

SISTEMA DE ESTERILIZAÇÃO PARA AMBIENTES HOSPITALARES, UTILIZANDO RADIAÇÃO UVC¹

Josemar Junior Weirich²
Rodrigo Konrath³
Fabiano Faller⁴
Maria Regina Thomaz⁵

RESUMO

Diante da ameaça à saúde global devido à resistência microbiana, antibióticos estão perdendo seu efeito contra bactérias multirresistentes. Uma saída para elimina-las sem utilizar produtos químicos que poderiam contribuir para adquirirem resistência, é a utilização de lâmpadas de mercúrio emissoras de radiação UVC com comprimento de onda de 254 nm, que são altamente eficazes na erradicação de microorganismos pelo fato de causarem danos fotoquímicos irreversíveis aos patógenos. Foram realizados os cálculos da quantidade de irradiação por área que seria necessária para a esterilização destes ambientes, e após isso foi realizado um teste prático com lâmpadas com o comprimento de onda supracitado. As bactérias utilizadas para o experimento foram *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*. Após o teste foram incubadas durante 24 horas para verificar se poderiam apresentar crescimento, e o resultado foi a esterilização de 2 logs (99 %), para 2 meios de cultura, e de 3 logs (99,9 %), para 4 meios de cultura. Provando assim o poder esterilizante de raios ultravioleta, e o seu potencial para contribuir com um ambiente hospitalar, cada vez menos suscetível a crescimento microbiano.

Palavras-chave: Esterilização. Infecções hospitalares. Sistema. Radiação UVC.

1 INTRODUÇÃO

Segundo o *European Centre for Disease Prevention and Control*, a resistência aos antibióticos está crescendo em todo o mundo, portanto o tratamento de doenças fica comprometido, assim como muitos avanços na área da medicina são prejudicados. Essa resistência ocorre naturalmente quando microorganismos maléficos tornam-se resistentes ao uso excessivo de antibióticos. Com isso, medicamentos mais caros deverão ser usados, e leve-se a um aumento no tempo de duração das doenças, tratamentos e dos custos com os cuidados de saúde (maior tempo de internação), bem como o custo econômico para as famílias ou sociedades (ECDC, 2018).

Recentemente, a ênfase se dá em como tomar precauções contra a criação, e se possível eliminar a resistência de microorganismos, em conjunto com a exploração de novos métodos

¹ Pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista pela UCEFF.

² Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da UCEFF Faculdades. E-mail: josemarsantasul@gmail.com

³ Docente do curso de Engenharia Elétrica da UCEFF Faculdades. E-mail: konrath@uceff.edu.br

⁴ Docente do curso de Engenharia Elétrica da UCEFF Faculdades. E-mail: fabiano.faller@uceff.edu.br.

⁵ Docente do curso de Engenharia Mecânica da UCEFF Faculdades. E-mail: mare_mrt@yahoo.com.br.

para a esterilização dos microorganismos patogênicos. Dentre esses novos métodos ou abordagens para essa erradicação, concentra-se esforços nas práticas não antibióticas, que consigam prevenir e proteger contra doenças infecciosas.

Uma tecnologia proeminente dentre práticas não antibióticas seria tecnologias a bases de luz, mais especificamente de irradiação ultravioleta C (UVC). Segundo Bolton (2013), as vantagens mais atraentes dessa tecnologia são a capacidade de erradicar microorganismos, independentemente de sua resistência antibiótica, e a improbabilidade dos próprios micróbios desenvolverem uma resistência a estas terapias a base de luz, devido à natureza não específica dos micróbios.

Observa-se que essa tecnologia de esterilização com radiação ultravioleta UVC, cresceu recentemente devido aos cuidados para proporcionar a desinfecção completa de superfícies do local em aplicação, juntamente com métodos de limpeza existentes. O uso de luz ultravioleta aumentou devido a sua facilidade de uso, tempos curtos de dosagem e ampla eficácia.

Em países de Primeiro Mundo essa tecnologia de esterilização já é usada, principalmente em ambientes hospitalares, clínicas, consultórios etc. Segundo o *American Ultraviolet Insightful Solutions* (2012), observa-se a eficiência em reduzir ou eliminar micróbios aéreos e de superfície indesejados em ambientes de saúde, utilizando-se um foco gerador de radiação ultravioleta (Lâmpada de Mercúrio de 254 nm) nesses ambientes, prevenindo assim a proliferação e conseqüentemente o número de infecções hospitalares.

Diante dessa opção comercial de utilização de Lâmpadas de Mercúrio de 254 nm, para a esterilização de ambientes clínicos e hospitalares, ascendemos a justificativa do artigo, e partindo desse pressuposto, pergunta-se: **Como calcular e verificar a eficácia de um equipamento emissor de radiação UVC, para realizar a esterilização em ambientes clínicos e hospitalares?**

Nessa linha de considerações, este estudo tem como objetivo calcular a intensidade de radiação gerada e verificar a eficácia de um equipamento com lâmpadas de mercúrio de 254 nm, para esterilização de ambientes hospitalares, para que essa tecnologia alie-se a outras práticas básicas de limpeza realizada com produtos químicos, afim de complementar e contribuir para um ambiente mais seguro contra infecções hospitalares.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INFECCÕES HOSPITALARES

Historicamente, o controle das infecções bacterianas hospitalares teve seu início em meados de 1935, utilizando a sulfanilamida, e a penicilina que fora descoberta por Alexander Fleming em 1928 (SANAR, 2019). Desde então novas pesquisas levaram por aumentar muito a eficácia da quimioterapia bacteriana. Porém, um grande número de microrganismos começou adquirir resistência a uma grande leva de agentes antimicrobianos, devido os seguintes mecanismos: mutação, transdução, transformação e por fim conjugação.

Entre os anos de 2011 e 2012, 1149 Hospitais da Europa foram submetidos ao Centro de Controle e Prevenção de Doenças da Europa, e foram analisados 231.459 pacientes. Segundo o relatório do *European Centre for Disease Prevention and Control* (2012), a quantidade de pacientes infectados por infecções atribuídas aos cuidados de saúde em hospitais da Europa, é cerca de 6,0 %. De um total de mais de 15.000 casos relatados, os mais frequentes são os de infecções respiratórias (pneumonia e trato respiratório 23,5 %), infecções no centro cirúrgico (19,6 %), infecções urinárias (19,0 %), infecções na corrente sanguínea (10,7 %), infecções gastrointestinais (7,7 %), entre outras.

No Brasil, de acordo com Aquino (2019), estima-se que infecções hospitalares atinjam 14 % das internações. Como prevenção o simples fato de higienizar as mãos continua sendo muito eficaz para a não propagação de doenças. Outros fatores citados como importantes na prevenção são a higienização dos ambientes aonde estão os pacientes, dos leitos, isolar os que já estão contaminados e a aplicação de protocolos de prevenção.

Em consequência disso a *World Health Organization* (2015), definiu como solução definitiva o saneamento das mãos, mas não somente isso. Como resposta a esse alto índice de incidência de infecções hospitalares, está sendo ofertado no mercado produtos à base de radiação UVC, que são dispositivos de desinfecção de salas em um período curto, de cerca de 15 minutos, que tem como objetivo geral a complementação da limpeza do ambiente. Estes dispositivos diminuem a carga biológica, esterilizam o ar e a superfície de todo o ambiente. Pelo fato da Luz UVC ser maléfica aos olhos humanos, deve-se tomar o cuidado de ser utilizado somente após o paciente deixar o leito hospitalar, e posteriormente da limpeza com produtos químicos.

2.1.1 Risco e crescimento de microorganismos

Atualmente a Microbiologia se depara com a descoberta de novos patógenos, e os antigos estão ressurgindo. Os microorganismos são classificados em quatro categorias de acordo com o grau de risco. No Quadro 1, apresenta-se categorias idealizadas pelo comitê (ACDP) *Advisory Committee for Dangerous Pathogens* e indicadas pelo (CDC) *Center for Disease Control do Reino Unido*.

Quadro 1 – Categoria de risco

Categoria de risco	Descrição
Risco Baixo	Micro-organismos raramente patógenos em humanos.
Risco Médio	Risco individual e limitado risco para a comunidade. Micro-organismos possivelmente patogênicos em humanos; podem representar riscos para os profissionais laboratoristas, mas de difícil disseminação na comunidade.
Risco Alto Individual	Alto risco individual e moderado risco para a comunidade. Micro-organismos que podem ser agentes de doenças graves em humanos e representam sérios riscos profissionais laboratoristas. Há disseminação na comunidade, porém a profilaxia e tratamento geralmente são eficazes.
Risco Alto Individual e para Comunidade	Alto risco individual e para a comunidade. Micro-organismos agentes de doenças graves em humanos e de alto risco para profissionais laboratoristas. Há disseminação na comunidade, e geralmente, a profilaxia e tratamento não são eficazes.

Fonte: *Advisory committee for dangerous pathogens* (2015).

Os microorganismos precisam de um meio de cultura favorável para seu crescimento. Alguns fatores importantes, são ambientais, como a temperatura e tensão de oxigênio. Quando um micro-organismo está em um meio de cultura que possua todos os requisitos nutritivos e também os fatores ambientais acima, seu desenvolvimento se inicia, passando por diversas fases de crescimento, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Fases de crescimento

Fase de Crescimento	Descrição
Fase Lag (Adaptação)	É o período que ocorre pouca ou nenhuma divisão celular. Durante esse período, as células se encontram em um estado estacionário. Esta população está passando por um período de intensa atividade metabólica, principalmente síntese de enzimas e de moléculas variadas, para então começar sua proliferação.
Fase Log (Exponencial)	A partir de um determinado tempo após a fase de Lag, as células iniciam seu processo de divisão entrando no período de crescimento. Durante esse período, a reprodução celular encontra-se extremamente ativa, e o tempo de geração atinge um valor constante, é o período de maior atividade metabólica da célula, originando a formação de um grupamento de bactérias da mesma espécie, que como a ser chamada de colônia.
Fase Estacionária	Em determinado momento a velocidade de crescimento diminui, o número de morte celular é equivalente ao número de células novas, e a população se torna estável. A atividade metabólica de cada célula também decresce nesse estágio, há pouco nutriente devido a fase de crescimento ser elevada anteriormente e acúmulos de produtos de degradação.

Fase de Declínio	Em determinado momento, a população microbiana entra na fase de morte celular, pois o número de células mortas excede o de células novas. Essa fase continua até que a população tenha diminuído para uma pequena fração do número de células da fase anterior, ou até que tenha desaparecido totalmente. Não Há nutriente.
------------------	---

Fonte: Zwietering (1991).

Fases de crescimento, são válidas para sistemas fechados. Observa-se na Figura 1, a curva de crescimento dos microorganismos de acordo com sua fase.

Figura 1 – Curva de Crescimento

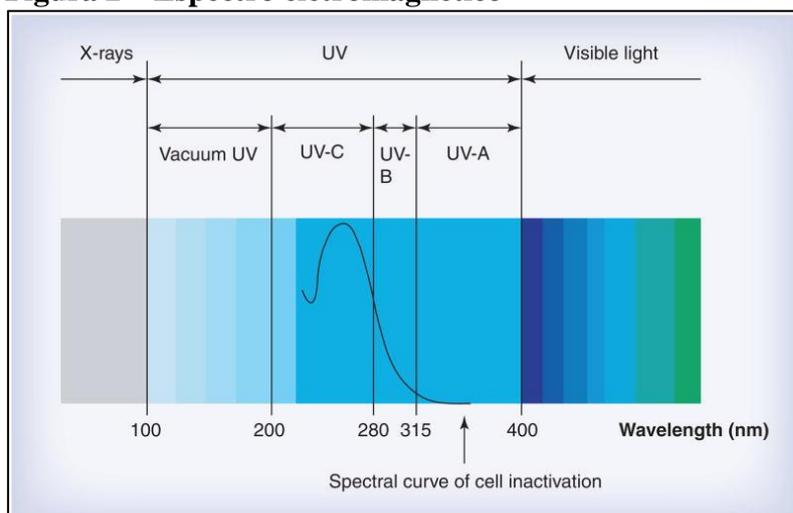


Fonte: Silva (2015).

2.2 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

A luz ultravioleta foi descoberta em 1801 por Johann Ritter. A radiação ultravioleta (UV), atua atômica e molecularmente nas estruturas alterando o DNA dos microorganismos, e também rompendo moléculas de carbono, que são essenciais a vida dos microorganismos, e acaba afetando todos os seres vivos e alguns materiais (SEELIG, 2003).

A luz (UV), ocupa uma pequena faixa de comprimentos de onda do espectro eletromagnético, se situa entre os raios-x (100 nm) e a luz visível (400 nm). As faixas ou regiões de radiação que compreendem a luz Ultravioleta (UV) são classificadas em Faixas A, B e C. A faixa de radiação UVC, corresponde ao intervalo entre 200 nm a 280 nm, como visualizaremos na Figura 2, que demonstra o Espectro da Curva de Inativação dos Microorganismos de acordo com o comprimento de onda da radiação Ultravioleta UVC, tendo seu pico de esterilização em 254 nm.

Figura 2 – Espectro eletromagnético

Fonte: (AUXTRAT, 2008).

Vários microorganismos respondem de forma diferente a luz. A Figura 3, mostra a dose necessária para três logs⁶ de inativação (99,9 %) para uma grande variedade de microorganismos patogênicos.

Figura 3 – Dose de UV necessária para inativação de diferentes tipos de microorganismos

PATÓGENOS ELIMINADOS COM LUZ ULTRAVIOLETA (UV)				DOSE UV (mJ/cm ²)		
Microorganismo	Tipo	Principal Doença	Resistência ao Cloro	1-log	2-log	3-log
Aeromonas hydrophila	Bactéria	Fasciíte Necrosante	Sim	1.1	2.6	3.9
Campylobacter jejuni	Bactéria	Hepatite	Não	1.6	3.4	4
E. coli	Bactéria	Diarreia	Sim*	1.5	2.8	4.1
Legionella pneumophila	Bactéria	Pneumonia	Sim*	3.1	5	6.9
Salmonella anatum	Bactéria	Salmonella	Sim	7,5	12	15
Salmonella antenidis	Bactéria	Salmonella	Sim	5	7	9
Salmonella typhi	Bactéria	Salmonella	Sim	2	3.5	5
Shigella sonnei	Bactéria	Diarreia	Não	3.2	4.9	6.5
Staphylococcus aureus	Bactéria	Gastroenterite	Não	3.9	5.4	6.5
Vibrio cholerae	Bactéria	Cólera	Sim*	0.8	1.4	2.2
Yersinia enterocolitica	Bactéria	Diarreia	Não	1.7	2.8	3.7
Adenovirus Tipo 40	Vírus	Infecção respiratória	Sim	30	59	90

Fonte: (WATERALL, 2016).

Na Figura 3, constata-se a Dose de UV necessária para a inativação de 3 logs (99,9 %), em diversos tipos de microorganismos, incluindo Vírus e Bactérias. A partir da Dose de UV necessária, que é medida em unidades de Energia por Área, chegamos ao conceito de

⁶ 1 log de inativação é 10^{-1} que é igual a 1 %, logo, 99 % de esterilização.

2 logs é 10^{-2} que fica 99,9 % de esterilização, e por fim, 3 logs que é 99,99 % de inativação microbiana.

Intensidade de uma Onda Eletromagnética, que é a energia total emitida em todas as direções, e a conservação dessa energia de onda, determina que a sua intensidade deve diminuir com o quadrado da distância até a fonte geradora, como nesse caso é irradiado em todas as direções, usa-se a área de uma esfera, de acordo com a equação 1.

$$I = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Onde:

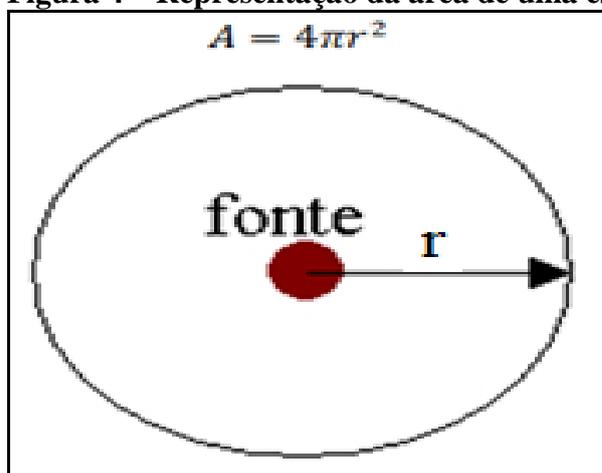
I = intensidade da onda emitida [cd];

P = potência real da fonte [W];

A = área de uma superfície esférica [m²].

A partir do uso de Candela como unidade de medida da Intensidade de onda, consideramos o uso da unidade lúmen por esferorradiano (lm / sr), que ambos possuem a relação de 1 para 1 entre si. O conceito de esferorradiano adentra na área de trigonometria esférica, e isso nos faz abandonar alguns conceitos da trigonometria plana, como o de que a soma dos ângulos internos de um triângulo é 180°. Já na trigonometria esférica esses ângulos são obrigatoriamente superiores a 180°, para melhor visualização desse conceito, segue Figura 4.

Figura 4 – Representação da área de uma esfera



Fonte: Silva (2015).

Diante destes conceitos sobre intensidade, conseguimos é possível determinar a quantidade de fótons por área, que são irradiados. Com isso, nos resta saber a energia de cada fóton, para comparar com a energia necessária para a erradicação de cada tipo de microrganismo, conforme Figura 3. Para descobrir o valor da energia de cada fóton, recorreremos ao ganhador do Nobel de Física em 1918, Max Planck. Onde constata-se que é possível calcular a radiação em função do comprimento de onda, conforme equação 5, e o comprimento de onda

que está relacionado com a frequência, segundo equação 6. Com isso é possível obter a intensidade da radiação alocada em determinada área, e a energia total em função do tempo determinado para a esterilização do ambiente citado.

$$E = h \times f \quad (2)$$

$$c = f \times \lambda \quad (3)$$

Onde:

E = energia Fundamental [J.s];

h = constante de Planck [J.s];

f = frequência [Hz];

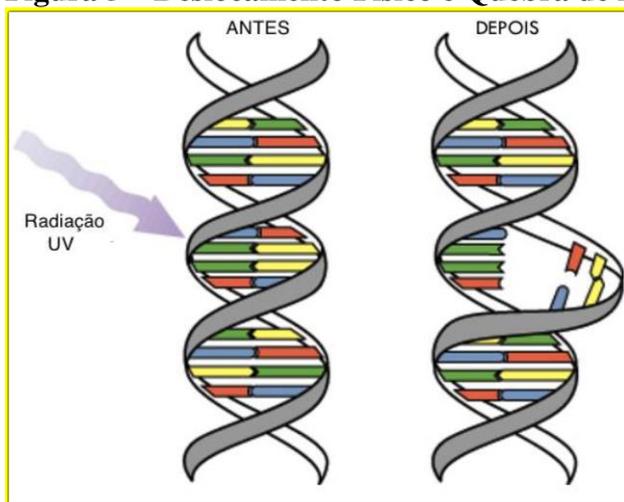
λ = comprimento de onda [m];

c = velocidade da luz no vácuo [m/s].

2.2.1 Efeitos da Radiação Ultravioleta

O efeito germicida da radiação ultravioleta altera o material genético de bactérias, vírus e fungos, bloqueando sua replicação, causando danos fotoquímicos e irreversíveis na estrutura dos microorganismos como a desnaturação proteica e desorganização da parede celular (EVANGELISTA, 2015). A radiação UVC é suficiente para causar um deslocamento físico de elétrons e também a quebra de ligações no ácido desoxirribonucleico (DNA) dos microorganismos, conforme Figura 5. Com esse dano e desnaturação proteica, altera-se seu metabolismo e reprodução, ou seja, acaba levando o microrganismo a morte (GUERRERO-BELTRAN e BARBOSA-CÁNOVAS, 2004).

Figura 5 – Deslocamento Físico e Quebra de Ligações



Fonte: (GONTIJO, 2015).

A radiação UVC tem o menor comprimento de onda e é a mais energética entre as radiações ultravioletas. Como sua capacidade de penetração é maior, há um maior risco biológico para quem é exposto. Esses raios em contato com a pele humana desencadeiam diversas alterações, desde queimaduras solar, e se exposto em altas doses diárias pode chegar ao desenvolvimento de uma lesão neoplásica como o câncer de pele não melanoma que é o câncer mais prevalente no Brasil e no mundo. (SILVA; OGAWA; SOUZA, 2017).

Diante disso, foram alocados dois temporizadores em série na base inferior do equipamento, um NA com dois minutos pré-selecionados, e o segundo NF com quinze minutos pré-selecionados, para que realizassem o acionamento e o desligamento seguro, visto que nenhum ser humano pode ter contato com a radiação UVC, ou seja, após o delay de 2 minutos para o equipamento entrar em funcionamento após energizado, ele permanece ligado por 15 minutos, para então se desligar automaticamente.

2.3 LÂMPADAS DE VAPOR DE MERCÚRIO

A fonte natural de radiação UVC é o Sol, e acaba por ser completamente absorvida nas camadas superior e média das atmosferas pelo ozônio e oxigênio molecular. As fontes artificiais de UV são chamadas de lâmpadas de mercúrio de onda curta, que são projetadas para produzir energia na região germicida (254 nm), podendo ser de vidro ou quartzo (LUCAS, 2003).

As lâmpadas de mercúrio são de baixa pressão, projetadas especialmente para produzir raios de UVC com potencial germicida e, também, se assemelham as lâmpadas fluorescentes normais. A principal diferença encontrada entre a lâmpada germicida e a fluorescente, é que a

germicida se constitui de quartzo, e também possui uma camada interna de fósforo que converte a Luz UV para luz visível (para identificarmos que a lâmpada está em funcionamento).

O princípio de funcionamento existente em uma lâmpada de vapor de mercúrio, se dá pela diferença de potencial aplicada nas extremidades, que acaba por gerar um campo elétrico em seu interior que ioniza o vapor de mercúrio, os quais produzem a emissão de UVC, (LUCAS, 2003).

2.3.1 Equipamentos

Diante do panorama acerca do uso de lâmpadas de mercúrio para a prevenção e controle de infecções em ambientes hospitalares, foi efetuado uma pesquisa a respeito dos equipamentos já existentes, que possuam o mesmo princípio de funcionamento a partir de lâmpadas de mercúrio de 254 nm. Deste modo constatou-se basicamente 2 formas de utilização, sendo uma fixa e outra móvel.

O modo de utilização fixo é constituído por lâmpadas de mercúrio fixadas nas paredes e teto em ambientes cirúrgicos, afim de quando finalizada a limpeza padrão, com produtos químicos, seja ligado o sistema de esterilização. É importante ressaltar, que em ambos os métodos, o ambiente precisa estar vazio, devido aos danos que a radiação pode causar ao corpo humano.

Já no método móvel é utilizada uma base, normalmente circular, que encontra-se envolta por diversas lâmpadas de mercúrio, afim de propagar a radiação por todo o ambiente e minimizar o sombreamento. Possui uma ampla vantagem, pelo fato de ser móvel e poder ser utilizada em diversos ambientes e leitos do mesmo estabelecimento hospitalar. A média de tempo para esterilização deste equipamento é de 15 minutos (AMERICAN ULTRAVIOLET 2012). Tal técnica ainda não é utilizada no Brasil, sendo encontrado principalmente nos Estados Unidos da América e nos países da Europa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente metodologia descreveu os procedimentos de coleta e análise dos dados e os materiais que levaram à obtenção dos resultados (MOTTA-ROTH; HENDGES, 2010). Sendo assim, este trabalho analisou a eficácia de um equipamento que esteriliza ambientes

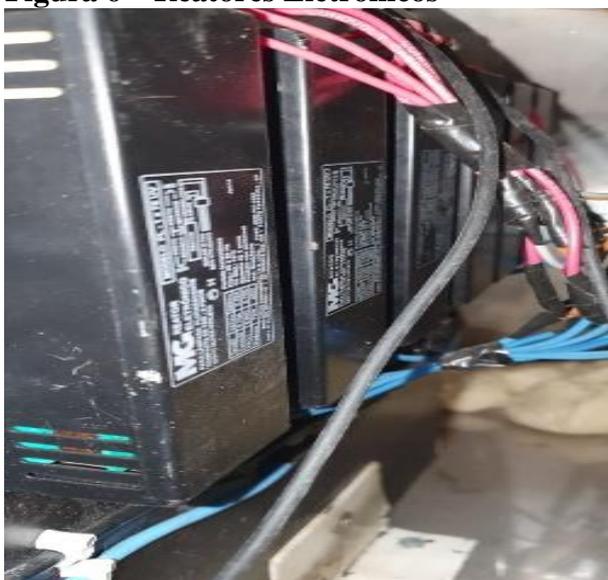
hospitalares, utilizando lâmpadas emissoras de radiação UVC, a partir de uma abordagem quantitativa, que só foi possível após a aplicação de testes em laboratório.

Portanto, considerando que a pesquisa utilizou abordagem quantitativa relacionada com as constatações da pesquisa bibliográfica, a abordagem é quali-quantitativa. Para o desenvolvimento deste projeto, necessitou-se de um equipamento que conseguisse se locomover, afim de esterilizar diferentes leitos de um mesmo hospital ou clínica, que seja possível solucionar o problema proposto. Diante disso, utilizou-se uma base em formato de hexágono, com 4 rodas de silicone em sua parte inferior.

Base que serviu para a alocação de 20 lâmpadas de mercúrio de baixa pressão com potência nominal de 75 W cada, e comprimento de onda de 254 nm. Lâmpadas que foram alocadas em forma circular na parte superior da base de suporte, com o objetivo de conseguir emitir radiação UVC em 360°.

As Lâmpadas escolhidas foram da marca Philips, modelo TUV T8 de 75 W e 0,84 A, pois possuem uma potência eficaz de radiação UVC de 25,5 W cada, também possuem um valor comercial relativamente acessível e um comprimento elevado, que garante uma emissão uniforme no ambiente. Suas dimensões são de aproximadamente 1213,6 mm de comprimento e 28 mm de diâmetro. Para que as lâmpadas entrassem em funcionamento foram necessários reatores individuais, conforme Figura 6. Os reatores utilizam uma corrente total de aproximadamente 8,4 A ($0,42\text{ A} \times 20$) e consomem cerca de 1360 W ($68\text{ W} \times 20$), dados referentes aos 20 reatores utilizados para o pleno funcionamento das lâmpadas germicidas.

Figura 6 – Reatores Eletrônicos



Fonte: Dados do estudo (2019).

Todos os reatores, ficam alocados internamente na base do equipamento, juntamente com uma contatora e 2 disjuntores para a proteção do equipamento, um com valor nominal de 10 A para curtos internos, e outro contra curtos externos de 20 A.

Para a obtenção dos resultados, foram coletadas em laboratório dois tipos diferentes de bactérias, ambas de Risco Moderado, conforme Quadro 1, *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, foram manipuladas em um meio de cultura chamado Cromoclin, destinado ao cultivo, contagem e identificação presuntiva de microrganismos causadores de infecções. A presente placa possui uma divisão ao meio, conforme Figura 7, sendo possível a alocação de ambas bactérias, uma em cada lado.

Figura 7 – Meio de Cultura Cromoclin



Fonte: Dados do estudo (2019).

Após semeado as bactérias nos meios de cultura da Figura 7, foi necessária a verificação da concentração de microrganismos em cada meio de cultura. Para isso foi utilizado um espectrofotômetro digital, que através de um feixe de luz é possível determinar a concentração de uma solução, vide Figura 8. Em seguida foram realizadas as soluções de cada bactéria. Foram alocadas no equipamento supracitado para a padronização de 100 inóculos, que é a suspensão de microrganismos em uma concentração adequada para ser utilizada, foram utilizados para todos os testes o valor aproximado de 100 inóculos, ou seja, todos os meios de cultura possuíram a mesma concentração de microrganismos para os testes realizados.

Figura 8 – Espectrofotômetro Digital

Fonte: Dados do estudo (2019).

Após a utilização do Espectrofotômetro para a padronização dos testes, tem-se os requisitos necessários para o objetivo geral do artigo, que é o cálculo e a verificação da eficácia de um equipamento emissor de radiação UVC para a esterilização de microrganismos, para uso em ambientes hospitalares.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CÁLCULOS PARA INATIVAÇÃO CELULAR

Para que a padronização dos experimentos ocorresse com eficácia foi necessário admitir alguns parâmetros para a disposição do equipamento emissor de radiação UVC, para com os meios de cultura. Primeiro parâmetro que precisa ser levado em consideração é a utilização das equações (1), (2) e (3), e partindo de seus resultados é efetuado a comparação com a Figura 3, para verificar se a energia gerada pelas lâmpadas UVC é o suficiente para esterilizar e/ou inibir o crescimento das bactérias *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*.

Para melhor disposição dos dados que serão utilizados para os cálculos, é utilizado o Quadro 3, onde se obtém valores nominais da lâmpada escolhida para o projeto, assim como valores como a constante de Planck e a velocidade da luz no vácuo.

Quadro 3 – Dados utilizados para os cálculos

Descrição	Valor
Potência Eficaz de cada Lâmpada	$P = 25,5 \text{ W}$
Comprimento de Onda	$\lambda = 254 \text{ nm}$

Constante de Planck	$h = 6,626 \times 10^{-34} J \cdot s$
Área	$A = 4\pi r^2$
Veloc. da luz no vácuo	$c = 299.792.458 \text{ m/s}$

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Partindo dos dados do Quadro 3, e através da equação (3), obtemos o valor da frequência da luz emitida:

$$299.792.458 = f \times 254 \cdot 10^{-9}$$

$$f = 1,1802 \cdot 10^{15} \text{ Hz.}$$

Então para encontrar a Energia de cada fóton liberado, é utilizado a equação (2):

$$E = 1,1802 \cdot 10^{15} \times 6,626 \cdot 10^{-34}$$

$$E = 7,8205 \cdot 10^{-19} \text{ J. s.}$$

Em seguida é calculado a intensidade irradiada, utilizando os valores da potência eficaz UVC de cada lâmpada, que é 25,5 W. Como conta-se com 5 lâmpadas no pior cenário possível, que emitem radiação para o mesmo ponto, necessita-se multiplicar os valores acima para obter a potência total eficaz, utilizando como base o raio esférico de 2,5 m², tendo como pretexto um leito hospitalar de cerca de 25 m² e que o equipamento fique situado no centro do leito, segue equação (1):

$$I = \frac{127,5 \text{ J/s}}{(4\pi 2,5^2)}$$

$$I = 0,0001623 \frac{\text{J}}{\text{s.cm}^2}$$

Após encontrada a Intensidade irradiada, é necessário transformá-la em mJ, e posteriormente multiplicá-la pelo tempo de uso, 900 segundos, para obter o valor de energia para finalmente realizar o comparativo com a “Dose UV” indicada na Figura 3,

$$E = 0,1623 \text{ mJ/s.cm}^2 \times 900 \text{ s}$$

$$E = 146,10 \text{ mJ / s.cm}^2, \text{ durante os 15 minutos.}$$

4.2 VALIDAÇÃO DO EXPERIMENTO

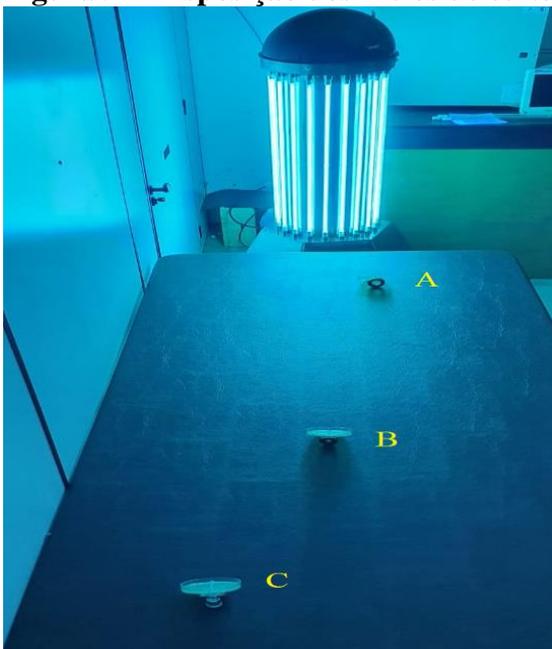
De acordo com o valor de irradiação calculado de 146,10 mJ / s.cm², e a constatação que as bactérias *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, sofrem inativação de 3 logs, com a dose UVC de 6.5 mJ / cm² e 4,1 mJ / cm², respectivamente, de acordo com Figura 3. Com isso

conclui-se que o valor irradiado é suficiente para a esterilização de ambos microrganismos, então ascendemos ao objetivo de verificação prática da eficácia da radiação UVC contra as bactérias supracitadas.

Após preparados quatro meios de cultura em laboratório, o primeiro meio de cultura de controle foi colocado em uma estufa, e os outros três nomeados de (A, B e C) foram alocados cuidadosamente em uma caixa de transporte para o local de execução dos testes. Quando alocadas, foi medido a distância até as fontes emissoras de UVC, então foram postas a três distâncias diferentes, sendo elas, 1 m, 2 m e 2,5 m.

Logo após a preparação do ambiente para a esterilização das bactérias, foi colocado em funcionamento o equipamento, usando os temporizadores para fazer o acionamento e o desligamento seguro, sem que se torne necessária interação humana com radiação UVC, segue Figura 9.

Figura 9 – Disposição dos meios de cultura durante o experimento



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Decorrido os 15 minutos do equipamento em funcionamento, os meios de cultura A, B e C foram fechados, e encaminhados ao laboratório onde já se encontrava o meio de cultura de controle, que foi igualmente preparado, porém não foi exposto a radiação UVC. Em seguida todos os meios de cultura foram alocados em uma estufa própria para crescimento microbiano, conforme Figura 10, onde contém os requisitos necessários, como temperatura, pressão e tensão de oxigênio.

Figura 10 – Estufa de cultura bacteriológica



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Após 24 horas incubados, foram retirados e encaminhados para observação, do comportamento dos meios de cultura que foram expostos a radiação, e efetuando o comparativo com o meio de cultura de controle, conforme Figura 11.

Figura 11 – Meios de Cultura de Controle, B, A e C, respectivamente



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Conforme Figura 11, o meio de cultura de controle, que não foi exposto a radiação UVC, obteve um enorme crescimento de *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*. Nota-se um leve aglomeramento nas bordas dos meios A e C, devido a um possível sombreamento levando em consideração que os meios de cultura encontravam-se levemente inclinados em direção as lâmpadas UVC. Já o meio B obteve-se uma esterilização altamente satisfatória. Então foi analisado a contagem de colônias com microscópio para a validação de quantos logs de inativação cada meio obteve, segue resultado no Quadro 5.

Quadro 5 – Inativação celular nos meios de cultura

Meios de Cultura	Inativação em Logs
Controle - <i>Staphylococcus aureus</i>	Nenhuma.

<i>Controle - Escherichia coli</i>	Nenhuma.
<i>A (1 m) - Staphylococcus aureus</i>	99,0 % (2 logs).
<i>A (1 m) - Escherichia coli</i>	99,9 % (3 logs).
<i>B (2 m) - Staphylococcus aureus</i>	99,9 % (3 logs).
<i>B (2 m) - Escherichia coli</i>	99,9 % (3 logs).
<i>C (2,5 m) - Staphylococcus aureus</i>	99,0 % (2 logs).
<i>C (2,5 m) - Escherichia coli</i>	99,9 % (3 logs).

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Analisando o Quadro 5, nota-se a eficácia mínima de 2 logs de inativação, ou seja 99 %, na esterilização de microrganismos utilizando radiação ultravioleta UVC. A partir disto pode-se considerar o resultado como satisfatório.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se que os cálculos, assim como o experimento prático, apresentaram resultados com uma diferença pouco expressiva entre os logs de esterilização, o que acabou atestando a eficiência de funcionamento do equipamento. Após finalizados os cálculos para o valor irradiado de radiação ultravioleta C, na ordem de 146 mJ / s.cm², foi atestado suficiente para a esterilização das bactérias em questão. Todavia se não levar em consideração regiões sombreadas, o equipamento obteve 99,9 % de esterilização. Com isso foi comprovado através de cálculos e experimento prático a eficiência da radiação UVC para esterilização de microorganismos. A partir dessa conclusão poderia ser possível diminuir o número de lâmpadas dispostas para eventual melhor custo benefício.

Como sugestão para futuro estudo, uma reorganização na disposição das lâmpadas para eventual diminuição de custos, e a elaboração de práticas utilizando sistemas eletrônicos opensource, como Raspberry pi 3, para o controle total, e comando por celular do equipamento em questão, tornando-se prático e não sendo necessário o uso de temporizadores eletromecânicos.

REFERÊNCIAS

ADVISORY COMMITTEE ON DANGEROUS PATHOGENS. **Management of Hazard Group 4 viral haemorrhagic fevers and similar human infectious diseases of high consequence.** 2015. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/534002/Management_of_VHF_A.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2018.

AMERICAN ULTRAVIOLET INSIGHTFUL SOLUTIONS. **How can the air, and surfaces, be cleaned to lower the risk from the usual suspects?** 2012. Disponível em: <<https://www.americanultraviolet.com/germicide-healthcare-solutions/documents/AUV-Mobile-UVC-brochure.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2019.

AQUINO, Yara. **No Brasil, taxa de infecções hospitalares atinge 14% das internações.** 2019. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2019-05/no-brasil-taxa-de-infeccoes-hospitalares-atinge-14-das-internacoes>>. Acesso em: 10 set. 2019.

AUXTRAT. **Desinfecção e esterilização ultravioleta.** Disponível em <<http://www.auxtrat.com.br/ultravioleta/>> 2008. Acesso em 02 de novembro de 2017.

BOLTON, James R. **Ultraviolet Applications Handbook.** 2013. Disponível em: <jbolton@boltonuv.com>. Acesso em: 21 out. 2017.

ECDC, European Centre for Disease Prevention and Control. **Point prevalence survey of healthcare-associated infections and antimicrobial use in European acute care hospitals.** 2012. Disponível em: <www.ecdc.europa.eu/publications>. Acesso em: 10 ago. 2019.

ECDC, European Centre for Disease Prevention and Control. **Antibiotic / Antimicrobial Resistance (AR / AMR).** 2018. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/drugresistance/about.html>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

EVANGELISTA, Z. R. **Radiação UV-C e cloreto de cálcio na qualidade pós-colheita da jabuticaba 'sabará,** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Engenharia de Sistemas Agroindustriais). Programa de pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis.

GONTIJO, Rafael. **Radiação Ultravioleta.** 2015. Disponível em: <<http://www.rafaelgontijo.com.br/radiacao.html>>. Acesso em: 13 jul. 2019.

GORDON, Peter E. **IUVA Healthcare.** 2014. Disponível em: <<http://www.iuva.org/>>. Acesso em: 10 set. 2019.

GUERRERO-BELTRÁN, J. A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Review: advantages and limitations on processing foods by UV light. **Food Science and Technology International**, v. 10, n. 3, p.137-147, 2004.

LUCAS, J. Integrating MAP with new germicidal techniques. In: AHVENAINEN, R. **Novel food packaging techniques.** 2003. Boca Ratón, Flórida: CRC, 2003. Chap. 15.

MOTTA-ROTH, Désirée; HENDGES, Graciela H. **Produção textual na universidade.** 2010. Disponível em: <<http://www.rle.ucpel.tche.br/index.php/rle/article/download/792/666>>. Acesso em: 20 out. 2019.

SANAR, Editora. **Comissão de Controle de Infecção Hospitalar | Tudo que você precisa saber.** 2019. Disponível em: <<https://www.editorasanar.com.br/blog/farmacia-farmaceutico-controle-infeccao-hospitalar-artigo>>. Acesso em: 12 maio 2019.

SEELIG, M. **Radiação ultravioleta.** Disponível em <<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/rad-uv-seelig.pdf>> Acesso em 23 de novembro de 2017.

SILVA, Domiciano Correa Marques da. **Intensidade da onda eletromagnética.** 2015. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/intensidade-onda-eletromagnetica.htm>>. Acesso em: 12 set. 2019.

SILVA, N. B. **Modelagem matemática do crescimento de *Lactobacillus viridescens* sob condições não isotérmicas em presunto fatiado embalado a vácuo.** Mestrado em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

SILVA, Gabriela Dias da; OGAWA, Melina Mayumi; SOUZA, Priscila Castro de. **Os efeitos da exposição à radiação ultravioleta ambiental.** 2017. Disponível: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAEiqAAJ/ultravioleta>. Acesso em 05 out 2017.

WATERALL. **Soluções: Patógenos Eliminados com luz Ultravioleta.** 2016. Disponível em: <<http://waterall.com.br/nossa-atuacao/saneamento/aquanetto/>>. Acesso em: 15 out. 2019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **SAVE LIVES: Clean Your Hands.** 2015. Disponível em: <https://www.who.int/gpsc/5may/HHSAF2015_EN.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2019.

ZWIETERING, M. H, KOOS, J. T.; HASENACK, B. E.; WIT, J. C.; RIET, K. V. **Modeling of bacterial growth as a function of temperature.** 1990. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 57, p. 1094-1101, 1991.