



Otimização do processo de desinfecção de ambientes por radiação ultravioleta C

Optimization of the process of room disinfection using ultraviolet C radiation

Optimización del proceso de desinfección de ambientes mediante radiación ultravioleta C

Wagner de Anchieta Marques¹, Ricardo Campanha Carrano¹.

RESUMO

Objetivo: Avaliar a eficiência energética das abordagens utilizadas por equipamentos para desinfecção de ambiente por radiação UVC (ultravioleta C). **Métodos:** O estudo considerou somente equipamentos de desinfecção comercialmente disponíveis e que possuem comprovação científica verificada através de artigos científicos. A avaliação foi realizada a partir de simulações e de modelos matemáticos. Nessa avaliação, o consumo de energia dos equipamentos foi comparado após a aplicação das abordagens em um ambiente de controle simulado. A comparação do consumo das abordagens foi feita considerando os mesmos pontos de desinfecção no ambiente e para os mesmos micro-organismos e taxas de desinfecção. **Resultados:** A avaliação mostrou que uma das abordagens permitiu uma redução de 64,71% no consumo de energia elétrica, devido à redução da potência do equipamento para um quinto do seu valor original, sem comprometer a capacidade de desinfecção do ambiente. **Conclusão:** Essa redução é capaz de viabilizar o uso de equipamentos com comprovação científica, pois como os atuais equipamentos demandam uma alta potência elétrica para funcionar, apenas algumas tomadas elétricas podem fornecer energia para esses equipamentos. Assim, os equipamentos podem ser conectados em qualquer tomada disponível no ambiente em que será realizada a desinfecção, o que pode ser fundamental em períodos de pandemia, como a COVID-19.

Palavras-chave: Radiação UVC, Desinfecção de ambiente, Eficiência energética.

ABSTRACT

Objective: To evaluate the energy efficiency of approaches used by equipment for room disinfection by UVC (ultraviolet C) radiation. **Methods:** The study considered only commercially available disinfection equipment that has scientific evidence verified through scientific articles. The evaluation was carried out based on simulations and mathematical models. In this evaluation, the energy consumption of the equipment was compared after the application of the approaches in a simulated control environment. The comparison of the consumption of the approaches was made considering the same disinfection points in the environment and for the same microorganisms and disinfection rates. **Results:** The evaluation showed that one of the approaches allowed a 64.71% reduction in electricity consumption, due to the reduction of the equipment's power to one fifth of its original value, without compromising the environment's disinfection capacity. **Conclusion:** This reduction is capable of enabling the use of scientifically proven equipment, since, as current equipment requires high electrical power to operate, only a few electrical outlets can supply energy to this equipment. Therefore, the equipment can be connected to any available socket in the environment where disinfection will be carried out, which can be essential during pandemic periods, such as COVID-19.

Keywords: UVC radiation, Room disinfection, Energy efficiency.

¹ Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói - RJ.

RESUMEN

Objetivo: Evaluar la eficiencia energética de los enfoques utilizados por los equipos para la desinfección ambiental mediante radiación UVC (ultravioleta C). **Métodos:** El estudio consideró únicamente equipos de desinfección disponibles comercialmente que cuentan con evidencia científica verificada a través de artículos científicos. La evaluación se realizó mediante simulaciones y modelos matemáticos. En esta evaluación, se comparó el consumo de energía del equipo después de aplicar los enfoques en un entorno de control simulado. La comparación del consumo de los enfoques se realizó considerando los mismos puntos de desinfección en el ambiente y para los mismos microorganismos y tasas de desinfección.

Resultados: La evaluación mostró que uno de los enfoques permitió una reducción del 64,71% en el consumo de energía eléctrica, debido a la reducción de la potencia de los equipos a una quinta parte de su valor original, sin comprometer la capacidad de desinfección del ambiente. **Conclusión:** Esta reducción es capaz de posibilitar el uso de equipos científicamente probados, ya que como los equipos actuales requieren de alta potencia eléctrica para funcionar, sólo unas pocas tomas eléctricas pueden suministrar energía a estos equipos. Por tanto, el equipo se puede conectar a cualquier enchufe disponible en el entorno donde se realizará la desinfección, lo que puede resultar imprescindible en periodos de pandemia, como la del COVID-19.

Palabras clave: Radiación UVC, Desinfección ambiental, Eficiencia energética.

INTRODUÇÃO

Em estabelecimentos assistenciais de saúde (EAS), como hospitais e clínicas médicas, a desinfecção é uma das principais formas de controle de infecções hospitalares (ANVISA, 2012). Além disso, em um cenário de pandemia de uma doença infecciosa, também se torna importante a desinfecção de ambientes de outros EAS. Como é o caso dos hospitais de campanha, postos de saúde, Unidades de Pronto Atendimento (UPA), bem como outros estabelecimentos como casas de repouso, escolas, hotéis, entre outros, conforme observado na pandemia da COVID-19 (ANVISA, 2020).

Entre os métodos de desinfecção existentes, a radiação ultravioleta C (UVC) se destaca por ser um método em que a sua aplicação não necessita de manipulação, armazenamento e transporte de soluções químicas. Em geral, os produtos químicos para desinfecção são itens consumíveis e por isso precisam de reposição à medida que são usados. Além disso, após a aplicação da radiação UVC não há efeito residual danoso aos seres humanos, diferentemente de alguns produtos químicos para desinfecção (MARTINS RJ, 2021).

Atualmente é possível encontrar diversos equipamentos para desinfecção de ambientes por radiação UVC disponíveis no mercado. No entanto, apenas alguns possuem comprovação científica, seja por artigos científicos publicados em revistas, seja por relatórios de estudo produzidos por laboratório de análises microbiológicas. Assim, os equipamentos que estão comercialmente disponíveis e que possuem comprovação científica serão considerados neste trabalho, como sendo os principais equipamentos emissores de radiação UVC. Esses equipamentos estão apresentados de forma comparativa na (**Tabela 1**).

Conforme pode ser observado na (**Tabela 1**), a potência elétrica dos equipamentos varia entre 1.500 e 2.400 W. A corrente elétrica indicada na (**Tabela 1**) é a corrente máxima recomendada pelo fabricante, que a tomada deve suportar para que o equipamento possa ser ligado com segurança. Assim, em um ambiente que tenha apenas tomadas de 127 V e corrente máxima de 10 A, os principais equipamentos não podem operar, por causa do limite de potência dessas tomadas. Essa restrição da potência das tomadas disponíveis no ambiente se torna ainda mais relevante, se ocorrer durante uma pandemia de uma doença infecciosa.

Tabela 1 - Comparação entre os principais equipamentos

Nome comercial	Hyper Light P3	Xenex	Tru-D	Helios	M15 / M20
Fabricante	Mediland	Xenex Disinfection Services	PDI	Surfacide	UVC Cleaning Systems
Referência	Yang JH, et al. (2019)	Kitagawa H, et al. (2021)	Shen LH e Gonzales EA (2017)	Bedell K, et al. (2016)	UVC Cleaning Systems Inc. (2014) / Antimicrobial Test Laboratories (2014)
Potência elétrica	2.200 W	820 W	2.400 W	1.500 W	1.920 W / 2.340 W
Tensão elétrica	220-240 Vac	100-240 Vac	120-240 Vac	120-240 Vac	120 Vac / 120-240 Vac
Corrente máxima da tomada	10 A	15-10 A	20-10 A	10 A	15 A / 20-10 A

Fonte: Marques WA e Carrano RC, 2025.

A capacidade de um equipamento de realizar a desinfecção do ambiente está relacionada, com a aplicação da dose necessária para eliminar os micro-organismos que estão nas superfícies de interesse. A dose UVC é a energia radiante UVC recebida por uma superfície por unidade de área em determinado intervalo de tempo. A unidade da dose no SI é J/m², podendo ser calculada a partir da seguinte equação:

$$D = i \cdot t \quad (1)$$

Onde, *i* é a irradiância e *t* é o tempo de duração da irradiação em segundos. A irradiância é a potência radiante que incide sobre uma superfície por unidade de área, dada em W/m². Entretanto, o valor da irradiância decai muito rapidamente a medida em que se afasta da fonte emissora (lâmpada UVC). Portanto, quanto maior a distância entre a fonte e o ponto de interesse, em que se deseja realizar a desinfecção, menor será a dose fornecida nesse ponto.

O valor reduzido da irradiância nos pontos mais distantes do ambiente em relação a fonte emissora e até mesmo nas regiões de sombra, é um dos motivos pelos quais, a potência dos principais equipamentos precisa ser tão elevada. Como nos pontos mais distantes a irradiância é reduzida, então os equipamentos precisam emitir mais radiação UVC, para compensar a forte atenuação da irradiância com a distância. Essa compensação por sua vez implica em um maior consumo de energia elétrica do equipamento.

Para avaliar como é possível tornar o processo de desinfecção de ambientes por radiação UVC mais eficiente energeticamente, é interessante observar como esse processo é realizado atualmente. Observando como os principais equipamentos emissores de radiação UVC são usados para realizar a desinfecção de um ambiente, foi possível identificar que duas abordagens podem ser utilizadas durante esse processo. Neste trabalho as abordagens serão chamadas de centralizada e distribuída, as quais serão apresentadas a seguir.

Na abordagem centralizada, a desinfecção é realizada em um único ciclo, ou seja, um equipamento composto por um emissor de radiação UVC é posicionado apenas uma vez no ambiente. A posição do emissor é definida pelo operador de modo a alcançar as regiões de interesse, que geralmente são as superfícies de alto toque, como maçanetas, interruptores e as laterais da cama, por exemplo. Essas superfícies são frequentemente tocadas e por isso possuem grande potencial de contaminação. Por esse motivo, as superfícies de alto toque costumam ser as superfícies de interesse na desinfecção do ambiente.

Na abordagem distribuída, a desinfecção do ambiente é realizada em vários ciclos de desinfecção com um único equipamento emissor ou em um único ciclo com vários equipamentos emissores. Uma das principais vantagens da abordagem distribuída em relação à centralizada, é a maior flexibilidade para posicionar o equipamento o mais próximo possível dos pontos de interesse no ambiente. A hipótese de que essa aproximação pode tornar o processo de desinfecção mais eficiente energeticamente está baseada no fato de que a irradiância é mais intensa nas proximidades das lâmpadas UVC.

Dessa forma, a abordagem distribuída pode ser uma alternativa para tornar o processo de desinfecção de ambientes por radiação UVC mais eficiente energeticamente e, com isso, viabilizar o uso de equipamentos com comprovação científica, principalmente em períodos de pandemia de doenças infecciosas.

Como visto, os equipamentos para desinfecção de ambientes por radiação UVC atualmente disponíveis no mercado, e que possuem comprovação científica de desinfecção operam em potência elétrica elevada. Por conta disso, eles podem ter dificuldades para operar em alguns ambientes, por causa do limite de tensão e de corrente das tomadas elétricas disponíveis no ambiente (ABNT, 2004).

Diante disso, a otimização do processo de desinfecção de ambientes por radiação UVC pode tornar esse processo mais eficiente energeticamente. Ou seja, com a otimização é possível obter os mesmos resultados dos equipamentos atuais na desinfecção do ambiente, porém consumindo menos energia elétrica. A maior eficiência energética na desinfecção do ambiente pode permitir, por exemplo, que os equipamentos possam ser conectados em qualquer tomada elétrica, independentemente da sua tensão ou corrente máxima suportada, uma vez que sua potência poderá ser reduzida para um nível compatível com uma tomada de 10 A.

Além disso, a otimização possibilita que mais equipamentos possam ser usados simultaneamente. A utilização simultânea de vários equipamentos em um ambiente tem a vantagem de ampliar o alcance da radiação UVC. Como a radiação UVC tem um comportamento similar à luz visível, que não é capaz de ultrapassar ou contornar obstáculos, então regiões de sombra podem existir durante a desinfecção. Assim, o uso de mais equipamentos no ambiente pode reduzir as regiões sombra e aumentar a área de desinfecção (JOLLY J, 2021).

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência energética das abordagens utilizadas atualmente para desinfecção de ambientes por radiação UVC. Essa avaliação será realizada através de simulação e modelagem, onde um ambiente de controle simulado e modelos matemáticos foram considerados.

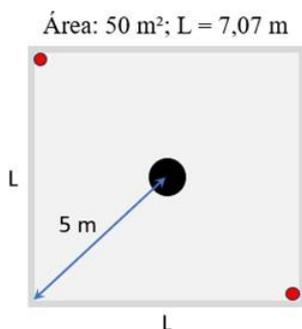
MÉTODOS

Tratou-se de um estudo experimental, analítico com o objetivo de verificar se a abordagem distribuída é mais eficiente energeticamente do que a abordagem centralizada. Ou seja, foi testado se a abordagem distribuída é capaz de alcançar a mesma taxa de desinfecção nos pontos de interesse do ambiente que a abordagem centralizada, porém consumindo menos energia.

Esse teste foi realizado em um ambiente de controle simulado, onde após aplicação de ambas as abordagens, o consumo de energia elétrica de cada abordagem será comparado. Nesse processo, foram considerados alguns micro-organismos e valores de taxa de desinfecção. Também foram considerados diferentes níveis de potência elétrica do equipamento de desinfecção.

A avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída foi realizada a partir de simulações e de modelos matemáticos. Nessa avaliação, a potência e o consumo de energia elétrica da abordagem centralizada foram usados como base de comparação. A simulação foi realizada considerando um ambiente de controle com 50 m² de área e com os lados iguais, medindo aproximadamente sete metros de comprimento. Nesse ambiente, a distância entre o centro e os cantos é de cinco metros. Essa será a maior distância entre o equipamento e os pontos de interesse considerados na simulação. Na **Figura 1** é mostrado a vista superior do ambiente de controle simulado.

Figura 1 - Simulação: abordagem centralizada.



Fonte: Marques WA e Carrano RC, 2025.

Para avaliar a eficiência energética da abordagem distribuída em relação a abordagem centralizada, serão comparados a potência e o consumo de energia elétrica de ambas as abordagens, ao eliminarem o mesmo percentual de micro-organismos nos pontos de interesse do ambiente de controle. Os micro-organismos e as taxas de desinfecção foram escolhidos de acordo com os valores de dose de radiação UVC disponíveis na literatura (MALAYERI AH, et al., 2016).

A simulação foi iniciada estabelecendo-se um caso base, onde a desinfecção do ambiente de controle foi realizada através da abordagem centralizada. Esse caso serviu como base de comparação para a potência e o consumo de energia elétrica das abordagens. O equipamento utilizado na abordagem centralizada foi o de maior potência entre aqueles considerados na simulação.

Dentro do ambiente de controle foram escolhidos dois pontos de interesse, para auxiliar na avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída, que estão localizados em cantos opostos do ambiente. Esses pontos estão indicados em vermelho na (Figura 1).

Entretanto, para calcular o consumo de energia elétrica do equipamento ao eliminar os micro-organismos situados nos pontos de interesse, é necessário primeiro estimar a irradiância nesses pontos. A partir dessa estimativa, foi possível determinar o tempo de desinfecção necessário para alcançar a dose UVC nos pontos de interesse. O tempo de desinfecção é um dos parâmetros que determina o consumo de energia do equipamento. A irradiância no ponto de interesse pode ser estimada a partir de modelos matemáticos.

Na avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída foram utilizados dois modelos matemáticos extraídos da literatura. O primeiro deles, chamado fator de visão da radiação, tem como objetivo estimar a irradiância produzida por uma lâmpada UVC. O segundo modelo, chamado dose resposta, relaciona a dose de radiação UVC com a taxa desejada para alguns micro-organismos.

O modelo fator de visão da radiação tem sido utilizado por apresentar boa correspondência com os dados experimentais, tanto para pequena quanto para grandes distâncias (PESSÔA M, et al., 2021; ROCHA AS, et al., 2021; SANTOS VC, et al., 2008). Por isso, esse modelo foi adotado neste trabalho. O fator de visão da radiação F pode ser calculado com a seguinte equação:

$$F(x, l, r) = \frac{L}{\pi H} \left[\frac{1}{L} \operatorname{atan} \left(\frac{L}{\sqrt{H^2 - 1}} \right) - \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{H-1}}{H+1} \right) + \frac{X-2H}{\sqrt{XY}} \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{X(H-1)}}{\sqrt{Y(H+1)}} \right) \right] \quad (2)$$

Os parâmetros da equação (2) são definidos de acordo com as equações (3), (4), (5) e (6) a seguir.

$$H = x/r \quad (3)$$

$$L = l/r \quad (4)$$

$$X = (1 + H)^2 + L^2 \quad (5)$$

$$Y = (1 - H)^2 + L^2 \quad (6)$$

Onde x , l e r são, respectivamente, a distância do centro da lâmpada UVC até o ponto de interesse, o comprimento e o raio da lâmpada UVC. O fator de visão da radiação é adimensional. Como a irradiância i_0 na superfície da lâmpada é dada pela relação entre a potência UVC (P_{UVC}) emitida com a área da sua superfície como mostra a (**Equação 10**), então de acordo com o modelo fator de visão da radiação, a irradiância i_x em um ponto das superfícies a uma distância x pode ser calculada com a (**Equação 8**). Onde i_0 e i_x são dadas em W/cm^2 .

$$i_0 = P_{UVC}/2\pi rl \tag{7}$$

$$i_x = i_0 F = (P_{UVC}/2\pi rl) F \tag{8}$$

Portanto, o modelo fator de visão da radiação permite calcular a irradiância de uma lâmpada UVC, em um ponto de interesse a uma distância x e a partir de suas dimensões e potência UVC emitida. O modelo de lâmpada UVC escolhida para ser usada na simulação possui 54 W de potência elétrica nominal e sua potência UVC emitida é de 18,5 W. O raio e o comprimento dessa lâmpada são, respectivamente, 1,4 cm e 89,46 cm (PHILIPS LIGHTING, 2023).

O modelo dose resposta relaciona a dose de radiação UVC necessária para alcançar taxas de desinfecção para alguns micro-organismos. Essa relação está baseada na resposta dos micro-organismos após serem expostos a doses de radiação UVC. As respostas são obtidas a partir de testes relatados em estudos disponíveis na literatura (JACOB SM e DRANOFF JS, 1970; MALAYERI AH, et al., 2016).

A **Tabela 2** apresenta valores de doses UVC para os micro-organismos considerados na avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída. Com base nas doses fornecidas pela **Tabela 2** e pela irradiância obtida através da modelagem do equipamento, é possível estimar o tempo de desinfecção utilizando a (**Equação 1**). Essa estimativa foi utilizada para obter o consumo de energia de ambas as abordagens.

Tabela 2 - Doses necessárias para redução de micro-organismos

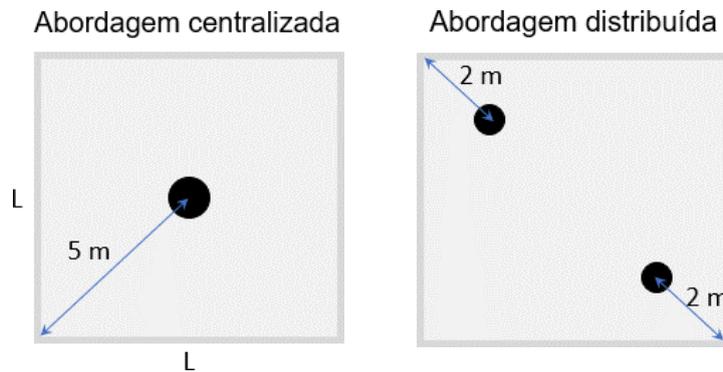
Micro-organismos Nome	Dose UVC (mJ/cm ²)					Referência
	1 log ₁₀	2 log ₁₀	3 log ₁₀	4 log ₁₀	5 log ₁₀	
Staphylococcus aureus (MRSA)	4,5	7,2	8,8	10,0	-	MCKinney CW e Pruden A (2012)
Pseudomonas aeruginosa (MDRPA)	1,3	2,7	4,3	6,3	10,0	MCKinney CW e Pruden A (2012)
Enterococcus faecium (VRE)	7	9	11	13	15	MCKinney CW e Pruden A (2012)
Listeria monocytogenes	2,2	3,0	3,2	4,1	4,6	Collins FM (1971)
SARS-CoV-2	2,55	3,40	4,24	-	-	Storm N, et al. (2020)

Fonte: Marques WA e Carrano RC, 2025.

A abordagem distribuída pode ser implementada aproximando o equipamento do ponto de interesse e reduzindo a potência elétrica do equipamento. As distâncias consideradas na simulação para as abordagens centralizada e distribuída foram, respectivamente, de cinco e dois metros. A quantidade adotada de lâmpadas UVC na aplicação das abordagens foi de cinco lâmpadas para a centralizada e uma para distribuída.

A (**Figura 2**) ilustra como as abordagens foram simuladas, onde o tamanho do círculo preto representa o nível de potência do equipamento. Ainda observando a (**Figura 2**), pode-se perceber que à medida que um equipamento se aproxima de um dos pontos de interesse, ele ao mesmo tempo se afasta de outro ponto de interesse do ambiente. Por isso, a proposta da abordagem distribuída é utilizar múltiplos emissores para realizar a desinfecção em um único ciclo de desinfecção ou um único emissor em vários ciclos de desinfecção. Dessa forma, os equipamentos indicados na abordagem distribuída podem ser entendidos como sendo dois emissores operando simultaneamente, ou o mesmo equipamento operando em dois instantes diferentes.

Figura 2 - Simulação: abordagem distribuída.

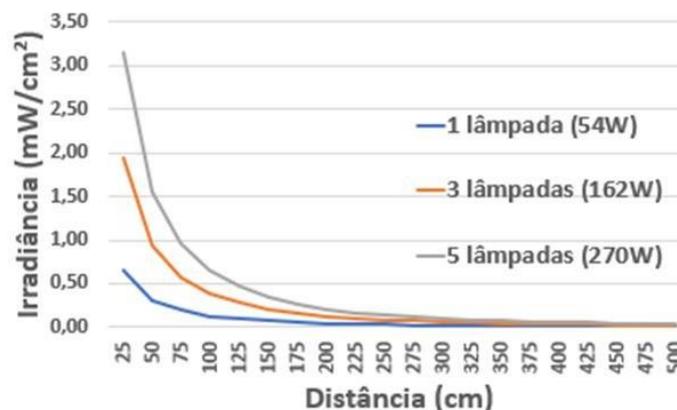


Fonte: Marques WA e Carrano RC, 2025.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos da avaliação da eficiência energética da abordagem distribuída estão apresentados nesta seção. A **Figura 3** mostra as curvas de irradiância para os três equipamentos considerados na simulação. Essas curvas foram obtidas a partir da aplicação do modelo fator de visão da radiação para cada uma das lâmpadas dos equipamentos. As curvas mostram o perfil da irradiância dos equipamentos para distâncias de até cinco metros. Os equipamentos possuem uma, três e cinco lâmpadas UVC e suas potências são respectivamente 54 W, 162 W (54x3) e 270 W (54x5).

Figura 3 - Perfil da irradiância dos equipamentos simulados.



Fonte: Marques WA e Carrano RC, 2025.

Como esperado, para regiões próximas ao equipamento, a irradiância é consideravelmente maior do que para as regiões mais distantes, e diminui à medida que se afasta do equipamento. O mesmo também pode ser observado nos equipamentos simulados com mais de uma lâmpada UVC.

Isso confirma que ao aproximar o equipamento do ponto de interesse, é possível aumentar significativamente a irradiância nesse ponto e manter a potência do equipamento constante. Assim, aumentando a irradiância no ponto de interesse, pela (**Equação 1**) pode-se diminuir o tempo de desinfecção, sem alterar o valor da dose UVC aplicada na superfície. Isso contribui para que o processo seja mais eficiente energeticamente.

É interessante observar, como mostra a (**Figura 3**), que quanto mais afastado o ponto de interesse estiver, menor é a diferença das irradiâncias dos equipamentos, pelo menos na região próxima ao equipamento. Isso revela o seguinte resultado importante do ponto de vista energético: nas proximidades dos equipamentos, um aumento na quantidade de lâmpadas UVC produz um efeito cada vez menos significativo na irradiância total,

a medida em que se afasta do equipamento. Ou seja, para realizar a desinfecção em pontos distantes, não é eficiente energeticamente aumentar a quantidade de lâmpadas UVC instaladas no equipamento, mas sim, aproximar na medida do possível, o equipamento de desinfecção desses pontos.

Os valores da (Figura 3) também estão apresentados na (Tabela 3). Nessa tabela uma escala de cores é mostrada de acordo com os seus valores. Em vermelho, amarelo e verde estão indicados, respectivamente, os valores altos, intermediários e baixos de irradiância. Como esperado, os valores mais altos de irradiância estão nas proximidades do equipamento mais potente e com mais lâmpadas UVC. Enquanto isso, os valores mais baixos são encontrados nos pontos mais distantes do equipamento menos potente e com apenas uma lâmpada UVC.

Tabela 3 - Irradiância dos equipamentos simulados.

Distância x (cm)	Irradiância (mW/cm ²)		
	1 lâmpada (54W)	3 lâmpadas (162W)	5 lâmpadas (270W)
25	0,6534	1,9341	3,1451
50	0,3125	0,9340	1,5452
75	0,1916	0,5736	0,9524
100	0,1292	0,3870	0,6435
125	0,0922	0,2763	0,4598
150	0,0686	0,2057	0,3425
175	0,0528	0,1583	0,2636
200	0,0417	0,1252	0,2084
225	0,0337	0,1012	0,1686
250	0,0278	0,0834	0,1389
275	0,0233	0,0698	0,1163
300	0,0197	0,0592	0,0987
325	0,0170	0,0509	0,0848
350	0,0147	0,0441	0,0735
375	0,0129	0,0386	0,0644
400	0,0114	0,0341	0,0568
425	0,0101	0,0303	0,0505
450	0,0090	0,0271	0,0452
475	0,0081	0,0244	0,0407
500	0,0074	0,0221	0,0368

Fonte: Marques WA e Carrano RC, 2025.

Na região intermediária em amarelo é possível observar, por exemplo, que o equipamento com cinco lâmpadas UVC e a 3,75 metros de distância, produz uma irradiância equivalente ao equipamento com apenas uma lâmpada UVC e a 1,5 metro. Ou seja, uma redução de aproximadamente dois metros de distância permitiu reduzir a potência do equipamento para um quinto do valor original, quase sem alterar a irradiância no ponto de interesse. Esse mesmo fato também pode ser observado em outros pontos e regiões da (Tabela 3). Esse resultado confirma que ao aproximar o equipamento do ponto de interesse, também é possível reduzir sua potência elétrica, mas sem alterar significativamente a irradiância nesse ponto.

Portanto, os resultados apresentados até o momento mostram que aumentar a quantidade de lâmpadas UVC instaladas no equipamento, para compensar a forte atenuação da irradiância nos pontos mais distantes não é eficiente energeticamente. Em vez disso, aproximar o máximo possível o equipamento desses pontos pode ser uma solução mais eficiente.

Entretanto, esses resultados ainda não são suficientes para avaliar se a abordagem distribuída é mais eficiente energeticamente do que a abordagem centralizada. Pois é necessário verificar se a abordagem distribuída é capaz de alcançar nos pontos de interesse do ambiente simulado, a mesma taxa de desinfecção que a abordagem centralizada, porém consumindo menos energia.

O consumo de energia de uma desinfecção depende da potência do equipamento e do tempo de desinfecção. Como a potência dos equipamentos simulados é conhecida, então o tempo de desinfecção

necessário para alcançar a taxa de desinfecção desejada nos pontos de interesse precisa ser estimado. Essa estimativa é obtida utilizando a (**Equação 1**) e a partir dos valores das doses indicadas na (**Tabela 2**) e das irradiâncias dos equipamentos na (**Tabela 3**).

Como exemplo de aplicação dessa metodologia, a (**Tabela 4**) mostra o tempo de desinfecção em minutos e o respectivo consumo de energia para cada equipamento simulado ao eliminar 3 log₁₀ (99,9%) do vírus SARS-CoV-2. Para as distâncias consideradas na simulação para a abordagem centralizada de cinco metros e para a abordagem distribuída de dois metros, o consumo de energia no processo de desinfecção reduziu de 8,65 Wh para 1,53 Wh.

Tabela 4 - Tempo e consumo para eliminar 99,9% do SARS-CoV-2.

Distância x (cm)	Tempo (min)		Consumo (wh)	
	1 lâmpada (54W)	5 lâmpadas (270W)	1 lâmpada (54W)	5 lâmpadas (270W)
200	1,69	0,34	1,5239	1,5256
500	9,60	1,92	8,6439	8,6456

Fonte: Marques WA e Carrano RC, 2025.

Entretanto, como mencionado anteriormente, a aplicação da abordagem distribuída pode requerer o uso de múltiplos equipamentos funcionando simultaneamente ou um único equipamento funcionando em vários ciclos de desinfecção. A quantidade de equipamentos ou de ciclos de desinfecção depende dos números de pontos de interesse do ambiente. Como o ambiente de controle possui dois pontos de interesse, então o consumo indicado na **Tabela 4** deve ser multiplicado por dois.

Dessa forma, a abordagem distribuída pode alcançar a mesma taxa de desinfecção que a abordagem centralizada nos pontos de interesse e o consumo de energia poderá ser comparado. Sendo assim, o consumo de energia para eliminar 99,9% do SARS-CoV-2 nos pontos de interesse do ambiente controlado foi de 8,65 Wh para a abordagem centralizada e 3,06 Wh para a abordagem distribuída. Esse resultado mostra que a implementação da abordagem distribuída reduziu o consumo de energia em 5,59 Wh. Essa redução corresponde uma economia de 64,7% de energia elétrica em relação à abordagem centralizada, na desinfecção do ambiente de controle considerado na simulação.

A (**Tabela 5**) mostra o consumo de energia e a redução do consumo entre as abordagens na desinfecção do ambiente, para os demais micro-organismos considerados na simulação. Na coluna consumo de energia estão os valores da energia elétrica consumida para eliminar os micro-organismos nas distâncias e taxas de desinfecção indicadas. A partir desses valores, foi calculada a redução relativa e absoluta do consumo de energia na desinfecção do ambiente com a implementação da abordagem distribuída em relação à abordagem centralizada.

Tabela 5 - Consumo de energia elétrica e redução do consumo com a abordagem distribuída.

Micro-organismos	Distância (cm)	Consumo de energia (Wh)		Redução do consumo			
		3 log ₁₀	4 log ₁₀	Relativa (%)		Absoluta (Wh)	
				3 log ₁₀	4 log ₁₀	3 log ₁₀	4 log ₁₀
Staphylococcus aureus (MRSA)	200	3,17	3,60	64,71	64,71	11,61	13,19
	500	17,94	20,39				
Pseudomonas aeruginosa (MDRPA)	200	1,55	2,27	64,71	64,71	5,67	8,31
	500	8,77	12,85				
Enterococcus faecium (VRE)	200	3,96	4,68	64,71	64,71	14,51	17,15
	500	22,43	26,51				
Listeria monocytogenes	200	1,15	1,48	64,71	64,71	4,22	5,41
	500	6,53	8,36				
SARS-CoV-2	200	1,53	-	64,71	-	5,59	-
	500	8,65	-				

Fonte: Marques WA e Carrano RC, 2025.

Os valores na coluna consumo de energia mostram que quanto mais resistente for o micro-organismo e mais distante ele estiver do equipamento, maior é a energia necessária para eliminá-los. Na coluna redução do consumo é possível observar que a redução absoluta proporcionada pela abordagem distribuída, também varia de acordo com a taxa de desinfecção.

Ainda na coluna redução do consumo, mas dessa vez observando a redução relativa proporcionada pela abordagem distribuída em relação à abordagem centralizada, é possível notar o mesmo percentual de redução para todos os micro-organismos e taxas de desinfecção considerados na simulação.

Também foi considerado outras distâncias além de dois metros na implementação da abordagem distribuída, que não estão na **Tabela 5**. Para as outras distâncias, foi verificado que de fato, a redução relativa do consumo possui relação com a distância em que a abordagem distribuída é implementada. Os valores da redução relativa mostram que quanto mais próximo o equipamento estiver do ponto de interesse, mais a abordagem distribuída é eficiente energeticamente na desinfecção do ambiente em relação a abordagem centralizada.

Portanto, os resultados da simulação mostraram que a implementação da abordagem distribuída proporcionou uma economia de 64,71% no consumo de energia elétrica, na desinfecção de um ambiente de 50 m². Nesse ambiente com dois pontos de interesse, essa economia observada foi devida a redução da distância de cinco para dois metros entre o equipamento e os pontos de interesse.

CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a eficiência energética das abordagens que são utilizadas no processo de desinfecção de ambientes por radiação UVC. O objetivo dessa avaliação foi otimizar esse processo para permitir que equipamentos com comprovação científica, diferente dos atuais, possam ser conectados em qualquer tomada disponível no ambiente. Essa facilidade pode ser fundamental durante uma pandemia de uma doença infecciosa, como a COVID-19. Embora os valores de potência, consumo absoluto e tempo de desinfecção vistos na simulação não sejam tão elevados quanto dos principais equipamentos, a redução relativa do consumo observada na simulação, indica que se a abordagem distribuída for implementada utilizando os principais equipamentos, a desinfecção do ambiente poderá ser realizada de forma muito mais eficiente energeticamente. Estudos microbiológicos utilizando micro-organismos reais podem ser realizados, de modo a verificar experimentalmente, a maior eficiência energética da abordagem distribuída em relação a abordagem centralizada.

REFERÊNCIAS

1. ANVISA. Segurança do paciente em serviços de saúde: limpeza e desinfecção de superfícies, 2012.
2. ANVISA. Nota técnica Nº 69. Orientações gerais sobre Hospital de Campanha durante a pandemia internacional ocasionada pelo coronavírus SARS-CoV-2, 2020.
3. Antimicrobial Test Laboratories. Study Report: Antibacterial Activity and Efficacy Evaluation of UVC Cleaning System's UV Device. Disponível em <https://bityli.com/BIJI3B>. Acessado em 8 de outubro de 2021.
4. ABNT. Instalações elétricas de baixa tensão NBR 5410, 2004.
5. BEDELL K, et al. Efficacy of an Automated Multiple Emitter Whole-Room Ultraviolet-C Disinfection System Against Coronaviruses MHV and MERS-CoV. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, (2016); 37, 598-599.
6. COLLINS FM. Relative susceptibility of acid-fast and non-acid-fast bacteria to ultraviolet light. *Appl. Microbiol*, 1971; 21(3), 411–413.
7. ROCHA AS, et al. Efficiency verification of a UV-C radiation disinfection device. *Research, Society and Development*, 2021 pp. 1-11.
8. JACOB SM, DRANOFF JS. Light intensity profiles in a perfectly mixed photoreactor. *AIChE Journal*, 1970; pp. 359-363.
9. JOLLY J. A study into the use of Surfacide® UV-C emitters in reducing hospital acquired infection rates at Royal Manchester Children's Hospital. *Infection, Disease & Health*, 2021.
10. KITAGAWA H, et al. Combining pulsed xenon ultraviolet disinfection with terminal manual cleaning helps reduce the acquisition rate of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *American Journal of Infection Control*, 2021; 1048-1051.
11. MALAYERI AH, et al. Fluence (UV Dose) Required to Achieve Incremental Log Inactivation of Bacteria, Protozoa, Viruses and Algae. *IUVA News*, 2016; (3), 1-41.
12. MARTINS RJ. A radiação ultravioleta na desinfecção de águas residuais domésticas. Iguatu, CE, 2021.
13. MCKINNEY CW, PRUDEN A. Ultraviolet disinfection of antibiotic resistant bacteria and their antibiotic resistance genes in water and wastewater. *Environ. Sci. Technol*, 2012; 46, 13393–13400.
14. PESSÔA M, et al. A Física de um Desinfector com Radiação UV–C. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2021; pp. 1-10.
15. PHILIPS LIGHTING TUV T8 55W HO 1SL/6. Disponível em: https://www.lighting.philips.com/prof/conventional-lamps-and-tubes/special-lamps/purificationwater-and-air/commercial-and-professional-air/tuv-t8/928049504003_EU/product. Acessado em: 13 de Setembro de 2023.
16. SANTOS VC, et al. Fator de visão da radiação: aplicação na determinação da irradiância de lâmpada ultravioleta de bronzeamento artificial. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, 2008; 67- 72.
17. SHEN LH, GONZALES EA. Reducing Hospital-Onset *Clostridium Difficile* Infections. SHEA Conference, 2017 Denver.
18. STORM N, et al. Rapid and complete inactivation of SARS-CoV-2 by ultraviolet-C irradiation. *Scientific Reports*, 2020; pp. 1-5.
19. UVC CLEANING SYSTEMS INC. 2014. UVC Cleaning Systems M20 Antimicrobial Report. Disponível em: <https://www.uvccleaningsystems.com/pdf/UVC%20Cleaning%20Systems%20M20%20Antimicrobial%20Report%20NG5622%2021NOV2014.pdf>. Acessado em: 22 de Novembro de 2023.
21. YANG JH, et al. Effectiveness of an ultraviolet-C disinfection system for reduction of healthcare associated pathogens. *Journal of Microbiology, Immunology and Infection*, 2019; pp. 487-493.