a altas temperaturas, o que torna a água altamente corrosiva.

Observa-se que a água de alimentação do sistema de dessalinização possui um valor baixo, concordando com o valor obtido para a turbidez no **Gráfico 4 Resultados das análises de turbidez da água de saída de saída do pré-tratamento para a planta de desmineralização**, que na literatura não apresenta uma relação direta turbidez x SDI, contudo, após comparar as análises foi verificado que a elevação de turbidez está diretamente relacionada com a elevação do SDI.

5.7 Alcalinidade

A alcalinidade total é definida como a capacidade da água de neutralizar íons hidônio (H^+). Geralmente, se deve a presença de carbonatos e bicarbonatos de metais, tais como cálcio, magnésio, sódio e potássio. A combinação destes compostos com cátions presentes na água pode resultar em deposição nas tubulações e outros equipamentos. Os bicarbonatos têm também o inconveniente de liberar gás carbônico quando submetidos a altas temperaturas, o que torna a água altamente corrosiva.

Gráfico 9 - Resultados das análises de alcalinidade da bacia da torre de resfriamento

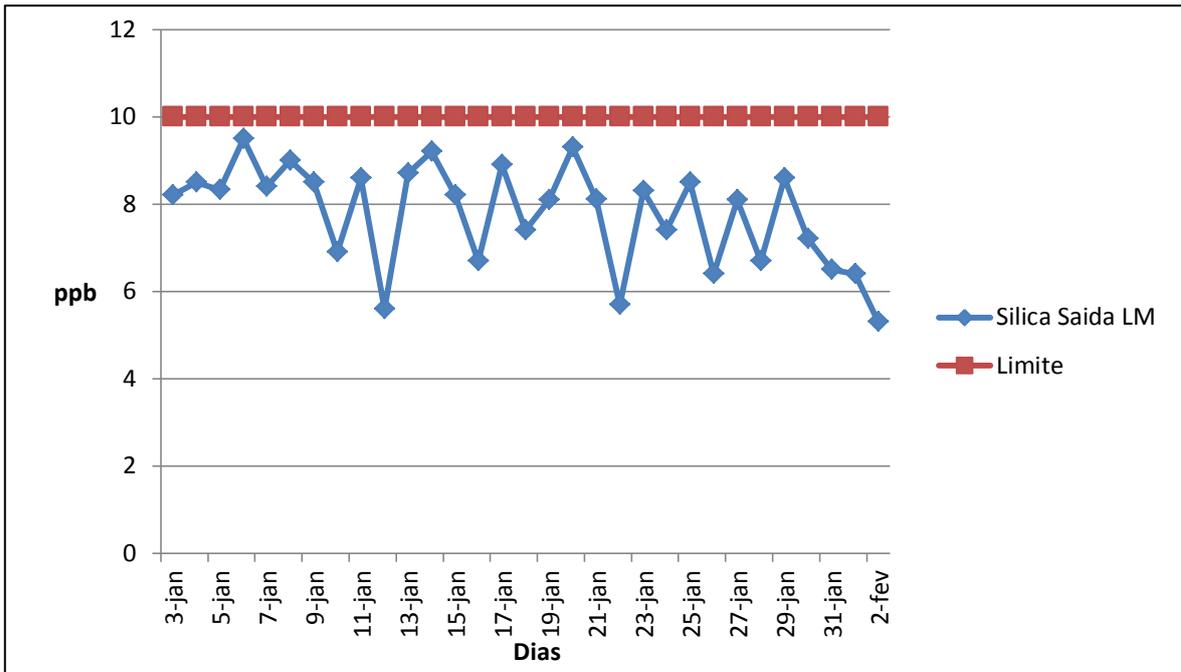


Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

5.8 Sílica

A sílica é uma das principais variáveis de controle que precisam ser controladas no ciclo térmico, pois além de ser extremamente erosiva, além de apresenta uma alta deposição nas palhetas da turbina ocasionando o desbalanceamento da turbina e a erosão do eixo por atrito causado pelo desbalanceamento do eixo.

Gráfico 10 - Resultados das análises de sílica na saída dos leitos mistos



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Observa-se que não há uma referência no controle de sílica, pois o seu resultado está diretamente ligado à vazão de alimentação do leito misto, segundo o fabricante a vazão de alimentação pode variar de 60 m³/h a 120 m³/h. após o comissionamento do sistema foi verificado que a vazão de otimização de captura de sílica é de 98 m³/h, que por sua vez é inconcebível devido a indisponibilidade de válvula de controle e variações na qualidade de água do pré-tratamento. Contudo a produção de água desmineralizada atende a demanda da fabricante da caldeira em relação ao limite máximo de sílica na água de alimentação.

6 CONCLUSÃO

No que se refere às análises físico-químicas as amostras coletas na indústria de geração de energia, na torre de resfriamento, na planta de pré-tratamento de água, na planta de dessalinização, na planta de desmineralização e no tanque de alimentação, estão dentro dos parâmetros estabelecidos pelos fabricantes da caldeira, turbina e planta de dessalinização.

As análises das amostras de água que saem do pré-tratamento para a planta de dessalinização apresentaram alguns valores levemente acima do limite de controle, ficando fora dos padrões permitidos. Esses valores tiveram influência não só na planta de dessalinização, mas também na torre de resfriamento e no ciclo da caldeira que devido a indisponibilidade da planta de dessalinização foi necessário a redução da purga para controle do nível do tanque de água desmineralizada.

Este estudo ainda mostra a importância no controle das análises físico-químicas do processo, para conservação e garantia dos equipamentos, quando vem reconhecer que a corrosão, formação de incrustação e a deposição que afetam as tubulações geram grande perda de eficiência nos sistemas e causam a indisponibilidade da usina junto ao ONO (Operador Nacional do Sistema), onerando a receita da empresa.

REFERÊNCIAS

- BARREIRO JUNIOR, Luiz Alberto Meirelles Beileiro. **Análise Comparativa da Viabilidade Financeira entre Projetos de Geração Termoeletrica a Gás e a Carvão no Brasil**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Economia e Finanças IBMEC, Rio de Janeiro, 2008.
- BRAILE, P. M.; CAVALCANTE, J. E. W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1993.
- CARBONO. 2017. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/c.htm>> Acesso em: 20 mar. 2017.
- CARVALHO, C. B. **Avaliação crítica do planejamento energético de longo prazo no brasil, com ênfase no tratamento de incertezas e descentralização do processo**. 2011. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos), FEM/Unicamp, São Paulo, 2011.
- DOW WATER & PROCESS SOLUTIONS. **Osmose Reversa e Nanofiltração**. 2017. Disponível em: <<http://www.dow.com/brasil/solucoes/transporte-e-infraestrutura/agua/ROeNF.htm>>. Acesso em: 15 jul. 2017.
- ENEVA. **Perfil e Empreendimentos**. 2017. Disponível em: <http://ri.eneva.com.br/conteudo_pt.asp?idioma=0&conta=28&tipo=57768>. Acesso em: 15 jul. 2017.
- ENGENHARIA SOLUÇÕES AMBIENTAIS. **Sistemas de Tratamento de Água para Abastecimento (ETA)**. 2016. Disponível em: <<https://o2engenharia.com.br/index.php/atuacao/projetos>>. Acesso em: 15 jun. 2017.
- GABCO - SOLUÇÕES PARA TRATAMENTO DE ÁGUA. **Fornecedor de osmose reversa**. 2016. Disponível em: <<http://www.gabco.com.br/fornecedor-osmose-reversa>>. Acesso em: 10 jun. 2017.
- GUERREIRO, A. et al. Aspectos da geração térmica a gás natural no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, XI., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.
- HACH. **2100Q Portable Turbidimeter**. 2017. Disponível em: <<https://www.hach.com/2100q-portable-turbidimeter/product?id=7640450963>>. Acesso em: 15 jul. 2017.
- HANNA INSTRUMENTS. **HI 2550-02/Medidor para pH/ORP/ISE/EC/TDS/NaCL de bancada**. 2017. Disponível em: <<http://www.hannacom.pt/produtos.ver.php?idProd=1960>>. Acesso em: 15 jul. 2017.
- KAISHA, Kurita Kōgyō Kabushiki. **Kurita Handbook of Water Treatment**. [S.l.]: Kurita Water Industries, 1985. Disponível em: <https://books.google.com.br/books/about/Kurita_Handbook_of_Water_Treatment.html?id=nmDrygAACAAJ&redir_esc=>> Acesso em: 20 jun. 2017.

KURITA. **Tratamento Químico para Estação de Tratamento de Água**. 2017. Disponível em: <<http://kurita.com.br/index.php/artigos-tecnicos/tratamento-quimico-para-estacao-de-tratamento-de-agua/>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

LEITE, A. D. **A Energia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2007.

LORA, Electo Eduardo Silva; MARCO, Antônio Rosa de. **Geração termoelétrica: planejamento, projeto e operação**. 2. v. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2004.

NICÉSIO, Raphael Gonçalves. Limpeza e lavagem de vidrarias. **Biomedicina Brasil**, 2014. Disponível em: <<http://www.biomedicinabrasil.com/2014/01/lavagem-de-vidrarias.html>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

RAMOS, Ademilson. **Incrustação saiba o que é e aprenda a evitar o seu prejuízo econômico**. 2015. Disponível em: <<http://engenhariae.com.br/editorial/colunas/incrustacoes-aprenda-a-evitar-o-seu-prejuizo-economico/>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

SANTOS FILHO, F. **Tecnologia de tratamento de água para a indústria**. São Paulo: Nobel, 1989.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO DO ESTADO DE SANTA CATARINA (SIECESC). 2007. Disponível em: <<http://www.siecesc.com.br/>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

SPLABOR. **Fotômetro medidor de pH, Cloro Livre e Total – Faixa de pH 6.5 a 8.5 pH – Faixa de Cloro Livre e Total 0.00 to 5.00 mg/L (ppm)- Com Cal Check e Maleta – Modelo HI 96710C – HANNA**. 2017a. Disponível em: <<http://www.splabor.com.br/produto/fotometro-medidor-de-ph-cloro-livre-e-total-faixa-de-ph-6-5-a-8-5-ph-faixa-de-cloro-livre-e-total-0-00-to-5-00-mgl-ppm-modelo-hi-96710c-hanna/>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

_____. **Condutivímetro Portátil de TDS/NaCl/Temperatura – Modelo HI 9835 – Faixa de Condutividade 0.00 a 29.99 μ S/cm; 30.0 a 299.9 μ S/cm; 300 a 2999 μ S/cm; 3.00 a 29.99 mS/cm; 30.0 a 200.0 mS/cm; até 500.0 mS/cm – HANNA**. 2017b. Disponível em: <<http://www.splabor.com.br/produto/condutivimetro-portatil-de-tdsnacltemperatura-modelo-hi-9835-hanna/>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.). **Geração de Energia Elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2005.

TROVATI, Joubert. **Tratamento de água para geração de vapor: caldeiras**. [2015]. Disponível em: <http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua-Caldeira.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2017.

WGM SISTEMA. **Filtração por membranas**. 2016. Disponível em: <<http://www.wgmsistemas.com.br/filtracaopormembranas.asp>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

WORLD COAL INSTITUTE. **Termoelétricas a carvão mineral**. 2007. Disponível em: <<http://www.google.com.br>>. Acesso em: 12 out. 2016.