

CONCURSO DE PROVAS PÚBLICAS PARA PROVIMENTO DE UMA
VAGA DE PROFESSOR-COORDENADOR DO QUADRO DO INSTITUTO
SUPERIOR DE ENGENHARIA DO INSTITUTO POLITÉCNICO DO
PORTO, NA ÁREA CIENTÍFICA DE ENGENHARIA QUÍMICA, NO
GRUPO DE DISCIPLINAS DE CIÊNCIAS DE ENGENHARIA

Lição a que se refere a alínea a) do n.º 1 do artigo 26.º
do Decreto-Lei n.º 185/81, de 1 de Julho

RAMIRO JOSÉ ESPINHEIRA MARTINS

Porto, Outubro de 2006

**DESINFECÇÃO DE ÁGUAS RESIDUAIS DOMÉSTICAS
POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA**

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	2
2.	DESINFECÇÃO POR UV – ASPECTOS TEÓRICOS.....	5
2.1	Espectro Electromagnético, Energia e Radiação UV	5
2.2	Princípios Básicos de Óptica e Radiação UV.....	8
2.3	Métodos de Avaliação da Intensidade UV	10
2.4	Mecanismos da Desinfecção por UV.....	13
2.5	Cinética de Inactivação	16
2.6	Intensidade Aplicada e Intensidade Efectiva duma Radiação UV	19
2.7	Fotorreactivação e Recuperação no Escuro	21
3.	PROCESSOS DE DESINFECÇÃO POR MEIO DE RADIAÇÃO UV	23
3.1	Informações Preliminares.....	23
3.2	Lâmpadas UV	24
3.2.1	<i>Factores que influenciam o desempenho das lâmpadas</i>	<i>27</i>
3.3	Desempenho do Processo de Desinfecção: Factores Físicos.....	29
3.4	Tipos de Processos	31
3.4.1	<i>Processos com lâmpadas emersas</i>	<i>31</i>
3.4.2	<i>Processos com lâmpadas imersas</i>	<i>33</i>
4.	DIMENSIONAMENTO DE UMA UNIDADE DE DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO UV	38
4.1	Procedimento de Cálculo (reactor de lâmpadas emersas).....	39
5.	MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO	42
5.1	Aspectos Operacionais e de Manutenção	42
5.2	Segurança em Sistemas de Desinfecção por UV	45
6.	BIBLIOGRAFIA	47

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos benéficos da luz solar sobre ferimentos, bem como na prevenção de certas doenças, são conhecidos do homem há vários séculos. No século XVIII, Isaac Newton, ao observar a passagem da luz solar através de um prisma de cristal, descobriu a existência de radiações que não são visíveis ao olho humano.

Actualmente sabe-se que quantidades significativas de radiação visível são produzidas pelo sol, e que uma importante fracção dessas emissões é eficientemente absorvida na atmosfera terrestre em níveis compatíveis com a vida na terra.

Em 1877, Downes e Blunt foram os primeiros investigadores a evidenciar o efeito da luz sobre bactérias e outros organismos.

Uma década mais tarde, os trabalhos realizados por Roux (1887), sobre culturas de bactérias causadoras da difteria comprovaram que meios de cultura expostos à luz solar eram incapazes de sustentar o crescimento bacteriano.

Ward (1892) investigou o efeito de radiação luminosa com diferentes comprimentos de ondas sobre colónias de *Bacillus anthracis* e mostrou que a luz azul era mais letal do que a luz vermelha.

Os efeitos bactericidas da radiação ultravioleta (UV) foram comprovados de forma mais precisa por Barnard e Morgan (1903), que utilizaram correntes eléctricas para produzir radiações com comprimento de onda entre 226 nm e 328 nm.

Apesar da comprovada acção germicida, a aplicação da radiação UV na desinfecção de efluentes praticamente não evoluiu no século XIX e na maior parte do século XX. Dois factores contribuíram para tal:

- a) O lento desenvolvimento de lâmpadas germicidas, concomitante ao desenvolvimento das lâmpadas fluorescentes, cuja comercialização em escala ocorreu por volta de 1940;
- b) O aparecimento da técnica de cloragem, ainda no século XIX, largamente utilizada e com bons resultados na desinfecção.

Nos tempos mais recentes, o emprego de radiação ultravioleta estendeu-se a diversos sectores da actividade humana, com particular interesse devido à sua acção germicida.

No tratamento de efluentes domésticos, a radiação UV mostra-se altamente competitiva com a cloragem, nos casos em que a implantação de uma etapa adicional de descloragem se torna necessária. Esta última etapa tem por função o controlo de subprodutos tóxicos de cloro nos efluentes tratados, como os organoclorados (trihalometanos e outros), que não são gerados nos processos de desinfecção por UV.

O emprego da radiação UV é, neste contexto, uma importante alternativa à desinfecção química de águas residuais. Não ocorre a adição de qualquer tipo de produto à corrente líquida, o que resulta em processos simples, de baixo custo e pouco exigentes em termos de operação e manutenção.

Basicamente, a desinfecção com ultravioleta é conseguida pela exposição dos microrganismos presentes no esgoto à radiação emitida por lâmpadas ultravioleta.

Essa exposição do efluente à radiação UV é feita em canais ou em tubagens sob pressão, designados de reactores fotoquímicos, fotorreactores ou simplesmente reactores UV.

Algumas das principais aplicações da desinfecção UV na actualidade são enumeradas de seguida:

- a) Desinfecção de água para abastecimento: municipal, hospitais, escolas, quartéis, centros comunitários, hotéis e residências.
- b) Desinfecção de efluentes: efluentes domésticos de condomínios, residências e indústrias.
- c) Comercial: aquicultura, laboratórios, aquários, restaurantes e padarias.
- d) Industrial: farmacêutica, bebidas, electrónica, alimentar, têxtil, cosméticos, gráfica, etc.

- e) Protecção para outras tecnologias de tratamento de água: membranas (osmose reversa e ultrafiltração), resinas de desionização, filtros de carvão activado.
- f) Aplicações de UV no ar: exaustão de tanques, ar comprimido estéril e condutas de ar condicionado.

A Tabela 1 resume as principais vantagens e desvantagens dos processos de desinfecção por UV em relação aos demais processos disponíveis actualmente.

Tabela 1. Principais vantagens e desvantagens da aplicação da radiação ultravioleta na desinfecção de águas residuais domésticas (Usepa, 1999).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • A desinfecção com UV é efectiva na inactivação de muitos vírus, esporos e cistos. • A desinfecção com UV é um processo físico que, contrariamente aos desinfectantes químicos, elimina a necessidade de gerir, manusear, transportar e armazenar produtos químicos tóxicos / perigosos / corrosivos. • Não gera efeitos residuais prejudiciais ao homem ou vida aquática. • A desinfecção com UV é facilmente controlada pelos operadores. • A desinfecção com UV tem um tempo de contacto menor quando comparada com outros agentes desinfectantes (20 a 30 segundos com lâmpadas de baixa pressão). • O equipamento de desinfecção UV requer menos espaço que outros métodos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixas dosagens podem não ser efectivas na inactivação de alguns vírus, esporos e cistos. • Os microrganismos podem, às vezes, reparar e reverter os efeitos destrutivos da radiação UV por meio de um mecanismo de reactivação (fotorreactivação), ou na ausência de luz (recuperação no escuro). • Necessidade de um programa preventivo para controlo da formação de biofilmes no reactor. • Sólidos suspensos totais e turvação do efluente prejudicam a eficiência de inactivação. • Os custos da desinfecção UV não são competitivos com a cloragem, mas tornam-se competitivos quando comparados com o processo de cloragem-descloragem.

2. DESINFECÇÃO POR UV – ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Espectro Electromagnético, Energia e Radiação UV

A luz pode ser caracterizada como parte do espectro de ondas electromagnéticas, que cobre uma grande faixa de comprimentos de ondas, desde os raios X ($\lambda \leq 10^{-9}$ m) até ondas de rádio (comprimento de onda: $\lambda \geq 1$ m) (Figura 1).

As radiações electromagnéticas com comprimentos de onda curtos, caso da luz ultravioleta, assumem comportamento corpuscular (fotões) governado pela física quântica (Chang, 1977).

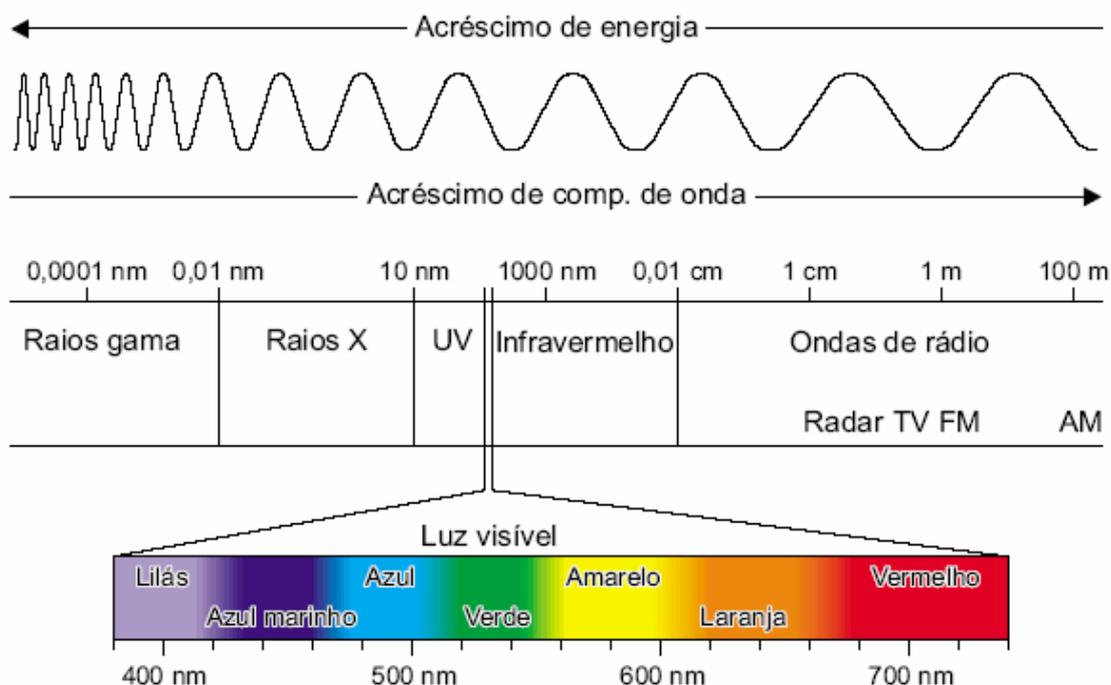


Figura 1. Localização da faixa de comprimento de onda UV, dentro das radiações electromagnéticas e espectro visível (Ryer, 1997).

A quantidade de energia de um fotão é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação emitida, de acordo com a Equação 1.

$$E_{\lambda} = (hc / \lambda)A \quad (1)$$

em que:

- E_{λ} , energia associada a um determinado comprimento de onda (kcal/mol);
- h , constante de Planck ($1,583 \times 10^{-37}$ kcal.s);
- C , velocidade da radiação electromagnética no vácuo (3×10^{17} nm/s);
- λ , comprimento de onda da radiação electromagnética (nm);
- A , número de Avogadro ($6,023 \times 10^{23}$ fotões/mol).

Daqui resulta que, a radiação infravermelha com comprimento de onda superior a 1200 nm e baixa energia associada, é praticamente incapaz de causar uma modificação química nos compostos. O seu principal efeito é o aumento da temperatura, resultado da conversão da energia associada à radiação em calor.

Por outro lado, se a absorção de um fotão por uma molécula promove a sua fotólise, a energia dos fotões é suficiente para romper uma ligação específica ou várias ligações entre os átomos que compõem a molécula fragmentada.

O termo fotólise refere-se à interacção da radiação luminosa com as moléculas, provocando a ruptura das ligações químicas, fragmentando-as. As modificações fotoquímicas ocorrem comumente associadas às radiações com comprimento de onda entre 1200 e 200 nm. Proteínas e ácidos nucleicos absorvem intensamente a radiação na faixa de 100 a 280 nm, o que resulta em modificações fotoquímicas que podem desequilibrar o metabolismo das células e, eventualmente conduzir à sua morte. Assim, a região mais efectiva do espectro situa-se em torno do comprimento de onda de 260 nm, em que a energia é absorvida com maior intensidade pelos ácidos nucleicos.

De acordo com a Equação 1, a energia associada à radiação com esse comprimento de onda é de 110 kcal/mol, valor superior ao limite de vários sistemas biológicos (Tabela 2).

Tabela 2. Energia de ligação para vários sistemas biológicos (WEF, 1996).

Ligação	Energia de dissociação da ligação (kcal/mol)
O–H	110 – 111
C–H	96 – 99
N–H	93
C=O	173 – 181
C–N	69 – 75
C=C	146 – 151
C–C	83 - 85

A luz ultravioleta pode ser dividida em três faixas, de acordo com os efeitos provocados nos seres vivos:

- UV-A: radiação com comprimento de onda entre 315 nm (90,8 kcal/mol) e 400 nm (71,5 kcal/mol). É o menos perigoso para os seres humanos, devido à baixa energia. É o tipo de radiação UV utilizada para causar fluorescência em materiais, sendo muito utilizado em fototerapia e câmaras de bronzamento (Ryer, 1997).
- UV-B: comprimento de onda entre 280 (102 kcal/mol) e 315 nm (90,8 kcal/mol). Trata-se da forma mais destrutiva da luz UV, dado que possui energia suficiente para provocar danos em tecidos biológicos e em quantidade mínima para não ser completamente absorvida na atmosfera. É a forma de radiação UV responsável pelo aparecimento de cancro da pele (Ryer, 1997).
- UV-C: comprimento de onda compreendido entre 200 (143 kcal/mol) e 280 nm (102 kcal/mol); radiação com propriedades germicida. Os fótons de luz nesta faixa apresentam quantidades significativas de energia que, na colisão com o oxigénio originam ozono e são absorvidos em poucas centenas de metros (Ryer, 1997; Chang, 1977). O comprimento de onda de maior efeito bactericida é o de 254 nm (112,6 kcal/mol) (Figura 2), e corresponde à emissão máxima das lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio. No entanto, a absorção máxima de radiação ultravioleta ocorre a 260 nm. A faixa germicida óptima para inativação de microrganismos é no intervalo de

comprimento de onda entre 245 nm (116,7 kcal/mol) e 285 nm (100,4 kcal/mol).

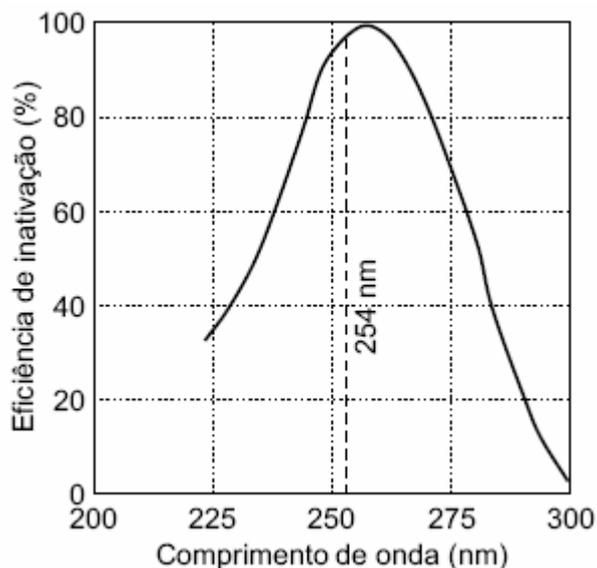


Figura 2. Efeito germicida em função do comprimento de onda da radiação UV.

2.2 Princípios Básicos de Óptica e Radiação UV

Na perspectiva de uma maior compreensão dos mecanismos e dos processos envolvidos na desinfecção de águas residuais domésticas por radiação ultravioleta, apresentam-se de seguida algumas definições e conceitos básicos da física, aplicados à radiação UV.

Fonte de energia UV (S): é a energia (W) emitida em todas as direcções por uma fonte.

Intensidade (I): define-se como a energia total incidente em todas as direcções num elemento infinitesimal de área transversal dA , contendo o ponto considerado. No sistema internacional SI, a unidade de intensidade é $W \cdot m^{-2}$, entretanto, é comum o uso de mW/cm^2 ($1 mW/cm^2 = 10 W/m^2$). Para um ponto à distância de um raio r , de uma fonte pontual e em meio não absorvente, a intensidade pode ser dada pela Equação 2 (Ryer, 1997).

$$I = \frac{S}{4\pi r^2} \quad (2)$$

em que:

- I , intensidade UV num ponto;
- S , energia total emitida pela fonte;
- r , raio desde a fonte pontual.

Dose UV (dose): é o principal parâmetro de projecto e controlo operacional da desinfecção UV, sendo definida como o produto da intensidade de radiação I e do tempo de exposição t . No SI a dose é expressa em $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$, contudo, é mais comum o uso de $\text{mW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$ ou $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($1 \text{ mJ}/\text{cm}^2 = 1 \text{ mWs}/\text{cm}^2 = 10 \text{ J}/\text{m}^2$). A dose de radiação ultravioleta é obtida pela Equação 3.

$$dose = I \times t \quad (3)$$

em que:

- I , intensidade UV;
- t , tempo de exposição à radiação.

Absorvância e Lei de Beer-Lambert: a radiação UV não é transmitida num meio com intensidade constante e equivalente à gerada na fonte. A partir da fonte ocorre um efeito de atenuação, devido à absorção da radiação originalmente emitida no próprio meio. Com o intuito de estimar esta atenuação para efeito de projecto, é comum empregar-se o termo coeficiente de absorvância (α) para corrigir a absorvância do meio, de acordo com a Equação 4.

$$\alpha = A \times \ln(10) \quad (4)$$

em que:

- α , coeficiente de absorvância;
- A , absorvância a 254 nm (cm^{-1}).

A absorvância de uma radiação luminosa (com um dado comprimento de onda) através de um líquido pode ser quantificada por espectrofotometria, obtendo a energia absorvida por unidade de profundidade. A relação entre absorvância e

transmitância é mostrada na Equação 5:

$$T(\%) = 100 \times 10^{-A} \quad (5)$$

em que:

- T , transmitância (%);
- A , absorvância (cm^{-1}).

A variação da intensidade média efectiva de determinada radiação num meio pode ser descrita pela Lei de Beer-Lambert (Chang, 1977) (Equação 6).

$$I_{\text{médio}} = \frac{I_0}{\alpha \cdot L} [1 - \exp(-\alpha \cdot L)] \quad (6)$$

em que:

- I_0 , intensidade UV aplicada no meio líquido;
- L , percurso óptico (cm).

Refracção e reflexão: a radiação ultravioleta obedece a leis da refracção (Snell) e reflexão (Fresnel) utilizadas na física óptica da luz visível. Entretanto, os índices de refracção e reflexão variam conforme o comprimento de onda (Bolton, 2000). Portanto, poucos são os materiais que apresentam uma elevada reflexividade da radiação UV e nem sempre são bons reflectores de luz visível. Por ex.: o aço inoxidável reflecte cerca de 20% de radiação UV a 254 nm, seguido do cobre, com cerca de 10%, e espelho polido com aproximadamente 7% (Blatchley III, 1997). Bolton (2000) propôs que os efeitos de reflexão e refracção sejam desprezados no caso de desinfecção de efluentes com menos de 90% de transmitância.

2.3 Métodos de Avaliação da Intensidade UV

A intensidade da radiação UV emitida por uma fonte é indispensável para o cálculo da dose de UV a aplicar num processo de desinfecção. A sua grandeza num dado ponto do reactor UV varia com a fonte geradora de UV, o *layout* da fonte em relação ao efluente e da transmitância da radiação através do meio líquido (Usepa, 1986).

Os principais métodos para estimativa da intensidade média num reactor UV

(bioavaliação, actinometria, modelação matemática e medição directa) são apresentados de seguida (Tchobanoglous *et al.*, 1996).

Bioavaliação: procedimento que usa uma cultura pura de um organismo indicador sensível à radiação UV, geralmente constituída por esporos de *Bacillus subtilis* (Sommer *et al.*, 1997).

Em ensaios cinéticos obtém-se o decaimento da densidade do indicador em função de doses específicas de radiação UV, gerando uma curva de calibração. Então, o microrganismo é injectado na unidade em funcionamento contínuo e, a intervalos de tempo regulares, são recolhidas amostras para quantificação do indicador. A dose equivalente é estimada a partir da curva de calibração e, num gráfico dose *versus* tempo, obtém-se a intensidade média pelo declive da recta ajustada aos pontos experimentais (Usepa, 1986; WEF, 1996).

Este método de determinação requer um trabalho de laboratório fiável e preciso, e pode ter custo elevado quando comparado com outros métodos. Entretanto, pode ser utilizado para calibração de instrumentos de medição directa (Sommer *et al.*, 1997).

Actinometria: neste método são utilizadas substâncias que sofrem reacções fotoquímicas a comprimentos de onda específicos (substâncias actinométricas).

As substâncias utilizadas devem apresentar produção máxima de foto-produtos, estáveis e mensuráveis, quando expostas a uma radiação específica. A solução actinométrica é introduzida no reactor e, a intervalos de tempo pré-definidos, são recolhidas amostras para determinar a concentração de foto-produtos. Como exemplos de actinómetros químicos podem citar-se o ferrioxalato de potássio, o oxalato de uranil e o ácido cloroacético, entre outros.

A utilização de ferrioxalato de potássio como actinómetro foi introduzida por Hatchard e Parker em 1956 (Harris *et al.*, 1987), e continua em uso devido à relativa facilidade de utilização. Contudo, esta técnica é muito sensível a variações de procedimento, pelo que deve ter-se muito cuidado em todos os passos, de modo a assegurar dados consistentes e fiáveis.

Embora similar ao método da bioavaliação, a actinometria exige equipamento

laboratorial e mão-de-obra qualificada, além de que a execução dos ensaios requer um pH baixo.

Modelação matemática: com o uso generalizado de computadores, a modelação por meio do modelo matemático PSS (Point Source Summation) é normalmente utilizada para estimar a intensidade média num reactor (WEF, 1996).

No modelo PSS a lâmpada é simulada como uma série de pontos de radiação colineares – fontes. A intensidade em qualquer ponto na zona irradiada é estimada somando as contribuições de intensidade de cada fonte pontual. A atenuação da intensidade da radiação UV deve-se basicamente a dois mecanismos: a dissipação e a absorção (Usepa, 1986).

A Equação 7 representa de forma genérica a intensidade emitida por uma lâmpada num ponto, devendo atender-se à configuração física do reactor para execução da modelação.

$$I(R, z) = \sum_{i=1}^n \frac{S/n}{4\pi r^2} \cdot \exp(-\alpha Lr/R) \quad (7)$$

em que:

- R , distância radial do eixo da lâmpada ao ponto;
- z , coordenada do ponto em relação ao eixo da lâmpada;
- S , energia total da fonte;
- n , número de fontes pontuais em que a lâmpada foi dividida;
- r , distância do ponto à fonte pontual;
- α , coeficiente de absorvância do meio líquido;
- L , caminho óptico no meio líquido.

Neste modelo não são considerados os efeitos de reflexão e refração. Contudo, para uma maior precisão deve utilizar-se uma maior quantidade de fontes pontuais, o que aumenta o tempo computacional requerido para a análise.

Medição directa – radiometria: é o método mais utilizado na estimativa da intensidade, devido à sua simplicidade.

São utilizados radiómetros equipados com detectores providos de filtros, para

determinar a intensidade a um comprimento de onda específico. A precisão dos valores obtidos está associada à sensibilidade do equipamento e à quantidade de medições feitas em diferentes pontos do reactor. Entretanto, como a maioria dos sensores apresenta uma resposta de acordo com a lei do cosseno, as leituras para radiação incidente em ângulos horizontais menores que 30° são minoradas. Como consequência, medições próximas da fonte emissora de energia não são válidas (Ryer, 1997).

Severin e Roessler (1998), a partir de modelação matemática e testes radiométricos, propõem o limite mínimo de quatro centímetros para a distância do ponto de medição, com o objectivo de se poder ter confiança nas leituras obtidas. A modelação matemática pode ser utilizada para confirmar o comportamento da intensidade obtida por medição directa (Blatchley III, 1997).

2.4 Mecanismos da Desinfecção por UV

A desinfecção por radiação UV baseia-se em alterações por fotólise do material genético (DNA, RNA) dos microrganismos presentes na água residual.

O DNA é um polímero de ácidos nucleicos, constituído por uma sequência de quatro bases nitrogenadas (adenina, citosina, guanina e timina) que constituem o suporte químico da hereditariedade e controlador dos processos vitais em todos os organismos. Essas bases formam as chamadas bases emparelhadas (adenina com timina e citosina com guanina), ligadas por pontes de hidrogénio (Figura 3a). São essas ligações que fazem com que as duas fitas do DNA permaneçam ligadas, dando origem à estrutura conhecida como dupla hélice.

As moléculas de DNA dos organismos a inactivar absorvem radiações com comprimento de onda entre 200 e 300 nm, com especial destaque em torno de 260 nm, que alteram a sua composição e por essa via comprometem a sua funcionalidade (Chang, 1977).

A radiação UV atravessa a parede celular e é absorvida pelos ácidos nucleicos e, em menor extensão, pelas proteínas e por outras moléculas biologicamente importantes. A energia absorvida rompe as ligações não saturadas, principalmente as bases nitrogenadas pirimídicas, provocando a dimerização de pirimidinas adjacentes de um mesmo fio do cromossoma do DNA (White *et al.*, 1986) (Figura 3b). Como

consequência das alterações provocadas pela radiação UV formam-se diversos dímeros, tais como: timina–timina, timina–citosina e citosina–citosina. As moléculas pirimídicas resultantes, uma vez unidas, deformam a estrutura helicoidal do DNA e dificultam a replicação do ácido nucleico. Caso a replicação ocorra, as novas células serão mutantes descendentes incapazes de se duplicar (WEF, 1995).

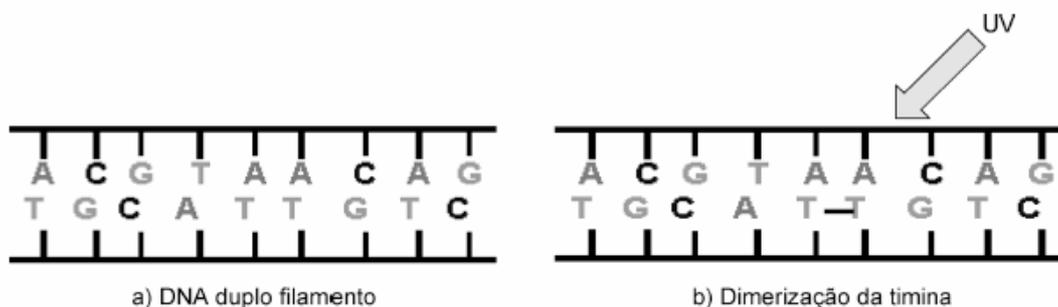


Figura 3. Efeito da radiação UV sobre a cadeia de DNA da bactéria.

A resistência dos diferentes organismos patogénicos à inactivação por radiações UV varia de acordo com a espécie, sendo este um dos principais parâmetros de dimensionamento dos reactores UV para desinfectação.

A Tabela 3 apresenta uma compilação das doses de UV para inactivação de diversos organismos (patogénicos ou não para os seres humanos). De modo geral, bactérias e vírus são muito sensíveis à radiação UV, bastando doses efectivas da ordem de 20 mWs/cm² para inactivar a maioria das espécies. Contudo, o mesmo não sucede para protozoários e helmintos, dotados de protecções naturais que permitem a sua sobrevivência em ambientes adversos. As formas encistadas dos protozoários e os ovos de helmintos são muito resistentes à radiação UV, pelo que requerem doses extremamente elevadas, o que na maioria dos casos é extremamente dispendioso, para que resulte numa inactivação eficiente. Assim, esses organismos devem ser retidos ou eliminados nas etapas do tratamento que precedem a desinfectação UV, o que, em função do seu tamanho, geralmente ocorre por sedimentação ou filtração.

Tabela 3. Doses de radiação UV para inactivar bactérias, vírus, protozoários, algas, helmintos e leveduras (Treij, 1995; WEF, 1996).

Bactéria	Dose UV (mWs/cm ²)	Vírus	Dose UV (mWs/cm ²)
<i>Agrobacterium lumefaciens</i>	8,5	Hepatite infecciosa	8
<i>Bacillus anthracis</i>	8,7	Influenza	6,6
<i>Bacillus anthracis</i> (esp. Antrax)	46,2	Rotavírus	24
<i>Bacillus paratyphosus</i>	6,1		
<i>Bacillus subtilis</i>	11	Protozoários e Helmintos	
<i>Clostridium tetani</i>	23,1	Cistos de <i>Giardia lamblia</i>	100
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	6,5	<i>E. histolytica</i>	84
<i>Dysentery bacilli</i>	4,2	Ovos de nematodos	40
<i>Eberthella typhosa</i>	4,1		
<i>Escherichia coli</i>	6,6	Algas	
Espécies de <i>Salmonella</i>	15,2	<i>Chlorella vulgaris</i>	22
Esporos <i>Bacillus subtilis</i>	22	Alga azul-verde	420
<i>Legionella bozemanii</i>	3,5		
<i>Legionella pneumophila</i>	12,3	Fungos	
<i>Leptospira interrogans</i>	6	<i>Aspergillus amstelodami</i>	77
<i>Micrococcus candidus</i>	12,3	<i>Aspergillus glaucus</i>	88
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	10	<i>Aspergillus niger</i>	330
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10,5	<i>Penicillium digitatum</i>	88
<i>Salmonella enteritidis</i>	7,6	<i>Penicillium expansum</i>	22
<i>Salmonella paratyphi</i> (febre entérica)	6,1	<i>Rhizopus nigricans</i>	220
<i>Salmonella typhi</i> (febre tifóide)	7		
<i>Shigella dysenteriae</i> (disenteria)	4,2	Leveduras	
<i>Staphylococcus aureus</i>	6,6	Levedura do pão	8,8
<i>Streptococcus faecalis</i>	10	Levedura da cerveja	6,6
<i>Streptococcus hemolyticus</i>	5,5	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	13,2
<i>Vibrio comma</i> (cólera)	6,5	<i>Saccharomyces ellipsoideus</i>	13,2

2.5 Cinética de Inactivação

A Lei de Chick, aplicada à desinfecção por radiação UV, baseia-se na similitude do processo de desinfecção com uma reacção cinética de primeira ordem, segundo a Equação 8 (Usepa, 1986).

$$\frac{dN}{dt} = -kN \quad (8)$$

em que:

k , constante de inactivação (s^{-1});

N , concentração de microrganismos vivos num instante t (organismos/100 ml).

Por integração da Equação 8 obtém-se:

$$\frac{N}{N_0} = \exp(-k.dose) \quad (9)$$

em que:

N_0 , concentração de microrganismos no afluente (organismos/100 ml);

$dose$, $I \times t$ (mWs/cm^2) (ver Equação 3);

t , tempo de exposição à radiação UV (s).

Esta equação teórica pode utilizar-se para prever a eficiência da desinfecção UV nos seguintes casos: i) a absorção da radiação UV no meio é muito baixa; ii) a intensidade UV aplicada aos microrganismos é homogénea; iii) o comportamento hidráulico da unidade é próximo do pistão; iv) a sensibilidade da população em relação à radiação UV é homogénea.

Contudo, na desinfecção de esgotos tratados, a agregação ou oclusão dos microrganismos nas partículas de matéria em suspensão impede a penetração da radiação ultravioleta, o que reduz a eficiência da inactivação e gera um efeito de cauda na curva dose versus resposta (Figura 4).

Como alternativa à Equação 9, tendo em vista os efeitos da presença de matéria particulada em suspensão, pode ser utilizada a seguinte Equação (Usepa, 1986):

$$N = N_D \cdot \exp(-k \cdot \text{dose}) + N_p \quad (10)$$

em que:

N_D , concentração de microrganismos dispersos no afluente (organismos/100 ml);

N_p , concentração de microrganismos associados à matéria particulada (organismos/100 ml);

N_0 , concentração de microrganismos no afluente, $N_0 = N_D + N_p$ (organismos/100 ml).

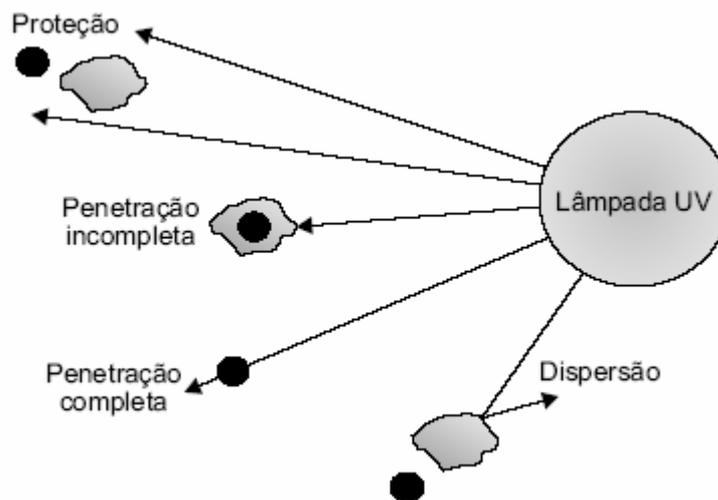


Figura 4. Efeitos das partículas de matéria em suspensão na desinfecção por UV.

O valor de N_p pode ser estimado para amostras expostas a altas doses, a partir do ajuste à Equação 11 (WEF, 1996).

$$N_p = a \times SST^b \quad (11)$$

em que:

a, b , coeficientes empíricos obtidos no ajuste;

SST , sólidos suspensos totais presentes na amostra (mg/L).

A radiação UV, mesmo que reduzida, pode atingir os organismos associados às

partículas em suspensão. A Equação 12, desenvolvida por Emerick *et al.* (2000), ajustou de forma razoável os dados experimentais para a inativação de coliformes fecais em efluentes secundários e terciários.

$$N = N_D \exp(-k \times dose) + \frac{N_p}{k \times dose} [1 - \exp(-k \times dose)] \quad (12)$$

em que:

N , concentração de microrganismos dispersos no efluente (organismos/100 ml);

N_D , concentração de microrganismos dispersos no afluente (organismos/100 ml);

N_p , concentração de microrganismos associados à matéria particulada (organismos/100 ml);

N_0 , concentração de microrganismos no afluente, $N_0 = N_D + N_p$ (organismos/100 ml).

A aplicação do modelo em ensaios de desinfecção por UV de efluentes terciários, é ilustrada pela Figura 5.

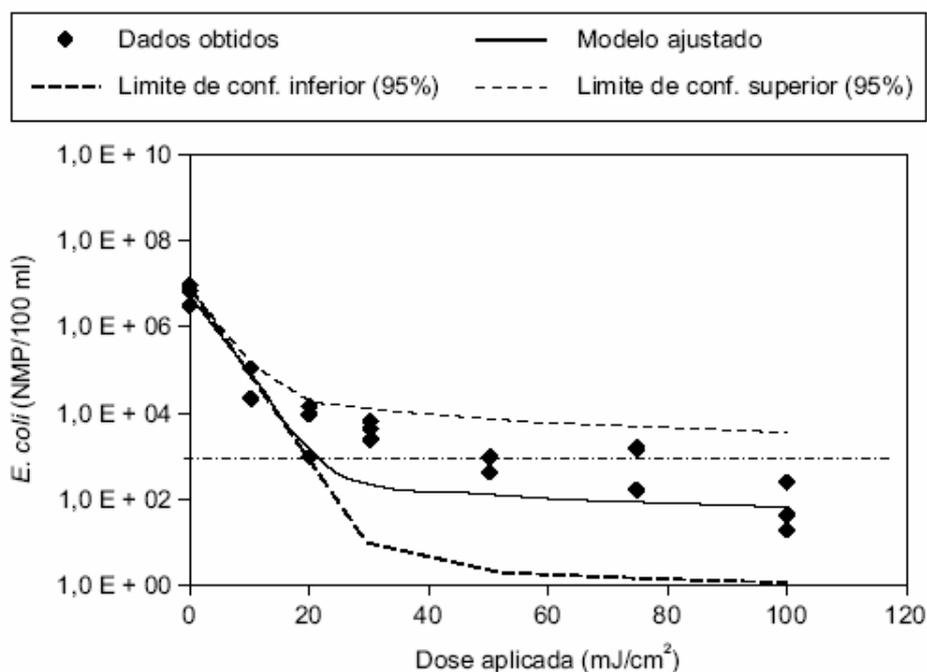


Figura 5. Resultados experimentais e ajuste do modelo cinético; inativação de *Escherichia coli* num efluente terciário.

2.6 Intensidade Aplicada e Intensidade Efectiva duma Radiação UV

Na secção anterior abordou-se o efeito da concentração de sólidos suspensos e da quantidade de partículas associadas aos microrganismos na água residual, na determinação da quantidade de radiação necessária para atingir e inactivar os organismos alvos.

Por outro lado, sabe-se que a capacidade de absorção de energia por alguns compostos químicos presentes no esgoto reduz a radiação UV antes que ela atinja o alvo. Quanto maior a concentração destes compostos no efluente, menor a disponibilidade de radiação UV e sua consequente absorção pelos organismos.

A Tabela 4 apresenta alguns compostos químicos presentes nos esgotos domésticos e respectivos efeitos na desinfecção por UV.

Tabela 4. Características da água residual doméstica e respectivos efeitos na desinfecção por UV (Usepa, 1999).

Características da água residual	Efeitos na desinfecção por UV
Azoto amoniacal	Nenhum detectado
Nitrito	Nenhum detectado
Nitrato	Nenhum detectado
Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO ₅)	Nenhum detectado. Contudo, se grande parte da CBO ₅ é húmica e/ou de compostos não saturados, a transmissão da radiação UV pode ser diminuída.
Dureza	Interfere na solubilidade de metais que podem absorver a luz UV. Pode ocorrer a precipitação de carbonatos nos tubos de quartzo.
Materiais húmicos e ferro	Alta absorvância de radiação UV.
pH	Altera a solubilidade de metais e carbonatos.
Sólidos Suspensos Totais (SST)	Absorve a radiação UV e protege microrganismos no interior das partículas.

A intensidade média da radiação UV aplicada num reactor pode ser determinada de acordo os métodos descritos anteriormente neste trabalho. Alguns trabalhos utilizam a Lei de Beer-Lambert (Equação 6) para correcção da intensidade aplicada e consequente determinação da intensidade média efectiva na desinfecção UV.

A quantidade de radiação UV na água residual pode ser quantificada por espectrofotometria, a um comprimento de onda de 254 nm, obtendo-se a Absorvância por unidade de profundidade. Por questões práticas, os resultados também se podem exprimir em função da intensidade ou da dose aplicada, desde que conhecidas as características de absorvância das amostras analisadas. A conversão dos resultados pode ser feita recorrendo à Equação 6.

Exemplo: cálculo da dose efectiva de radiação UV a partir das características da água residual.

Calculo das doses de radiação UV, aplicada e efectiva, numa amostra de esgoto tratado (SST = 30 mg/L e Transmitância de 42,5%).

A amostra foi exposta na sua superfície a uma radiação com uma intensidade UV de 1,33 mW/s² durante um período de 90 s; a espessura do líquido no recipiente irradiado foi de 4 cm.

A dose aplicada pode ser calculada a partir de:

$$D_{aplicada} = I_0 \times t ; \text{mJ/cm}^2$$

em que:

$$I_0 = 1,33 \text{ mW/s}^2$$

$$t = 90 \text{ s}$$

Então:

$$D_a = 1,33 \times 90 = 120 \text{ mJ/cm}^2$$

A partir do valor de Transmitância determina-se a Absorvância:

$$A = -\text{Log}(42,5/100) = 0,372 \text{ cm}^{-1}$$

O coeficiente de absorvância vem:

$$\alpha = 2,303 \times A = 2,303 \times 0,372 = 0,857$$

A intensidade média no meio pode ser obtida pela Lei de Beer-Lambert (Equação 6):

$$I_m = \frac{I_0}{\alpha.L} [1 - \exp(-\alpha.L)] [\text{mW/cm}^2]$$

Logo,

$$I_m = \frac{1,33}{0,857 \times 4} [1 - \exp(-0,857 \times 4)] = 0,375 \text{ mW/cm}^2$$

A dose efectiva é obtida por:

$$D = I_m \times t [\text{mJ/cm}^2] = 0,375 \times 90 = 33,8 \text{ mJ/cm}^2$$

2.7 Fotorreactivação e Recuperação no Escuro

Os organismos possuem mecanismos, adquiridos por evolução natural, que lhes permitem recuperar lesões causadas por fontes externas, seleccionando e preservando as espécies. Esses mecanismos são variáveis entre as espécies, podendo variar até dentro da mesma espécie, o que depende da organização biológica e da lesão sofrida.

O resultado final da exposição dos microrganismos à radiação ultravioleta, ou seja, a inactivação total ou parcial destes, reflecte a relação mútua entre a formação de fotoprodutos letais e sua remoção por processos de recuperação que visam impedir a letalidade, preservando a espécie. Assim, ao avaliar a eficiência da desinfecção por radiação ultravioleta, deve dedicar-se atenção aos microrganismos capazes de se recuperar após a irradiação (Chernicharo, 2001).

A fotorreactivação é um fenómeno que pode afectar negativamente a performance de um sistema de desinfecção por UV. São diversas as variáveis envolvidas na previsão dos efeitos de reparação nos sistemas em estações de tratamento de águas. A luz solar, que difere em intensidade e distribuição espectral de acordo com a estação do ano, hora do dia e existência de nuvens, bem como as características do efluente, afectam a penetração dos raios fotorreactivantes, assim como as próprias condições

do corpo receptor. Corpos receptores com baixa turvação, e rasos, são mais susceptíveis à fotorreactivação, enquanto os com alta turvação e profundos são menos susceptíveis (Usepa, 1986). Além disso, a extensão do fenómeno depende da dose de radiação aplicada para desinfeção. Quanto maiores as doses aplicadas, menores os efeitos da fotorreactivação.

São dois os principais mecanismos de recuperação dos microrganismos irradiados com ultravioleta:

- Reversão das alterações produzidas pela radiação UV - fotorreactivação.

A recuperação é obtida por meio de reacções fotoenzimáticas que produzem *in situ* os dímeros de piridina pela acção de uma enzima na presença de radiação com comprimento de onda entre 300 a 500 nm.

- Substituição dos nucleotídios lesados pela radiação ultravioleta - recuperação no escuro.

A substituição pode ser feita por meio de remoção da parte lesada e de uma sequência de nucleotídios adjacentes, com posterior re-síntese da sequência original de nucleotídios. Este processo denomina-se recuperação por excisão-re-síntese, e é feito na ausência de luz.

Em certa medida, a fotorreactivação aumenta a resistência dos microrganismos à radiação ultravioleta. Esse facto é particularmente importante nas situações em que o efluente desinfectado é lançado em sistemas receptores abertos, como rios e lagos. A luz solar ao incidir nesses sistemas pode reactivar uma parcela significativa dos microrganismos inactivados.

No caso de doses elevadas de radiação, a quantidade de dímeros é maior que a capacidade de recuperação do microrganismo, não havendo tempo para reverter todas as alterações antes que se inicie a duplicação da célula.

Considerando os factores ambientais que influenciam a fotorreactivação, esta pode ser controlada, aumentando a dose de radiação no sistema de desinfeção. É importante salientar que o efeito da fotorreactivação pode ser reduzido, mas nunca eliminado.

3. PROCESSOS DE DESINFECÇÃO POR MEIO DE RADIAÇÃO UV

3.1 Informações Preliminares

Os principais componentes de um processo de desinfecção UV são as lâmpadas do tipo arco de mercúrio, a fonte de energia, as reactâncias electrónicas e a câmara de contacto. As reactâncias electrónicas têm a função de limitar a corrente eléctrica sobre as lâmpadas, sem o que estas seriam destruídas. A eficiência de um processo de desinfecção de esgotos por radiação UV depende dos seguintes factores:

- **Características do afluente**

Conforme as informações já apresentadas neste trabalho, sabe-se que elevadas concentrações de colóides e partículas na água residual influenciam negativamente a desinfecção.

Quanto mais clarificado for o afluente ao processo, melhor será o seu desempenho de desinfecção. O caudal afluente e a quantidade de organismos a serem inactivados, também são factores importantes que influenciam o processo.

- **Intensidade da radiação UV aplicada**

A intensidade da radiação UV deve ser suficiente para suplantar todos os obstáculos já apontados. Tal deve ocorrer em todos os pontos do reactor UV, sob pena de haver perda de eficiência em função da existência de regiões insuficientemente irradiadas.

Outros factores que afectam a intensidade são a idade e acumulação de resíduos das lâmpadas, bem como a sua localização no reactor.

- **Comportamento hidrodinâmico do reactor**

O escoamento hidráulico do reactor deve ser o mais próximo possível do tipo pistão, com mistura axial suficiente para maximizar a exposição da massa líquida à radiação UV.

O reactor deve ser projectado de forma a evitar curto-circuitos e zonas mortas, que conduzem a uma utilização ineficiente da energia e à redução do tempo de exposição dos microrganismos à radiação UV.

O tempo de exposição dos microrganismos à radiação UV depende do percurso efectuado ao longo do reactor e determina a quantidade de radiação

a que serão expostos. Como a dose de UV depende da variável tempo, o período de permanência de todos os organismos-alvo deve ser o suficiente para alcançar a dose efectiva mínima para a sua inactivação.

- **Configuração do reactor**

A existência de zonas mortas e de curto-circuitos, assim como de regiões expostas a maiores ou menores intensidades de radiação, dependem da configuração do reactor.

Outros componentes, como o tipo de lâmpada e a existência de dispositivos de limpeza para eliminação do biofilme sobre lâmpadas, também são importantes.

Tendo presente a influência do nível de clarificação do esgoto tratado na eficiência da desinfeção, a inserção dos processos UV no fluxograma de tratamento geralmente ocorre após a etapa de tratamento secundário aeróbio.

Isso não significa que um processo UV não possa ser utilizado directamente para desinfeção de efluentes em processos anaeróbios ou de lagoas de estabilização facultativas, por exemplo. Porém, em função dos níveis de turvação que caracterizam esses efluentes, as doses necessárias para obter efluentes de qualidade são muito elevadas e, em geral, anti-económicas do ponto de vista operacional.

3.2 Lâmpadas UV

Além da radiação UV natural presente na luz solar, pequenas fracções de radiação UV artificial podem ser emitidas por lâmpadas comuns, de halogéneo e fluorescentes, telas de computadores, entre outras.

A desinfeção de água e águas residuais, requer quantidades de radiação UV muito superiores a estas, o que é obtido utilizando lâmpadas de vapor de mercúrio.

As lâmpadas germicidas de baixa pressão de mercúrio e baixa intensidade de radiação UV são as mais comuns, sendo constituídas por um tubo de quartzo com um eléctrodo de tungsténio em cada extremidade. O tubo é preenchido com vapor de mercúrio a baixa pressão e um gás inerte, geralmente árgon, de que resulta a luz azul-esverdeada vista na lâmpada em funcionamento.

Uma reactância electrónica garante a aplicação e a estabilização de voltagem nos eléctrodos, possibilitando a descarga eléctrica no interior do tubo. Os electrões, ao colidirem com os átomos de mercúrio, libertam a radiação UV, na maior parte a 253,7 nm (112,8 kcal/mol), efectiva na inactivação dos microrganismos.

O circuito eléctrico para accionamento das lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio é igual ao usado em lâmpadas fluorescentes. No caso das lâmpadas fluorescentes, o tubo de quartzo é substituído por um tubo de vidro revestido por cristais de fósforo (Figura 6).

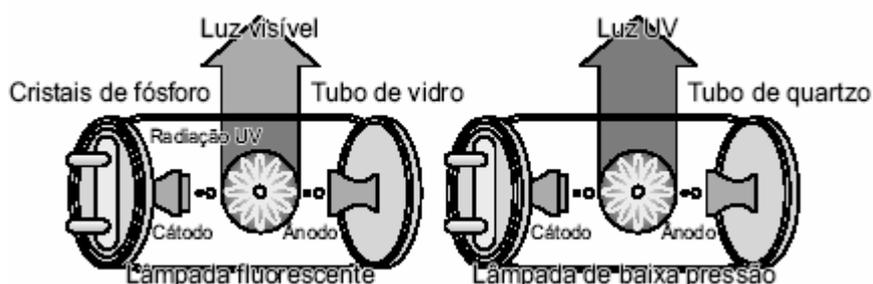


Figura 6. Lâmpada fluorescente normal e lâmpada de baixa pressão do tipo UV.

Os principais tipos de lâmpadas germicidas são (Usepa, 1986; Tchobanoglous *et al.*, 2003):

- **Lâmpadas de baixa pressão e baixa intensidade de radiação**

As lâmpadas de baixa pressão emitem de 80% a 90% da energia para um comprimento de onda de 253,4 nm, podendo ser consideradas monocromáticas.

A energia emitida no comprimento de onda de 253,4 nm representa entre 30% a 50% da potência nominal da lâmpada, sendo o restante dissipado na forma de calor. No mercado existem lâmpadas com potências que variam de 4 a 60 W, correspondendo a maior oferta a lâmpadas de 30 W.

A mistura de vapor mercúrio – argón encontra-se a uma pressão de 0,007 mm Hg no seu interior e uma temperatura óptima de trabalho de 40°C.

Geralmente são utilizadas em sistemas de desinfeção com um tubo de quartzo, cujo principal objectivo é manter a temperatura de funcionamento da lâmpada próxima de 40°C.

A vida útil deste tipo de lâmpada varia de 3000 a 13000 horas, dependendo da qualidade do material e do número de ciclos de partida a que são submetidas.

- **Lâmpadas de baixa pressão e alta intensidade**

Basicamente, são lâmpadas muito semelhantes às descritas anteriormente, à exceção da mistura mercúrio – índio que substitui o mercúrio – argon do caso anterior.

A capacidade para emitir radiação UV a 254 nm é 2 a 4 vezes superior à das lâmpadas convencionais de baixa pressão. A pressão no interior destas lâmpadas pode ser de 0,001 a 0,01 mm Hg.

Este tipo de lâmpada é mais eficiente e mais resistente do que as lâmpadas de baixa pressão e baixa intensidade, em função de a mistura mercúrio – índio manter um nível constante de átomos de mercúrio na forma de vapor.

- **Lâmpadas de média pressão e alta intensidade**

Lâmpada que opera sob pressões entre 100 e 10000 mm Hg, próximo da pressão atmosférica, e numa faixa de temperatura ideal de 600 a 800°C. Nestas condições, praticamente todo o mercúrio que existe no seu interior é vaporizado.

As lâmpadas de média pressão e alta intensidade são policromáticas, emitindo radiações com comprimento de onda de 180 a 1370 nm . A potência nominal varia na gama 0,7 a 5 kW.

Relativamente à conversão da energia total em UV-C, a eficiência varia de 27% a 44%, dos quais apenas de 7% a 15% possuem 254 nm. Além de que, estas lâmpadas geram quantidade de radiação UV 50 a 100 vezes superiores às geradas pelas lâmpadas de baixa pressão e baixa intensidade. Com isso, o tempo de exposição e o número de lâmpadas são muito menores do que os utilizados nas unidades que empregam as lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio.

A utilização mais frequente é em grandes estações de tratamento, o que possibilita a adopção de tempos de contacto muito curtos na desinfecção e, consequentemente, a construção de unidades bastante compactas.

Na Tabela 5 apresenta-se um resumo das principais características das lâmpadas UV

utilizadas em reactores de desinfectação de esgotos domésticos.

Tabela 5. Características das lâmpadas UV utilizadas na desinfectação de águas residuais (Tchobanoglous *et al.*, 2003).

Item	Unidade	Tipo de lâmpada		
		Baixa pressão Baixa intensidade	Baixa pressão Alta intensidade	Média pressão Alta intensidade
Potência consumida	W	70 – 100	200	
Corrente eléctrica	kW		1,2	2 – 5
	mA	350 – 550	Variável	Variável
Voltagem	V	220	Variável	Variável
Eficiência	%	30 – 40	25 – 35	10 – 12
Saída da lâmpada a 254 nm	W	25 – 27	60 – 400	
Temperatura	°C	35 – 45	90 – 150	600 – 800
Pressão	mm Hg	0,007	0,001 – 0,01	
Comprimento	m	0,75 – 1,5	Variável	Variável
Diâmetro	mm	15	Variável	Variável

3.2.1 Factores que influenciam o desempenho das lâmpadas

A intensidade da radiação ultravioleta emitida pelas lâmpadas germicidas é afectada por diversos factores, sendo de destacar os seguintes:

- **Temperatura de operação da lâmpada**

Tendo em vista a quantidade de radiação UV gerada, cada tipo de lâmpada possui uma faixa óptima de operação. No caso das lâmpadas de baixa pressão e baixa intensidade, o rendimento óptimo situa-se em torno de 40°C.

- **Tempo de operação da lâmpada**

A vida útil de uma lâmpada germicida corresponde ao período em que, respeitadas as condições de operação estabelecidas pelo fabricante, ela consegue gerar radiação UV com a intensidade prevista no dimensionamento

do processo de desinfeção. De acordo com a informação de diversos fabricantes, a vida útil de uma lâmpada de baixa pressão e baixa intensidade pode variar de 4000 a 13000 horas.

A Figura 7 ilustra o desempenho de diferentes lâmpadas comerciais, de baixa pressão e de baixa intensidade, na emissão de radiação a 254 nm, relativamente ao especificado pelo fabricante (100%). No início do funcionamento as intensidades de radiação foram superiores aos dados fornecidos pelos fabricantes, seguindo-se um decaimento da emissão em função do tempo de uso.

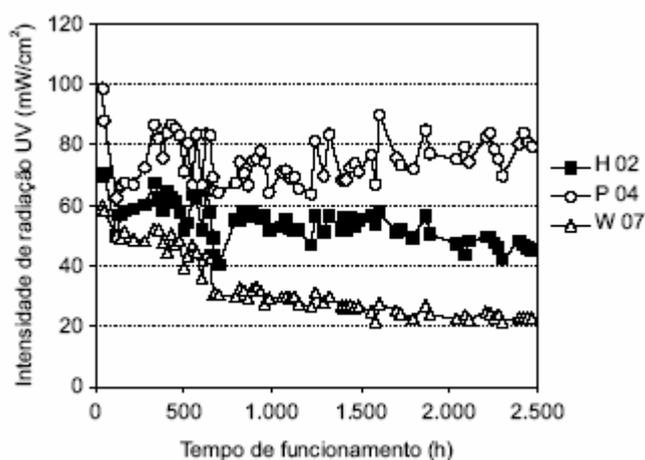


Figura 7. Variação da intensidade de radiação na câmara de contacto em função do tempo de operação.

- **Instabilidade na voltagem da corrente**

A eficiência de emissão de radiação UV para lâmpadas de baixa pressão e de baixa intensidade é de 100% para corrente a 220 V. A eficiência decai sensivelmente para voltagens inferiores, podendo diminuir cerca de 15% se a voltagem cair de 220 V para 200 V. A variação da intensidade de radiação UV ao longo do tempo, numa unidade ligada directamente à rede eléctrica, é apresentada pela Figura 8. Observam-se variações na intensidade que vão até aproximadamente 25% da intensidade média no período em análise.

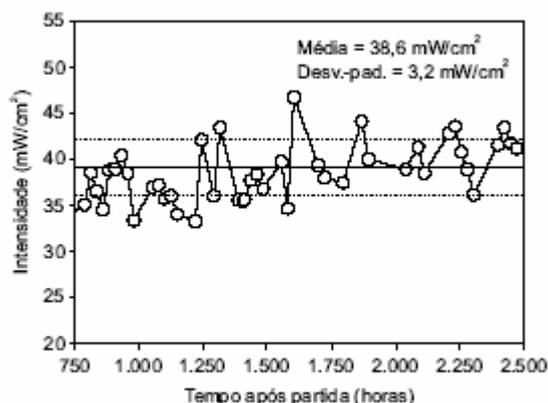


Figura 8. Instabilidade na intensidade da radiação UV devido a flutuações na voltagem da rede eléctrica.

A vida útil das lâmpadas também depende muito da qualidade do material, bem como do número de arranques e das condições de operação. Os principais factores que contribuem para uma redução da eficiência de emissão de radiação incluem falhas nos eléctrodos, deposição de mercúrio nas paredes (escurecimento) e solarização do invólucro (Usepa, 1984).

3.3 Desempenho do Processo de Desinfecção: Factores Físicos

A eficácia da desinfecção num reactor UV é influenciada de forma considerável, por diversos factores físicos, sendo de destacar a distribuição espacial da radiação UV e o seu comportamento hidrodinâmico nas diferentes condições operacionais. Uma breve descrição desses factores é apresentada a seguir.

- **Distribuição espacial da radiação UV**

A quantidade, o arranjo e o posicionamento das lâmpadas UV é fulcral para o bom desempenho do reactor UV na desinfecção. A distribuição espacial da radiação UV emitida depende desses factores, que deve ser o mais homogénea possível nas três dimensões do reactor (comprimento, largura e profundidade).

Esse objectivo não foi conseguido no exemplo apresentado na Figura 9, que ilustra as curvas de iso-intensidade de radiação UV (254 nm) num reactor. Observa-se que junto às paredes do reactor, o efluente recebe uma menor

intensidade de radiação; região onde se localizam a grade de fixação das lâmpadas e o suporte da reactância electrónica.

As regiões em que se verificam as maiores intensidades estão próximas ao eixo longitudinal do reactor, próximas de 40, 100 e 180 cm.

Assim, pode prever-se um baixo rendimento na inactivação de microrganismos nas linhas de fluxo próximas das paredes do reactor, contribuindo para obter um efluente final com qualidade aquém da prevista.

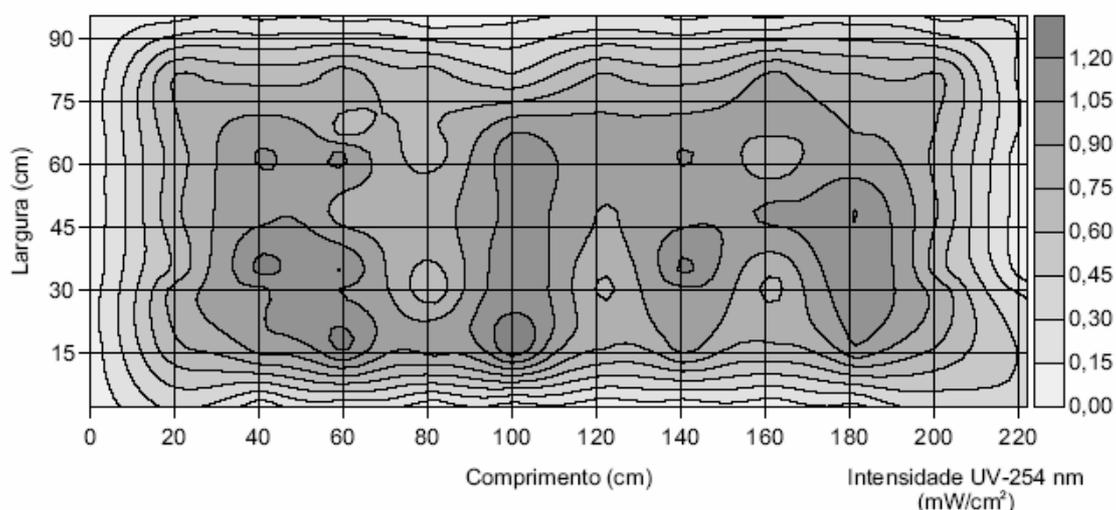


Figura 9. Curvas de iso-intensidade UV (254 nm) no reactor (a 5 cm do fundo).

- **Comportamento hidrodinâmico do reactor**

Conforme foi salientado anteriormente, o escoamento hidráulico de tipo pistão, com mistura axial suficiente para maximizar a exposição da massa líquida à radiação UV, deve ser privilegiado na concepção de um reactor UV. Tal facto é consequência da cinética de primeira ordem que caracteriza o decaimento dos microrganismos expostos à radiação UV.

Curto-circuitos e zonas mortas devem ser minimizados, o que pode ser conseguido com dispositivos que aumentem a eficiência hidráulica do processo (exemplo: chicanas ou cortinas deflectoras).

Deve ser dada atenção especial aos dispositivos de alimentação e de recolha do efluente do reactor, a fim de minimizar a dispersão longitudinal.

3.4 Tipos de Processos

Uma das classificações usuais para os processos UV tem por base o posicionamento das lâmpadas em relação ao líquido submetido à desinfecção.

Os processos em que as lâmpadas se encontram fora do meio líquido são conhecidos como processos de lâmpadas emersas ou de não contacto. Ainda nesta categoria, há processos com lâmpadas externas a tubos transparentes, no interior dos quais escoo o líquido.

Os processos com lâmpadas imersas compreendem a utilização de lâmpadas que podem estar em contacto directo ou não com a corrente líquida. Neste último caso, as lâmpadas encontram-se protegidas por um tubo, geralmente de quartzo, sendo desprezável a radiação UV adsorvida.

Outro tipo de classificação refere-se à forma de escoamento do líquido, que pode ocorrer em canais ou em condutas. Resumindo as diferentes opções técnicas, tem-se:

Processos com lâmpadas emersas / imersas

- Escoamento hidráulico em canal;
- Escoamento hidráulico forçado em conduta.

3.4.1 Processos com lâmpadas emersas

O processo mais comum com lâmpadas emersas é caracterizado pelo escoamento livre do líquido a desinfectar em um ou mais canais funcionando em paralelo, assumindo geralmente o formato de uma mesa (Figuras 10 e 11).

Uma câmara de alimentação dos canais recebe o efluente dos processos de tratamento secundário ou terciário e reparte o caudal pelos canais por meio de vertedores triangulares. A câmara de recepção do efluente final do reactor UV encaminha o efluente desinfectado para o emissário de descarga.

As lâmpadas UV de baixa pressão podem ser posicionadas paralela ou transversalmente ao sentido de fluxo do líquido e com espaçamento constante entre lâmpadas (5 a 10 cm).

A geratriz inferior de cada lâmpada é posicionada o mais próximo possível da superfície da água residual, a fim de otimizar a distribuição da radiação UV no líquido.

Os canais são cobertos por tampas constituídas ou revestidas por material reflector da radiação, com destaque para o alumínio. As tampas melhoram o aproveitamento da radiação UV emitida pelas lâmpadas, além de protegerem os trabalhadores do contacto directo com a radiação.

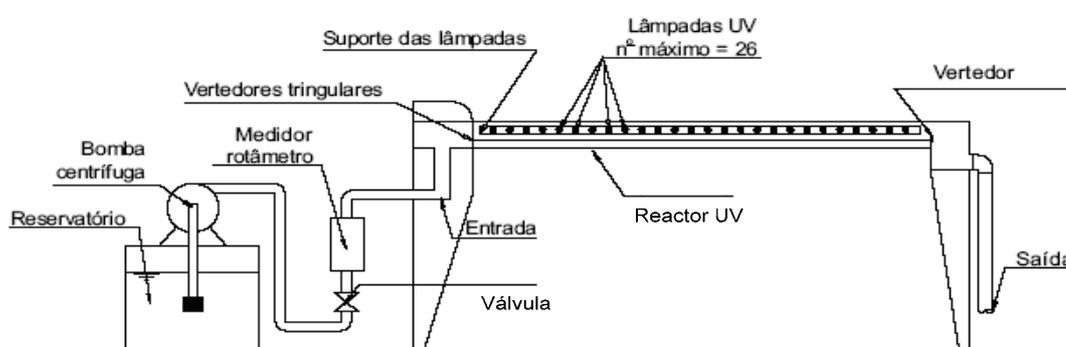


Figura 10. Esquema de implantação de um reactor UV com lâmpadas emersas.

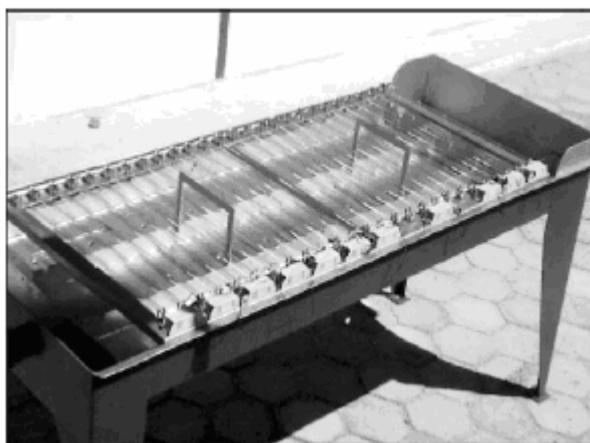


Figura 11. Reactor UV com lâmpadas emersas, sem tampa de protecção do canal de escoamento.

O escoamento forçado em tubagens não é muito comum no caso de processos com lâmpadas emersas. As lâmpadas são posicionadas externamente a tubos

transparentes à radiação UV, em quartzo ou teflon, por onde circula o líquido a ser desinfectado (Figura 12). Esta configuração requer a instalação de um dispositivo de limpeza da superfície dos tubos que entra em contacto com o líquido. A formação de biofilme diminui a eficiência de transmissão da radiação UV, prejudicando o desempenho do processo.

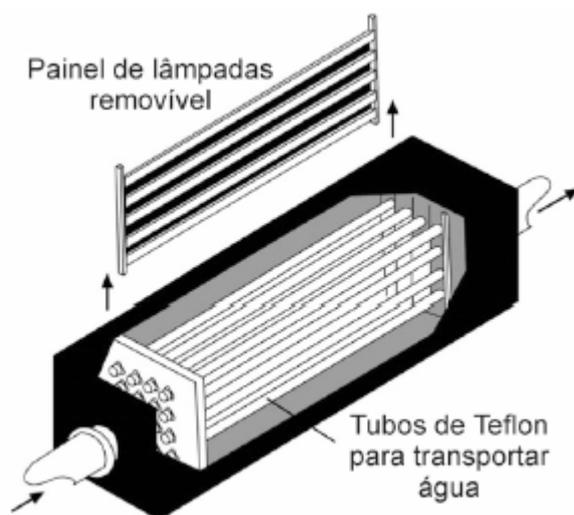


Figura 12. Processo UV com lâmpadas emersas e escoamento forçado em tubos de teflon.

3.4.2 Processos com lâmpadas imersas

Neste tipo de processo as lâmpadas UV trabalham dentro da corrente líquida, normalmente protegidas por um invólucro constituído por material com baixa absorção da radiação UV (quartzo ou teflon). O quartzo absorve aproximadamente 5% de radiação ultravioleta, enquanto o teflon, pode chegar aos 35% (Usepa, 1999). A dissipação de energia corresponde à perda que ocorre nos reflectores de alumínio polido, usados em sistema com lâmpadas emersas.

Geralmente, o invólucro possui a forma de um bolbo, em que o diâmetro da secção transversal é ligeiramente superior ao da própria lâmpada. A lâmpada é inserida no seu interior, sendo hermeticamente protegida do contacto com o líquido uma vez fechado o bolbo, o que lhe permite operar em condições adequadas de temperatura.

O contacto permanente entre o invólucro de protecção e o líquido leva à formação de

um biofilme na sua superfície, constituído por material orgânico e inorgânico, que prejudica a transmissão da radiação UV. Assim, torna-se indispensável um dispositivo para remoção do biofilme, de modo que o rendimento da desinfecção se mantenha ao longo do tempo. Tais dispositivos podem basear-se em processos químicos (cloro, ácidos fortes, etc.) ou físicos (ultra-som, raspagem simples, etc.).

Reactor UV com escoamento em canal

O arranjo do conjunto de lâmpadas depende do tipo de escoamento hidráulico utilizado no processo. Os reactores UV em canal aberto podem utilizar lâmpadas de baixa pressão, bem como lâmpadas de baixa pressão e alta intensidade. O posicionamento das lâmpadas pode ser horizontal ou perpendicular ao sentido de fluxo do líquido no canal. Estas também se podem apresentar paralela ou transversalmente ao sentido do escoamento. A combinação destas possibilidades dá origem às diversas patentes disponíveis actualmente no mercado. As Figuras 13 e 14 apresentam um reactor em canal aberto, com lâmpadas imersas dispostas perpendicular e transversalmente ao sentido de escoamento do líquido.



Figura 13. Processo UV com lâmpadas imersas e escoamento em canal.

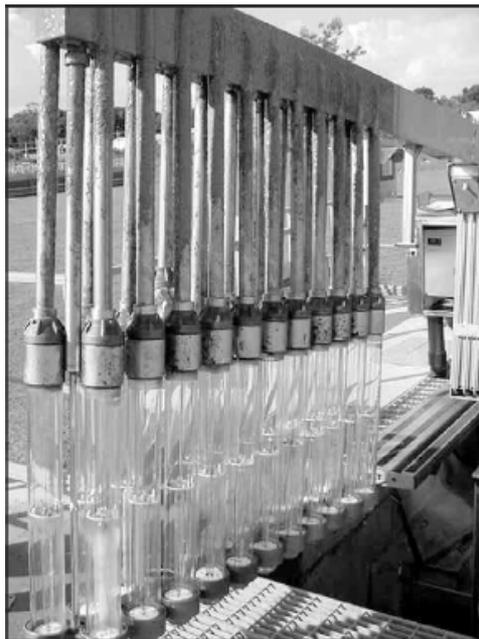


Figura 14. Arranjo de lâmpadas UV protegidas por um tubo de quartzo.

Reactores UV com escoamento forçado em conduta

O escoamento forçado numa conduta opaca, dentro do qual se inserem lâmpadas UV com ou sem tubo de protecção, é outra possibilidade. Da mesma forma que nos reactores em canal aberto, as lâmpadas também podem ser dispostas paralela ou transversalmente ao fluxo. Também neste caso, é imprescindível a existência de um dispositivo para limpeza das superfícies das lâmpadas ou dos tubos de protecção que entram em contacto directo com o líquido. Dois exemplos de reactores com lâmpadas posicionadas paralelamente ao escoamento hidráulico no interior do processo são apresentados nas Figuras 15 e 16.

Na Tabela 6 apresenta-se um resumo das principais características dos processos de desinfeção UV anteriormente descritos.

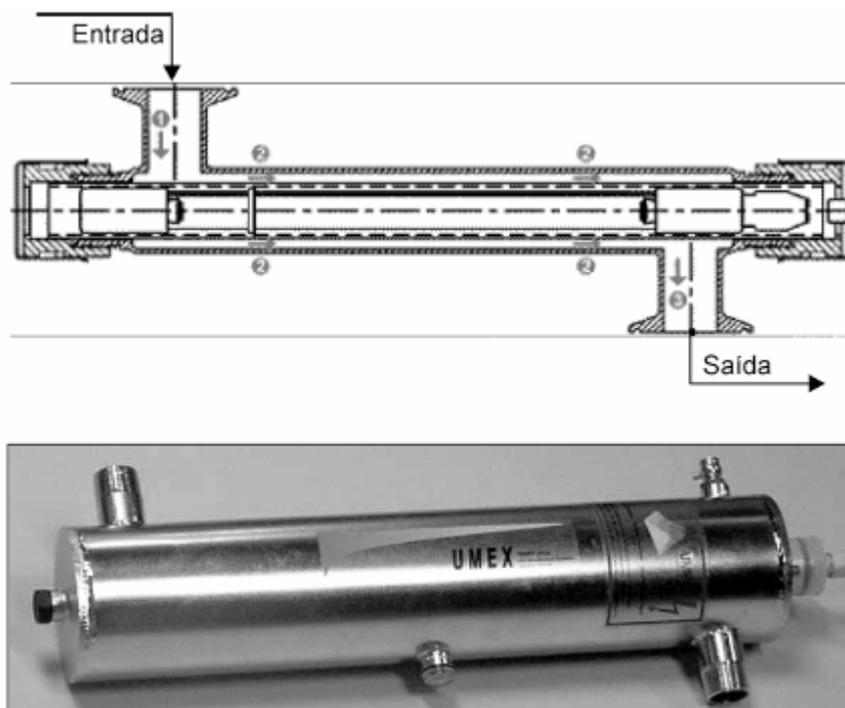


Figura 15. Reactor UV com lâmpada imersa e escoamento forçado em conduta no sentido horizontal.

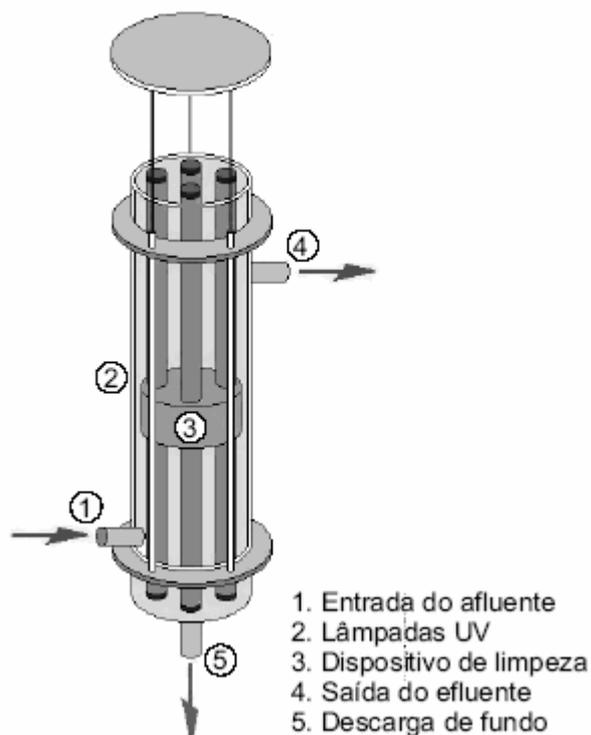


Figura 16. Reactor UV com lâmpada imersa e escoamento forçado em conduta no sentido vertical (Alves, 2003).

Tabela 6. Nível de desenvolvimento e aspectos de operação e manutenção dos processos.

Item	Lâmpadas emersas		Lâmpadas imersas	
	Escoamento em canal	Escoamento sob pressão	Escoamento em canal	Escoamento sob pressão
Estágio de desenvolvimento tecnológico	Bem desenvolvido	Desenvolvido	Bem desenvolvido	Bem desenvolvido
Dimensão da ETAR	Pequena a média	Pequena a média	Média a grande	Todos os tamanhos
Nível de tratamento antes da desinfecção	Secundário	Secundário	Secundário	Secundário
Complexidade da tecnologia	Simples	Moderada	Moderada	Moderada
Consumo energético	Intermédio	Intermédio	Reduzido	Reduzido
Exigência operacional	Mínima	Moderada	Moderada	Moderada
Limpeza das lâmpadas ou tubo de protecção	Não	Sim	Sim	Sim
Área requerida	Intermédia	Intermédia	Reduzida	Reduzida

4. DIMENSIONAMENTO DE UMA UNIDADE DE DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO UV

O dimensionamento de um reactor UV para desinfeção de uma água residual doméstica pode ser realizado por meio de modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos. Os modelos desenvolvidos por Scheible (1987) e Emerick e Darby (1993) (WEF, 1996), são apresentados de seguida.

Tendo por base a teoria para escoamentos não ideais apresentada por Levenspiel (1972), Scheible (1987) desenvolveu e validou o modelo apresentado na Equação 13.

$$N = N_0 \exp \left[\frac{u_m L}{2D} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4kD}{u_m^2}} \right) \right] + N_p \quad (13)$$

em que:

N , concentração de microrganismos no efluente sujeito à radiação UV (NMP/100 ml);

N_0 , concentração de microrganismos no afluente (NMP/100 ml);

N_p , concentração de microrganismos associada as partículas de matéria em suspensão (NMP/100 ml);

u_m , velocidade média do escoamento (cm/s);

L , comprimento do percurso monitorizado (cm);

D , coeficiente de dispersão longitudinal (cm²/s);

k , constante de inactivação (s⁻¹)

O valor de k é dado pela Equação 14:

$$k = a(I)^b \quad (14)$$

em que:

I , intensidade média de radiação UV no reactor (mW/cm²)

Por sua vez, o valor de N_p é calculado por:

$$N_p = c.(SS)^m \quad (15)$$

em que:

SS , concentração de sólidos suspensos (mg/L);

a, b, c, m coeficientes empíricos.

As limitações deste método têm a ver com a necessidade de conhecer previamente o coeficiente de dispersão longitudinal, e ainda, com a baixa correlação normalmente obtida ao ajustar a Equação 13 aos dados de amostras sujeitas a altas doses de radiação (Loge *et al.*, 1996).

Emerick e Darby em 1993 (ver WEF, 1996) propuseram um modelo empírico baseado em características do afluente (Equação 16).

$$N = A (SS)^a (TF)^b (N_0)^c (\beta)^c (dose)^n \quad (16)$$

em que:

N , concentração de microrganismos no efluente sujeito à radiação UV (NMP/100 ml);

SS , concentração de sólidos suspensos (mg/L);

TF , transmitância a 253,7 nm da amostra filtrada (%);

N_0 , concentração de microrganismos no afluente (NMP/100 ml);

β , coeficiente de distribuição do tamanho das partículas;

$dose$, dose efectiva média de radiação UV (mJ/cm²);

A, a, b, c, n , coeficientes empíricos.

Como limitação deste modelo pode apontar-se a necessidade de ter uma grande base de dados para obter coeficientes fiáveis, além de exigir regressão múltipla para obtenção dos mesmos.

4.1 Procedimento de Cálculo (reactor de lâmpadas emersas)

1º Passo: a partir de dados experimentais obtidos em ensaios em reactor fechado ou fluxo contínuo, estima-se a dose efectiva para atingir a eficiência de remoção de

microrganismos desejada. A dose efectiva pode ser obtida pela Equação 3:

$$D = I_m \cdot t \text{ [mJ/cm}^2\text{]}$$

A intensidade média no meio pode ser obtida pela Lei de Beer-Lambert (Equação 6):

$$I_m = \frac{I_0}{\alpha \cdot L} [1 - \exp(-\alpha \cdot L)] [\text{mW/cm}^2]$$

2º Passo: a dose aplicada é obtida pelo produto da intensidade de radiação ultravioleta na superfície do líquido (I_0) pelo tempo de exposição (t):

$$D_a = I_0 \times t \text{ [mJ/cm}^2\text{]} \quad (17)$$

3º Passo: cálculo da dose aplicada (D_{av}) por unidade de volume:

$$D_{av} = 0,278 \frac{D_a}{L} \text{ [Wh/m}^3\text{]} \quad (18)$$

em que:

D_a , dose de radiação aplicada na superfície do líquido (mJ/cm²);

L , espessura da lâmina de líquido (cm);

4º Passo: estimar o número de lâmpadas necessárias no reactor, o que pode ser calculado por:

$$n = \frac{Q \cdot D_a}{f \cdot P_{254}} \quad (19)$$

em que:

Q , caudal a tratar (m³/h);

P_{254} , potência da lâmpada a 254 nm (W);

f , fracção de energia que efectivamente chega ao líquido (eficiência do reflector).

5º Passo: calcular as dimensões do reactor. O volume do reactor é obtido a partir do tempo de exposição (t) e do caudal de água residual a tratar (Q). A área do reactor (A) obtém-se dividindo o volume pela espessura da lâmina líquida.

6º Passo: confirmar a dose de radiação aplicada, estimada no 2º passo. A dose média aplicada no reactor adoptado pode ser calculada por:

$$D_a(\text{reactor}) = \frac{n \times P_{254} \times f}{A} \times t \quad [\text{mJ/cm}^2] \quad (20)$$

Caso este último valor não seja compatível com a dose aplicada estimada, deve alterar-se o tempo de exposição da água residual à radiação no reactor, de forma a compatibilizar o valor com os dados iniciais.

O procedimento anteriormente descrito para dimensionar reactores UV, com lâmpadas emersas e escoamento em canal, foi utilizado no cálculo dos parâmetros apresentados na Tabela 7. Nela, são apresentados os principais parâmetros de dimensionamento deste tipo de processo, com base nas características do afluente a desinfectar.

Tabela 7. Parâmetros de dimensionamento de reactores UV (lâmpadas emersas e escoamento em canal), para diferentes tipos de afluente a ser desinfectado.

Tipo de efluente a tratar	Primário	Anaeróbio	Secundário aeróbio	Terciário aeróbio
Transmitância (%)	15 – 40	15 – 25	30 – 50	60 – 85
Absorvância (cm^{-1})	0,6 – 0,8	0,4 – 0,8	0,3 – 0,5	0,2 – 0,4
Dose aplicada (mJ/cm^2)*	130 – 175	90 – 155	80 – 135	70 – 135
Dose aplicada por volume (Wh/m^3)*	8,0 – 11	5,5 – 9,5	4,0 – 7,0	2,5 – 5,5
Potência instalada (W/hab)**	3,0 – 4,5	2,0 – 4,5	2,0 – 3,5	1,5 – 3,5
Potência consumida (kWh/hab.dia)**	5,0 – 6,5	3,0 – 6,5	2,5 – 4,0	1,5 – 3,0

* Valores aproximados a partir de uma dose efectiva de 21 mJ/cm^2 , calculada com base no valor médio da absorvância para cada efluente.

** Base de cálculo: População = 1000 hab. e uma captação de 150 L/hab.d ; lâmpadas de 30 W , eficiência de 75% .

5. MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO

5.1 Aspectos Operacionais e de Manutenção

A instalação de um sistema de desinfecção por radiação ultravioleta deve ser feita em local de fácil acesso, quer para operação do sistema, quer para efectuar serviços de manutenção.

As instalações eléctricas do sistema UV deverão contemplar uma linha exclusiva para motores e bombas, caso contrário podem ocorrer diversos problemas, como diminuição da vida útil das lâmpadas e das reactâncias electrónicas.

Como referido anteriormente, há dois tipos de configurações dos reactores de desinfecção por UV: lâmpadas imersas (de contacto) ou emersas (de não contacto) no meio líquido.

Em ambos, a principal operação corresponde à inspecção visual para avaliar da necessidade de limpeza, do canal ou das lâmpadas, esta última no caso de reactor com as mesmas imersas. A totalidade da superfície entre a fonte de radiação e os organismos-alvo deve manter-se limpa para o bom funcionamento do sistema, sendo a limpeza inadequada uma das causas mais comuns de baixa eficiência da desinfecção por UV (Usepa, 1999).

O procedimento de limpeza do canal pode ser hidráulico, manual ou automatizado. Em reactores com lâmpadas imersas a limpeza pode ser mecânica ou química, apresentando um funcionamento manual ou automatizado.

A limpeza química é comumente realizada com ácido cítrico ou soluções diluídas de vinagre ou hidróxido de sódio (Usepa, 1986). A sua frequência é específica para cada sistema, pelo que, deve ser estabelecida e implementada uma rotina de monitorização física e um cronograma de manutenção.

Os procedimentos operacionais devem incluir a monitorização e o controlo das variáveis do processo: transmitância da radiação ultravioleta no líquido (ou absorvância), características físicas do afluente (sólidos suspensos), caudal e nível do líquido no canal, concentração de ferro e dureza, tipo de efluente, tempo de funcionamento da lâmpada, temperatura e intensidade da radiação UV.

As operações de manutenção consistem na troca de lâmpadas, reactâncias e sistemas de controlo, e na manutenção das superfícies do reator, recuperação e pintura.

É importante que a substituição das lâmpadas seja feita em períodos não superiores a sua vida útil para funcionamento em contínuo, ou quando se constatar que a emissão de radiação pela lâmpada tem uma intensidade insatisfatória para promover a desinfecção, bem como, quando a lâmpada estiver queimada.

O sistema eléctrico de alimentação das lâmpadas germicidas deverá ser vistoriado mensalmente, efectuando-se os reparos necessários. As reactâncias electrónicas devem instalar-se em local ventilado e protegido da humidade, a fim de permitir uma adequada troca de calor.

O sistema de desinfecção deve contemplar um by-pass e ter flexibilidade suficiente para isolar cada módulo quando for necessário efectuar qualquer intervenção (manutenção correctiva ou preventiva), sem que ocorra a sua paralisação.

Pode ainda, prever-se a instalação de geradores para fornecimento de energia em emergências. O acesso a lâmpadas e reactâncias deve ser facilitado.

O stock de peças de manutenção deve incluir lâmpadas, tubos de quartzo, reactâncias electrónicas e outras peças de reposição.

Os relatórios de manutenção devem discriminar o tempo de uso das lâmpadas, vida útil e ciclo de reposição de equipamentos.

A Tabela 8 apresenta um conjunto de acções para a resolução dos problemas mais comuns e manutenção de sistemas de desinfecção por radiação ultravioleta.

Tabela 8. Problemas e soluções no funcionamento de reactivores UV (WEF, 1996).

Item	Problema	Verificar	Acção correctiva
	Aquecimento devido a ventilação deficiente do painel	Temperatura da superfície das reactâncias / período de funcionamento normal	Inserir ventilação no painel ou sistema de arrefecimento
Reactância electrónica	Aquecimento devido à distorção harmónica da fonte pelas reactâncias	Temperatura da superfície das reactâncias / funcionamento em stand-by	Verificar a qualidade da fonte de energia variando a carga de UV. Pode ser necessário sistema ou equipamento para filtrar as distorções
	Falhas frequentes das reactâncias	Ligação terra	Adequar a ligação terra às recomendações do fabricante
Medidor de intensidade	Acumulação de biofilme nos tubos de quartzo	Intensidade UV no sistema	Limpeza frequente
Lâmpada UV	Lâmpada queimada	Lâmpada	Substituir lâmpada
	Caudal baixo ou nulo	Aumento da temperatura do líquido	Aumentar o caudal
Monitorização da qualidade do efluente	Baixa eficiência da desinfecção	Alta concentração de sólidos	Verificar tratamento a montante
	Baixa eficiência da desinfecção: re-suspensão de sólidos depositados no fundo dos canais	Limpeza dos canais	Limpeza do canal
	Baixa eficiência da desinfecção: baixa dose de UV	Limpeza das superfícies	Limpar as superfícies
	Baixa eficiência da desinfecção: baixa dose de UV	Lâmpadas em funcionamento	Substituição das lâmpadas queimadas

5.2 Segurança em Sistemas de Desinfecção por UV

A radiação ultravioleta pode causar danos aos olhos e à pele não protegida. A exposição excessiva à radiação UV conduz à formação de queimaduras da pele. Cada exposição aos raios ultravioleta é armazenada na pele, ou seja, os danos causados pela exposição à radiação UV são cumulativos, sendo que os danos a nível celular podem ser irreversíveis. A exposição crónica ou prolongada à radiação ultravioleta tem sido relacionada com diversos efeitos sobre a saúde, nomeadamente o cancro de pele e o envelhecimento prematuro da pele.

Além da pele, a radiação ultravioleta representa um grande perigo para a saúde ocular. A exposição prolongada à radiação pode levar a um quadro agudo de vermelhidão e dor ocular, que no entanto melhora após 24 a 48 horas, sem deixar sequelas. Porém, a exposição crónica pode levar, ao longo de anos, ao desenvolvimento de problemas oculares como cataratas e degeneração da retina.

A principal regra de segurança é prevenir sempre a exposição à radiação ultravioleta. Assim, os operadores destes sistemas de tratamento devem ser informados sobre os danos causados pela radiação UV e quais os procedimentos a adoptar para os minimizar. Abaixo são citadas algumas precauções a serem tomadas pelos operadores:

- O operador nunca se deverá expor, directa ou indirectamente, aos raios ultravioleta;
- Nunca olhar directamente para a lâmpada germicida quando estiver ligada;
- Qualquer que seja a operação que exija remoção das lâmpadas, o operador deverá primeiro desligá-las;
- Pode prever-se um interruptor de segurança que desligará as lâmpadas sempre que haja risco de exposição dos operadores à radiação ultravioleta. Tal medida protegerá o operador em caso de erro de operação na manutenção do reflector, sem desligar o respectivo circuito eléctrico.

A melhor protecção é prevenir a exposição de qualquer parte do corpo à luz ultravioleta, pelo uso de luvas e protectores faciais que retêm esse tipo de radiação.

Os operadores devem utilizar roupa de trabalho com mangas compridas e calças. Devido à proximidade entre a corrente eléctrica e a água, devem tomar-se precauções relativamente a ligações eléctricas, ligações terra e interruptores.

6. BIBLIOGRAFIA

Alves, C.V.P. (2003). Ampliação de escala e avaliação de um fotorreator simplificado de radiação UV na desinfecção de esgotos tratados. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Blatchley III, E. (1997). Numerical modelling of UV intensity: application to collimated-beam reactors and continuous flow systems. *Water Research* 31, 9, 2205-2218.

Bolton, J.R. (2000). Calculation of ultraviolet fluence rate distributions in an annular reactor: significance of refraction and reflection. *Water Research* 34, 13, 3315-3324.

Chang, R. (1977). Physical chemistry with applications to biological systems. 2 ed.; New York: Macmillan Publishing Co. Inc.

Chernicharo, C.L. (2001). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. 2ª ed.; Belo Horizonte, MG: UFMG.

Emerick, R.W.; Loge, J.F.; Ginn, T.; Darby, J. (2000). Modeling the inactivation of particle associated coliform bacteria. *Water Environment Research* 72, 4, 432-438.

Harris, G.D.; Adams, V.D.; Sorensen, D.L.; Curtis, M.S. (1987). Ultraviolet inactivation of selected bacteria and viruses with photoreactivation of the bacteria. *Water Research* 21, 6, 687-692.

Loge, F.J.; Emerick, R.W.; Heath, M.; Jacangelo, J.; Tchobanoglous, G.; Darby, J.L. (1996). Ultraviolet disinfection of secondary wastewater effluents: prediction of performance and design. *Water Environment Research* 68, 5, 900-916.

Ryer, A.D. (1997). *Light measurement handbook*. 2. ed.; Newburyport: Technical Publications International Light Inc.

Severin, B.F.; Roessler, P.F. (1998). Resolving UV photometer outputs with modelled intensity profiles. *Water Research* 32, 5, 1718-1724.

Sommer, R.; Cabaj, A.; Pribil, W.; Haider, T. (1997). Influence of lamp intensity and water transmittance on the UV disinfection of water. *Water Science Technology* 35, 11-12, 113-118.

Tchobanoglous, G.; Loge, F.; Darby, J; Devries, M. (1996). UV design: comparison of probabilistic and deterministic design approaches. *Water Research* 33, 10-11, 251-260.

Tchobanoglous, G.; Loge, F.; Darby, J; Devries, M. (2003). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. New York: McGraw-Hill.

Treij, R. (1995). Ultraviolet technology. *Water Conditioning & Purification*.

Usepa – U. S. Environmental Protection Agency (1986). Design manual: municipal wastewater disinfection. Cincinnati: Office of Research and Development, Water Engineering, Research Laboratory, Center for Environmental Research Information (EPA/625/1-86/021).

Usepa – U. S. Environmental Protection Agency (1999). Wastewater technology fact sheet: ultraviolet disinfection. Washington: Office of Water (EPA/832/F-99/064).

WEF – Water Environment Federation (1996). Operation of municipal wastewater treatment plants: manual of practice MOP-11. 5^a ed. Alexandria: WEF.

White, S.C.; Jernigan, E.B.; Venosa, A.D. (1986). A study of operational ultraviolet disinfection equipment at secondary treatment plants. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 58, 3, 181-192.