

COMPARAÇÃO ENTRE O USO DO SULFATO DE ALUMÍNIO E DO HIDROXICLORETO DE ALUMÍNIO NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA GERAÇÃO DE VAPOR

Diogo Luiz Gasola*
Sergio Luis Marquezi**
José Carlos Azzolini***

Resumo

É imprescindível que a qualidade da água de alimentação das caldeiras seja controlada por meio de tratamentos, a fim de garantir a qualidade do vapor produzido e reduzir os danos causados aos equipamentos envolvidos. O objetivo deste trabalho foi analisar os efeitos da utilização do agente coagulante sulfato de alumínio e do hidroxicloreto de alumínio na qualidade do tratamento de águas para caldeiras, nas campanhas das resinas de troca iônica e nos custos do processo, em que se efetuaram testes com os dois produtos em uma estação de tratamento de água. Os principais autores que embasaram teoricamente o presente trabalho foram Santos (1985), Libânio (2008) e Ritcher (2009). Durante o trabalho, pode-se constatar que a substituição do agente coagulante impacta fortemente no consumo de produtos químicos no processo, bem como nas campanhas das resinas de trocas iônicas. Os resultados levaram à conclusão de que, com a aplicação de ambos os produtos, consegue-se obter uma água com parâmetros de qualidade conforme estabelecidos em bibliografias. O hidroxicloreto de alumínio trouxe melhores resultados em relação à quantidade de produtos químicos dosados durante o tratamento e, também, em relação às campanhas das resinas de troca iônica. Entretanto, o sulfato de alumínio mostrou-se mais constante no processo, sem apresentar alterações significativas com a variação de condições de temperatura.

Palavras-chave: Agente coagulante. Tratamento de águas. Caldeiras. Sulfato de alumínio. Hidroxicloreto de alumínio.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a água é o fluido de trabalho mais utilizado em sistemas geradores de vapor por ser o composto mais abundante da Terra e, portanto, de fácil obtenção e baixo custo, e em razão do seu alto calor específico.

Os tratamentos de água para geradores de vapor visam controlar os parâmetros de qualidade da água de modo a evitar a danificação de seus componentes e garantir a qualidade do vapor gerado. Desse modo, procurar maneiras de aperfeiçoar o tratamento de águas, como diminuir o tempo de paradas das estações de tratamentos de água ou reduzir as dosagens de produtos químicos, por meio da utilização de outros produtos, pode impactar tanto na qualidade da água tratada quanto no custo do processo.

Cabe mencionar que o objetivo principal do presente trabalho é avaliar o uso do sulfato de alumínio e do hidroxicloreto de alumínio no tratamento de águas para geração de vapor.

*Graduando da 10ª fase de Engenharia de Produção Mecânica Universidade do Oeste de Santa Catarina de Joaçaba; diogogasola@hotmail.com

**Professor orientador do Curso de Engenharia de Produção Mecânica da Universidade do Oeste de Santa Catarina de Joaçaba; sergio.marquezi@unoesc.edu.br

***Professor do Curso de Engenharia de Produção Mecânica da Universidade do Oeste de Santa Catarina de Joaçaba; jose.azzolini@unoesc.edu.br

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CLARIFICAÇÃO

Conforme Santos Filho (1985), a clarificação pode ser definida como a remoção da matéria finamente dividida e em suspensão na água. Esse processo, quando necessário, deve ser realizado como primeiro passo em qualquer sistema de tratamento de águas.

De acordo com o mesmo autor, a clarificação da água envolve, basicamente, quatro etapas: coagulação (que consta da mistura de produtos químicos com a água e a floculação), sedimentação, cloração e filtração.

2.1.1 Coagulação

Segundo Ritcher (2009), o processo de coagulação química, utilizado na maioria das estações de tratamento, envolve a aplicação de produtos químicos para a precipitação de compostos em solução e desestabilização de suspensões coloidais de partículas sólidas, que, de outra maneira, não poderiam ser removidas por outros processos.

Libânio (2008) ressalta que o principal objetivo da coagulação, e da floculação como consequência, consiste em aumentar, significativamente, a velocidade de sedimentação (decantação) do aglomerado de partículas a ser formado pela adição do coagulante.

Ritcher (2009) menciona que os coloides presentes nas águas naturais, geralmente, apresentam carga elétrica negativa, gerando uma força eletrostática de repulsão entre eles, o que evita a sua aglomeração.

Conforme Santos (1985), para se realizar a clarificação de uma água, é imprescindível a neutralização das cargas negativas da matéria em suspensão na água e a aglutinação das partículas, para que estas se tornem maiores e possam decantar mais rapidamente.

De acordo com Ritcher (2009), a coagulação envolve, primeiramente, a mistura rápida do coagulante com a água e, em seguida, a agitação lenta do material coagulado para a formação dos flocos. A mistura rápida e a floculação (ou mistura lenta) são, portanto, processos de transporte de fluido associados à precipitação e à união de partículas primárias.

2.1.1.1 Sulfato de alumínio

Para Ritcher (2009), o sulfato de alumínio em solução é um sal de caráter ácido e é corrosivo, devendo ser armazenado em local adequado.

De acordo com Santos (1985), quando adicionado à água, ocorrem reações que têm como consequência a formação de hidróxidos que possuem carga superficial positiva. Esses polímeros neutralizam as cargas negativas dos coloides em suspensão na água, encapsulando-os dentro de sua estrutura floculenta, deixando a água praticamente livre de turbidez.

2.1.1.2 Hidroxicloreto de alumínio

Segundo Pavanelli (2001), o hidroxicloreto de alumínio, na maioria dos casos, revela-se como coagulante superior ao sulfato de alumínio. Em relação à eliminação das substâncias coloidais, sua eficácia é, em média, 1,5 a 2 vezes maior em igualdade de dosagem em íon Al^{3+} do que a dos outros sais de alumínio utilizados como coagulantes.

De acordo com o autor, em razão da sua basicidade, o hidroxicloreto de alumínio libera, durante a hidrólise, em igualdade de dosagem de íons metálicos, uma quantidade de ácido relativamente inferior aos liberados pelos demais coagulantes tradicionais, como o sulfato de alumínio. Dessa forma, ocorre uma menor variação do pH no meio tratado, provocando um menor consumo de neutralizante para reconduzir o pH ao seu valor original.

2.1.2 Floculação

Segundo Ritcher (2009), a coagulação é, geralmente, seguida pela floculação, que pode ser definida como o processo de juntar partículas coaguladas ou desestabilizadas com o intuito de formar partículas maiores, de modo a possibilitar a sua separação por sedimentação e/ou filtração da água. Dentro dos tanques de floculação, os pequenos microflocos gerados na coagulação aglutinam-se formando flocos, os quais, ao saírem dos tanques, devem ter tamanho e densidade adequados para serem removidos por sedimentação e/ou filtração.

2.1.3 Sedimentação

Conforme Ritcher (2009), a sedimentação pode ser definida como o processo físico que separa partículas sólidas em suspensão na água e é comumente utilizado em tratamentos de água. Consiste na utilização das forças gravitacionais para separar partículas de densidade superior à água, depositando-as em uma zona de armazenamento. A sedimentação de partículas floculentas é, usualmente, chamada de decantação, e as unidades onde se realiza esse processo, de tanques de decantação ou simplesmente decantadores.

Consoante Azzolini (2011), em alguns casos é recomendada a realização de uma pré-decantação, a qual é empregada para separar partículas suspensas de grande tamanho, acima de 10 microns. Esse tratamento prévio pode ser executado em tanques de concreto providos de equipamentos para a retirada do material depositado ou em bacias naturais ou artificiais de grande capacidade volumétrica.

2.1.3.1 Cloração

Para Santos (1985), a cloração tem como finalidade esterilizar a água e torná-la potável, sendo utilizada tanto em estações que visam ao abastecimento do público quanto pelas indústrias alimentícias e de bebidas. Indústrias que não requerem água potável, muitas vezes, utilizam o cloro como coadjuvante da coagulação, já que ele destrói certos microrganismos que inibem a formação dos flocos. Além disso, o cloro oxida a matéria orgânica, prejudicial em diversos processos industriais, e ajuda a manter o sistema de tratamento livre de limos.

2.1.3.2 Filtração

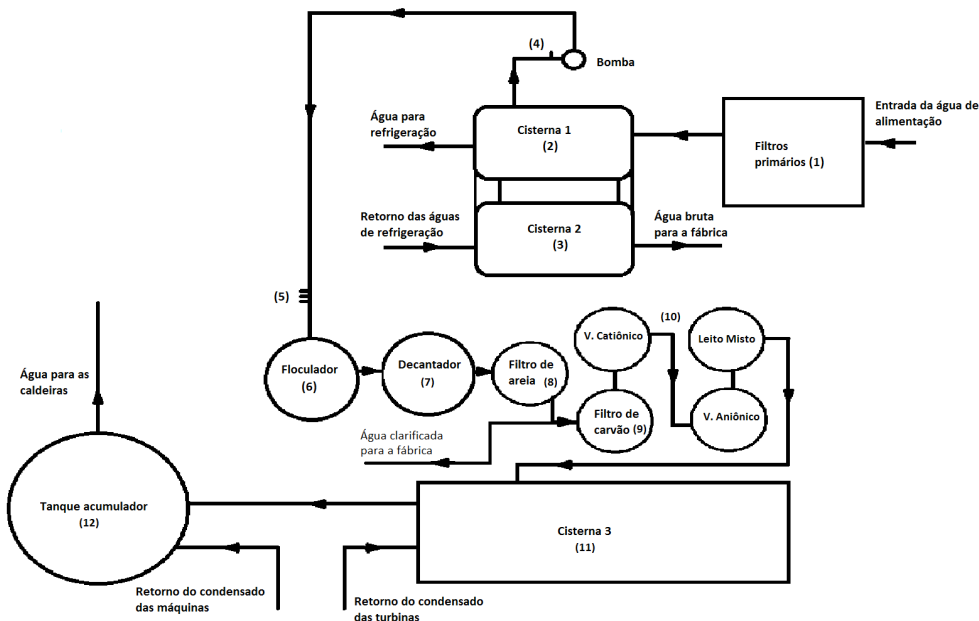
Segundo Libânio (2008), a filtração é um processo que tem como função primordial a remoção das partículas responsáveis pela cor e turbidez. Nas unidades de tratamento convencionais, cabe à filtração, provavelmente, a função mais relevante, por se constituir na etapa em que as falhas porventura ocorridas durante os tratamentos de coagulação, floculação e decantação podem ser corrigidas, assegurando a qualidade da água tratada.

Seguindo a linha de Libânio (2009), visando minimizar o aporte de sólidos, mais usualmente destinados a estações de filtração lenta, surgiram os pré-filtros. Atualmente, mantendo as características originais de pré-tratamento, esses filtros passaram a contar apenas com meios de pedregulho, visando alcançar dois objetivos principais: melhorar a qualidade da água bruta e reduzir os picos de afluência de sólidos, algas, cor e coliformes.

3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, realizou-se um experimento prático, com a aplicação dos agentes coagulantes no tratamento de águas de superfície e registro dos dados de cada período. A estação de tratamento de água (ETA) em que foram realizados os testes apresenta a seguinte configuração:

Esquema 1 – Estação de tratamento de água



Fonte: os autores.

O polímero utilizado como auxiliar na coagulação é catiônico, com alto peso molecular e baixa carga. No vaso catiônico, utiliza-se uma resina catiônica forte.

Os parâmetros analisados na água da desmineralização são: pH, sílica, turbidez, cor, cloro residual e condutividade. Os valores usados como referência para a água desmineralizada estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de controle da qualidade da água desmineralizada

Água desmineralizada			
	pH	Condutividade (μS)	Sílica (ppb)
Máximo	8	50	20000
Meta	7	-	-
Mínimo	6,5	-	-

Fonte: os autores.

A turbidez no processo é medida por um espectrofotômetro Hack DR 2700; são realizados testes a cada hora, e os resultados são expressos em NTU. O valor esperado para esse teste é sempre zero; caso seja encontrado um valor diferente, é necessário realizar uma investigação para identificar as suas causas. Os testes são realizados na entrada do filtro de carvão. Também é realizado o acompanhamento da turbidez da água na saída do tanque decantador por meio de medição eletrônica com turbidímetro.

O mesmo procedimento ocorre com os testes de cor realizados. São coletadas amostras na entrada do filtro de areia. Quando constatada a presença de cor na água é sinal de que pode estar ocorrendo arraste. Caso a cor aumente no próximo teste, ou o valor medido no primeiro teste seja muito elevado (acima de 30), é necessário desviar o processo e regenerar as resinas de troca iônica por causa do arraste.

O residual de cloro é medido na saída do filtro de carvão. Não foi registrada nenhuma grande alteração nesse parâmetro durante o período de testes.

As campanhas (período que transcorre entre as regenerações das resinas de troca iônica) são medidas em volume de água desmineralizada. O que determina a duração de uma campanha é o teste de sílica realizado após o leito misto; caso o valor do teste seja superior a 20 ppb, é realizada a regeneração das resinas de troca iônica. O teste de sílica é realizado todo início de turno e, quando a campanha atinge 800 m³, é realizado o teste a cada hora.

A condutividade da água é medida por um condutivímetro Digimed DM-3P e tem papel fundamental para as campanhas. Sendo a condutividade uma medida indireta da dureza, ou seja, dos íons de cálcio e magnésio presentes na água, quanto menor for esse parâmetro, menor será o trabalho exigido das resinas. Caso a água na saída do leito aniônico apresente uma condutividade muito elevada (acima de 20 μS) em testes consecutivos, mesmo que o leito misto esteja conseguindo reduzir esse valor, são regeneradas as resinas para evitar que a água saia dos parâmetros preestabelecidos.

Os produtos químicos utilizados no processo são: cloro, hidróxido de sódio, agente coagulante e polímero. Também são utilizados produtos químicos para realizar a regeneração, são eles hidróxido de sódio, para a regeneração da resina aniônica, e ácido clorídrico, para regenerar a resina catiônica.

Os produtos utilizados no tratamento são dosados em solução com água, e as suas concentrações foram calculadas a partir da seguinte fórmula:

$$\tau = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \tag{1}$$

Onde:

τ = título em volume

V_1 = volume do soluto

V_2 = volume do solvente

A Tabela 2 representa a porcentagem de cada produto presente nas soluções dosadas.

Tabela 2 – Percentual de produtos químicos nas soluções

Produto químico	Água (l)	Produto químico (l)	Concentração
Sulfato de alumínio	260	240	48,00%
Hidroxocloreto de alumínio	176	24	12,00%
Hidróxido de sódio	850	50	5,55%
Hipoclorito de sódio	800	100	11,11%
Polímero	898	2	0,22%

Fonte: os autores.

Para regenerar as resinas catiônica e aniônica, são utilizados, respectivamente, 165 litros de ácido clorídrico e 200 litros de hidróxido de sódio.

Com base nos dados das dosagens de produtos químicos no processo, das durações das campanhas e dos produtos químicos utilizados durante a regeneração das resinas, foi realizada uma análise financeira dos agentes coagulantes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 QUALIDADE DA ÁGUA

As Tabelas 3 e 4 exprimem os resultados obtidos durante o período de testes.

Tabela 3 – Campanhas com a aplicação do hidroxiclreto de alumínio

Campanhas Hidroxiclreto de alumínio												
Data	Volume de água tratada (m ³)	Duração das campanhas (horas)	Vazão média (m ³ /hora)	Varição média da vazão (m ³ /hora)	Temperatura média (°C)	Varição média da temperatura (°C)	Turbidez média na saída do decantador (NTU)	pH médio na saída do tratamento	Condutividade média na saída (µS)	Condutividade média na entrada do decantador (µS)	Silica média na saída do tratamento (µg/l SO ₄)	
1	16/ago	1455	37	39,324	1,359	10,210	0,170	3,289	7,010	0,570	77,460	4,500
2	17/ago	1485	42	35,357	4,850	11,950	1,270	3,399	6,980	0,052	77,076	3,500
3	19/ago	1412	42	33,619	3,640	13,630	0,650	2,410	6,890	0,053	74,302	2,166
4	21/ago	1438	42	34,238	3,320	15,405	0,403	1,830	6,790	0,056	70,430	3,500
5	23/ago	1600	50	32,000	4,110	16,840	1,090	1,690	6,870	0,075	71,345	2,830
6	25/ago	1544	47	32,851	3,645	17,100	0,540	1,530	6,770	0,061	67,281	2,167
7	27/ago	1580	46	34,348	3,220	15,060	1,240	3,150	6,750	0,083	66,419	2,830
8	29/ago	907	26	34,885	1,510	13,000	0,770	5,040	6,520	0,108	67,162	2,250
9	30/ago	1275	37	34,459	3,010	13,240	0,640	2,438	6,820	0,064	72,161	1,600
10	01/set	1500	44	34,091	3,860	14,710	0,767	2,500	6,940	0,585	72,820	5,500
11	02/set	654	18	36,333	1,138	14,020	0,980	2,530	6,740	0,065	70,689	4,500
	Total/Média	14850	431	34,455	3,060	14,106	0,775	2,710	6,825	0,161	71,559	3,213

Fonte: os autores.

Tabela 4 – Campanhas com a aplicação do sulfato de alumínio

Campanhas Sulfato de alumínio												
Data	Volume de água tratada (m ³)	Duração das campanhas (horas)	Vazão média (m ³ /hora)	Varição média da vazão (m ³ /hora)	Temperatura média (°C)	Varição média da temperatura (°C)	Turbidez média na saída do decantador (NTU)	pH médio na saída do tratamento	Condutividade média na saída (µS)	Condutividade média na entrada do decantador (µS)	Silica média na saída do tratamento (µg/l SO ₄)	
12	04/set	1074	32	33,563	1,050	16,010	0,900	2,870	6,748	0,066	90,934	5,830
13	05/set	1011	30	33,700	1,514	16,260	0,707	3,120	6,910	0,065	89,860	2,500
14	07/set	1240	37	33,514	2,770	17,010	0,458	2,110	6,840	0,280	101,446	3,000
15	09/set	1049	37	28,351	2,090	18,148	0,206	1,730	6,800	0,068	120,910	3,400
16	10/set	1000	29	34,483	2,066	17,190	0,866	1,840	6,730	0,073	106,530	4,500
17	11/set	1314	39	33,692	1,289	18,080	0,663	1,800	6,800	0,070	98,550	1,000
18	13/set	1203	36	33,417	3,619	19,227	0,617	1,710	6,950	1,010	96,580	2,400
19	15/set	1087	39	27,872	3,115	20,090	0,628	1,580	7,050	0,394	106,430	4,000
20	17/set	1169	44	26,568	2,202	20,325	1,465	2,100	6,780	0,260	111,165	4,667
21	19/set	1331	46	28,935	1,696	16,870	1,525	2,200	6,700	0,072	105,140	4,333
22	21/set	1290	42	30,714	2,259	14,021	0,553	2,070	7,030	0,240	99,530	4,500
23	23/set	1581	52	30,404	3,194	14,886	0,353	2,070	7,180	0,560	102,950	3,250
24	24/set	672	14	48,000	1,050	13,993	0,436	2,240	6,750	0,600	103,050	5,250
25	26/set	1283	46	27,891	3,417	13,167	0,938	2,060	6,800	0,210	100,640	3,166
26	26/set	148	4	37,000	1,712	12,800	0,071	2,680	6,820	0,600	93,610	5,000
	Total/Média	16452	527	32,540	2,203	16,538	0,692	2,145	6,859	0,305	101,822	3,786

Fonte: os autores.

As principais diferenças entre os produtos foram constatadas nos testes de condutividade na entrada do decantador e turbidez na saída do decantador. Em relação aos testes de condutividade, o hidroxiclreto de alumínio teve uma média de 71,559 µS, valor 30% menor que os 101,822 µS resultantes da aplicação do sulfato de alumínio. Já em relação à turbidez, a situação foi inversa, o sulfato de alumínio apresentou um valor médio de 2,145 NTU contra 2,71 NTU do outro produto, ou seja, um resultado 21% mais eficiente que o do hidroxiclreto de alumínio.

Em relação à qualidade da água na saída do tratamento de desmineralização, constataram-se, em média, valores menores para condutividade e sílica com a aplicação do hidroxiclreto de alumínio. Entretanto, a diferença entre os resultados obtidos é muito pequena, podendo ser fruto de diversos fatores (como a qualidade da água de alimentação, temperatura, entre outros) e não necessariamente da aplicação dos produtos. Além disso, ambos os resultados estão dentro dos limites estabelecidos para o controle da qualidade da água, sendo viável a aplicação de qualquer um deles no processo de desmineralização. A faixa média de pH foi semelhante durante o teste dos dois produtos.

4.2 CAMPANHA DAS RESINAS

Para analisar a duração das campanhas serão desconsideradas as campanhas interrompidas por motivos que não estão ligados diretamente aos produtos, como, por exemplo, paradas para troca de válvulas e bombas. Desse modo, serão desconsideradas as campanhas n. 8, 11, 16, 24 e 26.

Analisando as campanhas, conforme apresentado anteriormente, podem-se constatar os seguintes resultados:

Tabela 5 – Duração das campanhas com o hidroxiclreto de alumínio

Campanhas Hidroxiclreto de alumínio				
	Data	Volume (m³)	Tempo (horas)	Vazão média (m³/hora)
1	16 ago.	1455	37	39,324
2	17 ago.	1485	42	35,357
3	19 ago.	1412	42	33,619
4	21 ago.	1438	42	34,238
5	23 ago.	1600	50	32,000
6	25 ago.	1544	47	32,851
7	27 ago.	1580	46	34,348
9	30 ago.	1275	37	34,459
10	01 set.	1500	44	34,091
	TOTAL	14850	431	34,455
	Média	1476,556	43,000	34,476

Fonte: os autores.

Tabela 6 – Duração das campanhas com o sulfato de alumínio

Campanhas Sulfato de alumínio				
	Data	Volume (m³)	Tempo (horas)	Vazão média (m³/hora)
12	04 set.	1074	32	33,563
13	05 set.	1011	30	33,7
14	07 set.	1240	37	33,514
15	09 set.	1049	37	28,351
17	11 set.	1314	39	33,692
18	13 set.	1203	36	33,417
19	15 set.	1087	39	27,872
20	17 set.	1169	44	26,568
21	19 set.	1331	46	28,935
22	21 set.	1290	42	30,714
23	23 set.	1581	52	30,404
25	26 set.	1283	46	27,891
	Total	17409	567	30,704
	Média	1243,5	40,5	30,889

Fonte: os autores.

O hidroxiclreto de alumínio obteve um resultado médio de 1476,556 m³ de água desmineralizada contra 1243,50 m³ com a aplicação do sulfato de alumínio. Isso implica campanhas de resinas 18,74% mais longas.

O tempo médio de duração das campanhas com o sulfato foi de 40,5 horas, enquanto que com o hidroxiclreto de alumínio esse valor foi de 43 horas. Portanto, a aplicação do hidroxiclreto de alumínio provocou um aumento de 6,17% no tempo de duração.

Pode-se justificar esse aumento comparando os valores da condutividade da água (Tabelas 3 e 4), em que fica clara a diferença entre os dois agentes coagulantes. Com valores menores de condutividade, exigem-se menos esforços das resinas.

4.3 PROCESSO

Foi constatado que a variável de maior influência sobre o processo é a temperatura da água de alimentação. O aumento dessa temperatura dificulta a ação dos agentes coagulantes em razão de uma maior agitação das partículas, prejudicando o ato de as partículas em estado coloidal se agruparem em partículas maiores.

O principal fator que provoca o aumento da temperatura, nesse caso, é a operação das turbinas de condensação, que necessitam de águas de resfriamento. A principal consequência disso é o surgimento de cor na água com valores consideravelmente altos, mas que, conforme a temperatura da água, tornam-se mais estáveis e tendem a diminuir e até desaparecer.

Tabela 7 - Presença de cor na água durante os períodos de testes

Hidroxiclreto de alumínio			Sulfato de alumínio		
Data	Horário	Cor (uH)	Data	Horário	Cor (uH)
15 ago.	06h	16	03 set.	23h	26
	07h	6	07 set.	20h	3
16 ago.	19h	23	09 set.	20h	18
	02h	19		21h	3
17 ago.	04h	3	16 set.	22h	9
	04h	2		23h	4
26 ago.	10h	7	17 set.	12h	2
	10h30	22		17h	2
6 ago.	11h	10	17 set.	18h	14
	14h	35		19h	1
	20h	8		20h	6
27 ago.	03h	19	18 set.	03h	1
	18h	4		15h	1
28 ago.	15h	7	20 set.	18h	1
	19h	17	22 set.	18h às 22h	2
29 ago.	12h	7		01h	8
30 ago.	03h	2		03h	2
	09h	3		06h	5
31 ago.	06h	1	23 set.	08h	1
	10h	9		10h	1
01 set.	10h30	8		13h	3
	12h	18		14h	3

Fonte: os autores.

Durante a fase de teste do sulfato de alumínio, percebeu-se que ele é menos sensível às mudanças de temperatura da água do que o hidroxiclreto de alumínio, de forma que quando aumentava a temperatura, eram menos frequentes as variações na decantação. Tais variações podem apresentar como consequência o surgimento de cor na água, como visto na Tabela 7.

Mesmo sendo testado em um período de tempo menor, o número de vezes em que foi constatada cor na água com o hidroxiclreto de alumínio foi similar ao do sulfato, o que vem a comprovar a maior sensibilidade do produto às variações de temperaturas.

4.4 CONSUMO DE PRODUTOS QUÍMICOS

As dosagens das soluções de produtos químicos durante o período de testes ocorreu conforme exposto nas Tabelas 8 e 9:

Tabela 8 – Dosagens de produtos químicos durante as campanhas com o hidroxiclreto de alumínio

	Data	Hidroxiclreto de alumínio (ml/min)	Hidróxido de sódio (ml/min)	Hipoclorito de sódio (ml/min)	Polímero (ml/min)
1	16 ago.	250,85	97,71	52,28	275,14
2	17 ago.	225,97	85,85	100	266,83
3	19 ago.	191,67	84,28	97,26	252,50
4	21 ago.	145,31	63,33	79,51	257,90
5	23 ago.	157,50	59	79,50	246,20
6	25 ago.	156,91	60	90	240
7	27 ago.	167,50	67,50	90	254,56
8	29 ago.	179,74	70,00	90	255,20
9	30 ago.	186,09	76,08	90	258,12
10	01 set.	180	70	90	260
11	02 set.	180	70	90	260
	Média	183,78	73,07	86,23	256,95

Fonte: os autores.

Tabela 9 – Dosagens de produtos químicos durante as campanhas com o sulfato de alumínio

	Data	Sulfato de alumínio (ml/min)	Hidróxido de sódio (ml/min)	Hipoclorito de sódio (ml/min)	Polímero (ml/min)
12	04 set.	242,94	124,50	126,08	254,51
13	05 set.	211,33	121,54	121,29	273
14	07 set.	248,48	156,97	115,15	276,67
15	09 set.	244,32	157,84	74,86	277,84
16	10 set.	240,69	150,00	70,34	270
17	11 set.	275,55	165,55	101,11	275,55
18	13 set.	261,11	166,94	110	267,78
19	15 set.	210,00	124,11	110	260
20	17 set.	206,82	120	110	260
21	19 set.	252,39	128,69	110	275,22
22	21 set.	230	130	110	260
23	23 set.	224,23	127,11	110	260
24	24 set.	225,33	104	109,33	250
25	26 set.	238,48	147,61	131,74	269,56
26	26 set.	217,60	142,95	106,44	259,55
	Média	235,28	137,85	107,76	265,98

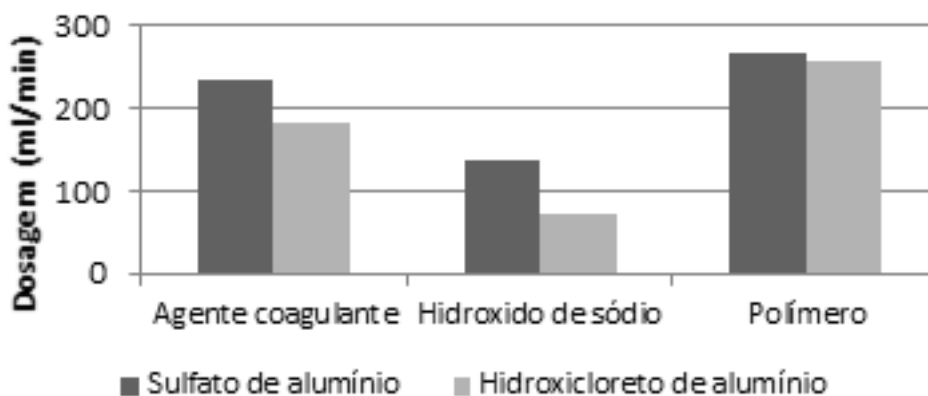
Fonte: os autores.

Nota-se que durante as duas primeiras campanhas em que foi utilizado o hidroxiclureto de alumínio as dosagens do produto foram bem superiores ao restante das campanhas. Isso porque foi sendo adequada a dosagem durante os testes, de modo que no princípio se utilizou um valor superestimado para não comprometer a qualidade da água.

O consumo de produtos químicos com a aplicação do hidroxiclureto de alumínio caiu, principalmente o consumo de soda. Isso se deve à composição do agente coagulante, que libera menos cargas negativas na água, provocando um menor acréscimo no pH do meio.

O consumo de hipoclorito não tem relação com o agente coagulante, estando relacionada, principalmente, à qualidade da água de admissão. Dessa forma, serão desconsiderados os custos com a dosagem de cloro para a análise financeira.

Gráfico 1 – Dosagem de produtos químicos



Fonte: os autores.

4.5 ANÁLISE FINANCEIRA

Todos os produtos são adquiridos por quilograma, sendo seus valores, em R\$/kg, durante o período analisado, de:

Tabela 10 – Custo dos produtos químicos utilizados na desmineralização

Produto	Custo (R\$/kg)
Hidroxiclureto de alumínio	2,45
Sulfato de alumínio	0,35
Hidróxido de sódio	1,65157
Hipoclorito de sódio	0,997
Polímero	12,840
Ácido clorídrico	0,660

Fonte: os autores.

Em virtude de as dosagens das duas primeiras campanhas em que se utilizou o hidroxiclureto de alumínio estarem bem acima da média, constituindo pontos discrepantes, elas não foram consideradas para essa análise.

Como a dosagem dos produtos é realizada em volume, e os produtos são adquiridos por peso, utilizou-se a densidade dos produtos para obter o custo por litros dos produtos, e com isso obter valores mais coerentes. Feito isso, utilizando as informações da Tabela 2, referentes às concentrações dos produtos em solução, e das Tabelas 8 e 9, referentes às dosagens, estimou-se o custo médio do tratamento com a aplicação dos dois agentes coagulantes. Também foram considerados os gastos com as regenerações das resinas. Para estimar o número de regenerações realizadas diariamente, dividiram-se as 24 horas de um dia pelo tempo médio de duração de uma campanha. Os resultados desse processo são mostrados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Análise financeira com o hidroxiclreto de alumínio

Produto	Custo (R\$/kg)	Densidade (kg/cm ³)	Custo (R\$/l)	Concentração (%)	Dosagens (ml/min)	Custo (R\$/dia)
Hidroxiclreto de alumínio	2,45	1,36	3,21	12	171,63	98,82
Hidróxido de sódio	1,65157	1,526	2,52	5,55	68,91	13,88
Polímero	12,840	0,9797	12,58	0,22	253,81	10,11
Custo por regeneração	Custo (R\$/kg)	Densidade (kg/cm ³)	Custo (R\$/l)	Quantidade utilizada (l)	Regenerações por dia	Custo (R\$/dia)
Ácido clorídrico	0,660	1,16	0,77	165		70,51
Hidróxido de sódio	1,65157	1,526	2,52	200	0,5581	281,34
Custo total (R\$/dia)	Custo (R\$/mês)					
474,66	14.239,67					

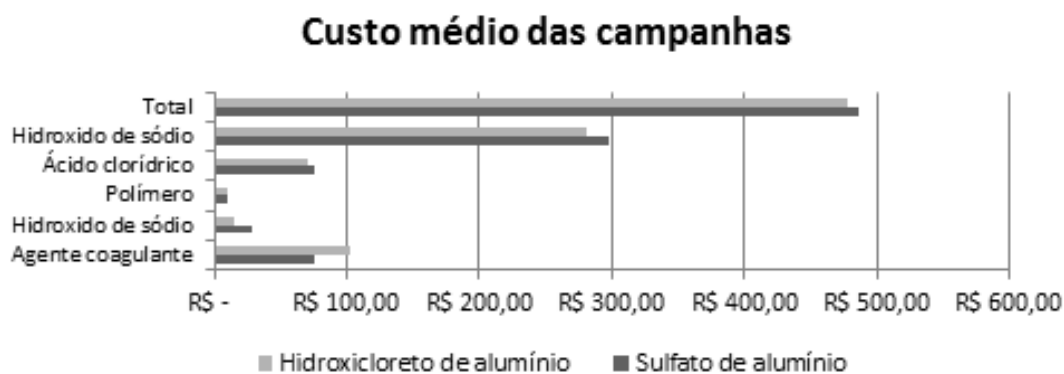
Fonte: os autores.

Tabela 12 - Análise financeira com o sulfato de alumínio

Produto	Custo (R\$/kg)	Densidade (kg/cm ³)	Custo (R\$/l)	Concentração (%)	Dosagens (ml/min)	Custo (R\$/dia)
Sulfato de alumínio	0,35	1,32	0,46	48,00	235,28	75,13
Hidróxido de sódio	1,65157	1,526	2,52	5,55	137,85	27,77
Polímero	12,840	0,9797	12,58	0,22	265,98	10,60
Custo por regeneração	Custo (R\$/kg)	Densidade (kg/cm ³)	Custo (R\$/l)	Quantidade utilizada (l)	Regenerações por dia	Custo (R\$/dia)
Ácido clorídrico	0,660	1,16	0,77	165	0,5926	74,86
Hidróxido de sódio	1,65157	1,526	2,52	200		298,70
Custo total (R\$/dia)	Custo (R\$/mês)					
487,06	14.611,77					

Fonte: os autores.

Gráfico 2 – Custo médio das campanhas



Fonte: os autores.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos durante os períodos de testes dos dois agentes coagulantes, ambos os produtos resultaram em uma água de alimentação com qualidade conforme padrão preestabelecido. Portanto, a escolha entre um ou outro produto não comprometerá a qualidade da água das caldeiras.

Os resultados das durações das campanhas das resinas de troca iônica com o hidroxiclreto de alumínio, tanto em tempo quanto em volume de água desmineralizada, foram melhores que os do sulfato de alumínio, o que significa que a frequência das regenerações é menor e, conseqüentemente, o consumo de produtos químicos diminui.

As variações das condições da água, principalmente da temperatura, mostraram que o sulfato de alumínio tem uma adaptabilidade maior, sendo menos sensível a essas mudanças. Esse fato é importante, pois vale ressaltar que os testes foram realizados durante o inverno, com a água a uma temperatura baixa, e é difícil prever como se comportaria o hidroxiclreto de alumínio no verão, quando a temperatura da água pode passar de 30 °C.

Os produtos químicos utilizados no tratamento da água, principalmente o hidróxido de sódio, foram bem menores com a utilização do hidroxiclreto de alumínio. Uma dosagem menor implica uma necessidade menor de preparo de soluções, resultando em mais tempo para os operadores da ETA realizarem outras tarefas.

Em relação aos custos dos tratamentos, apesar do valor inicial dos produtos estarem em uma proporção de 7:1, o hidroxiclreto de alumínio consegue compensar esse valor na sua proporção, no consumo de químicos e na duração das campanhas. O resultado disso foi um custo total de tratamento inferior ao do outro produto, sendo R\$ 14.611,77 o valor mensal com o sulfato e R\$ 14.239,67 com a aplicação do hidroxiclreto de alumínio.

Por fim, para a desmineralização de águas com baixas temperaturas, é vantajosa a utilização do hidroxiclreto de alumínio, obtendo uma água de qualidade com menor custo, menor consumo de químicos e campanhas mais longas. No caso de águas com temperaturas elevadas, recomenda-se a realização de novos testes, para comprovar o comportamento dos dois produtos em tais condições.

REFERÊNCIAS

AZZOLINI, J. C. **Águas Industriais, Combustíveis, Lubrificantes, Polímeros, Aços**. Joaçaba, 2011.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2. ed. Campinas: Átomo, 2008.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com turbidez elevada**. 2001. 233 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-21012003-084719/pt-br.php>>. Acesso em: out. 2014

RITCHER, C. A. **Água Métodos e tecnologia de Tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009.

SANTOS, D. F. F. **Tecnologia de tratamento de água: água para a indústria**. 3. ed. São Paulo: Nobel, 1985.