

REDUÇÃO DA VARIABILIDADE OPERACIONAL NO TRATAMENTO DE EFLUENTES E O AUMENTO DA EFICIÊNCIA NO TRATAMENTO BIOLÓGICO

Felipe De Carli¹, Angelo Coelho Meneses¹, Humberto Luis Alves Batista¹

¹ CMPC Celulose Riograndense. Brasil

RESUMO

A gestão sobre o processo de tratamento de efluentes líquidos requer elevados recursos financeiros. Em particular, na planta da CMPC Celulose Riograndense, os custos com a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) tornam-se mais elevados em comparação à outras fábricas do setor devido as características do corpo receptor de efluentes e exigências do órgão ambiental. Esta condição requer um tratamento terciário e, dessa forma, aumenta o custo operacional com químicos no tratamento. O objetivo deste trabalho foi de reduzir o consumo de sulfato de alumínio, coagulante no tratamento terciário, sem comprometer a qualidade do efluente tratado. Para tanto, a hipótese testada foi da redução da variabilidade operacional nos parâmetros de controle do efluente, buscando maior eficiência no tratamento biológico e, por consequência, redução da necessidade de dosagem de coagulante no tratamento terciário. Para viabilizar esta hipótese utilizou-se a ferramenta Controle Estatístico de Processos (CEP). Os indicadores de desempenho da ETE, ou seja, Eficiência e Consumo de coagulante no tratamento terciário tiveram melhoras substanciais em função da implementação do programa CEP. Os ganhos contabilizados pela redução de coagulante no tratamento terciário foram de aproximadamente R\$ 2.100.000,00 anuais. A confiabilidade do tratamento de efluentes aumentou, o que foi confirmado pela redução de ultrapassagens de parâmetros legislados comparado aos anos anteriores.

Palavras-chave: variabilidade, estação de tratamento de efluentes, controle estatístico de processos, custos.

1. INTRODUÇÃO

A gestão sobre o tratamento de efluentes líquidos requer elevados recursos financeiros. Em particular, na planta da CMPC Celulose Riograndense, os custos com a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) tornam-se mais elevados em comparação à outras fábricas do setor devido as características do corpo receptor de efluentes e exigências do órgão ambiental. No presente caso, o corpo receptor é o lago Guaíba. Esta condição requer um tratamento terciário e, dessa forma, aumenta o custo operacional com reagentes químicos no tratamento. Para atender a qualidade dos parâmetros legislados, o Tratamento de Efluentes da Celulose Riograndense pode ser dividido de forma resumida em quatro grandes subsistemas, como se segue:

Pré-Tratamento: neste sistema, os efluentes passam por um processo de remoção de sólidos grosseiros por gradeamento, sendo em seguida, neutralizados e recalçados ao tratamento primário.

Tratamento Primário: os sólidos suspensos remanescentes do pré-tratamento são removidos neste subsistema em quase sua totalidade, por meio de decantação, após a qual são resfriados, homogeneizados e encaminhados ao tratamento secundário. Para a retenção temporária de efluentes cujas características sejam prejudiciais ao tratamento biológico, nesta etapa, existe a possibilidade de desvio do efluente para a lagoa de emergência.

Tratamento Secundário: este subsistema tem objetivo de reduzir a demanda biológica de oxigênio dos efluentes (DBO), conseguido através de tratamento biológico por lodos ativados e injeção de oxigênio gasoso no reator fechado de aeração (reator UNOX)

Tratamento Terciário: nesta etapa, ocorre a coagulação e sedimentação das substâncias responsáveis por dar cor ao efluente. Assim, esta fase também reduz a demanda química de oxigênio (DQO). O efluente tratado, após correção final de pH, é bombeado para o lago Guaíba. O custo específico com coagulante no tratamento terciário, ou seja, custo do coagulante dividido pela produção de celulose é de aproximadamente 13,5 R\$/t celulose, valor médio praticado em 2011. Este elevado custo, requer ações que minimizem o impacto deste insumo na competitividade do produto celulose no mercado.

O objetivo deste trabalho foi de reduzir o consumo de sulfato de alumínio, coagulante usado no

tratamento terciário, sem comprometer a qualidade do efluente tratado. Para tanto, a hipótese testada foi a redução da variabilidade operacional dos parâmetros de controle do efluente, buscando maior eficiência no tratamento biológico e, por consequência, redução da necessidade de dosagem de coagulante no tratamento terciário.

Para viabilizar esta hipótese utilizou-se a ferramenta Controle Estatístico de Processos (CEP). O CEP constitui-se em um conjunto de técnicas e ferramentas estatísticas, organizadas de modo a proporcionar, através da aplicação destas, a manutenção e a melhoria dos níveis de qualidade de um processo. O CEP pode ser considerado uma ferramenta ou estratégia da qualidade dentre as diversas existentes, sendo, portanto, um dos caminhos para se atingir alguns resultados importantes para uma organização. Com a utilização do CEP, os processos podem ser avaliados, reduzindo-se os desperdícios por meio de uma avaliação constante do processo [1].

2. MÉTODOS

A partir do objetivo de obter melhor controle de operação na ETE da Celulose Riograndense, utilizou-se a ferramenta de Controle Estatístico de Processos (CEP). Para viabilizar o uso desta ferramenta na operação foi necessário implementar as seguintes medidas de preparo do processo e dos operadores da ETE. Pode-se destacar as seguintes ações:

- Curso de oito horas sobre Tratamento Secundário no tratamento de efluentes. Esta medida teve como objetivo, o alinhamento de conceitos avançados no tratamento de efluentes para o grupo operadores da ETE;
- Automatização das leituras no Boletim de Ocorrências da área utilizando software Processbook. Esta ação teve como objetivo obter maior precisão nas leituras dos parâmetros de processo;
- Adequação do Boletim de Ocorrências da área e uso da ferramenta CEP. O Boletim de Ocorrências foi preparado para receber as cartas de controle e planilha de registros de desvios de qualidade;
- Avaliação do lodo da ETE por microscopia digital. Aquisição de um novo microscópio para avaliação da cultura microbiológica no tratamento secundário.

Conforme estas ações foram sendo realizadas, o programa CEP teve início na ETE no início de abril de 2012. A escolha dos parâmetros controlados pelo CEP teve como principal consideração, o impacto das variáveis no processo e também a possibilidade de controle efetivo através de medidas operacionais visando a menor variabilidade operacional no tratamento secundário e, por consequência, redução da variação de DQO no efluente tratado. As variáveis controladas pelo CEP e suas justificativas podem ser observadas abaixo:

- **Temperatura na entrada do reator UNOX:** a temperatura tem uma grande influência no metabolismo microbiano, afetando, por conseguinte, as taxas de oxidação das matérias carbonácea e nitrogenada. Nas reações biológicas, a tendência de aumento das taxas de crescimento mantém-se até uma certa temperatura ótima que depende do tipo de cultura. Para bactérias mesófilas este valor é de 39 °C. Acima de 40 °C, a taxa decresce, devido provavelmente à destruição de enzimas nas temperaturas mais elevadas [2].
- **Condutividade do efluente na entrada da ETE:** a condutividade é a expressão numérica da capacidade de uma água conduzir a corrente elétrica. Depende das concentrações iônicas e da temperatura. Indica a quantidade de sais existentes na corrente de fluido e, assim, representa uma medida indireta da concentração de poluentes [3]. Portanto, este parâmetro tem influência nos tratamentos secundário e terciário e, se ultrapassar um valor máximo de 6000 uS/cm, o efluente deve ser desviado para a lagoa de emergência.
- **Oxigênio residual no reator biológico:** na presença de oxigênio dissolvido, a bactéria nitrificante converte amônia em nitrato. A atividade dos microorganismos depende da concentração de oxigênio. Baixo nível de oxigênio dissolvido no reator, na prática valores inferiores a 1 mgL⁻¹ pode causar a proliferação de microorganismos filamentosos, propiciando o entumescimento do lodo [4,5]. Por outro lado, o excesso no oxigênio residual em valores de 3 mgL representa um custo desnecessário do insumo;
- **Taxa A/M:** este indicador mede a relação entre a carga orgânica que é introduzida no sistema e a concentração de microorganismos presentes. A taxa A/M exerce papel fundamental no controle da qualidade de formação de flocos biológicos. Uma menor taxa A/M pode favorecer a formação de um lodo tipicamente filamentoso, enquanto que

uma alta relação pode favorecer a formação de um lodo tipo cabeça de alfinete. Com uma alta concentração de alimentos no reator, as bactérias tenderiam a crescer forma dispersa em vez de formar flocos [6]. Para o reator em questão, o valor de projeto é de 0,30, enquanto que valores fora do intervalo de 0,2 e 0,4 são considerados inadequados.

A partir do exposto, foram escolhidas cartas de controle do tipo Média e Amplitude (X e R), como pode ser observado na Figura 1.

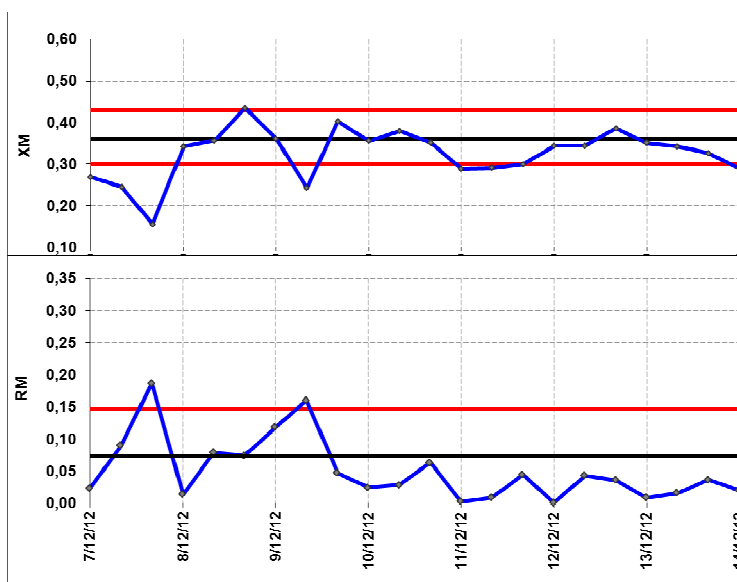


Figura 1: Carta de controle do tipo X e R para controle da taxa A/M durante meados de dezembro de 2012.

Os limites de controle, ou seja, Limite Superior de Controle (LSC), Limite Inferior de Controle (LIC), Objetivo e Variação Máxima (VAR) foram estabelecidos com base estatística do desempenho da ETE durante o ano de 2011. De acordo com a resposta do processo, os limites são avaliados com frequência mensal de modo que sejam atualizados conforme necessidade. O sistema foi implementado no Boletim de Ocorrências da área. Os limites de controle estabelecidos são a base do funcionamento do sistema, logo, quando as variáveis apresentam desvios de qualidade, o sistema requer uma justificativa e ação de retomada de controle pelo operador. Por exemplo, a Tabela 1 apresenta os limites de controle praticados em dezembro de 2012.

Tabela 1. Limites de Controle praticados em dezembro de 2012.

Var. de Controle	unid.	LSC	OBJ.	LIC	LCV
Temp. entrada UNOX CR - V	mgL ⁻¹	39,2	37,4	35,5	1,1
Razão F/M - CR - IV	kgDBO(kgSSV) ⁻¹	0,43	0,36	0,30	0,15
Condutividade - CR - I	µs(cm ²) ⁻¹	4200	3900	3600	400
Oxigênio dissolvido - reator	mgL ⁻¹	3	2	1	0,7

Os eventos de des controle do CEP foram agrupados de forma a identificar as principais causas de des controle de todos os parâmetros controlados no programa. A Figura 2, apresenta um exemplo, deste conceito para o parâmetro de condutividade.

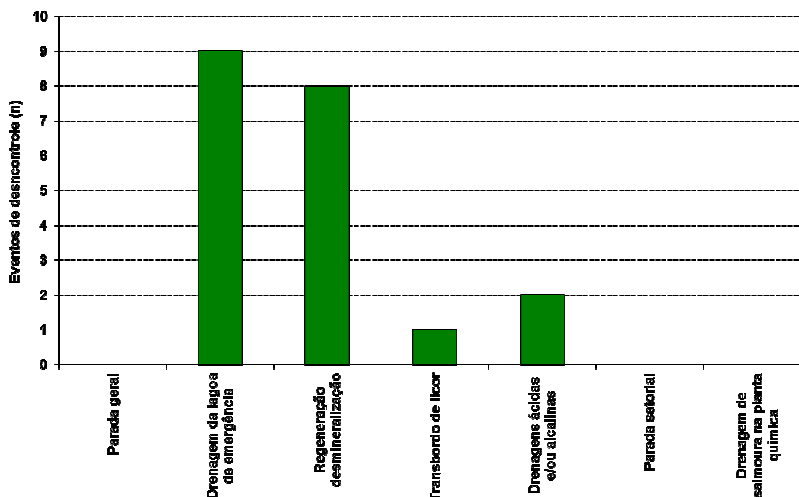


Figura 2: Agrupamento das principais causas de descontrole do parâmetro condutividade na entrada da estação para o período de julho de 2012.

A partir desta análise, ações operacionais foram avaliadas para reduzir estes eventos de descontrole e, assim, reduzir a variabilidade operacional da ETE. Conforme o programa evoluiu e as ações foram tomadas, os limites de controle foram reavaliados periodicamente de forma a refinar o controle das variáveis.

2.1 Indicadores de Processo

Para avaliar os resultados do trabalho foram utilizados dois indicadores de desempenho de processo.

O indicador Eficiência tem como objetivo monitorar os resultados das melhorias de controles, análises e gestão de processo. O indicador é definido como $(\text{Carga de DQO da entrada do reator UNOX} - \text{Carga de DQO do efluente final}) / (\text{Carga de coagulante no tratamento terciário})^{-1}$.

Equação 1 Indicador de eficiência da ETE

$$\text{Eficiência} = \frac{[\text{t DQO removida nos tratamentos secundário e terciário}]}{[\text{t Al}_2(\text{SO}_4)_3]} \quad (1)$$

Na prática, este indicador avalia a eficiência de remoção de DQO nos tratamentos secundário e terciário, uma vez que, a planta possui recirculação de lodos, e desta forma, entende-se que é necessário monitorar o processo de forma integrada.

Outro indicador de processo utilizado é o consumo específico de coagulante por produção diária de celulose. Este indicador é de suma importância para o custo do processo sendo função da eficiência do tratamento de efluentes e carga de contaminantes que entra na ETE. A unidade de medição é dada em kg de coagulante por tonelada de celulose seca ao ar (ADMT).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O programa teve início em abril de 2012. O acompanhamento de resultados e reuniões com o corpo operacional foram realizados com frequência mensal. O indicador Eficiência da ETE apresentou resultados superiores no período CEP comparados aos obtidos entre 2011 e 2012. A Figura 3 apresenta o resultado do indicador de Eficiência.

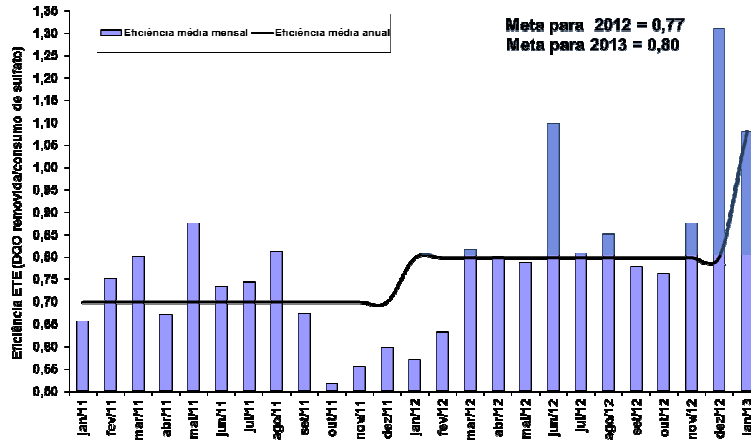


Figura 3: Resultados mensais do índice de Eficiência da ETE.

Como pode ser observado acima, a eficiência de remoção de DQO nos tratamentos secundário e terciário aumentou após o início do programa. Na prática, isso representou uma maior taxa de remoção de DQO no tratamento secundário com menor consumo de coagulante no tratamento terciário. Este resultado é consequência do acompanhamento mensal dos resultados obtidos no programa e ações focadas na redução da variabilidade operacional.

As principais ações realizadas para melhor controle da planta foram:

Uso da drenagem da lagoa de emergência como variável manipulada para controle da condutividade na entrada da ETE. A drenagem constante da lagoa de emergência ocorre principalmente devido à purga diária de cinzas da caldeira de recuperação. No modelo antigo, o efluente da drenagem de cinzas entrava diretamente no tratamento primário ocasionando uma variação abrupta de condutividade durante o tempo de purga de cinzas. Estas variações ocasionavam reduções de eficiência no tratamento secundário e, por consequência, havia a necessidade de aumentar a dosagem de coagulante no tratamento terciário para manter a qualidade do efluente tratado. A partir do CEP, a estratégia de operação foi de utilizar a vazão de drenagem da lagoa de emergência como variável para controlar condutividade na entrada da estação. Conforme a condutividade do efluente na entrada da estação varia, a operação realiza ajustes na drenagem da lagoa de emergência, sempre buscando a faixa de condutividade estabelecida pelo CEP. A Figura 4 apresenta os resultados de condutividade na entrada da estação.

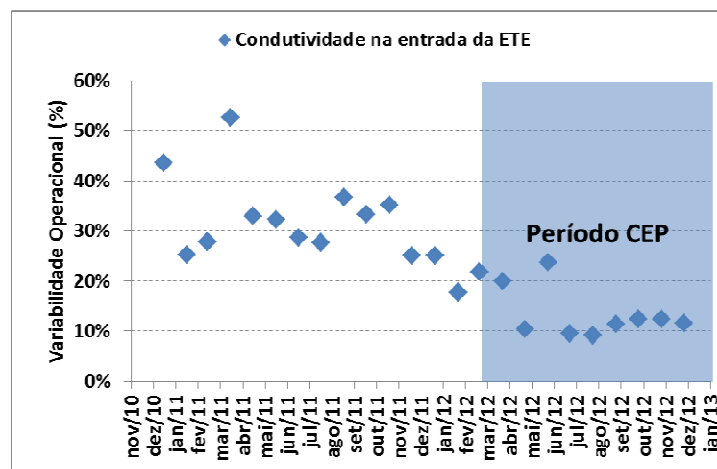


Figura 4: Resultados mensais da variabilidade da Condutividade do efluente na entrada ETE.

Em teoria, o uso de parte do volume da lagoa de emergência para uso no processo aumenta o risco de continuidade operacional da fábrica de celulose como um todo, uma vez que, podem

ocorrer eventos de desvios imprevisíveis de efluente para a lagoa de emergência. O nível médio da lagoa de emergência aumentou 15% após implementação do CEP. No entanto, desde a implementação desta estratégia, não ocorreram eventos que representassem risco à continuidade operacional da fábrica.

O resfriamento do efluente é feito em uma torre de resfriamento paralelamente a sete trocadores de calor. Os trocadores de calor apresentam incrustações severas devido à contaminações no fluido de resfriamento prejudicando a eficiência de troca térmica, sendo mais grave nos trocadores de calor que utilizam água mecanicamente tratada. A natureza da incrustação em um determinado processo influencia significativamente o projeto do trocador de calor, na escolha do material e a programação da limpeza e manutenção. Cabe ressaltar que a formação de incrustações é potencializada com o aumento da temperatura e a diminuição da velocidade do fluido de resfriamento [7].

Por outro lado, a torre de resfriamento perde rendimento quando a umidade relativa do ar é elevada, uma vez que, a eficiência de uma torre de resfriamento é limitada pela temperatura de bulbo úmido do ar ambiente. A soma desses fatores dificulta o controle de temperatura do efluente na entrada do reator biológico. A partir da avaliação dos resultados do CEP, buscaram-se as seguintes ações para reduzir a variação de temperatura e adequação das temperaturas de projeto do efluente na entrada do reator biológico.

- Foi implementada uma nova estratégia do uso dos trocadores de calor para resfriamento do efluente. O conceito utilizado foi de trabalhar com o menor número de trocadores de calor e a maior vazão de água e efluente por trocador de calor, nunca limitando o sistema por vazão. O objetivo desta operação foi de aumentar a eficiência de troca térmica total;
- Realizou-se um estudo das condições de limpeza e conservação dos trocadores de calor, de modo a realizar procedimentos de lavagem especializada e reforma do sistema de forma econômica visando a melhor troca térmica global. O resfriamento do efluente é feito em uma torre de resfriamento paralelamente a sete trocadores de calor.

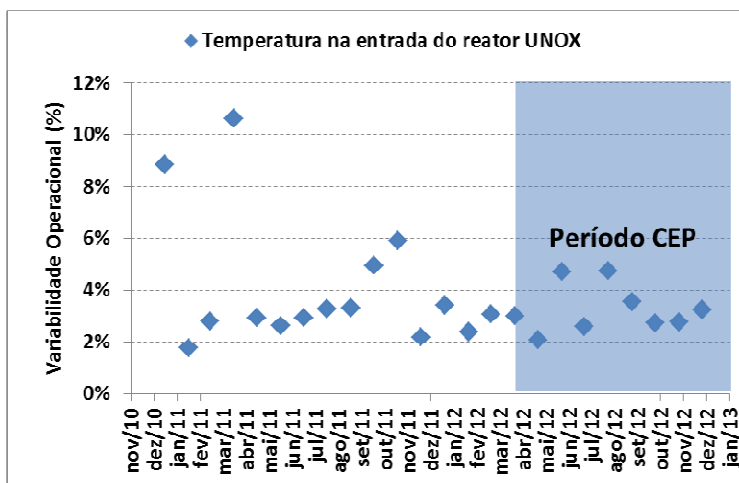


Figura 5: Resultados mensais da variabilidade da temperatura do efluente na entrada do reator UNOX.

A partir de agosto de 2012, Oxigênio residual no reator UNOX este parâmetro passou a ser controlado pelo CEP. Inicialmente houve dificuldade em controlar este parâmetro devido ao elevado tempo de resposta do controle o tornando mais suscetível a variações de processo. Com o decorrer do mês, o parâmetro foi enquadrado com sucesso e este encontra-se sob controle.

A Figura 6 apresenta os resultados mensais de variabilidade do oxigênio dissolvido no reator UNOX.

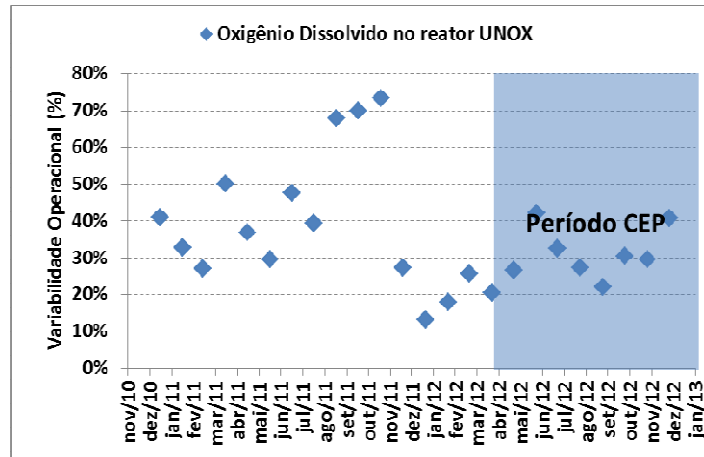


Figura 6: Resultados mensais da variabilidade do oxigênio dissolvido no reator UNOX.

Sugere-se que o controle do oxigênio dissolvido no UNOX foi possível, devido à grande estabilidade operacional que a planta atingiu. Historicamente, o oxigênio residual nunca havia sido controlado com sucesso dentro da faixa recomendada na literatura.

Taxa A/M. Este indicador teve seu cálculo modificado para melhor controle do parâmetro a partir do uso do CEP. Anteriormente ao programa, este cálculo utilizava fatores constantes para determinação da concentração de DBO a partir da análise de DQO e ainda era realizada uma estimativa de sólidos suspensos voláteis (SSV) a partir da análise de sólidos suspensos totais. Observou-se que estas considerações mascaravam o resultado do indicador e, dessa forma, o cálculo foi modificado para que as análises de DBO e SSV fossem contempladas. A Figura 7 apresenta os resultados da taxa A/M para o período do CEP.

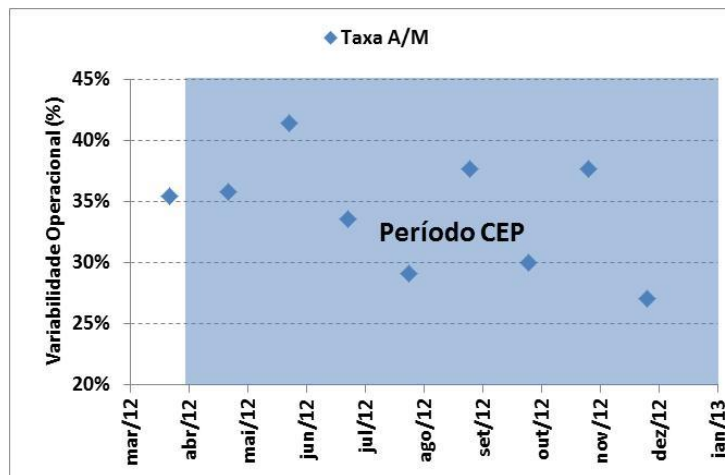


Figura 7: Taxa A/M no reator UNOX.

O novo cálculo possibilitou o uso efetivo deste indicador na operação da ETE que antes estava em desuso. Observou-se que em períodos considerados estáveis, o indicador comportou-se da mesma forma. Por outro lado, em períodos onde houve eventos de descontinuidade operacional da fábrica, o indicador variou de forma demasiada. Os valores da taxa A/M são atualizados com a frequência de 8 h e utilizados para controlar o descarte de lodo buscando a melhor qualidade do floco formado nos decantadores secundários. O controle mais efetivo das variáveis temperatura na entrada do reator, condutividade na entrada da ETE, oxigênio residual e taxa A/M possibilitou a maior estabilidade operacional da concentração da DQO no efluente tratado, como pode ser observado na Figura 8.

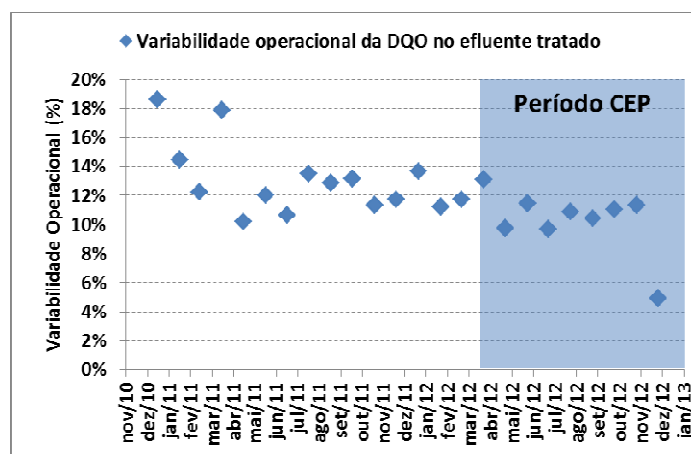


Figura 8: Variabilidade operacional da concentração de DQO no efluente tratado.

Como a concentração de DQO no efluente tratado é um parâmetro legislado, a maior confiabilidade no tratamento de efluentes atingida pelo CEP, possibilitou o controle deste parâmetro mais próximo do limite legislado de 145 mgL^{-1} de DQO. A consequência direta deste ganho é a possibilidade de redução na dosagem de coagulante no tratamento terciário. A Figura 9 apresenta o consumo histórico de sulfato de alumínio na ETE.

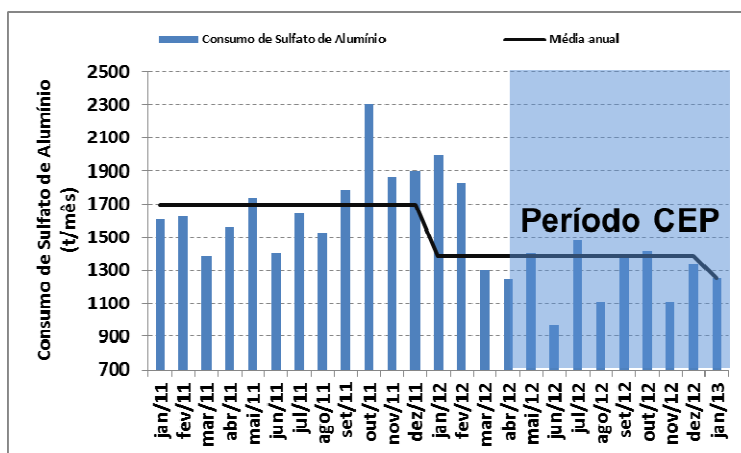


Figura 9: Consumo de coagulante no tratamento terciário.

Outro ganho obtido através da maior previsibilidade no tratamento de efluentes foi o desempenho dos indicadores de efluentes líquidos em 2012. O resultado foi melhor da história da fábrica com apenas uma ultrapassagem de padrão do parâmetro cloretos ao longo de todo o ano atingindo virtualmente 100% de atendimento aos padrões. A ETE não tem operação unitária para tratar cloretos e este desvio foi resultado de uma concentração incomum de precipitação pluviométrica durante três dias consecutivos. Dessa forma, houve uma lavagem da pilha de sal da planta de Cloro e Soda fazendo transbordar pela primeira vez os estoques de salmoura. Além disso, observou-se que durante o período referente à utilização do CEP na ETE todas as análises de toxicidade crônica tiveram resultados menor ou igual a 2 para Ceriodaphnia Dubia. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos de Unidade de Toxicidade Crônica (Utc) entre 2011 e 2013.

Tabela 2. Testes de Biomonitoramento do efluente tratado da Celulose Riograndense.

Período de Análise	Utc
Março-11	2
Maio-11	2
Julho-11	4
Setembro-11	2
Novembro-11	2
Janeiro-12	2
Março-12	1
Maio-12	2
Julho-12	2
Setembro-12	2
Novembro-12	2
Janeiro-13	1

Sugere-se que o melhor controle da estação de tratamento de efluentes possa estar correlacionado com os resultados de toxicidade crônica do efluente. No entanto, cabe um estudo mais detalhado para comprovar esta hipótese através de aprimoramento de controle de estabilidade da ETE visando o atendimento de Utc nível 1.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados do trabalho foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- A redução de variabilidade operacional tornou mais previsível a dosagem de sulfato de alumínio, reduzindo o desperdício sem perda de qualidade do efluente tratado. Os ganhos praticados desde o início do CEP na ETE foram superiores a R\$ 2.100.000,00 ao ano pela redução do consumo de sulfato de alumínio;
- A estabilidade operacional trouxe maior eficiência no tratamento secundário aumentando a taxa de remoção de DQO nesta etapa do processo e, por consequência, redução da necessidade de remoção de DQO no tratamento terciário com uso de produtos químicos;
- A confiabilidade do tratamento de efluentes aumentou, o que foi confirmado pela redução de ultrapassagens de parâmetros legislados comparado aos anos anteriores;
- Como as análises de toxicidade crônica tiveram resultados menor ou igual a 2 de Utc para *Ceriodaphnia Dubia* durante o programa CEP, Recomenda-se aprimorar o controle de estabilidade da ETE buscando o nível de Utc para 1;
- Os ganhos globais obtidos no tratamento do efluentes através da redução da variabilidade operacional utilizando a ferramenta CEP podem ser estendidos para outras áreas.

REFERÊNCIAS

1. Schissati, M. L., "Uma Metodologia de Implantação de Cartas de Shewhart para o Controle de Processos." Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, (1998);
2. Sawyer, C.N., Mc Carty, P.L. "Chemistry for environmental engineering" 3º ed. Mc Graw-Hill, Inc. 532 p New York. (1978);
3. <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guas-Superficiais/34-Vari%C3%A1veis-de-Qualidade-das-%C3%81guas#condutividade>. Acesso em 25/02/2013;
4. Metcalf e Eddy "Waste Water engineering – Treatment, disposal, reuse" 3º ed. McGraw-Hill. 1334, New York (1991);

5. Jenkins, D., Richard, M. G., Daigger, G.T. "Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming. 2^o Lewis Publisher. Michigan USA (1993);
6. CETESB, "Microbiologia de lodos ativados. 47 p. São Paulo (1999);
7. http://asbrav.org.br/conteudo/asbrav/fator_incrustacao.pdf "Efeito das incrustações em condensadores do tipo casco e tubo. Prejuízo ou Oportunidade?" Acesso 27/02/2013.