

II-173 - AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE DESINFECÇÃO COM TECNOLOGIA UV PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REUSO

Allan Saddi Arnesen⁽¹⁾

Engenheiro da Superintendência de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da SABESP - Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Márcio Luiz Rocha P. Fernandes

Gerente da Divisão de Controle Sanitário Centro – MCEC da SABESP - Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Edilson de Oliveira Prado

Técnico em Sistema de Saneamento da Divisão de Controle Sanitário Centro – MCEC da SABESP - Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Márcio Alves Silva

Encarregado de Sistema de Tratamento de Esgoto da Divisão de Controle Sanitário Centro – MCEC da SABESP - Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Endereço⁽¹⁾: Rua Costa Carvalho, 300, Prédio da Prefeitura – piso superior – Pinheiros – São Paulo – SP - CEP: 05429-900 - Brasil - Tel: +55 (11) 3388-9541 - Fax: +55 (11) 3388-8695 - e-mail: aarnesen@sabesp.com.br.

RESUMO

A cloração é o método de desinfecção de águas mais consolidado no Mundo, sendo adotado, por exemplo, para a produção de águas de reuso para fins não potáveis. Embora altamente eficiente para redução da maioria dos microrganismos patogênicos, este método tem implicação em outros parâmetros que podem ser importantes ao cliente/consumidor da água produzida (como condutividade e cloretos). Neste contexto, foram realizados testes com a tecnologia ultravioleta (UV) para desinfecção do efluente tratado da ETE Jesus Netto (Ipiranga-SP), focando a redução da dosagem total de cloro. A avaliação técnica da tecnologia UV indicou que sua adoção implica em uma menor formação dos parâmetros condutividade e cloreto, tomando como referência o método atual aplicado na ETE (cloração). Em termos de eficiência de desinfecção (redução de E.Coli), observou-se que a dose mínima necessária para conferir eficiência equivalente ao método atual é de 30 mJ/cm². Os testes realizados com a combinação dos métodos cloro+UV demonstraram que é possível reduzir as doses de UV e cloro para ¼ da dose necessária caso fossem aplicados métodos isolados. A avaliação econômica indicou que a adoção dos métodos combinados se tornaria mais econômica do que o método atual (apenas com cloro) após um período de menos de 9 anos de operação, devido principalmente à redução significativa de cloro aplicado na ETE. Isto comprova que, além do ganho de qualidade que a água de reuso teria ao adotar a tecnologia testada, também seria vantajoso economicamente adotar a tecnologia UV.

PALAVRAS-CHAVE: Desinfecção, Ultravioleta, Reuso Industrial, Viabilidade Técnico-Econômica.

INTRODUÇÃO

A cloração é o método de desinfecção de águas (potáveis e residuárias) mais consolidado mundialmente, sendo que destrói os microorganismos pela oxidação do material celular (METCALF & EDDY, 2004). A desinfecção com cloro é adotada, por exemplo, para produção de águas de reuso para fins não potáveis.

A aplicação deste método, por meio de dosagem de hipoclorito de sódio (NaOCl) confere elevada segurança à água de reuso produzida, com eficiência de remoção de E. Coli, principal microrganismo indicador, superior a 4 log de remoção (> 99,99%). No entanto, a escolha deste método tem implicação em outros parâmetros que podem ser importantes ao cliente/consumidor da água produzida.

Os parâmetros cloreto e condutividade, por exemplo, são influenciados pela dosagem de NaOCl em níveis que podem exceder os níveis desejados pelo cliente, em especial para fins industriais, o que pode ser negativo à venda da água de reuso.

Contudo, deve-se ter a clareza de que as dosagens de outros produtos químicos, como coagulantes adotados em etapas do processo, também podem favorecer o aumento das concentrações destes parâmetros (cloreto e condutividade), dependendo do produto aplicado.

Embora a dosagem de cloro na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) seja importante para, além da desinfecção, abater a cor e manter um residual de cloro na água produzida, a redução das dosagens dos produtos químicos (cloro e coagulante) pode minimizar a geração do íon cloreto pelo processo de tratamento.

Neste contexto, foram realizados testes com a tecnologia ultravioleta (UV) para desinfecção do efluente tratado da ETE, o qual possibilitará uma redução da dosagem total de cloro. Como benefício, a tecnologia UV tem por característica inativar uma maior variedade de microrganismos patogênicos do esgoto.

Em teste preliminar da tecnologia, verificou-se que a eficiência da desinfecção é dependente da dose-UV aplicada (a qual depende do tempo de contato no reator UV) e da qualidade da água (em termos de transmitância UV) (Arnesen et al., 2015). No presente trabalho, buscou-se desenvolver e operar uma unidade piloto que melhor simulasse as condições da escala real da ETE, para avaliar a viabilidade técnica e econômica de implantação na estação.

OBJETIVO

Avaliar técnica e economicamente a aplicação de radiação UV para desinfecção do efluente tratado por processo biológico em ETE de produção de água de reuso.

MATERIAIS E MÉTODOS

A ETE de reuso estudada foi a Jesus Netto, que recebe parte do esgoto coletado no bairro do Ipiranga, em São Paulo e produz uma vazão média de 29,5 L/s de água de reuso destinada à utilização industrial e limpeza urbana.

A ETE possui dois processos de tratamento que operam em paralelo: a) sistema de Lodos Ativados (LA) ($Q_{méd}=20,9$ L/s em 2014, ou seja, aproximadamente 2/3 da vazão da ETE); b) sistema combinado Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) + Filtros Biológicos ($Q_{méd}=8,6$ L/s em 2014, ou seja, aproximadamente 1/3 da vazão da ETE). A Figura 1 apresenta o fluxograma de todo o processo de tratamento da ETE, com destaque também aos pontos de coleta para controle de processos.

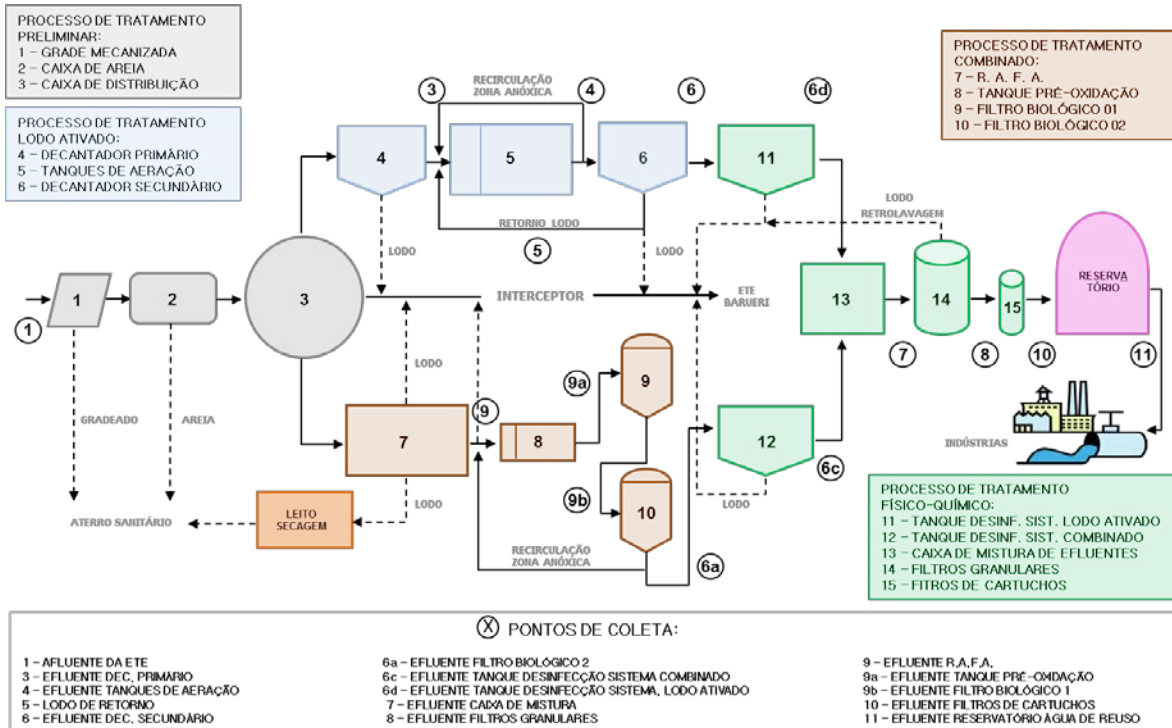


Figura 1: Fluxograma do processo de tratamento da ETE Reuso Jesus Netto com apresentação dos pontos de coleta para análises de controle de processos. Fonte: Portal MC – Sabesp.

A desinfecção é realizada através da aplicação de hipoclorito de sódio (NaOCl, com 12% de cloro ativo) em dois pontos: nas entradas dos tanques de desinfecção após o sistema de LA (11 na Figura 1) e após o sistema combinado (12 na Figura 1). A dosagem aplicada nestes pontos é a mesma (de 6 a 8 mg/L) e ela é capaz de manter um residual final de 1 mg/L no sistema de armazenamento (reservatório) e distribuição à Indústria.

O monitoramento da eficácia da desinfecção da ETE é realizado através de análises de E.coli desde 2013 no efluente final e com frequência semanal, sendo que neste período todos os resultados sempre permaneceram inferiores ao limite de detecção do método (ou seja, < 1 NMP/100mL).

Descrição do piloto

A Figura 2 apresenta um croqui do piloto, demonstrando seus quatro pontos de coleta para controle dos processos.

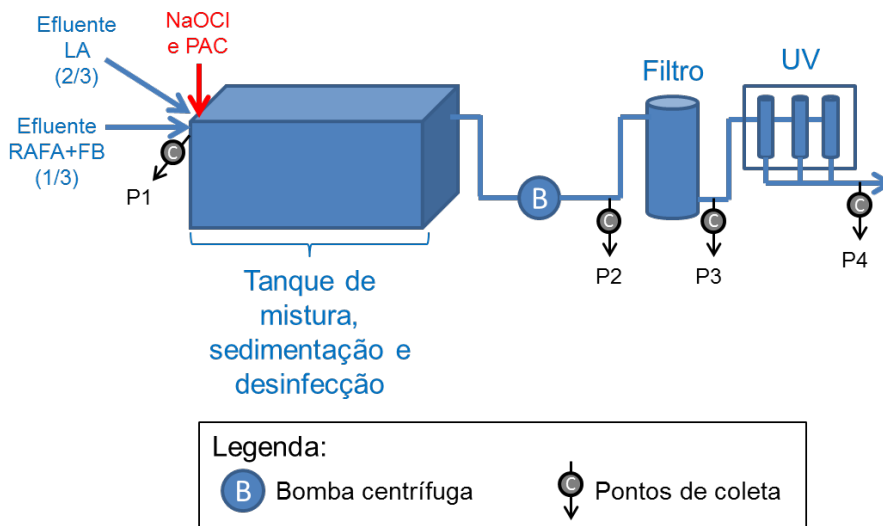


Figura 2: Croqui básico do piloto.

O piloto consiste na simulação das seguintes etapas de tratamento:

- Tanque de Coagulação/sedimentação e oxidação/desinfecção dos efluentes tratados pelos processos de Lodo Ativado e Sistema Combinado (etapas 11 e 12 do Fluxograma da Figura 1);
- Mistura dos efluentes dos sistemas de Lodo Ativado e Sistema Combinado (etapa 13 do Fluxograma da Figura 1);
- Filtro granular composto por areia e carvão antracito (etapa 14 do Fluxograma da Figura 1);
- Desinfecção com radiação UV: este processo não é atualmente adotado na ETE, sendo que este trabalho propõe-se a avaliá-lo após a etapa de filtração, onde a transmitância da água é de aproximadamente 85% (Arnesen et al., 2015).

No piloto optou-se por simular os processos de desinfecção/oxidação e coagulação para os efluentes misturados (2/3 da vazão do LA e 1/3 da vazão do Sist. Combinado), ou seja, realizando as etapas 13, 11 e 12 juntas em um mesmo tanque de mistura, sedimentação e desinfecção. Este tanque apresenta tempo de detenção hidráulico similar à escala real, ou seja, de aproximadamente 4 horas.



Figura 3: Tanque de mistura, sedimentação e desinfecção do piloto.

Depois do tanque de mistura, sedimentação e desinfecção o esgoto passa por um filtro de areia e carvão (Figura 4a) antracito que simula os filtros granulares da ETE, com taxas de filtração similares aos da estação (Tabela 1 apresenta as características dos filtros em escala piloto e real).

Tabela 1: Características dos filtros de areia/antracito (escala real e piloto).

| Características | Filtro Escala real | Filtro Escala piloto |
|---|--------------------|----------------------|
| Diâmetro (m) | 2,92 | 0,35 |
| Área superficial (m ²) | 6,697 | 0,096 |
| Vazão média (m ³ /h) | 50 | 0,875 |
| Taxa de filtração média (m ³ /m ² .dia) | 179 | 218 |
| Espessura da camada de antracito (superior) (m) | 0,60 | 0,33 |
| Espessura da camada de areia (inferior) (m) | 0,30 | 0,15 |

O filtro tem uma função importante para clarificar o esgoto para a próxima etapa que o piloto irá ensaiar: desinfecção com radiação UV, processo dependente da transmitância UV (ou UV-T). O filtro é retrolavado a cada 24 horas de operação por períodos de 6 minutos.

O módulo de reatores UV para desinfecção é composto por três unidades UVMAX Modelo A da Viqua/Trojan instalados em paralelo em uma configuração que podem ser isoladas para operar separadamente (Figura 4b).

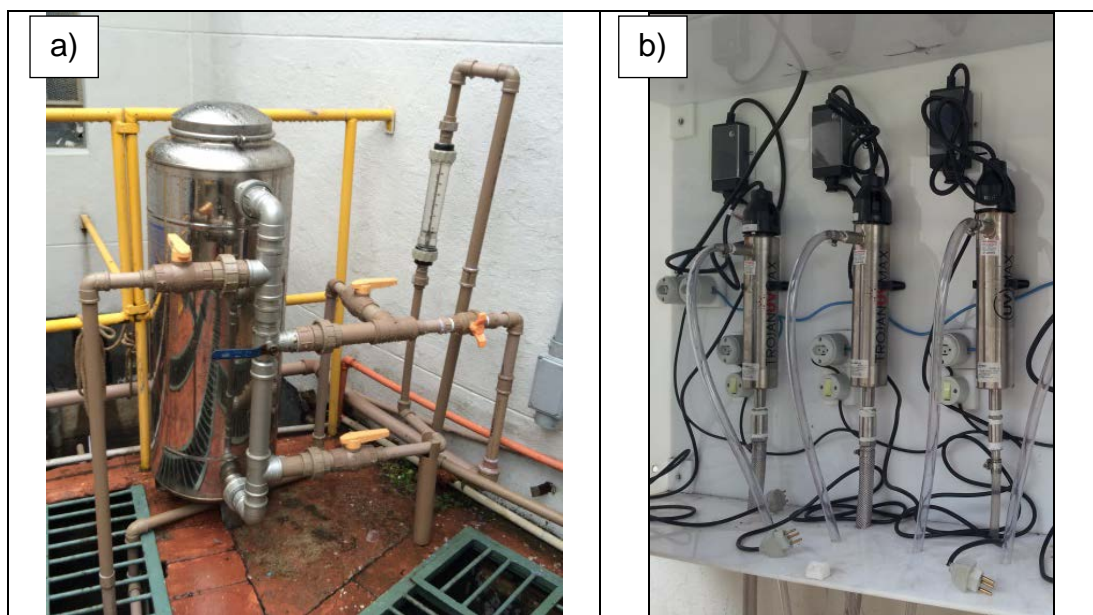


Figura 4: a) Filtro de areia e carvão; b) Pannel com reatores UV utilizados nos testes.

A Tabela 2 apresenta as características do modelo de reator UV utilizado no trabalho.

Tabela 2: Características dos reatores UV MAX Modelo A utilizados nos testes. (*) valores válidos para transmitância UV de 85%. Fonte: Manual Trojan.

| Características de cada reator UV MAX Modelo A | | |
|---|-------|--------|
| Vazão para uma dose UV de 16 mJ/cm ² * | 11 | L/min |
| Vazão para uma dose UV de 40 mJ/cm ² * | 4 | L/min |
| Voltagem | 230 | V |
| Frequência | 50-60 | Hz |
| Corrente máxima | 0,4 | Ampére |
| Potência da lâmpada | 14 | Watts |
| Máximo consumo energético | 22 | Watts |

Testes realizados

A avaliação da a tecnologia UV na unidade piloto consistiu em três etapas:

A. Método de desinfecção atualmente adotado:

- Objetivo: determinar a eficiência proporcionada pelo método atual de desinfecção com NaOCl, para estabelecer a linha de base que deve ser alcançada pelo método testado;
- Dosagem: igual à aplicada em escala real, ou seja, de 32 mg/L (cloro ativo).

B. Desinfecção com UV:

- Objetivo: determinar a eficiência do método de desinfecção com a tecnologia UV;
- Dosagem: foram testadas 5 doses-UV entre 5 e 40 mJ/cm², variando o número de reatores em operação e, em algumas situações, a vazão do sistema piloto. O ajuste das dosagens foi realizado com base em dados informados no manual do fabricante dos reatores UV MAX

Modelo A para águas com transmitância (UV-T) de 85%, semelhante à transmitância do efluente misturado (LA+Sistema Combinado) da ETE.

C. Combinação dos métodos de desinfecção de cloro e UV:

- Objetivo: determinar a eficiência proporcionada pela combinação dos métodos de desinfecção cloro e UV, aplicados de forma sequencial;
- Dosagem: a aplicação de cloro foi realizada antes dos reatores UV. Foram testadas doses menores dos dois agentes desinfetantes, sendo que a concentração aplicada de cloro era aproximadamente 1/4 da atualmente aplicada e a dosagem de UV de aproximadamente 10mJ/cm².

Análises de qualidade da água realizadas

A eficiência de desinfecção dos testes foi avaliada com base nos resultados de análises de E.coli, pela técnica de substrato enzimático (*Standard Methods for the Examination Water and Wastewater 22nd Edition, 2012 – Method 9223B*), com resultados expressos em NMP/100mL.

Também foram analisados durante os testes os parâmetros: pH, cor aparente, cloreto, condutividade, transmitância UV (comprimento de onda 254 nm), turbidez. A Tabela 3 apresenta os pontos do piloto onde foram realizadas as análises.

Tabela 3: Análises realizadas durante os testes nos quatro pontos de coleta do Piloto.

| Teste/Ponto | P1 | P2 | P3 | P4 |
|--|---|--|--|--|
| A. Método de desinfecção atualmente adotado | Turbidez; Cloro total; Condutividade; Cor; Cloreto; E.Coli. | Turbidez; Cloro total; Condutividade; Cor; Cloreto. | Turbidez; Cloro total; Condutividade; Cor; Cloreto; E.Coli. | - |
| B. Desinfecção com UV | Turbidez; Transm. UV; Condutividade; Cor; Cloreto; E.Coli. | Turbidez; Transm. UV; Condutividade; Cor; Cloreto; | Turbidez; Transm. UV; Condutividade; Cor; Cloreto; | Turbidez; Transm. UV; Condutividade; Cor; Cloreto; E.Coli. |
| C. Combinação dos métodos de desinfecção de cloro e UV | Turbidez; Transm. UV; Cloro total; Condutividade; Cor; Cloreto; E.Coli. | Turbidez; Transm. UV; Cloro total; Condutividade; Cor; Cloreto; | Turbidez; Transm. UV; Cloro total; Condutividade; Cor; Cloreto; | Turbidez; Cloro total; Condutividade; Cor; Cloreto; E.Coli. |

Avaliação econômica

A avaliação econômica foi realizada comparando o método combinado de cloro e UV, com base nos resultados dos testes (ver na seção Resultados) com a solução atual de desinfecção apenas com cloro.

Para avaliar os custos de implantação (CAPEX) e de operação (OPEX) para o caso da ETE/Reuso Jesus Netto das duas alternativas foram considerados os seguintes dados/informações:

- Método de avaliação econômica: Valor Presente Líquido;
- Taxa de desconto de 8,06% ao ano;
- Tempo de alcance: 20 anos (considerada a vida útil dos equipamentos de UV);
- Q_{PROJETO} = 70 L/s (2,2*10⁶m³/ano), visando ampliação futura da ETE;
- Tempo de operação: 24 horas/dia em 365 dias/ano;
- Mão-de-obra: s/ alterações.

- Custos de investimento (CAPEX):
 - Bombas dosadoras de cloro (hipoclorito de sódio):
 - Necessárias duas bombas, uma para cada sistema de tratamento da ETE;
 - Eletronicamente controlada (atualmente utilizada na ETE): R\$ 3.200,00/bomba, totalizando R\$6.400,00 (referência: Setembro/16);
 - Vida útil: 5 anos;
 - Foram adquiridas recentemente bombas novas na ETE, portanto só haverá necessidade de aquisição após a vida útil das bombas;
 - Mesmo com a adoção da tecnologia UV, haverá dosagem de cloro e, portanto, serão necessárias bombas nas duas situações avaliadas.
 - Sistema UV:
 - Adotados os valores de mercado das propostas técnico-comerciais de três fornecedores (referência: Setembro/16), especificados para conferir dose-UV mínima de 20mJ/cm²;
 - 2 reatores em paralelo, sendo cada um com capacidade nominal de 35L/s, possuindo 3 lâmpadas de baixa pressão cada e sistema de limpeza automático;
 - Suporte em inox para instalação dos equipamentos UV em cima das bases de concreto existentes;
 - Serviços de instalação, start-up e comissionamento inclusos;
 - Investimento inicial: R\$ 517.665,29;
 - Vida útil: 20 anos.
- Custos de operação (OPEX):
 - Bombas dosadoras de cloro (hipoclorito de sódio):
 - Produto químico (NaOCl):
 - Considerando os dados históricos operacionais da ETE, em especial anos de 2012 e 2013 (antes da Crise Hídrica de SP), o consumo específico de hipoclorito de sódio é de 0,084 kg/m³ tratado;
 - Assim, para a vazão avaliada (de 70 L/s, após ampliação), o custo anual considerando o preço do NaOCl de R\$0,783/kg seria de R\$145.193,01/ano.
 - Energia Elétrica:
 - Considerando a potências das bombas dosadoras e as tarifas de ponta e fora de ponta praticadas, considerando bandeira verde, o custo anual com o consumo de energia elétrica das bombas dosadoras é de R\$ 1.089,87/ano.
 - Manutenção:
 - Considerado valor de 2% a.a. do custo de investimento das bombas dosadoras, ou seja, R\$ 128,00/ano.
 - Sistema UV:
 - Produto químico (NaOCl):
 - Considerando os resultados do estudo na unidade piloto, a dosagem de hipoclorito de sódio poderá ser reduzida para ¼ da dosagem atual, ou seja, o custo anual será de R\$36.298,25/ano.
 - Energia Elétrica:
 - Considerando a potências das bombas dosadoras e as tarifas de ponta e fora de ponta praticadas, considerando bandeira verde, o custo anual com o consumo de energia elétrica do sistema UV (1,74 kW) somado ao das bombas dosadoras é de R\$ 5.830,82/ano.
 - Manutenção:
 - Substituição de lâmpadas:
 - Tempo de vida útil das lâmpadas: 12.000 horas (ou 1,36 anos de operação a 24h/dia, 365dias/ano);
 - Considerando que as lâmpadas são comercializadas em pacotes de 12 unidades, a um custo de R\$ 50.486,81 (mesmo fornecedor do menor CAPEX), o custo anual com troca de lâmpadas será de R\$18.561,33/ano).

RESULTADOS

Método de desinfecção atualmente adotado

Os resultados dos testes de avaliação do método de desinfecção atualmente adotado estão apresentados na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Resultados dos testes realizados no piloto simulando o método atualmente adotado na ETE.

| | | Método atual - Desinfecção com cloro (NaOCl) | | | | | | | | | |
|------------------|-----------------------------|--|-----------------|---------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|--|--|--|----------------------------------|
| Semana do teste | Ponto de aplicação do NaOCl | Dose cloro (mg/L) | Dose PAC (mg/L) | Eficiência remoção E.Coli | | Eficiência remoção Coliformes totais | | Eficiência de remoção de cor (do P1 ao P2) | Eficiência de remoção de cor (do P1 ao P3) | Varição de Condutividade (do P1 ao P3) | Varição de Cloreto (do P1 ao P3) |
| | | | | % | Log de remoção | % | Log de remoção | % | % | % | % |
| 23 a 27/11/15 | Entrada do tanque | 32 | 85 | 99,9944% | 4,2 | 99,9977% | 4,6 | 34% | 70% | 19% | 44% |
| 29/02 a 04/03/16 | Entrada do tanque | 32 | 85 | 99,9938% | 4,2 | 99,9989% | 5,0 | 45% | 92% | 23% | 47% |

Foram observados os seguintes aspectos:

- Não se observou diferença significativa de eficiência de desinfecção entre as combinações testadas de NaOCl e PAC, avaliada em termos de E.Coli e Coliformes totais, entre as dosagens de NaOCl (32 e 17 mg/L) e PAC (85 e 45 mg/L), ou seja, em torno de 4 log de remoção de E.Coli e 5 log de remoção de Coliformes Totais;
- Este fato provavelmente ocorreu devido ao filtro reter a cor e a turbidez do efluente do tanque, e proporcionar uma melhor condição para a ação do cloro. Entretanto, observou-se que as maiores dosagens (de Cloro e PAC) proporcionaram melhor eficiência de remoção de cor no tanque do piloto (Eficiência de remoção de cor de P1 a P2);
- Para as maiores dosagens de NaOCl e PAC observou-se um maior aumento da condutividade (em torno de 20%) e de cloreto (em torno de 45%), enquanto que o aumento foi aproximadamente a metade para as menores dosagens, corroborando a hipótese de que estas variáveis são influenciadas pela dosagem de PAC e NaOCl.

Desinfecção com UV

Os resultados dos testes de avaliação do método de desinfecção utilizando a tecnologia UV estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados dos testes realizados no piloto com o método de desinfecção UV.

| | | Tecnologia UV | | | | | | | | | |
|----------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|--|--|--|----------------------------------|--|
| Teste - Semana | Lâmpadas utilizadas e vazão do piloto | Dose-UV (mJ/cm ²) | Eficiência remoção E.Coli | | Eficiência remoção Coliformes totais | | Eficiência de remoção de cor (do P1 ao P2) | Eficiência de remoção de cor (do P1 ao P4) | Varição de Condutividade (do P1 ao P4) | Varição de Cloreto (do P1 ao P4) | |
| | | | % | Log de remoção | % | Log de remoção | % | % | % | % | |
| 19 a 23/10 | 1 Lâmpada, Q=16,5L/min | 5 | 99,3227% | 2,2 | 99,9097% | 3,0 | 15% | 75% | 3% | 10% | |
| 26 a 30/10 | 2 Lâmpadas, Q=18L/min | 20 | 99,9574% | 3,4 | 99,9952% | 4,3 | 9% | 65% | 5% | 11% | |
| 03 a 06/11 | 3 Lâmpadas, Q=18L/min | 30 | 99,9913% | 4,1 | 99,9972% | 4,5 | -30% | 70% | 2% | 10% | |
| 09 a 13/11 | 3 Lâmpadas, Q=13 L/min | 40 | 99,9979% | 4,7 | 99,9997% | 5,5 | 3% | 61% | 7% | 9% | |
| 16 a 19/11 | 1 Lâmpada, Q=13L/min | 10 | 99,9922% | 4,1 | 99,9988% | 4,9 | 31% | 78% | 7% | 18% | |

Nesta etapa foram observados os seguintes aspectos:

- À medida que se aumentou a dose UV aplicada, as eficiências de remoção de E.Coli e Coliformes Totais também aumentaram. Apenas as menores dosagens testadas (de aprox. 5 e 20 mJ/cm²)

apresentaram eficiências de remoção de E.Coli menores do que 4 log, sendo que a partir de 30 mJ/cm² não verificou-se variação significativa de eficiência;

- Ao tentar simular a dose de 10 mJ/cm², reduziu-se muito a vazão do piloto e, conseqüentemente, a eficiência do tanque aumentou devido ao maior tempo de detenção hidráulico neste reator (4,62h da vazão de 13 L/min, ao invés das 3,33h da vazão de 18L/min). Este fato provavelmente influenciou o resultado do teste, resultando em uma eficiência de remoção de E.Coli da ordem de 4 log;
- Um importante parâmetro que influencia a eficiência de desinfecção do sistema UV é a transmitância UV 254 nm (ou UV-T). Esta variável não foi medida ao longo de todo o teste, por carência de equipamento. Contudo, a UV-T foi medida durante 4 semanas do teste, sendo identificada a UV-T média após o filtro (P3) de 82%;
- Ao adotar a tecnologia UV ao invés do cloro (mantendo a dosagem de PAC), verificou-se uma redução do acréscimo dos parâmetros condutividade e cloreto em relação ao teste simulando o método atual da ETE. Enquanto que no método atual a condutividade e a cloreto aumentaram cerca de 20 e 45%, no método com UV os acréscimos foram de 5% e 10%, respectivamente;
- Já com relação ao parâmetro cor aparente, não se observou diferença significativa entre os métodos atual e UV (ambos em torno de 70% do ponto inicial – P1 ao final – P4), devido à capacidade do filtro de reter a cor aparente.

Combinação dos métodos de desinfecção de cloro e UV

Os resultados dos testes de avaliação do método de desinfecção utilizando a tecnologia UV estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados dos testes no piloto com o método de desinfecção combinado de cloro+UV.

| Teste - Semana | Lâmpadas utilizadas e vazão do piloto | Dose-UV (mJ/cm ²) | Técnicas cloro+UV combinadas | | | | | | | |
|----------------|---|-------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|--|--|--|----------------------------------|
| | | | Eficiência remoção E.Coli | | Eficiência remoção Coliformes totais | | Eficiência de remoção de cor (do P1 ao P2) | Eficiência de remoção de cor (do P1 ao P4) | Varição de Condutividade (do P1 ao P4) | Varição de Cloreto (do P1 ao P4) |
| | | | % | Log de remoção | % | Log de remoção | % | % | % | % |
| 30/11 a 04/12 | 2 Lâmpadas, Q=18L/min + Cloro (8 mg/L) | 20 | 99,9936% | 4,2 | 99,9977% | 4,6 | 39% | 68% | 8% | 18% |
| 15/02 a 19/02 | 1 Lâmpada, Q=16,5L/min + Cloro (8 mg/L) | 5 | 99,9796% | 3,7 | 99,9614% | 3,4 | 44% | 65% | 6% | 22% |
| 22/02 a 26/02 | 1 Lâmpada, Q=16,5L/min + Cloro (8 mg/L) | 5 | 99,9920% | 4,1 | 99,9945% | 4,3 | 36% | 77% | 10% | 34% |

No teste de combinação dos métodos de desinfecção foram observados os seguintes aspectos:

- Mesmo com menores doses de cloro (1/4 da dose atual) e UV (apenas 5 mJ/cm²) foram obtidas eficiências de remoção de E.Coli em torno de 4 log, equivalente à eficiência do método atualmente adotado na ETE;
- Os acréscimos de condutividade e cloreto foram, em média, de 8% e 24%, menores do que os do método atual de 20 e 45%, respectivamente;
- A remoção do parâmetro cor aparente também ficou na faixa de 70%, devido ao processo de filtração, como nas etapas anteriores.

Avaliação técnica dos métodos testados

O gráfico da Figura 5 apresenta as eficiências de remoção, em termos de log de remoção, de E.Coli dos testes com UV e combinação cloro+UV, respectivamente.

Observou-se nestes testes que, com exceção da dose-UV 10 mJ/cm² (que teve seu resultado influenciado pelo maior tempo de detenção no piloto), a eficiência do método de UV foi crescente à medida que se aumentou a dose-UV aplicada (pontos azuis dos gráficos).

Quando se aplicou a combinação dos métodos (pontos verdes dos gráficos), foram obtidas eficiências equivalente à obtida pelo método atual (linha vermelha dos gráficos), com menores doses-UV e de cloro, especialmente em termos de remoção de E.Coli (principal indicador).

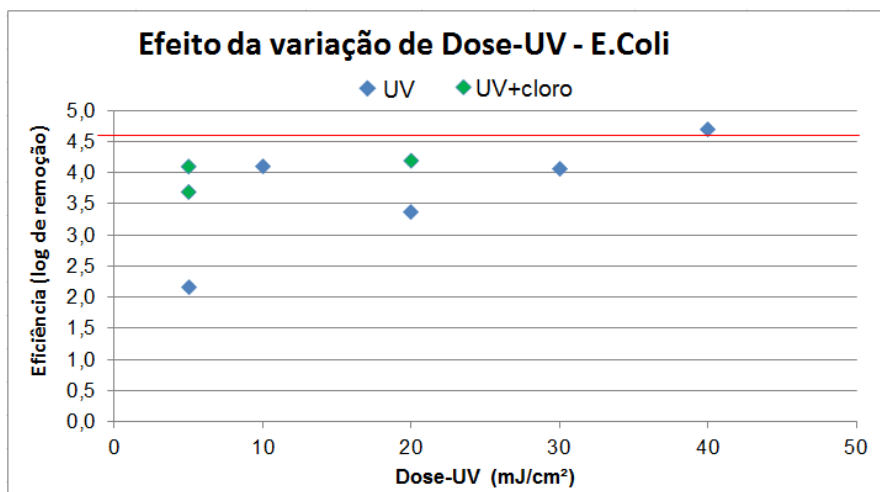


Figura 5: Efeito da variação da dose-UV sobre remoção de E. Coli. A linha vermelha representa o patamar de eficiência obtido pelo método atual (dosagem de cloro).

Estes resultados sugerem que com a aplicação do método combinado pode-se obter:

- Menor consumo energético, já que a dose-UV poderá ser inferior;
- Menores concentrações de cloro e condutividade (aproximadamente metade do método atual com apenas cloro) no efluente final da ETE, já que a dose de cloro pode ser reduzida.

Avaliação econômica

Considerando as premissas apresentadas, a avaliação econômica indicou pelo método do VPL que o retorno do investimento ocorre após 9 anos de operação, conforme se pode verificar na Tabela 7 e na Figura 6.

Tabela 7: Avaliação econômica para um horizonte de operação de 20 anos.

| Período | Custo de investimento (CAPEX) | | Custo de operação (OPEX) | | | | | | Cloro | UV + Cloro |
|---------|-------------------------------|----------------|--------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Cloro | UV + Cloro | Cloro | | | UV + Cloro | | | | |
| | Equipamento | Equipamento | Manutenção | Hipoclorito de sódio | Energia elétrica | Manutenção (Lâmpadas) | Hipoclorito de sódio | Energia elétrica | | |
| Ano 0 | - | R\$ 517.665,29 | - | - | - | - | - | - | R\$ 0,00 | R\$ 517.665,29 |
| Ano 1 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 135.490,35 | R\$ 573.828,90 |
| Ano 2 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 260.874,73 | R\$ 625.803,36 |
| Ano 3 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 376.906,91 | R\$ 673.901,15 |
| Ano 4 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 484.284,46 | R\$ 718.411,40 |
| Ano 5 | R\$ 6.400,00 | R\$ 6.400,00 | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 587.996,57 | R\$ 763.945,38 |
| Ano 6 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 679.953,31 | R\$ 802.063,38 |
| Ano 7 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 765.051,16 | R\$ 837.338,23 |
| Ano 8 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 843.801,72 | R\$ 869.982,00 |
| Ano 9 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 916.678,41 | R\$ 900.190,93 |
| Ano 10 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 984.119,37 | R\$ 928.146,62 |
| Ano 11 | R\$ 6.400,00 | R\$ 6.400,00 | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 1.049.258,15 | R\$ 956.745,29 |
| Ano 12 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 1.107.013,71 | R\$ 980.686,18 |
| Ano 13 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 1.160.461,39 | R\$ 1.002.841,37 |
| Ano 14 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 1.209.922,50 | R\$ 1.023.344,04 |
| Ano 15 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 1.255.694,39 | R\$ 1.042.317,46 |
| Ano 16 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 1.298.052,25 | R\$ 1.059.875,68 |
| Ano 17 | R\$ 6.400,00 | R\$ 6.400,00 | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 1.338.964,17 | R\$ 1.077.837,73 |
| Ano 18 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 1.375.238,88 | R\$ 1.092.874,37 |
| Ano 19 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 1.408.807,93 | R\$ 1.106.789,45 |
| Ano 20 | - | - | R\$ 128,00 | R\$ 145.193,01 | R\$ 1.089,87 | R\$ 18.561,33 | R\$ 36.298,25 | R\$ 5.830,82 | R\$ 1.439.873,13 | R\$ 1.119.666,62 |
| | | | | | | | | | R\$ 1.497.628,69 | R\$ 1.143.607,52 |

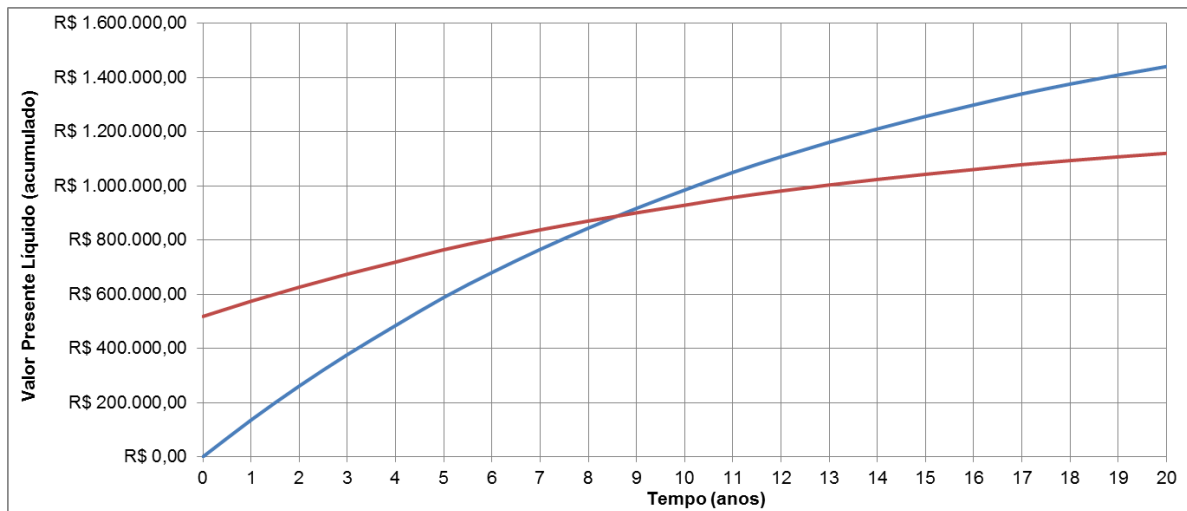


Figura 6: Gráfico do Valor Presente Líquido Acumulado para um horizonte de operação de 20 anos.

CONCLUSÕES

A avaliação técnica da tecnologia UV indicou que sua adoção implica em uma menor formação dos parâmetros condutividade e cloreto, tomando como referência o método atual aplicado na ETE (cloração). Enquanto que no método atual a condutividade e o cloreto aumentaram nos testes cerca de 20 e 45%, no método com UV os acréscimos foram de 5% e 10%, respectivamente. Quanto ao parâmetro cor aparente, pouca diferença foi observada no piloto, já que uma de suas unidades era o filtro, principal responsável pela redução desta variável no teste.

Em termos de eficiência de desinfecção, representada em remoção de E.Coli, observou-se que caso seja adotada a técnica de UV, a dose mínima necessária para conferir eficiência equivalente ao método atual (remoção de 4 log de E.Coli) é de 30 mJ/cm².

Entretanto, considerando a capacidade de oxidação de cor do cloro, bem como a necessidade de manutenção de um residual de cloro na água final de reuso produzida, foram realizados testes com a combinação dos métodos cloro+UV. Estes testes demonstraram que ao combinar os métodos é possível reduzir as doses de UV e cloro para ¼ da dose necessária caso fossem aplicados métodos isolados, mantendo a mesma eficiência de desinfecção (4 log de remoção de E.Coli).

A avaliação econômica indicou que a adoção de uma combinação dos métodos de cloração e UV se tornaria mais econômica do que o método atual (apenas com cloro) após um período de menos de 9 anos de operação, devido principalmente à redução significativa de cloro aplicado na ETE. Isto comprova que, além do ganho de qualidade que a água de reuso teria ao adotar a tecnologia testada, também seria vantajoso economicamente adotar a tecnologia UV, considerando a vida útil dos equipamentos em questão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARNESEN, A.S. et al. Desinfecção de esgoto tratado pela técnica de ultravioleta: testes na ETE/Reuso Jesus Netto. In Anais 26º Encontro Técnico da AESABESP. 2015.
2. METCALF & EDDY. "Wastewater engineering: treatment and reuse". McGraw-Hill, 4 ed. 1819p, 2004.