

I-163 – DESINFECÇÃO POR ULTRAVIOLETA: UMA TECNOLOGIA VERDE E ENERGETICAMENTE EFICIENTE DE DESINFECÇÃO DE ÁGUA

Larissa Matos Scarpelini⁽¹⁾

Especialista em Gestão Ambiental pelo PECE-EPUSP e graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Kirsten Meyer⁽²⁾

Engenheira Ambiental pela Brandenburg Technical University of Cottbus, Alemanha, com mais de 15 anos de experiência em sistemas de desinfecção por ultravioleta.

Endereço⁽¹⁾: Rua Telmo Coelho Filho, 40 – Vila Albano – São Paulo-SP – CEP: 05543-020 – Brasil – Tel.: +55 (11) 3732-0214 – e-mail: larissa.scarpelini@xyleminc.com.

Endereço⁽²⁾: Boschstraße 4, 32051 – Herford – Alemanha – e-mail: kirsten.meyer@xyleminc.com.

RESUMO

A desinfecção é uma prática comum no processo de tratamento de água para proteção da saúde pública e da vida aquática contra patógenos. Desde o início do século 20, a cloração é a tecnologia mais utilizada. Com anos depois, porém, esta tecnologia vem sendo cada vez mais questionada devido à crescente preocupação com a formação de subprodutos tóxicos e carcinogênicos durante a desinfecção com cloro.

Como consequência, processos de desinfecção sem a utilização de químicos, como a irradiação ultravioleta (UV), têm ganhado importância. A fim de garantir aos operadores o desempenho confiável dos sistemas de desinfecção por UV, foram desenvolvidas em vários países normas de projeto e operação destes sistemas. O desenvolvimento da tecnologia da lâmpada UV e os avanços no projeto do sistema UV resultaram em sistemas energeticamente eficientes, de fácil operação e manutenção, tornando-os uma solução verde e competitiva em relação ao cloro.

Assim, atualmente, centenas de milhares de sistemas UV instalados ao redor do mundo provam a confiabilidade desta tecnologia de desinfecção, desde a desinfecção de efluentes primários e secundários para a descarga em áreas sensíveis, até o fornecimento de água potável convencional e tratamento de efluentes para reuso em processos industriais específicos.

Este artigo fornece uma visão geral dos benefícios e dos avanços da tecnologia de desinfecção por ultravioleta e também alguns exemplos de instalações existentes.

PALAVRAS-CHAVE: Ultravioleta, Desinfecção, Cloro, Tratamento de Água, Tratamento de Efluentes.

INTRODUÇÃO

Considerando a relação entre a contaminação patogênica das águas superficiais e as doenças transmitidas pela água, tem-se hoje um número crescente de leis que definem os limites de bactérias coliformes e outros organismos indicadores no descarte de efluentes em corpos hídricos. Enquanto no passado a cloração era frequentemente a tecnologia escolhida para desinfecção, um alto número de impactos negativos associados à desinfecção com cloro, como mostrado na Tabela 1, apoiou a busca de tecnologias de desinfecção alternativas. Entre estas, a radiação ultravioleta (UV) é considerada a solução mais simples e de melhor custo-benefício que não altera a química da água.

Tabela 1: Comparação entre a Desinfecção por Cloração e UV

CLORAÇÃO	UV
Afeta gosto & odor	Não afeta gosto & odor
Gera subprodutos carcinogênicos	Não gera subprodutos carcinogênicos
Químicos perigosos	Sem químicos perigosos
Muda a composição química da água	Não muda a composição química da água
Corrosivo	Não corrosivo
Longo tempo de contato (até 25 min)	Curto tempo de contato (< 5 segundos)
Tóxico	Não tóxico

Especificamente em águas residuais, altos níveis de carbono orgânico total (COT) podem demandar altas doses de cloro para atingir os níveis de descarte definidos, o que, por sua vez, aumenta o potencial de formação de subprodutos de desinfecção. Enquanto no abastecimento de água potável pode ser desejável um residual de desinfecção, muitas vezes é necessário o oposto nos descartes de águas residuais: cada vez mais regulamentações exigem uma etapa específica de decloração para proteger a vida aquática e áreas ambientalmente sensíveis do residual tóxico do cloro.

TECNOLOGIA DE DESINFECÇÃO UV

Mecanismo de Desinfecção

A desinfecção UV é um processo físico durante o qual a radiação UV-C torna os microorganismos inofensivos através da alteração das informações genéticas de seu DNA (Figura 1). Com isto, os microorganismos perdem a capacidade de se reproduzir e, conseqüentemente, seu efeito patogênico. Com a tecnologia UV é possível destruir mais de 99,99% de todos os patógenos dentro de segundos sem adição de produtos químicos, os quais poderiam levar a subprodutos de desinfecção indesejados.

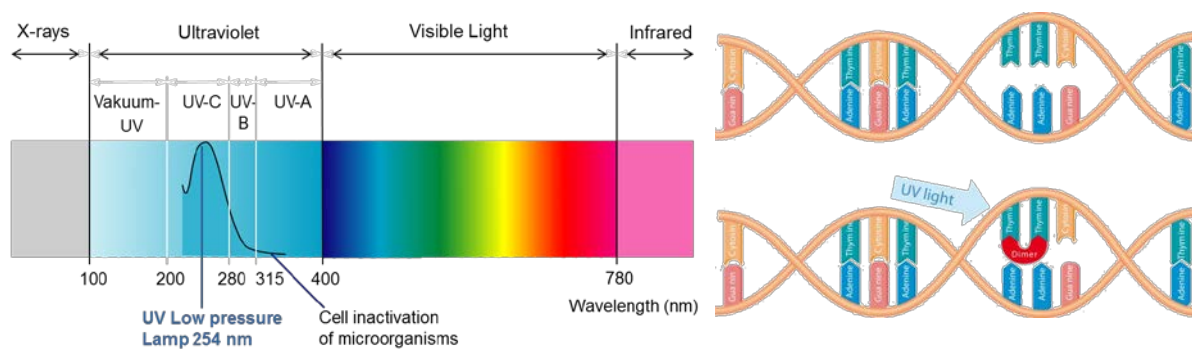


Figura 1. Mecanismo de desinfecção por radiação UV

Devido à natureza física do processo de desinfecção por luz ultravioleta, qualquer tipo de microorganismo será afetado por ele, inclusive protozoários, como *Cryptosporidium* e *Giardia*, que são conhecidos por serem resistentes ao cloro. No entanto, pesquisas demonstram que a sensibilidade à UV pode variar de acordo com o tipo de patógeno, bem como com a meta de redução e as condições da água – em especial no caso das águas residuais.

Tecnologia da lâmpada UV

Existem basicamente 2 tipos de lâmpadas UV comumente aplicadas nos sistemas de desinfecção UV atuais: lâmpadas UV de média pressão e lâmpadas UV de baixa pressão e alta intensidade (amálgama). Os dois tipos de lâmpadas diferem significativamente nas suas propriedades físicas, nos espectros de emissão e na vida útil, conforme ilustrado na Figura 2.

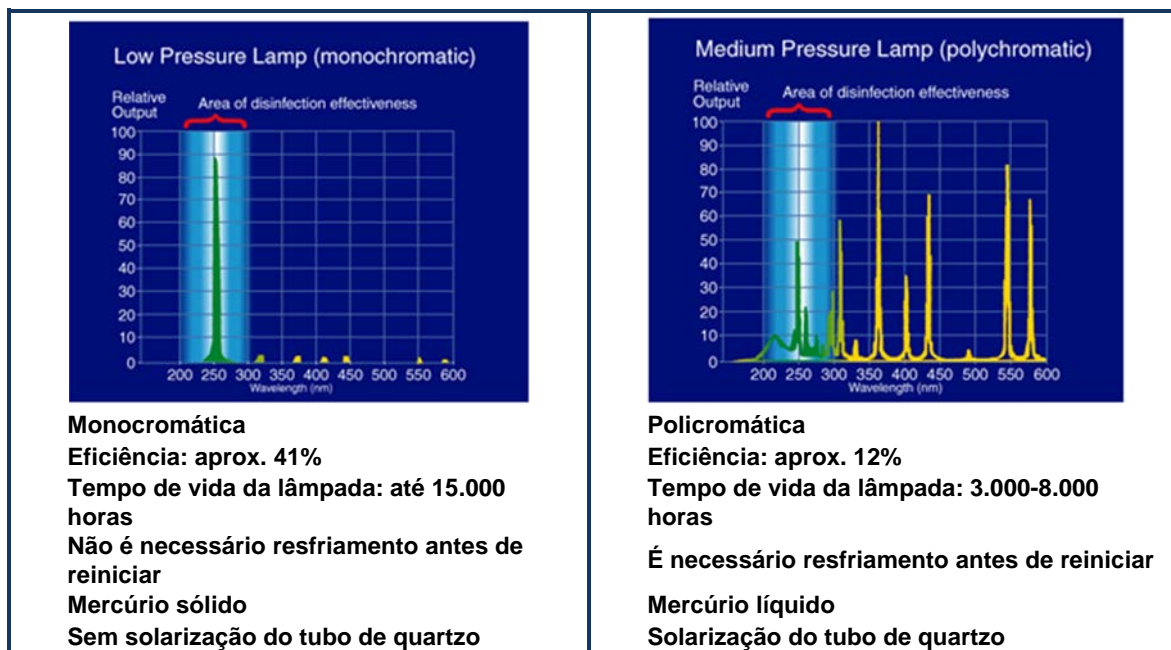


Figura 2. Comparativo entre os tipos de lâmpadas UV

Devido à maior eficiência da lâmpada, que é descrita pela relação entre a entrada de energia elétrica e conversão em luz UVC germicida, as lâmpadas UV de baixa pressão e alta intensidade são hoje mais amplamente utilizadas em aplicações de desinfecção de águas residuais. As lâmpadas de baixa pressão se destacam também pelo menor consumo de energia, menor potencial de incrustação e maior período de vida útil em relação aos sistemas com lâmpadas de média pressão e, por isto, têm sido preferidas na desinfecção de efluentes. Esta tendência é ainda mais reforçada por gerações mais novas e avançadas de lâmpadas de amálgama, que permitem reduções significativas no número de lâmpadas em comparação com as anteriores, mantendo a sua elevada eficiência energética.

Reatores UV

A fim de assegurar a desinfecção adequada de uma determinada vazão de água ou efluente, as lâmpadas UV são dispostas em sistemas de UV de canal aberto ou em reatores fechados.

Devido ao seu conceito modular e baixa perda de carga, os sistemas UV de canal aberto são frequentemente selecionados para a desinfecção de efluentes municipais. Tais sistemas são, na maioria dos casos, concebidos para instalação em canais de concreto e podem ser operados por vazão a gravidade. A Figura 3 apresenta uma visão geral dos componentes de um sistema UV de canal aberto.

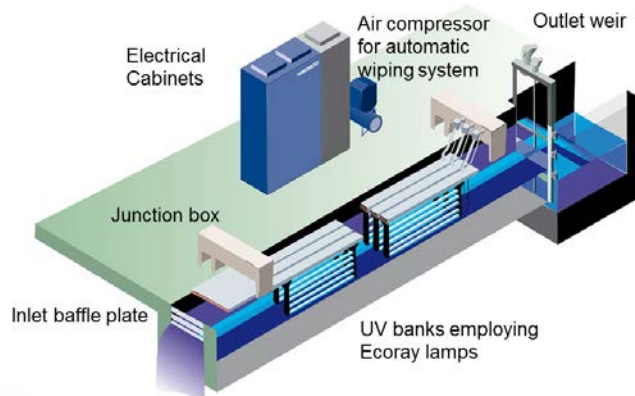


Figura 3. Visão geral de componentes de sistema UV de canal aberto

Os sistemas de reator fechado são instalados em tubulações pressurizadas, como as encontrados em sistemas de produção de água potável ou reuso de água. Nestes, as lâmpadas UV são agrupadas num reator de aço inoxidável.

Em qualquer caso, a fluidodinâmica computacional auxilia a melhoria do projeto do sistema UV. Desta forma, a distribuição de intensidade UV e o padrão de fluxo hidráulico puderam ser otimizados e a eficiência do sistema UV melhorada ao longo do tempo.

Parâmetros de Projeto

Há uma série de parâmetros que determinam o tamanho do sistema UV, bem como o nível de desinfecção que se pode alcançar. Estes parâmetros são:

- Vazão de projeto;
- Transmitância UV (UVT): descreve a absorvância da luz UV após uma camada de água (usualmente considerado 1 cm);
- Sólidos suspensos totais e tamanho de partículas:

Limitam o nível de desinfecção que se pode atingir uma vez que os microorganismos podem ficar na “sombra” ou serem incorporados nestas partículas, e, em ambos os casos, não ficarem expostos à radiação UV. A Figura 4a dá uma visão geral sobre as bactérias associadas às partículas, que, portanto, estão fora do alcance da desinfecção por UV.

- Curva de resposta do organismo indicador à dose UV

Dependendo do organismo, da composição do efluente e das etapas de tratamento anteriores, o comportamento de reposta de um microrganismo a certa dose de UV pode variar. A Figura 4b dá uma visão geral da variação do comportamento de resposta à dose por um organismo indicador comumente utilizado.

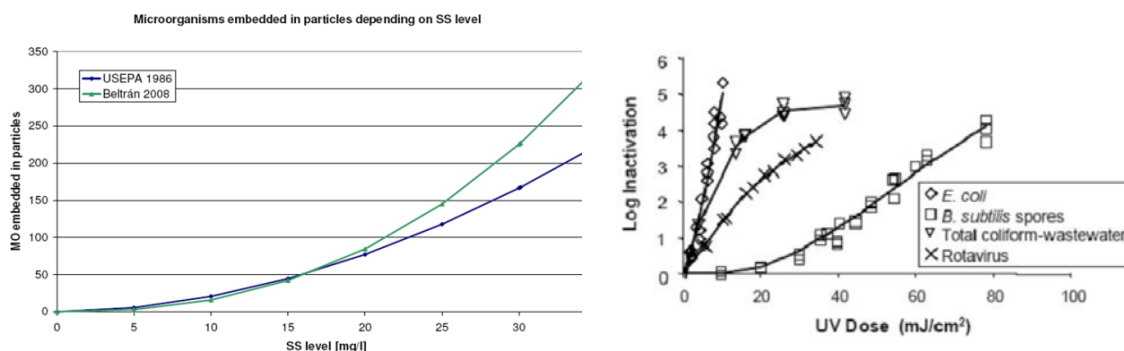


Figura 4. 4a. Microrganismo associados em partículas; 4b. Curvas de resposta das doses UV de organismos indicadores comuns.

- Nível de redução do organismo indicador

As curvas de resposta à dose não são lineares, mas exibem certa tendência, como também ilustrado na Figura 4b. Consequentemente, é necessária uma dose significativamente mais baixa para se conseguir uma inativação de 2 log a partir de uma maior contagem de organismos na entrada em comparação com uma redução de 2 log a partir de uma menor contagem na entrada.

NORMAS DO PROJETO

Os sistemas UV são tipicamente projetados para atingirem determinada dose UV, que deve alcançar a remoção de microorganismos exigida. Uma vez que a dose de UV não pode ser efetivamente mensurada, todas as etapas de desinfecção são usualmente baseadas na equação Concentração X Tempo – concentração do desinfetante multiplicado pelo tempo de contato – para chegar à “dose” a qual o patógeno deve ser exposto. Este conceito é

chamado PSS (do inglês, *Point Source Summation*) e tem sido usado desde os anos 1980. Ele é simplesmente um modelo teórico e matemático que assume uma distribuição da intensidade UV e um padrão de escoamento através do reator UV ideais e as propriedades físicas das lâmpadas e da câmara do reator.

Exceto pela transmitância UV e pela vazão, os parâmetros de projeto discutidos acima não são considerados, assim como a eficiência de um projeto de sistema UV.

Devido à preocupação com a saúde pública na desinfecção UV de água potável, foram implementados bioensaios em diversos países. Estes determinam a verdadeira performance do sistema UV sob um conjunto de condições de teste definidas (validação). Normas sobre como conduzir estas validações e a análise dos dados correspondentes também foram desenvolvidas para orientar o projeto e a operação de sistemas de desinfecção UV. Estas normas estão apresentadas abaixo.

- Manual Guia de Desinfecção por Ultravioleta (UVDGM, *Ultraviolet Disinfection Guidance Manual*) da USEPA: é o protocolo de validação mais completo e permite maior flexibilidade de organismos de validação utilizados e métodos para determinar a dosagem em operação. É também base para os próximos dois protocolos.
- Diretrizes para validação de processos de tratamento para redução de patógenos – Suporte a sistemas de água reciclada Classe A em Victoria, AUS, 2013.
- Protocolo Uniforme para validação de efluentes, 2011, International UV Association.
- Instituto de Pesquisa Nacional de Águas (NWRI – National Water Research Institutes) – Diretrizes para Desinfecção Ultravioleta para Água Potável e Reuso de Água (2012): foi desenvolvido originalmente para aplicações de reuso com altas doses (Califórnia Título-22). Esta norma é adaptada para atingir um nível de desinfecção de 5-log de inativação de poliovírus e um número mais provável de coliformes totais de 2,2 [NMP] /100 mililitros [ml] a uma mediana de 7 dias. Estes valores são considerados como livres de patógenos.

SISTEMA UV: OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Para operar um sistema ultravioleta e atingir o nível de desinfecção exigido, deve-se utilizar um sensor UV para um monitoramento e controle ativos. Desta forma, as lâmpadas UV modernas podem ser automaticamente reguladas para fornecer somente a energia necessária para o nível de desinfecção desejado e, assim, economizar energia enquanto mantêm um desempenho de desinfecção confiável.

A operação e a manutenção de um sistema UV são simples, uma vez que a maioria dos sistemas em canal aberto é equipada com micro-controladores inteligentes ou CLP, os quais controlam autonomamente o sistema UV em resposta ao monitoramento de vazão, transmitância UV e intensidade UV.

Os custos de operação residem nos custos de energia e na reposição de lâmpadas após o tempo de vida útil destas. As melhorias contínuas na tecnologia das lâmpadas e balastros resultaram em lâmpadas UV mais duradouras que são garantidas por até 1,5 anos. Com isto, é necessário apenas um pequeno envolvimento do operador em comparação com a cloração, em que a manipulação deste químico perigoso requer um alto nível de medidas de segurança para seu transporte, armazenamento e manuseio.

Novos projetos de sistemas, incorporando sistemas de limpeza automática e mecanismos de içamento integrados, aumentam ainda mais a simplicidade no manuseio desses sistemas.

EXEMPLOS DE INSTALAÇÃO

Carmel, Estados Unidos

Devido à crescente demanda da população de 70.000 pessoas, a cidade de Carmel decidiu ampliar sua planta de tratamento de efluentes para atender às necessidades atuais e futuras.

Uma das principais melhorias da planta foi o sistema de desinfecção. Antes da expansão, a ETE de Carmel utilizava grandes quantidades de cloro e produtos químicos de dióxido de enxofre para a desinfecção primária. Assim, a cidade decidiu substituir completamente o seu sistema químico existente por um sistema de desinfecção UV, tendo em vista que o uso de produtos químicos para o tratamento de águas residuais pode resultar em efeitos colaterais prejudiciais ao meio ambiente e também criar condições de trabalho perigosas.

Para esta finalidade, escolheu-se um sistema UV de canal aberto horizontal (Figura 5) para uma vazão futura de 1,0 m³/s. Equipado com 288 lâmpadas UV Ecoray® de baixa pressão e alta intensidade e um sistema de limpeza automático livre de químicos, o sistema UV opera usando controle baseado na intensidade UV para assegurar que limites de desinfecção sejam atingidos e ultrapassados. Este controle baseado na intensidade utiliza um sensor UV localizado em cada banco de lâmpadas para medir em tempo real o envelhecimento da lâmpada, incrustação e os parâmetros de qualidade de água para variar a potência da lâmpada. Isto garante a dose apropriada enquanto possibilita o mínimo consumo de energia.



Figura 5. Sistema UV Carmel, dividido em dois canais paralelos.

Assim, a substituição do tratamento químico pela tecnologia UV para a desinfecção primária eliminou o risco de descarga de produtos químicos tóxicos em lagos e rios próximos. Além disso, o sistema UV melhorou drasticamente as contagens de coliformes no efluente e excedeu em muito a regulamentação do estado, de máximo de 235 E.Coli por 100 ml. A contagem de coliformes, que antes variava entre 100 e 235 E.Coli por 100 ml com a desinfecção química, foi reduzida para 54 CFU por 100 ml.

Manteca

A ETE de Manteca trata a água de chuva e o efluente doméstico da cidade de aproximadamente 66.000 habitantes e utiliza um sistema UV como etapa final de tratamento terciário, após a filtração, antes do descarte no Rio San Joaquin (São Francisco, EUA).

O sistema UV de canal aberto (Figura 6), fabricado e comissionado em 2007, possui 2.240 lâmpadas de alta intensidade e baixa pressão instaladas em dois canais paralelos. Há cinco bancos instalados por canal, cada um com 224 lâmpadas. A planta UV foi projetada para os seguintes parâmetros de efluente:

- Vazão média de 430 l/s e vazão máxima de 840 l/s
- Consumo máximo de energia: 807 kW
- Dose UV: 100 mJ/cm²
- Sólidos suspensos: ≤ 6 ppm
- Transmitância mínima > 55%



Figura 6. Sistema UV Manteca com dois canais paralelos de cinco bancos de lâmpadas cada.

A planta UV foi projetada de acordo com a norma NWRI e os critérios de reuso de água Califórnia Título 22, os quais exigem os seguintes níveis de desinfecção:

- Coliformes totais (mediana 7 dias) < 2.2 NMP / 100 ml
- Coliformes totais (um evento em 30 dias) < 23 NMP/ 100 ml

Durante o comissionamento e operação inicial do sistema, uma análise independente comprovou que o sistema atendia às especificações exigidas.

Uma vez que o sistema foi projetado para capacidade futura e, como exigência da NWRI, um dos dois canais deve sempre operar em modo standby, o sistema não funciona em toda a sua capacidade e as lâmpadas ficam por grandes períodos fora de operação. Originalmente, o sistema UV de Manteca foi concebido para ser controlado pela vazão, ou seja, a vazão determinava quantos bancos deviam operar. Neste modo, os níveis de potência das lâmpadas são definidos com base nas intensidades que o sensor mede.

Em 2009, foi realizada uma auditoria no sistema instalado, com o objetivo de melhorar a eficiência e o balanço energético dos sistemas UV. Uma parte da auditoria foi medir o consumo de energia e os intervalos de liga/desliga do banco do sistema UV de Manteca. Com a alteração da vazão e da transmitância, várias mudanças nos bancos foram analisadas. O consumo de energia foi determinado de acordo com a vazão e o tempo em que cada banco permaneceu energizado.

Foram registradas as seguintes observações:

- O banco de teste teve tempos de inatividade de 64% e os bancos em standby tiveram tempos de inatividade ainda maiores que 64%.
- Durante períodos de baixa vazão, o sistema operava com apenas um banco devido à configuração de controle por vazão.
- Durante períodos de alta vazão ou alta transmitância, o sistema não aumentou a potência dos bancos em operação, mas permitiu que mais bancos (até quatro) operassem em configurações de potência menores.
- As lâmpadas funcionaram com 50% da sua potência a maior parte do tempo.
- O banco em teste operou com 50% de sua potência durante 88% do tempo.

Os testes demonstraram que o sistema UV de Manteca não estava operando de forma energeticamente eficiente nas condições de alta vazão, nas quais bancos adicionais operavam com baixos níveis (50%) de potência.

Concluiu-se que uma operação com um número mínimo de lâmpadas em serviço e aumento em rampa na potência da lâmpada com o aumento da vazão seria a forma mais eficiente de operação do sistema UV. Para isto, o controle “regulado pela vazão” inicial teve que ser transformado em um controle “regulado pela dose UV”, o que significa que a mudança de bancos e a potência das lâmpadas são reguladas de acordo com as medições reais de dose.

As principais melhorias de controle e alterações realizadas no sistema estão descritas abaixo:

- Implementação de uma equação de dose validada e inclusão de uma medição online de transmitância como base para uma medição de dose UV exata e em tempo real.
- Aumento automático e em rampa da potência das lâmpadas para até 85% da potência máxima em vazões altas e transmitâncias baixas.
- Em vazões baixas, a potência da lâmpada reduz automaticamente em rampa até 50% do valor inicial enquanto desliga os bancos, mantendo um número mínimo exigido de dois bancos em serviço.
- Desligamento do banco de lâmpadas em caso de nível de potência de 50% e dose superior à requerida, independente da vazão.
- Otimização do modo standby e da capacidade de desinfecção usando menos bancos e lâmpadas.

As melhorias de controle resultaram em uma redução média de lâmpadas UV em funcionamento ou disponíveis de 22,5%. Isto foi alcançado com um controle da potência da lâmpada acurado para a dose exigida (sem doses maiores que às exigidas), o que resultou em um número reduzido de bancos em operação, especialmente durante os períodos de alta vazão. Assim, houve uma economia em custos de energia de mais de USD 120 por dia com a melhoria do controle da UV por dose.

CONCLUSÕES

Os avanços tecnológicos, o aumento do conhecimento e a melhoria de projetos promoveram uma crescente mudança da tecnologia de desinfecção, de cloro para ultravioleta. O desenvolvimento da tecnologia da lâmpada UV resultou em lâmpadas UV energeticamente eficientes e de maior vida útil, resultando em menores custos operacionais e redução na necessidade de manutenção. Ao mesmo tempo, a validação do sistema UV proporcionou uma nova perspectiva na confiabilidade do projeto do sistema UV e no controle inteligente do sistema. Assim, a tecnologia UV consolidou-se como uma alternativa de desinfecção verde e competitiva em relação ao cloro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Ultraviolet Disinfection Guidance Manual for the Final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule*. EPA 815-R-06-007, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, 2006.
2. NATIONAL WATER RESEARCH INSTITUTE. *Ultraviolet Disinfection Guidelines for Drinking Water and Water Reuse*. 3a. Edição, 2012
3. WHITBY, E., ROPIC, P., LAWAL, O., SHMIA, S., FERRAN, B. DUSSERT, B. (2011). “Uniform Protocol for Wastewater UV Validation Applications”, IUVA News Vol. 13 No. 2: 26-33.
4. WATER ENVIRONMENT FEDERATION, INTERNATIONAL UV ASSOCIATION: “Ultraviolet Disinfection for Wastewater. Low-Dose Application Guidance for Secondary and Tertiary Discharges”, 2015