UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

BRUNO PEREIRA DE OLIVEIRA

Desenvolvimento de um sistema para inativação microbiológica em
vegetais frescos por ação física através de líquidos circulantes

São Carlos

2021

BRUNO PEREIRA DE OLIVEIRA

Desenvolvimento de um sistema para inativação microbiológica em vegetais frescos por ação física através de líquidos circulantes

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Física Aplicada
Opção: Física Biomolecular
Orientador: Prof. Dr. Vanderlei Salvador Bagnato.

Versão corrigida
(Versão original disponível na Unidade que aloja o Programa)

São Carlos

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Oliveira, Bruno Pereira de

Desenvolvimento de um sistema para inativação microbiológica em vegetais frescos por ação física através de líquidos circulantes / Bruno Pereira de Oliveira; orientador Vanderlei Salvador Bagnato - versão corrigida - - São Carlos, 2021.
117 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada Biomolecular) -- Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2021.

1. Descontaminação. 2. Alimentos. 3. UV. 4. Opto-mecânica. I. Bagnato, Vanderlei Salvador, orient. II. Título.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que foram importantes para minha formação, em especial saliento os meus pais, Selma e Adilson e minha namorada Larissa.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Vanderlei Salvador Bagnato no qual foi o primeiro no país a acreditar que eu poderia ser cientista. Devo-lhe uma eterna gratidão pela oportunidade, pois como somos um país de poucas oportunidades, ele me ensinou que posso criá-las ao invés de busca-las no tradicional, que inovar é o futuro e sempre será o presente. Sem o suporte dele nada teria acontecido. Hoje me vejo com o mesmo perfil e tenho orgulho disso. Tive um aprendizado e uma evolução gigantesca neste período, agradeço as cobranças e correções que me fizeram sair da zona de conforto e que me colocaram à frente da maioria.

Outro pilar importante para o sucesso, dentro do instituto de Física, foi o Professor Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto, no qual proferiu, em diversas situações, opiniões nas quais me recentralizaram em momentos muitos difíceis dentro do meu desenvolvimento do projeto de doutorado. Não me orientou diretamente, contudo foi um mentor para minha vida.

No laboratório de Biofotônica, agradeço muito a Dra. Kate Cristina Blanco que me acompanhou nos testes microbiológicos, em que tive a honra de aprender veementemente sobre uma pequena base, de aprendizado e entendimento, de microbiologia. Um ponto importante é agradecer a todos os “nãos” recebidos no ingresso de mestrado e os outros tantos “nãos” recebidos na vida, sem eles não buscaríamos novas soluções e desafios.

Outro ponto fundamentalmente importante é a minha família, que sempre esteve presente nos momentos bons e complicados, me ensinando a sempre olhar a frente independentemente dos problemas impostos pela vida. Quero salientar o agradecimento de forma imensurável aos sacrifícios que meus pais Adilson e Selma fizeram para me manter focado e como o suporte básico necessário para a continuação dos meus estudos. Sem eles não teria nem se quer me formado. Também, minha namorada Larissa que me suportou em todo esse percurso e que sabendo das necessidades que tinha, de escolhas duras para progresso na vida, sempre me compreendeu.

Por fim agradeço a todos os amigos que fiz e que continuam presentes na minha vida. Estarão sempre presentes no meu coração e mente, em especial Fábio, Ramon, Renan, Tiago, Woner, Govone, Amanda, Larissa, Cláudia, Fernanda,

Antônio, Raphael, Rodrigo e Arnon que sempre estiveram presentes nos momentos difíceis da jornada, e ao Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica (CEPOF).

Não buscamos apenas engenheiros,
mas sim engenheiros que possam
substituir outros engenheiros

Boing Conference

RESUMO

OLIVEIRA, B. P. **Desenvolvimento de um sistema para inativação microbiológica em vegetais frescos por ação física através de líquidos circulantes**. 2021. 117 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

O controle microbiológico em alimentos é um dos fatores de maior importância na segurança alimentar. Tanto para o consumo direto de vegetais *in natura*, ou para a preservação e minimização de perdas durante o transporte, a eliminação de microrganismos é uma operação necessária e exigida por autoridades sanitárias. As empresas do setor têm conseguido fazer um grande trabalho, utilizando agentes químicos sanitizantes, que em quantidades moderadas são toleráveis ao ser humano e que mantêm o nível microbiológico dos alimentos. Ácidos como o hiper acético dentre outros tem sido escolha de uso. Ocorre, no entanto, que os níveis necessários para manter aceitável a quantidade de microrganismos nestes alimentos tem aumento muito. Além disto, o descarte das soluções utilizadas tem causado grande prejuízo ao meio ambiente. Em diversas situações a volta da solução para a lavoura, causa problemas. A água tem sido o principal veículo de lavagem dos alimentos na indústria, e seu uso de forma crescente tem também pressionado o setor produtivo a minimização e otimização de uso. Para diminuição destes problemas vem com o desenvolvimento de técnicas não químicas para a limpeza e controle microbiológico dos alimentos. Este trabalho de tese consiste na demonstração de que através da descontaminação de líquidos circulantes utilizando radiação UVC diretamente no líquido e não nos alimentos, permite atingir graus de eliminação microbiana muito aceitáveis e ao mesmo tempo correspondendo a grandes economias, através da circulação e reciclagem da água. Para esta demonstração, neste trabalho, realizamos inicialmente provas de princípio e desenhamos e construímos um reator que opera de forma otimizada para iluminação de grandes fluxos de água circulante, tendo como base principal a distribuição perimetral das fontes de luz. Análise do sistema permitiu garantir iluminação adequada do volume circulante, o reator divergente teve $\sim 0,194$ mJ, o reator convergente teve uma dose de $\sim 0,9$ J. Construído o reator, um experimento especial para descontaminar brócolis foi construído e testado mostrando a dinâmica da descontaminação. Levando em conta o equilíbrio detalhado entre a saída dos microrganismos do vegetal sobre ação do fluido circulante e a taxa de eliminação ao passar pelo reator, foi possível analisar as condições operacionais uma eficiência de inativação de 99,999% na água e 90% para o reator divergente e para o reator convergente 99,999% para água e 99,9% para o vegetal em questão, ou seja, estas doses entregues permitem eliminação dos contaminantes. O sistema construído já se encontra em uso e seu princípio operacional deu origem a diversas aplicações onde descontaminação de líquidos circulantes possa ser aplicadas. Discutimos e apresentamos algumas delas.

Palavras-chave: Descontaminação. Alimentos. UV. Opto-mecânica.

ABSTRACT

OLIVEIRA, B. P. **Development of a system for microbiological inactivation in fresh vegetables by physical action through circulating liquids.** 2021. 117 p. Dissertação (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Microbiological control in food is one of the most important factors in food security. Whether for direct consumption of fresh vegetable, or for the preservation and minimization of losses during transport, the elimination of microorganism is a necessary and a required operation by health authorities. Companies in the sector have managed to do a great job, using chemical sanitizing agents. Which in moderate quantities are tolerable to humans and which maintain the microbiological level of food. Acids such as hyper acetic, among others, have been the choice of use. It does happen, however, that the quantity necessary of those chemicals necessary to keep the level of microorganism in these foods acceptable has increased a lot. In addition, the disposal of the solutions used has caused great damage to the environment. In several situations, turning the solution to the crop causes problems. Water has been the main vehicle for washing food in the industry, and its increasing use put pressure on the productive sector to minimize and optimize use. The minimization of these problems comes with the development of non-chemical techniques for cleaning and microbiological control of food. This thesis work consists of the demonstration that through the decontamination of circulating liquids using UVC radiation directly in the liquid and not in the food, it allow to reach very acceptable degrees of microbial elimination and at the same time corresponding to great saving, through the circulation and recycling of water. For this demonstration, in this work, we initially carried out proofs of principles, designed, and built a reactor that operates optimally for lighting delivery was ~ 0.194 mJ and ~ 0.9 J divergent and convergent reactor respectively, large flows of circulating water, having the perimeter distribution of light sources as the main base. Analysis of the system allowed guaranteeing adequate lighting of the circulation volume. After the reactor was built, as especial experiment to decontaminate broccoli was built and tested showing the dynamics of decontamination in water 99.999% two device (divergent and convergent). Taking in account the detailed balance between the outflow of microorganism rom the plant under the actin of the circulating fluid and the elimination rate when passing through the reactor, it was possible to analyze the operational conditions that allow the elimination of contaminants in vegetable 90% and 99.9% in the divergent and convergent respectively. The built system is already in use and its operational principle has given rise to several applications where decontamination of circulating liquids can be applied. We discussed and presented some of them.

Keywords: Food. Decontamination. UV. Opto-mechanics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Número de patentes em aplicações de líquidos iônicos na indústria química de 1996 a 2006.	28
Figura 2 - Número de crianças com autismo relacionados ao uso de glifosato em soja e milho.	29
Figura 3 - Taxa de crescimento global na agricultura.	30
Figura 4 - Curva de absorção nos comprimentos de ondas de UVC e UVB relacionados o grau de danos causados pela irradiação de UV.	34
Figura 5 - Esquematização e classificação das lâmpadas e organização em contínuas e não contínuas; MPB- Mercúrio de baixa pressão; MBPAS – Mercúrio de baixa pressão e alta saída; MMP –Mercúrio de Média Pressão; PL – Lâmpada pulsada.	35
Figura 6 - Vias de dano fotooxidativo ao DNA após irradiação UV.	36
Figura 7 -Estrutura molecular a-) Molécula de pirimidina; b-) Molécula de timina e c-) Molécula de Citosina.	37
Figura 8 - Formação do ciclobutano pirimidina (Início de DCP), o R* representa um grupo de Riboses (carboidratos).	38
Figura 9 - Representação esquemática da interação de dímeros da timina e os fotoprodutos, a-) dímera timina, b-) Intermediário de oxitano e c-) o resultado do rearranjo do oxitano 6-4 PP	39
Figura 10 - Parâmetros e influência da resistência dos microrganismos em relação a irradiação UV.	41
Figura 11 - Equipamento simples para o tratamento de luz UV com a lâmpada centralizada.	44
Figura 12 - Modelo de reator anular com construção concêntrica.	45
Figura 13 - A-) exemplo de diagramação realizada para os cálculos de perfil do escoamento; B-) Modelo descrito e amplamente utilizado na literatura de reatores	45
Figura 14 - Análise do problema de o reator anular envolvendo coordenadas cilíndricas, e suas respectivas contribuições e valores.	47
Figura 15 - Configuração de reatores para regime de escoamento laminar produzido em escala industrial.	49
Figura 16 - Esquematização de um reator de fluxo turbulento da <i>Hanovia</i> aplicada para a descontaminação de fluídos túrbidos.	50

Figura 17 - Bancada de testes para avaliação da capacidade de descontaminação de água em fluidos circulantes: 1-) Reator de UVC divergente; 2-) Suporte fixador de posição; 3-) Tubulação para a circulação de fluídos; 4-) Bomba de circulação do sistema; 5-) Fonte de energia elétrica.	51
Figura 18 - Fluxograma de processo da empresa La Hacienda (México), no qual o mesmo produz vegetais congelados; As setas amarelas representa pontos de elevada taxa de substituição de água; As setas azuis demonstrasse o processo produtivo de forma geral; As setas pretas são pontos de críticos de controle de processo (alta possibilidade de contaminação cruzada); As setas vermelhas representa pontos nos quais a utilização da tecnologia de UV deverá atuar e substituir a utilização de agentes químicos.	52
Figura 19 - Esquematização do setup experimento utilizando o reator axial com escoamento angular; A-) Foto do reator instalado e em funcionamento; B-) Esquematização do sentido de fluxo e posicionamento das lâmpadas.	55
Figura 20 - Esquematização do experimento utilizado para a lavagem dos brócolis em escala de bancada para testes preliminares. 1-) Compartimento de lavagem do vegetal em natura; 2-) Bomba para circulação forçada da água no sistema de tubos; 3-) Reator de UV para descontaminação do fluido; 4-) Sistema de descarte contendo uma válvula globo.....	56
Figura 21 - Desenho esquemático do reator de UVC, na parte circulada em vermelho é mostrado as paredes do reator. A parte do lado esquerdo representa o tubo de quartzo, a parte da direita representa o casco externo; as setas representam o perfil de escoamento da água circulante.	57
Figura 22 - Descrição da relação da dose versus vazão para o reator de UVC utilizado, e o valor do coeficiente de extinção utilizado foi o da água.	58
Figura 23 - Relação teórica da dose entregue na solução, considerando sua passagem completa de 800 mL e a relação da mesma por tempo. ..	59
Figura 24 - Resultados descrevendo a curva de morte dos microrganismos presentes em água e nos brócolis, para o reator anular (centralizada) na escala de bancada.	60
Figura 25 - Taxa de morte do microrganismo normalizado comparando na taxa de morte dos microrganismos presentes nos vegetais brócolis e também na água circulante.....	61
Figura 26 - Imagem durante a construção mecânica do reator imagem ilustrativa e a esquematização está descrita no decorrer deste e-mail.	62

Figura 27 - Esquematização e dimensões da escala semi-industrial e o posicionamento de cada aparato, a linhas vermelhas indica altura em relação ao solo do local de instalação; números em pretos são as medidas em centímetros (cm) de cada parte da tubulação.	63
Figura 28 - Gaiola construída para colocação dos vegetais brócolis e proteção para a bomba de recirculação	65
Figura 29 - Equipamento para a caracterização luminosa das lâmpadas utilizadas; A-) Sensor COHERENT LM-2 UV da série 0482116R, para medidas na faixa e espectro da luz ultravioleta. B-) Medidor de potência eletrônico marca COHERENT modelo LABMAX-TOP.....	67
Figura 30 - Descreve a constituição mecânica do reator de luz UV; 1-) Válvula globo para o controle do fluxo de escoamento; 2-) Lâmpadas de UV-C que circunda o cilindro de quartzo localizado no centro do reator; 3-) placa refletora e protetora contra a incidência de luz UV; 4-) Estrutura base para estabilização e suporte do reator; 5-) União para a conexão do sistema de tubos ao reator; 6-) suporte para amortização da vibração.	69
Figura 31 - Representação isométrica do projeto de scaling down da planta semi-industrial para os testes do reator de UV-C e capacidade de lixiviação do brócolis; 1-) Sistema de by-pass utilizado para o controle de velocidade de água que passa pelo reator de luz UV; 2-) Tubulação de saída e retorno para o tanque de lavagem; 3-) Tanque de lavagem do brócolis; 4-) Sistema de medição de água através do nível; 5-) Bomba centrífuga para uma circulação forçada; 6-) Reator de luz UV e seus componentes; 7-) Conexões de ligação ao sistema de reator com redução de tubulação 2" para ½".	70
Figura 32 - Reator de UVC com os detalhes eletrônicos; 1-) Botão on/off; 2-) Esquematização das lâmpadas UVC; 3-) Sensores que mostram o funcionamento e injúrias dos mesmos; 4-) Sensores de pressão; 5-) Sensores de intensidade das luzes; 6-) Medidor de vazão.	71
Figura 33 - A-) descrição da distribuição das lâmpadas emissoras de luz UV-C variando-as de 1 até N; B-) Posicionamento das lâmpadas no plano cartesiano e suas respectivas posições no eixo X, Y.	72
Figura 34 - Comportamento da variação da intensidade com uma variação crescente do eixo X (0;6) e Y (0).	73
Figura 35 - Simulação da distribuição de luz para a geometria do reator convergente, sem a presença do tubo de quartzo, as dimensões e variações das intensidades de regiões centrais para as periféricas são de ~0,03 mW.	74
Figura 36 - 1-) Placa de absorção para avaliação da distribuição de luz no reator; 2-) Lâmpada de UV-C circundando o reator; 3-) Estrutura metálica para fixação e resistência do reator.	75

Figura 37 - Resultado da simulação óptica mostrando a distribuição luminosa em uma placa inserida no centro do reator periférico, resultado que mostra a configuração da distribuição luminosa.	76
Figura 38 - Posicionamento da simulação da irradiação no tubo de quartzo do reator e as regiões que apresentam uma singularidade de distribuição; 1;3-). Existe uma tampa de fixação no tubo para posicionamento das lâmpadas são observados que há uma diminuição da intensidade; 2-) devido ao posicionamento dos atenuadores de vibração (vibra-stop) faz uma compreensão de irradiação na área, mas sem interferência direta a característica de contaminantes do projeto.	77
Figura 39 - Descritivo do escoamento no tubo do reator de UV, em que é determinante um valor infinitesimal de volume para o cálculo do tempo de retenção (δV), e uma conservação de massa ($Q_1 = Q_2$). ..	79
Figura 40 - Cálculo da dose entregue no experimento do reator perimetral, de forma incremental ao tempo de circulação.	81
Figura 41 - Gráfico da taxa de morte de microrganismos variando-se a vazão, entre 20 – 80 L/min.	82
Figura 42 - Gráficos que confronta a dose calculada no sistema com a taxa de inativação de microrganismo experimentalmente obtidos: A-) Para a vazão experimental de 20 L/min; B-) Para a vazão experimental de 40 L/min; C-) Para a vazão experimental de 60 L/min; D-) Para a vazão experimental de 60 L/min.	84
Figura 43 - Resultados teste para a lixiviação dos brócolis instalados no sistema e com o UV desligado.	86
Figura 44 - Efeito no número de microrganismos na presença da luz ultravioleta.	88
Figura 45 - Imagem do reservatório de recirculação de água do reator de UV e também de lixiviação dos vegetais brócolis, o círculo vermelho é a tubulação no qual sai o jato livre de água após a passagem no reator de UV.	90
Figura 46 - Esquematização de um jato livre de água no mesmo sentido do vetor gravidade e a forma que o mesmo tomasse quando o escoamento está plenamente desenvolvido.	91
Figura 47 - Cálculo da energia de vorticidade e momento em escalas menores de formação.	93
Figura 48 - Cálculo de energia de vorticidade e momento em escalas maiores de formação.	94
Figura 49 - Fluxograma para descontaminação de fluídos circulantes: 1-). Objeto a ser descontaminado por líquidos circulantes; 2-) Reator de	

UV, podendo ser o divergente ou o convergente; 3-) Sistema elétrico mecânico para forçar o escoamento criando uma circulação.	97
Figura 50 - Descrição da dose entregue em solução versus a vazão do sistema, assim é possível determinar a dose real entregue em uma passagem do fluido em um <i>range</i> de vazão.....	98
Figura 51 - Determinação da dose entregue em solução em um tempo de circulação de 9 hora totais, em que se obteve um máximo de ~42 mJ de energia descontaminantes na <i>Steen</i>	98
Figura 52- <i>Plotting</i> dos resultados extraídos e a correlação da dose entregue; A-) Carga viral do tecido transplantado; B-) Carga viral da <i>Steen</i> ; C-) PCR em tempo real; D-) Taxa de inativação do HCV.....	99
Figura 53 - <i>Plotting</i> dos resultados extraídos e a correlação da dose entregue circulação da <i>Steen</i> sem a utilização de um órgão no sistema.	100
Figura 54-Inativação do HCV presente no líquido circulante <i>versus</i> a dose entregue ao sistema	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de espécies e a dose necessária para inativação dos microrganismos sob a irradiação UV.....	42
Tabela 2 - Resultados dos dados experimentais microbiológicos	53
Tabela 3 - Quantidade tipo e os materiais utilizados para a construção da planta produtiva.....	64
Tabela 4 - Dados experimentais para ambos os reatores.	65
Tabela 5 - Tempos de coletas das amostras no reator axial e perimetral.	66
Tabela 6 - Dados utilizados para os cálculos relacionados a dose entregue na água	78

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Somatória da Intensidade entregue em um sistema convergente, aplicado para n lâmpadas tendo efeitos de simetria,	72
Equação 2 – Cálculo da dose entregue em um sistema sem considerar efeitos de simetria.	78
Equação 3 – Relação entre a vazão e a velocidade de escoamento em um sistema constituído de 2 placas.....	79
Equação 4 – Determinação da relação da vazão com a velocidade e área do sistema.....	79
Equação 5 – Determinação do tempo de retenção de um volume infinitesimal com escoamento contido em 2 placas.	80
Equação 6 – Definição diferencial da relação de lixiviação do vegetal	85
Equação 7 – Relação da concentração de microrganismo no escoamento do sistema.....	87
Equação 8 – Taxa de decrescimento do microrganismo no sistema de escoamento.....	88
Equação 9 – Concentração proporcional de microrganismo com a taxa de decréscimo	89
Equação 10 – Taxa de transferência do vegetal para a solução por tempo de escoamento.....	89
Equação 11 - Cálculo do número de Reynolds:	92
Equação 12 - Energia de dissipação de vórtice pelo fator de atrito:	92
Equação 13 - Escalas menores de vorticidade e momento (Escala de Kolmogorov)	93
Equação 14 - Escalas maiores de vorticidade e momento (Escala de Kolmogorov)	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
2	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE RADIAÇÃO UVC E CONTROLE MICROBIOLÓGICO	33
2.1	Efeitos da radiação de UV em compostos orgânicos	33
2.2	Mecanismos de inativação microbiana	35
2.3	Equipamento existentes de descontaminação microbiológica com radiação de UV	44
3	CONCEPÇÃO, CONSTRUÇÃO E TESTE DOS REATORES	51
3.1	Visão geral e testes preliminares	51
3.2	Configuração construtiva com reator axial em escala de bancada	55
3.4	Construção do reator utilizando a luz UV-C para planta semi-industrial	62
3.5	Procedimento metodológico para a determinação da taxa de inativação nos reatores de luz-ultravioleta (UV)	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1	Configuração construtiva de reator perimetral em escala semi-industrial.....	69
4.2	Avaliação da distribuição de luz dos reatores de UV e caracterização da lâmpada	71
4.3	Correlação da capacidade de descontaminação do reator e capacidade de inativação microbiológica na água circulante do sistema.....	78
4.4	Taxa de descontaminação da água de lavagem no sistema variando-se a vazão.	82
4.5	Efeito do jato livre no sistema de lavagem do vegetal.....	85
4.6	Análise da influência na vorticidade gerada pelo jato livre e influência na taxa de lixiviação.	89
5	CONCLUSÃO	103
	REFERÊNCIAS.....	105

ANEXO A - Pedido de patente do reator perimetral.....	111
ANEXO B - Carta de aceite para apresentação em um congresso internacional no país Índia.	113
ANEXO C - Artigo publicado	115
ANEXO D - Convite Congresso 20º IUFoST 20.....	117

1 INTRODUÇÃO

A alta dos preços dos alimentos é perceptível no dia-a-dia e é evidente a mudança com um foco nos protocolos de segurança alimentar em termos de segurança no consumo de alimentos. Com as projeções do crescimento populacional, isso aumentará a demanda por alimentos em até 70 %, em relação ao volume atualmente produzido, entre 2005 até 2050, para que ocorra um equilíbrio na demanda de alimentos e um equilíbrio na distribuição global. (1)

Em todas as cadeias de produção e na escala industrial, estão intensificadas as atenções nas capacidades de processamento, na maior capilaridade e eficiência na distribuição dos alimentos, isso se faz necessário para a redução dos efeitos ambientais negativos das produções de alimentos sobre o meio ambiente. Além disso, a liberação de gases de efeito estufa, a poluição ambiental, a escassez de água devido à extração excessiva, a degradação do solo e a perda de biodiversidade por meio da conversão de terras ou da gestão inadequada, a utilização de níveis elevados de defensivos químicos e de ácidos na cadeia produtiva, a perturbação do ecossistema devido ao uso substâncias químicas para a eliminação de microrganismos. Assim, a literatura científica e a mídia em geral vêm mostrando publicações relacionadas às preocupações devido às grandes utilizações de químicos e de antibióticos para o controle microbiológico em diversas ocasiões (2), além do uso tradicional dos químicos que é utilizado em excesso; impactando na transformação na capacidade de resistir a tais aplicações.

Tudo isso, faz com que se tenha uma necessidade de novos químicos devido a potencialização e o surgimento de novas variantes microbiológicas que possam ocasionar doenças graves em infecções bacterianas comuns, que eram anteriormente facilmente combatidas. (2) Assim, várias novas perspectivas foram iniciadas na implementação de outras alternativas nos quais propiciaram uma condição mais sustentável e alternativa para desacelerar o surgimento de microrganismos multáveis nas mais diferentes áreas. (3)

Com isso, as indústrias produtoras dos químicos têm se objetivado no desenvolvimento de novos protocolos para a melhoria do controle da contaminação

por toda a cadeia produtiva dos alimentos, visando uma melhoria na qualidade de vida. (4)

Atualmente o controle das contaminações cruzadas (transferência de bactérias entre superfícies e/ou objetos), enseja um foco especial a procedimentos e manuseio, para a eliminação de formas não higiênicas que propiciam os altos fatores de contaminação nos alimentos, fazendo com que sejam utilizados químicos como antibióticos, antifúngico e antibacterianos. Esta busca é compatível com o crescente número de pedidos patentes, com os dados mais recentes obtidos até a presente data desta publicação, dos químicos que são aplicados no controle biológicos em diversos setores da saúde (Figura 1).

Figura 1 - Número de patentes em aplicações de líquidos iônicos na indústria química de 1996 a 2006.

Fonte: KHADRE; YOUSEF.; KIM. (4); PLECHKOVA.; SEDDON. (5)

Analisando de forma qualitativa o comportamento do gráfico da Figura 1, faz com tenhamos um entendimento do quão volumoso e virtuoso é a busca por novos químicos e o quão é crescente a necessidade de controle de contaminação. Este excesso pode impactar diretamente a saúde das gerações subsequentes. Já a Figura 2, demonstra o resultado da correlação de um aumento de crianças nos EUA com algum percentual de autismo e a sua direta ligação com a utilização de agentes

químicos utilizados na produção de soja, um dos alimentos base para as diversas formulações e composições alimentícias.

Figura 2 - Número de crianças com autismo relacionados ao uso de glifosato em soja e milho.

Fonte: MEYER. (6)

Existe uma tendência sócio-política e organizacional, para adoção de novos protocolos sanitários e que tenha como base suportar o crescimento industrial do mundo e quem grande parte é relacionada a cadeia de alimentos, pois a necessidade mundial por energia advinda de alimentos aumentando, devido ao fato de o crescimento populacional seguir a mesma tendência.

É de senso comum que a engrenagem do mundo é advinda fortemente da indústria alimentícia, que tem como objetivo a entrega da demanda necessária e apresenta soluções sustentáveis que gerem o menor impacto com uma diminuição na concentração de resíduos químicos pós processamento encontrados atualmente, fazendo como senso comum, a dona de casa ter que lavar e/ou deixar de molho um tomate devido a alta carga de químicos residuais.

Naturalmente o ser humano com o passar dos tempos está tendo uma maior conscientização para o impacto na qualidade de vida e o seu próprio bem-estar. Fato que, quando é analisada a capacidade *versus* a eficiência de um sistema produtivo,

há um descompasso tecnológico, em vivência na indústria é visto um descompasso com, no qual tem como fruto a Figura 3.

Figura 3 - Taxa de crescimento global na agricultura.

Fonte: PERRY. (7)

Nos dados supracitados, denota-se uma grande característica evidente que é a problemática de que a capacidade produtiva em um curto espaço de tempo, não tem condições, até o momento, de suportar o ritmo de crescimento da curva de crescimento populacional. Com isso é perceptível o surgimento de um descompasso, que é vivenciado, e que a eficiência produtiva das plantas industriais no Brasil estão em torno de 50 – 95% de eficiência em dados amostrais, não em valores absolutos, pois não é comum ter este controle nos pátios fabris do país.

Isso faz com que tais números de eficiência, como exemplo 95% de eficiência na capacidade produtiva, (ou seja, 100 % que deveria produzir sai 95%), sejam fora da real realidade, ou seja, ainda existe uma grande faixa para o aumento da eficiência industrial e a diminuição de químicos, sabe-se que este é um dos principais objetivos de vivenciar uma concentração de 40 – 80 ppm de concentração de químico para a aplicação que é realizada a cada 30 min de processamento ativo, e que os dados não se absorvem o custo de todo o *supply-chain*, pois dependendo do setor como exemplo hortaliças que tem índices de até 60% de perda no processo. (8 - 9)

Estes fatores descritos até o presente momento do texto, tem um denominador comum entre todas as problemáticas que o processamento de quaisquer alimentos no mundo. Em algum momento, as empresas deverão utilizar em seu ciclo produtivo a

água, que é considerada uma *comoditie*, e que não é vista com o passar dos anos um uso racional nas industriais alimentícias, além do grande volume utilizado, sempre estão nas unidades de hectolitros.

Assim, este projeto visou estudar e implementar a solução na indústria de alimentos congelados e a produção de legumes que em muitos casos são minimamente processados, e/ou de distribuídos de forma *in natura*. Como este processamento faz o uso de água em as suas etapas do processo produtivo e é um dos fatos que faz com que as descontaminações ocorram em todos os pontos da cadeia produtiva, como exemplo as higienizações de equipamentos, utensílios e limpeza da parte estrutural, em curtos espaços de tempo (*gap*), como também entre os turnos de trocas de matéria-prima e/ou colaboradores. Se denominasse como protocolo *clean-in-place*, nas indústrias de grande porte, a planta é totalmente conectada em tubulações para escoamento da produção e carregado com água, isso se deve ao fato de diminuir as injúrias (machucados nos vegetais) que diminuem o valor agregado final, ou a água de carregamento, esta é usada água com a diluição de químicos, e a cada final de ciclo produtivo (encerramento de turno) é substituída em sua totalidade para garantir um maior controle na contaminação. (1-4;7)

A não regularidade de um processo, ou seja, um descontrole há a consequência de ocasionar a contaminação cruzada no fator comum dos processos a água, e ocasionar diversas possibilidades de transmissão de doenças tais como: hepatite A, botulismo, infecções, diarreias e toxoplasmose, como exemplos.

Fato que as tais não conformidades ocorrem, um exemplo no Brasil em que a ANVISA, proibiu um lote de peito de frango em que continha traços da bactéria *Listeria monocytogenes*, doença no qual é agente causador da meningite. (8). Há outros casos evidenciados como em 2008 na China, em que queijos estavam contaminados com a substância química melamina e afetou aproximadamente 294.000 crianças e 50.000 tiveram que ser hospitalizadas, mas 6 delas não resistiram e morreram. (9). Com isso, é de senso comum que há contaminações de forma corriqueira no setor produtivo, pois é sabido que um material biológico, uma alta atividade de água, favorecendo assim tais insurgências. Por fim devido a uma grande escala do problema e o enorme interesse mundial.

Dessa forma, com a base fundamentada acima, este presente trabalho desenvolveu um estudo em conjunto com um prototipo de reator de UVC, no qual tem a capacidade de descontaminar fluído circulante/industriais sem adição de químicos e aplicado diretamente em modelo produtivo real, que durante o desenvolvimento foi simulado, calculado, construído toda as etapas em uma pequena indústria de alimentos, em que a veemente motivação foi o desafio de haver uma planta produtiva com reais problemáticas no processo de vegetais congelados, que está presente no México e é chamada *La Hacienda* alimentos congelados.

2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE RADIAÇÃO UVC E CONTROLE MICROBIOLÓGICO

2.1 Efeitos da radiação de UV em compostos orgânicos

A técnica de irradiação por luz ultravioleta (UV) é descrita na literatura a muitos anos. Esta técnica Biofotônica se mostrou ser um bom agente inativador de microrganismos, mas durante um certo período de tempo as diversas aplicações foram sucumbidas e uma veemente diminuição de estudos relacionados. Fato que com o passar deste tempo se tornou notória a utilização dos agentes químicos para descontaminação, no entanto há um movimento social para a diminuição dos problemas ambientais causados nas demandas químicas geradas e os resíduos volumosamente gerados. (10 - 13)

É possível descrever aplicações da luz em quase todos os campos de da humanidade, como por exemplo a indústria de alimentos (13-15), farmacêutica (16-17), no tratamento de efluentes.(18-21) Entretanto, para a compreensão e como é o foco do presente texto vamos prosseguir na inativação microbiológica em alimentos, e com isso o espectro de interesse é a variação de comprimento que corresponde entre 100 a 400 nm com as faixas do espectro UVA (315 - 400 nm), UVB (280 – 315 nm), UVC (200 – 280 nm) e UV vácuo (100 – 200 nm), sendo que a região do UVC é amplamente conhecida como uma região com característica germicida (22) e o comprimento de onda utilizado de aproximadamente 254 nm no qual temos capacidade de inativação (Figura 4) de microrganismo. (23)

Figura 4 - Curva de absorção nos comprimentos de ondas de UVC e UVB relacionados o grau de danos causados pela irradiação de UV.

Fonte: ZHAORIGETU *et al.* (24); SELTSAM; MÜLLER. (25)

Com o avanço da tecnologia utilizando comprimentos de ondas na faixa do UV, é possível atualmente obtermos diferentes fontes emissoras que emitem de forma contínua ou a forma pulsada (Figura 5), a luz pulsa (LP) por exemplo é baseada em emissão acumulada de energia com um curto período temporal e que consequentemente, inibe a capacidade de regeneração dos microrganismos, pois a energia entregue neste tempo é suficientemente alta para a inativação completa do microrganismo. (15,26-27)

Outra técnica descrita em literatura e a utilização no presente trabalho, são sistemas de emissão luz de forma contínua (emissão contínua - LEC). A configuração deste dispositivo apresenta um funcionamento ininterrupto de emissão de energia, e os tipos de operações das lâmpadas, são baseadas em baixa pressão de vapor de

mercúrio (BPVM), de alta pressão de vapor de mercúrio (APVM) e média pressão de vapor de mercúrio (MPVM). (28-30)

Figura 5 - Esquematização e classificação das lâmpadas e organização em contínuas e não contínuas; MPB- Mercúrio de baixa pressão; MBPAS – Mercúrio de baixa pressão e alta saída; MMP –Mercúrio de Média Pressão; PL – Lâmpada pulsada

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.1 Mecanismos de inativação microbiana

Os efeitos da luz UV no DNA e em diversas moléculas biológica, é amplamente discutido e descrito na literatura ao longo do tempo. (31-36) A faixa incidente de UV determina dois tipos de danos na estrutura do DNA. Na faixa do UVA prevalece efeitos indiretos, pois o ácido nucleico não absorve a luz nessa faixa, por outro lado está radiação produz efeitos conhecidos como espécies reativas de oxigênios (Reactive Oxygen Species – ROS). (37)

Figura 6 - Vias de dano fotooxidativo ao DNA após irradiação UV.

Fonte: KHADRE; YOUSEF; KIM. (4)

O dano ao DNA para irradiação de UVA pode ocorrer por meio de dois mecanismos: o tipo I envolve a transferência de elétrons de um fotosensibilizador excitado para uma base de DNA, enquanto o tipo II é uma reação direta com o O_2 que forma ROS. O dano específico ao DNA resultante é mostrado na coluna final.

Estas espécies reativas surgem através de oxidação das moléculas de oxigênio presentes na mitocôndria em que oxida outras moléculas, o resultado destas espécies são os ânions superóxido ($O_2^{\cdot-}$), isso faz com que ocorra o surgimento de moléculas de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e moléculas de oxigênio singlete (1O_2), que causam oxidação em bases nitrogenadas presentes, os chamados quebras de cordões e até ligações cruzadas no DNA-proteína. (38-39)

Para a faixa de UVB (280-320 nm) e UVC (200-280 nm) os efeitos da radiação são diretos e é iniciado com a absorção de fótons nas moléculas pirimidinas presentes nas bases nitrogenadas, sendo que o resultado de tal absorção é a excitação encontradas em estados $\pi\pi^*$ ou $1n\pi^*$ de transição no qual é dirigida no sistema subsequente da formação de dímeros pirimidínicos. (40-42) Estes dímeros poderão ser formados por duas timinas adjacentes (T-T, mutação timina com timina) (43), citosinas adjacentes (C-C, mutação citosina com citosina) ou também timina adjacente com citosina (T-C, mutação citosina com timina ou C-T, mutação com citosina com timina). (44) A Figura 7 mostra a estrutura molecular dos grupos pirimidínicos e as bases nitrogenadas.

Figura 7 -Estrutura molecular a-) Molécula de pirimidina; b-) Molécula de timina e c-) Molécula de Citosina.

Fonte: Elaborada pelo autor

A produção dos dímeros tem como produto principal três fotoprodutos que são: dímeros de ciclobutano pirimidina (DCP's) (37); fotoprodutos (6-4) pirimidina-pirimidona (6 – 4 PP's) (38) e isômeros de dewar. (39). Os DCP's e 6-4 PP's são as causas mais comuns de danos no DNA, representando 70-80% e 20-30%, respectivamente. (28,45-46)

A foto-dimerização em moléculas adjacentes foi demonstrada por um trabalho publicado por Markovitsi *et al* (42), em que as interações através dos fenômenos empilhamento - π e os mecanismos para a formação dos DCP's ocorrem com interações que levam a aproximação do carbono 5 e 6 com seus vizinhos correlatos carbonos 5' e 6'.

O resultado desta aproximação tem a quebra das ligações π entre os carbonos 5-6 e 5'-6', e com isso novas ligações entre os carbonos 5-5' e 6-6'. A formação de cada estrutura deste anel para os compostos DCP's são mostradas na Figura 8.

Figura 8 - Formação do ciclobutano pirimidina (Início de DCP), o R* representa um grupo de Riboses (carboidratos).

Fonte: Elaborada pelo autor

A fotoreação usualmente acontece em comprimentos de ondas maiores, tais como UVB e UVC, no entanto Rochette *et al* (41) observou a formação de DCP's na faixa de emissão do UVA nas células de roedores e mostraram também que neste mesmo comprimento de onda ocorrerem a formação de DCP's em células humanas.

Porém, a formação de 6-4 PP's e T-T acontece com diferenças, a primeira é formada por um composto intermediário, que é denominado de intermediário oxetano (Figura 9), esta formação acontece quando há a quebra da ligação 5-6 π que seguidamente interage com átomos 6-4' e 5-8' de oxigênios aproximando o carbono 5 com ataque nucleofílico. (47)

O intermediário de oxetano é instável e o rearranjo na forma de 6-4 PP, este ocorre no carbono 4' transferindo o oxigênio 8' para o carbono 5 (48), as estruturas moleculares envolvidas na formação de 6-4 PP.

Figura 9 - Representação esquemática da interação de dímeros da timina e os fotoprodutos, a-) dímera timina, b-) Intermediário de oxetano e c-) o resultado do rearranjo do oxetano 6-4 PP

Fonte: Elaborada pelo autor

O surgimento de Dímeros de Ciclobutano Pirimidina (DCP's) surgem quando as Timinas-Timinas (T-T) absorvem a luz em 280 nm, no entanto quando o intermediário de oxetano precisar de um valor energético maior, e para isso o comprimento absorvido, é na faixa de 254 nm e isso faz com que há uma mudança estrutural para 6-4 Pirimidina-Pirimidona (PP), sem influência de qualquer radiação. Quando o DNA sofre interação pelo UVB e UVC a formação de DCP's são maiores do que 6-4 PP's (cerca de 25% menor que DCP's). Isto é explicado pelo alto rendimento quântico (ϕ), descrito por Gorner *et al* que o $\phi = 22-26 \times 10^{-4}$ para DCP's enquanto que para os PP's este valor é de $\phi = 1,4 \times 10^{-4}$. (48)

Outras classes de biomoléculas proteicas que sofrem danos quando existe uma interação com a radiação ultravioleta, sendo este fenômeno bem descrito para a interação das proteínas do DNA com as ligações cruzadas, se as análises dos aminoácidos são ligadas a bases nucleícas (49) que mostra a ligação entre a uracila e a cisteína na faixa do espectro do UVC.

No entanto, a variedade de fenômenos de quebras de ligações entre DNA e proteínas são parecidas para as interações entre Tirosina, Fenilalanina e o Triptofano para as bases pirimidinas com mecanismo de radiação de UVC com interação como essas moléculas (mecanismo de ligação que cruza). (50-51)

As ligações cruzadas de timina/fenilamina e timina/tirosina, com a mistura complexa timina/triptofano, que estas são todas reações induzidas pela radiação. (52-53)

Outro processo amplamente conhecido é relacionado é do processo de degradação de proteínas que ocorre clivagem de pontes de dissulfeto (RS-SR'), que tem características de ligações covalentes e são de importância para manutenção da estrutura terciária, e a degradação desta estrutura faz com que as proteínas tenham seu desdobramento. (54-55)

Toda essa diversidade de rotas bioquímicas de interação e mecanismos reacionais faz com que cada microrganismo tenha uma resistência característica a interação com a luz ultravioleta (Tabela 1), pois cada organismo tem uma taxa de resposta e regeneração aos danos da interação com a luz UVC, o qual é muito estudada e conhecido para o microrganismo *Escherichia Coli* tem uma certa resistência aos danos da radiação. (56). Por este fato, é amplamente utilizada em pesquisas testes de esterilização. Como o *Deinococcus radiodurans*, isolado pela NASA para testar a capacidade de esterilização de componentes enviados ao espaço. (57)

Todos os agentes biológicos apresentam uma taxa de regeneração aos danos suportados pela interação com a luz ionizante UVC, quando perdem a capacidade de regeneração de tais danos, observa-se a inativação das atividades metabólicas e bioquímicas das células. (58-60)

A definição científica para a capacidade de resistência do microrganismo pode ser descrita como suscetibilidade e varia para cada espécie, pois não apresentam a mesma taxa para bactérias gram-negativa e gram-positivas, fungos e esporos. (15-16)

A influência da resistência são subdivididas em parâmetros extrínsecos e intrínsecos (Figura 10), o extrínseco são espécies e os intrínsecos são fase de

crescimento e as condições do ambiente no qual está presente o microrganismo como por exemplo solução tampão, meio aquoso, placas sólidas, meio, influência da dose necessária para inativação, este conjunto de fatores que definiram a capacidade de sobrevivência ou morte. (60-61)

Figura 10 - Parâmetros e influência da resistência dos microrganismos em relação a irradiação UV.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 1 estão classificadas as doses obtidas experimentalmente e em que meio estão presentes, e de forma que cada espécie se comporta com a dose que lhe foi entregue.

A sobrevivência tem 2 fatores de extrema importância que irá definir a maior ou menor a resistência ao UV, que é o fator intrínseco que depende se e somente se do tipo de microrganismo. No entanto a característica extrínseca não depende da estrutura interna do microrganismo, porém é dependente de aspectos externos associados, isso fará com que o mesmo esteja mais fragilizado ou ativado a degradação da luz.

Os microrganismos gram-negativos (GN) têm uma maior resistência ao UVC do que gram-positivos (GP), devido aos GN terem uma dupla camada proteica de encapsulamento e um outro ponto é o processo de regeneração a danos do DNA serem mais rápidos, a água livre ou atividade de água (a_w), presente no meio aumenta a resistência quando se tem um aumento da porcentagem desta água no meio. (15,62-

63). A dose necessária de luz entregue aos microrganismos para sua inativação foi descrita Tabela 1 considerando as espécies e suas respectivas doses de inativação em um fator de redução em 90 % em relação a concentração inicial. (28)

Tabela 1 - Dose necessária para a inativação de 90% da concentração inicial de microrganismos presentes.

<u>Espécies de Microrganismo</u>	<u>Tipo de solução</u>	<u>Dose (mJ/cm²)</u>
<i>Candida albicans</i> ATCC 10231	Solução Tampão	44,7
<i>Micrococcus radiodurans</i> ATCC13939		198,6
<i>Enterococcus faecalis</i> ATCC 10541		12,0
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538		5,6
<i>Escherichia Coli</i> ATCC 8739		8,1
<i>Pseudomonas cepacia</i> ATCC 25416		5,2
<i>Pseudomonas diminuta</i> ATCC 11568		11,9
<i>Pseudomonas diminuta</i> ATCC 19146		7,4
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> WB-1		5,8
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> G-2		3,0
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 10145		4,6
<i>Acanthamoeba castellanii</i> ATCC 30234	Água Residual	60
<i>Rotavirus</i> SA-11		6,1
<i>Bacillus subtilis</i> ATCC6633- Spores		36
<i>Enterococcus Faecalis</i> ATCC 29212		6,6
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923		3,9
<i>Escherichia coli</i> ATCC 11229		3,0
<i>Bacillus subtilis</i> DE69	Não identificado	3,2
Spores		14,2
<i>Escherichia coli</i> O157:H7 CCUG 29193		3,5
<i>Escherichia coli</i> O157:H7 CCUG29199		0,4
<i>Escherichia coli</i> O25:K98:NM		5
<i>Escherichia coli</i> ATCC 11229		3,5
		(Continua)

(Continuação)		
<i>Cryptosporidium parvum</i>		4,4
<i>Girdia muris</i>		8,2
<i>Acanthamoeba spp.</i>		47,6
<i>Bacillus subtilis</i> – Spores		16,9
<i>Clostridium perfringens</i> – Spores		16,7
<i>Streptococcus Faecalis</i>		3,2
<i>Legionella pneumophila</i>		2,5
<i>Escherichia coli</i>		1,8
<i>Salmonella typhi</i>		1,9
<i>Compylobacter jejumi</i>		1,1
<i>Yersinia enterocolitica</i>		1,1
<i>Vibrio cholerae</i>		0,7
<i>Enterococcus faecium</i> NUIG J952		4,2
<i>Enterococcus faecalis</i> NUIG D46209		3,4
<i>Enterobacter sakazakii</i> NCTC 8155		2,1
<i>Staphylococcus aureus</i> NUIG 5624		2,0
<i>Listeria monocytogenes</i> NUIG 11994		2,6

Fonte: PLECHKOVA; SEDDON. (5)

Com o crescimento de aplicações e variabilidade da utilização da técnica de aplicação do UVC para esterilização, a *Foundation of Drug and administration* (FDA) criou uma normativa de dose mínima necessária para inativação dos microrganismos mais comuns presentes na indústria de no mínimo de 400 J/m². (64)

2.2 Equipamento existentes de descontaminação microbiológica com radiação de UV

Quase toda a técnica de aplicação de UV a descontaminação de fluídos circulantes trabalha com a configuração em que há a passagem em um sistema de irradiação (reatores). Neste caso o tempo de permanência de irradiação e a homogeneidade são características a serem observadas.

Notoriamente, é possível caracterizar que o sistema de descontaminação em completitude há o fluxo no montante do reator, através de uma bomba que força a circulação, com uma jusante ligada diretamente em um reservatório (Figura 11).

Figura 11 - Equipamento simples para o tratamento de luz UV com a lâmpada centralizada.

Fonte: GUERRERO-BELTRN; BARBOSA-CANOVAS. (14)

Este sistema é considerado de geometria simples, com uma relativa robustez para descontaminação de fluídos não-túrbidos, aplicado frequentemente para escoamento com baixa vazão, devido a uma limitação quando correlaciona vazão versus dose, assim decrescendo a eficiência (Figura 12).

Figura 12 - Modelo de reator anular com construção concêntrica

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para há estimativa da dose realizada em questão, foi compreendido estudos dos seguintes artigos, como base: Z. YE.-2009, para conjecturarmos os procedimentos para a caracterização da dose entregue deste reator que é o modelo amplamente difundido e utilizando com uma lâmpada central, conforme é mostrada na figura abaixo (65):

Figura 13 - A-) exemplo de diagramação realizada para os cálculos de perfil do escoamento; B-) Modelo descrito e amplamente utilizado na literatura de reatores

Fonte: YE. (65)

Para o presente sistema de escoamento mostrado na figura acima, foi feita uma aproximação do perfil de velocidade, calculando o valor teórico da dose entregue no fluido com o perfil de escoamento *Poiseuille*, como é verificado por análises qualitativas, assim é descrito pela seguinte equação (65):

$$u(r) = C_1 \left[1 - \frac{r^2}{R_2^2} + \frac{1 - k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \ln\left(\frac{r}{R_2}\right) \right] U_{av} \quad (1)$$

- $u(r)$ = Perfil de escoamento *Poiseuille* entre placas;

- C_1 = Constante determinada por uma relação, $\left(C_1 = \frac{2}{\left[\frac{1-k^4}{1-k^2} - \frac{1-k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right]} \right)$

Em que $K = R_1/R_2$;

- R_2 = raio externo;

- r = raio interno central;

- U_{av} = Velocidade média entre R_1 e R_2 $\left\{ U_{av} = \frac{Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \right\}$

- K = razão dos raios;

A estimativa de distribuição de luz no reator é baseado na lei de *Lambert-beer* ($I(r)$), foi calculada baseando-se na seguinte equação descrita por (65):

$$I(r) = I_0 \frac{R_1}{r} e^{(-\alpha(r-R_1))} \quad (2)$$

- $I(r)$ = Intensidade distribuída ao final do reator;

- I_0 = intensidade inicial da lâmpada emissora;

- R_1 = Raio do centro da lâmpada até a parede em contato com a fluído;

- α = Coeficiente de absorção;

Para os cálculos da dose entregue no volume presente dentro do reator faz-se:

$$D = I t(r) = \frac{I(r) * L}{u(r)} \quad (3)$$

- D = dose entregue na solução na posição r;
- I (r) = Intensidade final;
- u (r) = perfil de escoamento;
- L = comprimento entre entrada e saída;

Baseando-se nos cálculos e posteriormente analisados (não demonstrado no presente texto), e seguindo as condições de contornos da equação de um escoamento contínuo, sem efeitos externos de pressão, de mesma fase e um único fluido.

Para entendermos a distribuição de luz no escoamento do fluido, vamos considerar uma distribuição cilíndrica de luz. A luz é originada no eixo do cilindro e estaremos analisando sua distribuição de R_0 em diante.

Figura 14 - Análise do problema de o reator anular envolvendo coordenadas cilíndricas, e suas respectivas contribuições e valores.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tendo em $r = R_0$ uma intensidade $I_0 = I(R_0)$, temos por unidade de comprimento a variação da intensidade não havendo absorção ou espalhamento.

$$I(r + dr) = I(r) - \frac{R_0 I_0}{r^2} dr \quad (4)$$

$$I(r + dr) - I(r) = - \frac{R_0 I_0}{r^2} dr \quad (5)$$

Ou,

$$\frac{dI}{dr} = - \frac{R_0 I_0}{r^2} \quad (6)$$

Havendo absorção ou espalhamento com um coeficiente de redução (α) por comprimento de propagação, temos que subtrair da equação $-\alpha I(r)$. Desta forma:

$$\frac{dI}{dr} = - \frac{R_0}{r^2} I_0 - \alpha I(r) \quad (7)$$

A solução da equação é:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\ln \frac{r}{R_0}} * e^{-\alpha r} \quad (8)$$

Ou,

$$I = \frac{I_0 R_0}{r} e^{-\alpha(r-R_0)} \quad (10)$$

Mostrando atenuação proporcional a $1/r$ seguindo de uma atenuação exponencial. Quando $R_0 \sim r$ e tendo pouca variação de raio.

$$I = I_0 e^{-\alpha(r-R_0)} \quad (11)$$

Assim demonstramos a relação tradicionalmente utilizada. Existem diversas outras configurações de reatores baseado na tecnologia de UV aplicados e comercializados em larga escala produtiva de duas marcas descritos por *CiderSure* e *Taylor-Couette* (Figura 15). Este equipamento é muito utilizado por anos para descontaminação de fluídos com aumento na capacidade de descontaminação frente a vazão limitada da versão anterior. (66) Todas as configurações atualmente presentes em comercialização têm-se limitações em suas respectivas aplicações,

alguns tem baixa vazão, ou seja, menor capacidade de aumento de volume. O outro tem-se aplicações para líquidos túrbidos, no entanto suas aplicações é para fluídos em de alta turbidez, tais como suco de uva como exemplo.

Figura 15 - Configuração de reatores para regime de escoamento laminar produzido em escala industrial.

Fonte: KOUTCHMA.(66)

A configuração da geometria do reator descrito acima é expressamente aplicada em escoamento laminar podendo ser ampliado para um fluído com uma alta amplitude de turbidez, no entanto com o passar do tempo de utilização é verificado que há diferenças do perfil de velocidade de escoamento, isso faz com que não se tenha uma uniformidade na inativação de microrganismo, e um outro fator limitante é a baixa vazão. Com isso, surgiu a definição CFR 179 (Figura 16) definindo um método para o tratamento em fluídos turbulentos sem a queda expressiva da pressão interna, porém quanto maior o fluxo menor era a capacidade de redução microrganismo com exemplo *E. coli*. (66).

Figura 16 - Esquematização de um reator de fluxo turbulento da *Hanovia* aplicada para a descontaminação de fluídos túrbidos.

Fonte: KOUTCHMA. (66)

3 CONCEPÇÃO, CONSTRUÇÃO E TESTE DOS REATORES

3.1 Visão geral e testes preliminares

Afim de que fosse desenvolvido um sistema que pudesse ser empregado em uma situação real de uso, estudou-se uma planta real. No início do desenvolvimento do sistema que seja integrado em um processo produtivo, preliminarmente se estudou um fluxograma de toda a cadeia de uma empresa de processamento de alimentos da *La Hacienda*, com uma alta taxa de utilização de água, localizada na cidade de León no México. Em conjunto com sua equipe de Engenharia, foram feitos o estudo e o levantamento do fluxograma e das definições nos pontos críticos de controle explanados e os protocolos das aplicações dos agentes químicos (hipocloritos, soda, perácetico) (figura 17), além dos testes preliminares comuns protótipo desenvolvido no grupo.

Figura 17 - Bancada de testes para avaliação da capacidade de descontaminação de água em fluidos circulantes: 1-) Reator de UVC divergente; 2-) Suporte fixador de posição; 3-) Tubulação para a circulação de fluídos; 4-) Bomba de circulação do sistema; 5-) Fonte de energia elétrica.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 - Fluxograma de processo da empresa La Hacienda (México), no qual o mesmo produz vegetais congelados; As setas amarelas representa pontos de elevada taxa de substituição de água; As setas azuis demonstrasse o processo produtivo de forma geral; As setas pretas são pontos de críticos de controle de processo (alta possibilidade de contaminação cruzada); As setas vermelhas representa pontos nos quais a utilização da tecnologia de UV deverá atuar e substituir a utilização de agentes químicos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Um protótipo piloto (Figura 18) constituído de um dispositivo contendo uma lâmpada de UV de 4W (1), um tubo circulado com uma entrada e uma saída (2) conectada na mangueira (3), uma bomba centrífuga conectada nas mangueiras para circular o fluido em questão (4), um potenciômetro com regulação de velocidade da bomba centrífuga (5) foi levado até a empresa.

As provas de princípio *in campi* com amostras advindas de água em pontos considerados altamente contaminados foram consideradas para os testes.

A amostra número 1 foi retirada do hidrocorte (entrada de toda a matéria prima da fábrica) em seu tanque de recirculação. Nessa etapa do processo a água utilizada é totalmente descartada após 8 horas de utilização, devido à alta taxa de contaminantes presentes. Uma amostra foi coletada na etapa em que é considerado a maior presença de microrganismos pela equipe da empresa mexicana, caracterizada no tanque do pré-congelamento tratado com ácido peracético com a concentração de 40 ppm.

Para os testes realizados *in loco* (México) de controle microbiológico, seguiu-se o protocolo utilizado pela empresa pelo Método de Números Mais Prováveis de Microrganismo (NMP) (Tabela 2). As amostras foram coletadas utilizando tubos falcons estéreis, e foi coletado 50 mL em cada em triplicata. Estes pontos foram escolhidos pelos engenheiros de qualidade da indústria, e os pontos gerais de coletas que é considerado um ponto crítico de controle foram:

Tabela 2 - Resultados dos dados experimentais microbiológicos

	Amostras	Resultados
México	Hidro corte (sem UV)	>1100 NMP
	Tratado com Hiperacetico	150 NMP
	Hidro corte (C/ UV)	93 NMP

Fonte: Elaborada pelo autor.

As características organolépticas da água não estavam em normalidade e com alterações físicas e química assim os resultados se tornaram inconclusivos, para amostra retiradas e trazidas para análises dentro do laboratório no Brasil.

Os resultados acima mostrados são comparados em três situações distintas, sendo a primeira no hidrocorte, em que não há nenhuma utilização de um método de controle microbiológico, e foi obtido um resultado de > 1100 NMP, ou seja, é considerado uma situação que contém uma alta carga de microrganismos e elevado risco a saúde do consumidor. O resultado foi esperado por este ponto de coleta estar localizado na entrada do processo produtivo, em que os alimentos vêm diretamente do produtor.

Após a passagem dos vegetais pelo sistema de corte com jato de água, os brócolis são carregados por um sistema de tubulações com água com a adição de hipoclorito para uma redução da carga microbiológica, e neste ponto o resultado é de uma carga de 150 NMP, perfazendo essa razão temos uma diminuição de 7 vezes.

Assim para comparar o protocolo de utilização da luz UV-C em água, onde realizamos os testes na água de entrada (hidrocorte), e o resultado obtido foi de 93 NMP, tendo uma razão de 11 vezes em redução comparando-o com o padrão. Porém a descontaminação desta mesma água (hidrocorte), foi circulando pelo sistema de bancada durante um período de 20 minutos, e foi usada uma lâmpada de potência nominal de 4W, após este período foi realizado o mesmo protocolo de contagem microbiológica e em contagem com a prova base (sem aplicação da luz UV-C) ocorreu uma diminuição de 91% da carga microbiana presente no fluido.

Comparando o padrão ouro da empresa que é a utilização de agentes químicos (ácido hipoclorito), em relação ao tratamento de UV, este tem a capacidade de inativar uma porcentagem 5% a mais do que o método ouro da empresa, considerando que a água que é tratada com ácido já sofreu diversas trocas e eliminação via derivados de cloro para um controle durante o processo. Já a água presente na entrada da empresa não se tem nenhum tipo de sistema de minimização da contaminação.

3.2 Configuração construtiva com reator axial em escala de bancada

Se baseando nos testes descritos acima e realizado *in loco*, e para efeitos de reprodutibilidade e maior controle, foi reduzida a escala industrial para uma escala de laboratório (bancada), e um sistema de recirculação da água que tenha conceitos fundamentais fidedignos ao processo produtivo *La hacienda*. A geometria do reator utilizada na escala laboratorial é uma lâmpada Osram de 4 W centralizada conforme é mostrada no sistema abaixo, e esta configuração não é utilizada para aplicações em grandes volumes, devido ao fato de uma excessiva pressão ortogonal que há no quartzo com 99,995 % de SiO_3 (em todos os protótipos foram utilizados este modelo) de grau de pureza que envolve a lâmpada (Figura 19).

Figura 19 - Esquematização do setup experimento utilizando o reator axial com escoamento angular; A-) Foto do reator instalado e em funcionamento; B-) Esquematização do sentido de fluxo e posicionamento das lâmpadas.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para determinar a capacidade de lixiviação microbiológica dos vegetais brócolis, se construiu um reservatório, que tem como objetivo aprisionar o mesmo em porções sem danificações do sistema de circulação. Esta construção de bancada (Figura 20) é constituída como um reator em formato convergente em um sistema integrado que promove todo o escoamento (1), e que são conectadas via mangueiras na montante e jusante do reator. (2) A circulação é forçada por uma bomba centrífuga estéril, comumente usada em circulação extracorpórea. (3) . Um reator de escoamento

coaxial (4) e um sistema de irradiação é constituído de lâmpadas UV-C de baixa pressão da marca OSRAM PURITEC (HNS G5 8W).

Figura 20 - Esquematização do experimento utilizado para a lavagem dos brócolis em escala de bancada para testes preliminares. 1-) Compartimento de lavagem do vegetal em natura; 2-) Bomba para circulação forçada da água no sistema de tubos; 3-) Reator de UV para descontaminação do fluido; 4-) Sistema de descarte contendo uma válvula globo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A inserção do vegetal para os testes ocorre na caixa de lavagem (1) contendo um volume de 800 mL de água com capacidade de recirculação (jusante do reator UV-C) e uma saída inferior (montante do reator de UV-C) conectada em uma bomba centrífuga (2) que trabalha afogada e é diretamente ligada ao reator. (3)

O fluido que passa através dos brócolis pode retirar os microrganismos presentes e consequentemente é irradiado dentro do reator concêntrico que tem uma saída paralela com o fluxo de entrada e a lâmpada de UV-C utilizada (OSRAM 4W UV-C).

3.3 Análise da capacidade de morte microbiana pelo sistema de bancada

O reator de bancada (Figura 21), tem um perfil de escoamento axial e é denominado de escoamento *Poiseuille*.

Figura 21 - Desenho esquemático do reator de UVC, na parte circulada em vermelho é mostrado as paredes do reator. A parte do lado esquerdo representa o tubo de quartzo, a parte da direita representa o casco externo; as setas representam o perfil de escoamento da água circulante.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando que a água é o fluído de trabalho, e tem um comportamento de escoamento newtoniano a taxa de velocidade é proporcional a tensão de cisalhamento. (67) . Assim, partido das preposições supracitadas e equacionado a relação da dose de luz de UVC frente a vazão como é mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Descrição da relação da dose versus vazão para o reator de UVC utilizado, e o valor do coeficiente de extinção utilizado foi o da água.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nos resultados apresentados na Figura 22, e que a vazão utilizada neste experimento é de aproximadamente ~ 55 mL/s temos que a energia entregue neste perfil de escoamento é de $\sim 0,194$ mJ, temo como base para os cálculos que os raios do reator são de 2,18 e 3,35 cm para o interno e externo, respectivamente.

Assim temos a energia entregue em um ponto do reator, ou seja, a dose, para a determinação da capacidade real em todo o fluído circulante, partimos para a análise de que foi necessário determinar o tempo de passagem do fluído dentro do reator, ou seja, o tempo de retenção do fluído dentro do sistema de iluminação (reator). Isto só é possível quando definimos uma pequena amostra do volume interno, que é denominado como sendo uma parte infinitesimal do volume de água, que passa naquele instante, que conseguidamente foi denominado com sendo um volume de controle, e com isso tivemos como determinar o tempo de passagem deste volume em todo o sistema e consequentemente a determinação da dose real entregue no sistema (extrapolação dos dados para o volume todo).

Logo, com todos os dados obtidos tais como: tempos de experimento e o cálculo do volume médio de água total no sistema que é de 800 mL, considerando que o volume interno do reator é de 147 mL. Assim, pode ser calculado o número de ciclos do volume para passar pelo reator em sua totalidade foi de 70 s e conseguidamente

extrapolar os valores realmente entregues da dose em solução. A figura abaixo mostra a relação da dose entregue na água por tempo (Figura 23).

Figura 23 - Relação teórica da dose entregue na solução, considerando sua passagem completa de 800 mL e a relação da mesma por tempo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos resultados descritos acima e o tempo de experimentação versus taxa de inativação, temos que dose entregue em solução é de 12,5 mJ e na literatura temos que para a *E. coli* O157:H7 CCUG 29193 que é um microrganismo patogênico que dose/área (padrão denotado na normativa da FDA) é de uma taxa de 3,5 mJ/cm², assim em nossos cálculos temos que termos 12 mJ entregue em cada volume infinitesimal presente no experimento, isso é claramente denotado que temos 4 vezes a energia entregue no sistema, para o que é estabelecido pelas normativas. (66)

E, portanto, assim nos asseguramos que há passibilidade na obtenção do sucesso da experimentação deste trabalho, foi delineado a utilização do método *pour-plate* utilizando *E. coli*, levando como base a dose de luz descrita acima e, um experimento com o tempo de 40 minutos em constante circulação de água foi realizado. Primeiramente, os testes sem a adição dos vegetais brócolis foram realizados e depois somente com a circulação de água com os microrganismos, consequentemente fez-se os testes com vegetal contaminado para analisar a capacidade de lixiviação (limpeza) pelo sistema de circulação.

Neste primeiro momento, os resultados obtidos (Figura 24), denotaram duas situações distintas: primeiramente somente a circulação sem o vegetal, e os outros dados da mesma forma, no entanto em conjunto com o vegetal.

Figura 24 - Resultados descrevendo a curva de morte dos microrganismos presentes em água e nos brócolis, para o reator anular (centralizada) na escala de bancada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando qualitativamente os dados acima, os resultados preliminarmente mostraram uma pequena capacidade de eliminação dos microrganismos presentes na superfície do vegetal, com uma redução de 1 log, enquanto que para o sistema que estava escoando água obteve-se a redução de até 5 log. O primeiro fato observado é referente a configuração construtiva das folhagens dos brócolis (fechada e rugosas), fazendo assim um aumento no grau de dificuldade para que a água lave (lixiviamento).

O decorrer do tempo experimental foi observado que em 20 minutos ocorreu um decréscimo menor que 1 log, o que representa 90% de inativação dos microrganismos. No entanto, nos tempos de 20 – 30 minutos, a inativação acresce em um valor de 2 log, representando assim, uma taxa de descontaminação de 99% de *E. coli* presente no sistema.

É possível analisar de forma qualitativa que a vazão imposta pelo sistema em circulação dentro do tanque de lavagem não gere um volume elevado de vórtices, o que em um alto volume auxiliaria uma melhor taxa de lixiviação do vegetal, fator que

está diretamente relacionado a velocidade de escoamento da água pela configuração construtiva do tanque.

O tempo de experimentação foi de 40 minutos e a dose estimada de entrega de luz UVC na solução é de ~12 mJ. Este período de tempo apresenta características de uma dose de luz superior à de capacidade do microrganismo corrigir o dano causado na fita de DNA, com as doses acima descritas denotarão uma não capacidade de regeneração. Consequentemente, um efeito irreversível do microrganismo inativando sua capacidade de replicação pode ocorrer resultado em sua morte. Porém, a turbulência realizada auxilia na capacidade de retirada dos microrganismos inseridos internamente nas folhas que constituem o caule dos brócolis e, esta nova quantidade de agente no fluido poderá que seja eliminado a bactéria. (68). Para uma melhor visualização dos resultados foram normalizados e transformados os valores em unidades percentuais (Figura 25)

Figura 25 - Taxa de morte do microrganismo normalizado comparando na taxa de morte dos microrganismos presentes nos vegetais brócolis e também na água circulante.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os dados acima, é possível identificar inicialmente que a descontaminação no fluido circulante (água) está por volta de 99,999% enquanto nos vegetais brócolis em torno de 90 %.

Estes resultados mostraram uma capacidade de eliminar microrganismos presentes na água de lavagem do vegetal e uma baixa capacidade de eliminação nos brócolis.

Para continuidade do desenvolvimento deste projeto, iniciou a construção de um reator de capacidade de inativação microbiológica em maiores escalas. Em que, primeiramente, fez-se a construção do reator e a utilização de fonte emissora na faixa do UV-C, que foi desenvolvida em uma configuração para se obter segurança alimentar e mecânica.

3.4 Construção do reator utilizando a luz UV-C para planta semi-industrial

A estrutura mecânica foi toda desenvolvida em alumínio, com um sistema de vibra-stop para diminuição de interferência de ruídos advindas de periféricos (Figura 26), para isso, inicialmente será realizada uma aplicação em escala semi-industrial, mas tal protótipo pode ser empregado diretamente na indústria.

Figura 26 - Imagem durante a construção mecânica do reator imagem ilustrativa e a esquematização está descrita no decorrer deste e-mail.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O encaixe para as tubulações presentes em plantas produtivas da empresa *La hacienda* alimentos congelados, é composta de um sistema de tubos com mais de 1

km de comprimento total (ligação entre a recepção e *blanching*), na qual se faz a ligação entre a área de recepção e a área produtiva, para uma escala de aplicação optando pelo desenvolvimento de um reator convergente, pois há uma escala de reprodutibilidade com aplicação direta em outros processos produtivos. Além da aplicação descrita neste trabalho, existe a possibilidade de aplicação em frigoríficos, indústria farmacêutica, eletrônica e aeroespacial. Afim de se obter uma prototipagem em escala semi-industrial realizou o “scaling-down”, configurando-se similitude, é detalhado a planta (Figura 27) utilizada em toda a pesquisa deste trabalho.

Figura 27 - Esquematisação e dimensões da escala semi-industrial e o posicionamento de cada aparato, a linhas vermelhas indica altura em relação ao solo do local de instalação; números em pretos são as medidas em centímetros (cm) de cada parte da tubulação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o levantamento dos dados científicos e conseguidamente realização dos cálculos, faz-se necessário a descrição de alguns dados (Tabela 3).

A otimização do funcionamento foi realizada através da circulação de água em diferentes vazões, estes testes foram realizados ao final da construção do protótipo de circulação, assim não se constatou dano no sistema de lavagem e circulação. A bomba de circulação apresenta um modelo de centrífuga (Sistema no qual faz toda a circulação do fluido), e para o controle do fluxo foi utilizado um sistema de by-pass para controle de fluxo, a lavagem (lixiviamento) ocorre dentro de uma caixa que

contêm 50 L de água, e a força de momento causado pela circulação forçada gera efeitos turbulentos que consequentemente gera vortéx no escoamento, conseguido um lixiviação forçada, essa passagem no reator entrega uma dose no qual faz o processo de inativar os microrganismos presentes dentro da solução e sendo que estas forças de escoamento poderão fragmentar os pedaços de vegetais de brócolis, e adentrar na montante da bomba, assim para evitar infortúnios inseridos dentro da caixa de lavagem um sistema de contenção de fragmentos “gaiola”(Figura 28).

Tabela 3 - Quantidade tipo e os materiais utilizados para a construção da planta produtiva.

Total	Qte	Diâmetro (pol.)	Material
Curvas 90°	3	½"	PVC
Curva 90(2)	2	2"	Galvanizado
Válvulas globo	7	½"	PVC
Rotâmetro	1	½"	PVC
Redutor	2	2" - ½"	Galvanizado/ PVC
Expansão	1	½" - 2"	Galvanizado/PVC
União	5	½"	PVC
União T	1	½"	PVC
Bomba centrifuga	1	½"	Aço
Reator UV	1	2"	Galvanizado Alumínio Quartzo
Reservatório	1	65 L	PP/PE
Gaiola	1	~12x12"	Alumínio

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 28 - Gaiola construída para colocação dos vegetais brócolis e proteção para a bomba de recirculação

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 Procedimento metodológico para a determinação da taxa de inativação nos reatores de luz-ultravioleta (UV)

A determinação da capacidade de inativação e lixiviamento tanto na água de circulação como nos vegetais faz-se necessária com a organização experimental, assim abaixo é denotado os procedimentos experimentais adotados durante este estudo (Tabela 4):

Tabela 4 - Dados experimentais para ambos os reatores.

Variações experimentais	Reator divergente	Reator convergente
Vazão	8 (L/min)	20/40/60/80 (L/min)
Análise na H ₂ O	✓	✓
Análise no Brócolis	✓	✓
Potência das lâmpadas	4 W	30 W

Fonte: Elaborada pelo autor.

A contaminação tanto da água quanto do alimento foi realizada com cepas de *Escherichia coli* (ATCC – 25922), e sempre em um padrão de concentração inicial de 10^5 UFC/mL. Para a inoculação dos microrganismos tanto em água como no vegetal configurou das seguintes etapas: primeiramente a ativação dos microrganismos em tubos de ensaios e agitação em um *mixer* por um período de 24 horas, após este

período foi realizado a lavagem da suspensão do inoculo bacteriano com água esterilizada.

Para o processo de contaminação, tanto dos brócolis como da água, foi realizado o procedimento de duas maneiras:

- i. Contaminação da água: Após o processo de lavagem do inoculo e inserção em tubos de ensaio esterilizados, estes foram vertidos dentro do tanque de recirculação da água, para uma homogeneização adequada a circulação por todo o sistema foi realizada durante o tempo necessário para uma passagem total do volume contido no sistema, no experimento em questão, garantindo a contaminação total do sistema.
- ii. Contaminação dos vegetais brócolis: A contaminação dos vegetais foi realizada com a inserção dos pedaços de brócolis dentro dos tubos de ensaios, contendo as cepas de microrganismos e deixadas submersas por 20 minutos, garantindo a contaminação na maior profundidade da posição do *caule* do vegetal, após este tempo, todo conteúdo foi despejado no interior da câmara de recirculação e os testes foram realizados.

Finalizado a etapa de preparação do inoculo para contaminação do sistema a ser avaliado, foram retiradas amostras em tempos diferentes (Tabela 5) para a contagem foi realizado o *pour-plate*.

Tabela 5 - Tempos de coletas das amostras no reator axial e perimetral.

Reator	Axial	Perimetral
Tempos de coleta (min)	0/10/20/30/40	0/10/30/50/70

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6 Caracterização óptica e procedimento de simulação

Para caracterização da intensidade luminosa de cada lâmpada utilizou-se um sensor LM-2 com range de leitura de 250 – 400 nm e potência máxima de 30 mW com resolução de $1 \text{ nW} \pm 8\%$ (Figura 29).

Figura 29 - Equipamento para a caracterização luminosa das lâmpadas utilizadas; A-) Sensor COHERENT LM-2 UV da série 0482116R, para medidas na faixa e espectro da luz ultravioleta. B-) Medidor de potência eletrônico marca COHERENT modelo LABMAX-TOP.

Fonte: Foto elaborada pelo autor.

3.7 Simulação mecânica e óptica do reator

O desenvolvimento do projeto mecânico dos reatores e as peças necessária para a fabricação, primeiramente ocorreram em uma construção em 3D de todos os componentes no qual constitui o sistema, e para isso foi utilizado o software Inventor 2016 versão estudantil, produzido pela Autodesk e na parte de simulação da óptica envolvida aplicou-se o software Tracepro foi produzida pela *Lambda Research Corporation in Littleton- Massachusetts –USA* e financiando pela NASA

A simulação óptica foi realizada com a distribuição luminosa do reator e a capacidade de entrega das fontes emissoras, e as unidades métricas para irradiação com a distribuição angular lambertiana com irradiância de 1 W/cm^2 em 254 nm de comprimento variando de 10 – 1000 raios incidentes. Por fim, para a realização de cálculos foi realizado utilizando os softwares Excel e *Matlab*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Configuração construtiva de reator perimetral em escala semi-industrial

A construção e constituição do reator foi desenhado para minimizar os efeitos provenientes de tensão causada escoamento com uma fácil inserção no sistema de tubulação em uma planta industrial padrão de produção de brócolis congelado. A configuração construtiva foi realizada de forma perimetral circundando-o com lâmpadas de UV com tubo de quartzo (Figura 30).

Figura 30 - Descreve a constituição mecânica do reator de luz UV; 1-) Válvula globo para o controle do fluxo de escoamento; 2-) Lâmpadas de UV-C que circunda o cilindro de quartzo localizado no centro do reator; 3-) placa refletora e protetora contra a incidência de luz UV; 4-) Estrutura base para estabilização e suporte do reator; 5-) União para a conexão do sistema de tubos ao reator; 6-) suporte para amortização da vibração.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O reator é constituído por um tubo de quartzo centralizado de diâmetro (D) de 5 cm circundado por 6 lâmpada de mercúrio de baixa pressão de 30 W cada circundando com a totalidade o tubo de quartzo de 100 cm e fluído exposto no volume de 8000 cm³ (8 L).

Portanto para a realização dos testes laboratoriais, como as análises microbiológicas, foi construído um sistema com capacidade de simular o processo de carregamento de água de uma planta produtiva padrão no processamento de brócolis

congelado e assim realizar o “*scaling-down*” do modelo de fábrica visitado no México na companhia *La hacienda*.

A segunda parte deste projeto é a configuração e construção dos sistemas de tubulações para a recirculação e lavagem dos brócolis a serem analisados. Perfez-se assim, a inserção de um tanque (3) com capacidade de 50 L com medidor de volume manual inserido em sua lateral e calibrado (4) de acordo com a configuração da caixa e uma grade (gaiola) interna para que pedaços maiores não adentrarem no montante da bomba (5) ou no medidor de vazão. (7)

Para que planta semi-industrial tenha um ciclo contínuo, o mesmo foi ligado através de tubulações (2) a fim de perfazer diversos tipos de avaliações e situações de funcionamento. Foi confeccionado um sistema de controle de vazão *by-pass* (1) inserido logo após a bomba com controle do fluxo de água que passará pelo reator de luz UV (6) conforme a regulagem das válvulas contida no sistema abaixo (Figura 31), mostrando de forma isométrica o posicionamento de todo o sistema presente no *setup* experimental. A circulação de água ocorre no sentido direcional oposto a gravidade (montante em baixo e a jusante para cima) com duas válvulas globo que são acionadas para o controle de eventuais problemas.

Figura 31 - Representação isométrica do projeto de scaling down da planta semi-industrial para os testes do reator de UV-C e capacidade de lixiviação do brócolis; 1-) Sistema de by-pass utilizado para o controle de velocidade de água que passa pelo reator de luz UV; 2-) Tubulação de saída e retorno para o tanque de lavagem; 3-) Tanque de lavagem do brócolis; 4-) Sistema de medição de água através do nível; 5-) Bomba centrífuga para uma circulação forçada; 6-) Reator de luz UV e seus componentes; 7-) Conexões de ligação ao sistema de reator com redução de tubulação 2" para ½".

Fonte: Elaborada pelo autor.

O painel de controle eletrônico *touch* capacitivo foi desenvolvido para uma fácil operação optoeletrônica do sistema e o reator é composto por 6 lâmpadas (Figura 32).

Figura 32 - Reator de UVC com os detalhes eletrônicos; 1-) Botão on/off; 2-) Esquemática das lâmpadas UVC; 3-) Sensores que mostram o funcionamento e injúrias dos mesmos; 4-) Sensores de pressão; 5-) Sensores de intensidade das luzes; 6-) Medidor de vazão.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Avaliação da distribuição de luz dos reatores de UV e caracterização da lâmpada

O primeiro ponto a ser avaliado neste novo modelo de reator é a distribuição de luz internamente ao reator, isso é necessário para que os projetos mecânicos intervêm o mínimo possível na distribuição de luz no interior do projeto. Isso faz com que se tenha uma descontaminação de forma mais eficiente com aumento da irradiação no volume de água que passa pelo tubo de quartzo que recebe a irradiação.

A relação para o posicionamento das lâmpadas em função do raio é dada pela expressão descrita no texto e para que as lâmpadas circundem a totalidade do quartzo de forma diametralmente oposta (Figura 33).

Figura 33 - A-) descrição da distribuição das lâmpadas emissoras de luz UV-C variando-as de 1 até N; B-) Posicionamento das lâmpadas no plano cartesiano e suas respectivas posições no eixo X, Y.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim temos:

Equação 1 – Somatória da Intensidade entregue em um sistema convergente, aplicado para n lâmpadas tendo efeitos de simetria,

$$I(x, y) = r_0 n I_0 \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} \quad (12)$$

Após o raciocínio da forma na qual haverá a distribuição luminosa com base na expressão matemática (4), e através de simulação numérica realizada no Matlab, em que definiu uma não variação ao longo do eixo Y ($Y=0$), e que o ponto zero é o ponto de simetria do reator (posição central do círculo). Através dessa definição é possível determinar a curva de distribuição em um eixo e para efeito de análise a variação ao longo do eixo X está na faixa de 0 até 6 unidades métricas (Figura 34).

Figura 34 - Comportamento da variação da intensidade com uma variação crescente do eixo X (0;6) e Y (0).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados apresentados mostram que a região interna do reator é constante e que não há um decaimento evidenciado de linearidade, portanto, se caracteriza com uma região de homogeneidade. Os resultados acima descrevem que na região central a intensidade entregue é de aproximadamente 0,89 mW e praticamente não varia até 3 u.m. de raio.

Este tipo de resultado mostra uma característica diferenciada em relação aos reatores axiais, nos quais o decaimento tem o perfil de uma exponencial, isso é advindo de suas características construtivas, pois as lâmpadas estão distribuídas de maneira opostas formando uma simetria com sua distribuição de irradiação.

A visualização da modelagem luminosa poderá ser realizada de uma outra maneira como é mostrada (Figura 34) de forma superior ao posicionamento das lâmpadas.

Figura 35 - Simulação da distribuição de luz para a geometria do reator convergente, sem a presença do tubo de quartzo, as dimensões e variações das intensidades de regiões centrais para as periféricas são de $\sim 0,03$ mW.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando é analisado a relevância do fator geométrico, e movemos 10% da posição central em direção a lateral do reator, obtemos aproximadamente uma intensidade de $\sim 0,9$ mW, e quando movemos para a extremidade do raio (R) do tubo, o ponto mais próximo das lâmpadas é obtido $I = 0,9 \cdot I_0$ (potência da fonte emissora). Continuando a análise quantitativa e focalizando na região central do reator tem-se a seguinte Figura 35.

A quantificação dos valores para cada região que tenha uma determinada homogeneidade é representada por cada linha de intensidade na figura acima, em que as linhas azuis são de menores intensidade e conforme tende ao amarelado há um acréscimo do valor do mesmo. Com essa simulação é possível realizar uma estimativa da potência luminosa distribuída e comparando-a com a extremidade os resultados nos mostram que temos uma variação de 0,03 mW, quando comparado a região central com região periférica do raio externo.

Um outro ponto analisado foi a influência de atenuação de luminosa devido a configuração estrutural (2) do equipamento (Figura 36), para isso o desenho em 3D

desenvolvido no inventor foi aplicado no software Tracepro. Para a obtenção do gráfico de distribuição ao longo do corpo do reator se inseriu uma placa retangular (1) no ponto central do reator com o tamanho do raio do tubo e perfeitamente posicionado na parte central do reator e estendido ao longo de todo o comprimento, para a *plotting* dos dados se atribuiu que a placa tenha o perfil absorvedor perfeito, e desconsiderado os efeitos reflexivos da placa, no entanto a parte de alumínio estrutural (3), foi definido com as mesmas características reais do material.

Figura 36 - 1-) Placa de absorção para avaliação da distribuição de luz no reator; 2-) Lâmpada de UV-C circundando o reator; 3-) Estrutura metálica para fixação e resistência do reator.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, devido tais definições de todo o sistema estrutural e com as lâmpadas circundantes, os emissores perfeitos de comprimento de 245,5 nm, e para melhor visualização foi plotado um gráfico em 2D (Figura 37), mostrando a características da distribuição de intensidade.

Figura 37 - Resultado da simulação óptica mostrando a distribuição luminosa em uma placa inserida no centro do reator periférico, resultado que mostra a configuração da distribuição luminosa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível verificar a distribuição luminosa em todo o reator de UV, e este recebeu irradiação em toda a sua extensão (Figura 37), devido a forma estrutural das colunas de estabilização do reator, apresentado áreas com mapa de irradiação diferenciados. Mas para um melhor entendimento está plotado um gráfico no qual estão paralelos a parte estrutura mecânica do reator ao lado a simulação de irradiação (Figura 38).

Figura 38 - Posicionamento da simulação da irradiação no tubo de quartzo do reator e as regiões que apresentam uma singularidade de distribuição; 1;3-). Existe uma tampa de fixação no tubo para posicionamento das lâmpadas são observados que há uma diminuição da intensidade; 2-) devido ao posicionamento dos atenuadores de vibração (vibra-stop) faz uma compressão de irradiação na área, mas sem interferência direta a característica de contaminantes do projeto.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O conjunto de figuras mostrada acima tem como característica de observação uma distribuição de luz em todo o comprimento do tubo de quartzo, entretanto na parte central existe uma leve variação da intensidade comparada ao restante do reator. Isso é devido a forma que o projeto mecânico foi desenhado, pois para uma efetiva sustentação é necessária uma estabilização, inserindo uma peça circundando o tubo de quartzo em sua região central, a qual está ligado e fixado diretamente os atenuadores (Figura 38– 2) de vibração (vibra *stop*), sendo fixado na estrutura base do reator para diminuir quaisquer efeitos nocivos ao quartzo originados das vibrações da bomba e da própria estrutura da planta fabril.

4.3 Correlação da capacidade de descontaminação do reator e capacidade de inativação microbiológica na água circulante do sistema

Primeiramente, se calcula a potência emitida da lâmpada em diferentes pontos e durante um tempo de 10 minutos de funcionamento, assim foi mensurado a potência luminosa de uma lâmpada de 30 W de UV da marca Osram em um comprimento de onda de 254 nm, que é a faixa germicida e o valor obtido para 1 lâmpada, de aproximadamente $0,347 \pm 0,005$ mW, para a estimativa de dose entregue no reator, primeiramente organizou-se os dados na seguinte Tabela 6.

Tabela 6 - Dados utilizados para os cálculos relacionados a dose entregue na água

Dados	Valores
Comprimento do tubo de quartzo (m)	0,956
Volume interno (L)	1,937
Volume tanque para abastecimento (L)	50
Dose (mW) - 1 Lâmpada	0,347
Dose (mW) - 6 Lâmpada	2,082
Vazão (L/min) - ΔQ	20 40 60 80
Tempo de experimento (min)	10 30 50 70

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a determinação numérica da dose estimada no volume total de 50 L, perfez-se as seguintes etapas, e como é conhecido a dose é estimada por:

Equação 2 – Cálculo da dose entregue em um sistema sem considerar efeitos de simetria.

$$D = I \times t \quad (13)$$

D = Dose total entregue no sistema [Energia]

I = Intensidade da energia entregue [Energia/ tempo]

T = Tempo de exposição [unidade temporal]

Para a determinação da dose teve a seguinte continuação de passos:

1º Passo: Cálculo do tempo residente de um volume infinitesimal dentro do reator;

Afim de modelar o desenvolvimento equacional e a estimativa de uma dose no fluído circulante, primeiramente está esquematizado a problematização.

Qual o tempo de residência?

Figura 39 - Descritivo do escoamento no tubo do reator de UV, em que é determinador um valor infinitesimal de volume para o cálculo do tempo de retenção (δV), e uma conservação de massa ($Q_1 = Q_2$).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, é considerado que temos uma conservação de massa e momento neste escoamento, ou seja, que $Q_1 = Q_2$, logo temos:

Equação 3 – Relação entre a vazão e a velocidade de escoamento em um sistema constituído de 2 placas

$$Q \sim v \quad (14)$$

Q = Vazão;

v = velocidade

Por conseguintemente é equacionado a relação da vazão com a velocidade, com isso é obtido:

Equação 4 – Determinação da relação da vazão com a velocidade e área do sistema.

$$Q = \frac{\delta V}{t} = \frac{L}{t} * A = v * A \quad (15)$$

δV = Volume infinitesimal;

L = Comprimento do tubo;

A = Área;

t = tempo;

Finalmente a determinação do tempo de retenção da parte infinitesimal do volume dentro do tubo é predita como:

Equação 5 – Determinação do tempo de retenção de um volume infinitesimal com escoamento contido em 2 placas.

$$v = \frac{L}{t} = \frac{L}{v} \rightarrow t = t_R \quad (16)$$

t_R = tempo de retenção;

2º Passo: Determinação do tempo para a passagem total do fluido ao menos 1 vez no reator:

Baseado na equação 16, sabemos que, $t \sim \frac{1}{Q}$, assim determina o tempo total de 1 passagem completa do volume contido no tanque.

3º Passo: Estimativa da dose entregue para 1 passagem completa do volume:

Para cada Q temos um T_R , assim podemos afirmar que $Q_1 \sim T_{R1}$; $Q_2 \sim T_{R2}$ assim por diante. Consequentemente $Q_1 \neq Q_2$, ou seja, $T_{R1} \neq T_{R2}$.

Com essa premissa temos a possibilidade de determinar a dose aplicada ao menos uma vez por todo o volume de experimento que é 50 L, e como foi medido a potência luminosa entregue por cada lâmpada, e anteriormente foi descrito que a distribuição óptica tem um comportamento homogêneo. Logo sabemos que a distribuição das lâmpadas de forma equidistante em relação ao ponto central, se torna uma contribuição energética igualitária no sistema.

Outros pontos são relacionados aos efeitos de reflexão que podem ser desconsiderados, e que a equação de Lambert-beer, descreve a grande contribuição nestes sistemas de absorção ou chamado de coeficiente de extinção. A água pode absorver fortemente a energia de comprimentos de ondas pertencentes a faixa de UV.

4º Passo: A dose entregue no volume baseado no tempo experimental

Inicialmente, para o entendimento do resultado, vamos as proporções de passagens do fluido pelo reator quando se varia a vazão, logo assim é possível obter a correlação descrita na Tabela 7.

É observado uma proporção conforme aumente ou diminua a vazão, com isso é estimado que a dose entregue no sistema, ou seja, na quantidade de água de 50 L será a mesma, devido a proporcionalidade. Com base na sequência descrita obteve-se o seguinte resultado (Figura 40):

Figura 40 - Cálculo da dose entregue no experimento do reator perimetral, de forma incremental ao tempo de circulação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a inativação de agentes microbiológicos é utilizado os dados da FDA em que descreve a que a fluência mínima para *E. coli* ATCC 23958 inativar é de aproximadamente 500 mJ/ cm². (69-70).

A dose é obtida de forma temporal no reator, sendo que mesmo na menor vazão configurada para os testes na vazão de 20 L/min no tempo de 70 minutos apresenta uma dose de ~ 0,9 J. As normas de não evidencia de maneira pragmática a forma pela qual calcula-se a descontaminação de fluidos circulantes para este tipo de reator. Assim, para obtenção de uma boa estimativa e o confronto dos resultados obtidos matematicamente foi realizado os testes microbiológicos que estão descrito no decorrer deste texto.

4.4 Taxa de descontaminação da água de lavagem no sistema variando-se a vazão.

Os primeiros testes foram realizados (Figura 41) variando-se a vazão (Q), os valores testados são 20,40,60,80 L/min.

Figura 41 - Gráfico da taxa de morte de microrganismos variando-se a vazão, entre 20 – 80 L/min.

Fonte: Elaborada pelo autor.

As concentrações iniciais para todos os experimentos foram de 7 Log de microrganismos vivos (10^7 UFC/mL) e os tempos para as coletas foram de 10, 30, 50, 70 minutos em todos os experimentos, nas amostras retiradas aplicaram-se o protocolo de plaqueamento em placas de Petri a partir de diluições seriadas (*pour-plate*) para contagem de Unidades formadoras de Colônias (UFC/mL). As placas de Petri foram incubadas durante 24 h, à 37 °C, após este período realizou-se a contagem das UFC.

Na vazão de 20 L/min o decréscimo de microrganismos foi de aproximadamente 99% (2 logs), com uma taxa de inativação que está entre 90 – 99,9%.

Na vazão de 40 L/min foi observado que nos primeiros 10 minutos de funcionamento do circuito uma inativação de 4 log, isso representa aproximadamente 99,99%, e em 50 minutos de experimentos praticamente não foi detectável microrganismos, considerando 99,99999% de inativação, porém com 70 minutos ocorreu um aumento de 1 log de colônias de microrganismos, fato a ser discutido adiante.

Em 60 L/min observou-se uma redução de 99,9999% em 10 minutos e não foi mais detectável no próximo tempo, de retirada da amostra. No último valor mensurado experimentalmente de 80 L/min uma redução de 99,999% em 10 minutos e não detectável nos próximos tempos experimentais, exceto que no último tempo de coleta apareceu um pico contendo 1 log, e com uma margem de variação de 2 log. Tal fato pode ser advindo de microrganismos presentes em canais de baixa pressão de escoamento, tais com os cantos de 90° do tanque, e a segunda possibilidade pode estar relacionada a geometria dos brócolis, mas não pode não caracterizar pela junção dos dois efeitos que contribua com o pico presente nos 70 minutos. A quarta possibilidade de contaminação é devido a água durante a execução do protocolo de testes. Foram realizados contraprova microbiológica na água de circulação com o sistema ligado por um período de 15 minutos, circulando a água destilada, que foi utilizada para minimização do problema de contaminação cruzada realizando a contagem de UFC de somente as amostras de água. Ao fim de cada teste foi trocada por completo o volume de água contido no sistema de 50 L, e higienizado todo o sistema com água límpida e álcool 70%, aplicados nas paredes.

Foi observado que as vazões dobrassem com o decréscimo da concentração dos microrganismos inativados, sendo linear o *slop*, *que* é equivalente ao triplo da vazão, provando que é proporcional. Assim ficou pré-estabelecido a relação entre a constante cinética (γ) e a vazão, se for para 20 L/min é obtido $\gamma \sim 0,04 \text{ min}^{-1}$ por variação de vazão (Q).

$$\gamma = 0.04 Q / 20 \quad (17)$$

Para uma comparação entre a dose entregue no sistema *versus* inativação microbiológica (Figura 42).

Figura 42 - Gráficos que confronta a dose calculada no sistema com a taxa de inativação de microrganismo experimentalmente obtidos: A-) Para a vazão experimental de 20 L/min; B-) Para a vazão experimental de 40 L/min; C-) Para a vazão experimental de 60 L/min; D-) Para a vazão experimental de 60 L/min.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados denotados acima foram obtidos de amostras retiradas logo após a passagem no reator convergente, no entanto é percebido que de fato o aumento da dose entregue no sistema contribui diretamente para inativação de microrganismos presentes em água.

Quando é comparado o resultado da figura 28-A com a figura 28-D, mostrasse o decréscimo veemente dos microrganismos presentes em solução, no entanto o resultado da figura 28-C confrontando com o da figura 28-D, denotasse o melhor resultado aparente.

Preposições nos quais devemos levantar neste momento, é que o vegetal utilizado neste estudo se trata dos brócolis, este é vegetal no qual tem sua folhagem entrelaçadas e de forma a obter uma retenção maior de microrganismo.

Assim uma maior nesta conjectura é entendida que uma vazão de escoamento maior obteve uma maior capacidade de lixiviamento, fato no qual será discutido no decorrer deste estudo.

4.5 Efeito do jato livre no sistema de lavagem do vegetal

Após a demonstração da capacidade de o sistema inativar os microrganismos foi realizada a circulação de água, em duas situações: a primeira com o reator de UV desligado e a segunda com o reator de UV ligado, e em conjunto com os vegetais brócolis contaminados em circulação com o sistema fechado e posicionado abaixo do jato livre acima do suporte em que estava contido.

A água do tanque é forçada a passar pela bomba (vazão variável) no montante do reator e é exposta a luz de UVC. Consequentemente, é retornada diretamente para o tanque, onde contêm a gaiola com partes dos brócolis contaminado.

Esta nova conjectura tem como via de contaminação o vegetal, e esta configuração simula em menor escala o lixiviamento ocorrido na indústria mexicana *la hacienda*, no entanto aqui não há inserção de nenhum agente químico para auxiliar tal fenômeno.

A lavagem do jato livre inserido acima do tanque contribuiu com a turbulência do fluido conforme o tempo, na passagem de uma quantidade volumétrica há uma irradiação fazendo com que se tenha a diminuição dos agentes patogênicos liberados com o tempo e a turbulência do sistema (não considerado na cinética), logo pode-se descrever o seguinte equacionamento:

Equação 6 – Definição diferencial da relação de lixiviação do vegetal

$$\frac{dN}{dt} = -\gamma * N + F(N, t) \quad (18)$$

Onde o F representa a função da taxa de inserção do microrganismo em solução, ou seja, a recontaminação na solução. Esta função é dependente de vários fatores que envolve a capacidade de circulação e remoção do sistema fluido e contaminantes presentes.

Assim, para compreender está cinética per fez-se o experimento para a avaliação do microrganismo residual nos brócolis e também a taxa de lixiviação

(microrganismo presente no vegetal que é transferido para água) nessas duas situações temos curvas em sentidos opostos, pois espera que tenha comportamento opostos os resultados.

Uma primeira situação foi realizada com o reator de UV desligado todas as lâmpadas, assim é inicialmente entendido o comportamento desta taxa de remoção de agentes (Figura 43), e em um segundo momento as lâmpadas presentes no reator foram ligadas, com isso temos em conjunto a taxa de inativação. Os experimentos foram realizados com uma vazão de 80 L/min e um volume de 50 L.

Figura 43 - Resultados teste para a lixiviação dos brócolis instalados no sistema e com o UV desligado.

Fonte: Elaborada pelo autor

É observado acima que inicialmente ($t = 0$ min) não há constatação de microrganismos presente em água e com a evolução temporal há um aumento da concentração dos microrganismos em água de forma inversa ao vegetal analisado em 0 min com uma concentração de aproximadamente 6 log de UFC/mL (10^7 colônias) e com o passar do tempo este valor sofre um decréscimo.

Analisando o vegetal, uma eliminação de aproximadamente 3 log ocorreu, isso representou uma diminuição de 99,9% de microrganismos, enquanto na água de circulação aumentou aproximadamente 5 logs, ou seja, um acréscimo de 10^5 colônias de microrganismos. Entretanto, considerando a margem de erro tem-se no tempo de

70 minutos um equilíbrio entre a contaminação presente no vegetal em relação a água fluida.

Com este resultado é verificado a seguinte característica do *setup* construído com capacidade de lixiviar os brócolis, ou seja, tem a característica de limpar o vegetal de possíveis agentes patogênicos com a evolução temporal. O crescimento da concentração de microrganismo na solução (N_s) é observada com esta evolução do tempo, enquanto as concentrações dos agentes presentes nos vegetais brócolis decresceram (N_B), e temos a seguinte aproximação:

Equação 7 – Relação da concentração de microrganismo no escoamento do sistema

$$\frac{dN_s}{dt} = - \frac{dN_B}{dt} \quad (19)$$

Nesta situação, eventualmente ambos começam em zero, quando a taxa de lixiviação é igual a taxa de recontaminação da solução tem-se que $\gamma = 0$ e $\frac{dN_s}{dt} = F(N, t)$, sendo que esta função tem um crescimento rápido e inicialmente segue uma tendência de saturação. Quando estamos no equilíbrio temos $N_s = N_B$, temos a remoção de contaminantes dos brócolis pela solução, o que perde a eficácia e um equilíbrio é estabelecido.

No entanto, é importante demonstrar a capacidade de inativação microbiológica para uma real aplicabilidade em um sistema que há atuação conjunta lixiviando e inativando os agentes patógenos presentes no vegetal. Para isso, foi realizado testes com as mesmas características do anterior, o reator ligado a luz UVC (Figura 44) para assim verificar qual o comportamento da curva tanto de lixiviamento como da taxa de morte dos agentes presentes em água.

O próximo experimento é adicionado pelo mecanismo de inativação ($\gamma \neq 0$), ou seja, uma taxa de inativação microbiológica na água. Para esta configuração experimental com a luz ligada foi inicialmente utilizada uma concentração de aproximadamente 10^7 UFC/mL de contaminação nos vegetais brócolis com a recirculação desses vegetais em um sistema de gaiola para prevenir o entupimento no montante da bomba de circulação do sistema e em vazão utilizada de $Q = 80$ L/min e um microrganismo *E. coli* (Figura 44).

Figura 44 - Efeito no número de microrganismos na presença da luz ultravioleta.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados acima mostram que o comportamento de microrganismo é crescente na água até o ponto de 30 minutos, após este período o mesmo começa a reduzir de 5 log para 3 log. Esta redução de 90% e no tempo de 70 minutos após o início deste processo não é evidencia nenhum traço de microrganismo.

Quando a concentração de microrganismo presente nos vegetais decresce com o tempo, realizada na demonstração da taxa de remoção de microrganismos acumulados na solução que difere do comportamento do sistema circulante quando não está ligado a lâmpada.

Com o aumento do número de microrganismos, consequentemente diluído após o tempo de 30 min, o número decresce rapidamente como observa:

Equação 8 – Taxa de decrescimento do microrganismo no sistema de escoamento.

$$\frac{dN_s}{dt} = L(N_B, t) - \gamma N_s \quad (20)$$

Onde $L(N_B, t)$ a taxa de carregamento depende da quantidade de brócolis e do tempo, que é considerado equidade da seguinte forma, em que a concentração é proporcional no vegetal em uma taxa constante (α). Por outro lado, o número de microrganismos nos brócolis decresce a uma taxa aproximada:

Equação 9 – Concentração proporcional de microrganismo com a taxa de decréscimo

$$\frac{dN_B}{dt} = -\beta(N_B - N_S) \quad (21)$$

Indicando que $N_B > N_S$ em que a transferência nos brócolis em solução, por causa destas considerações temos os seguintes conjuntos de equações diferenciais:

Equação 10 – Taxa de transferência do vegetal para a solução por tempo de escoamento

$$\frac{dN_B}{dt} = -\alpha(N_B - N_S) - \gamma N_S \quad (22)$$

$$\frac{dN_B}{dt} = -\beta(N_B - N_S) \quad (23)$$

Onde $N_B \sim N$ e $N_S = 0$, o número em solução aumenta, pois $\frac{dN_B}{dt} > 0$ alcança o ponto onde é $\frac{dN_S}{dt} = 0$, quando os dois tempos são iguais temos que $\alpha(N_B - N_S) = \gamma N_S$ como $N_S = \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} N_B$. Para este ponto onde $\frac{dN_S}{dt} < 0$ e N_S agora está decrescendo com o tempo. Na solução para N_B também decresce também diminui tanto quanto $N_B > N_S$, mas considerando $\alpha, \gamma > 0$, N_S poderá obter o máximo $N_S = \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} N_B < N_B$. No entanto N_B poderá sempre está decrescendo em função do tempo, a solução completa do sistema pode ser obtido resolvendo os dois sistemas de equações para assim obter um resultado que está presente na Equação 10 que está de acordo com os resultados obtidos.

4.6 Análise da influência na vorticidade gerada pelo jato livre e influência na taxa de lixiviação.

No reservatório de recirculação de água, ou seja na jusante do reator de UV tem o direcionamento através de uma tubulação que é construída até a parte central do reservatório e localiza-se acima da caixa de telas para a proteção, caracterizando com sendo um jato livre, assim se tem um sistema de grades para proteção contra a liberação de possíveis fragmentos de vegetais brócolis no qual por ventura pode

desprender-se e ser succionado até a montante da bomba de recirculação (Figura 45) danificando o mesmo.

Figura 45 - Imagem do reservatório de recirculação de água do reator de UV e também de lixiviamento dos vegetais brócolis, o círculo vermelho é a tubulação na qual sai o jato livre de água após a passagem no reator de UV.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Experimentalmente é observado que este jato livre posicionado acima do fluido presente no reservatório há uma aceleração aumento a quantidade de momento entregue no sistema contido abaixo (reservatório) e de fato o mesmo é transferido de forma direta aos vegetais, consequentemente ao escoamento forçado a massa de água faz com que o volume contido dentro do reservatório seja perturbado e turbilhonado, ou seja os vegetais juntamente com a água tenham movimentos caóticos.

O posicionamento do tubo (círculo vermelho), presente acima da camada superior de água com um gap entre sua jusante e tal superfície, colabora que para tenhamos um efeito de jato livre plenamente desenvolvido de fato influência diretamente a taxa de lixiviamento do vegetal presente internamente no sistema, e como o momento está diretamente relacionado a velocidade e está é variada conforme a vazão temos, assim uma plausibilidade de análise de para o esclarecimento de uma preposição aferida acima.

Para um bom entendimento de como é o escoamento de jato livre na Figura 46 é mostrado de forma fidedigna o que realmente acontece no experimento ao fluido sair do tubo até atingir a superfície da água.

É fato que a direção do escoamento ocorre no mesmo sentido do vetor da gravidade, tendo assim contribuições da aceleração ao jato.

Figura 46 - Esquematização de um jato livre de água no mesmo sentido do vetor gravidade e a forma que o mesmo tomasse quando o escoamento está plenamente desenvolvido.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, buscando a compreensão do fenômeno de jato livre e a turbulência, é possível descrever que a turbulência é o estado caótico e isotrópico das moléculas presentes no fluido e isso ocorre durante o escoamento plenamente desenvolvido, e a característica física nestes fenômenos são a intensa variação instantânea de velocidade, temperatura e outros escalares. (71-73)

A consequência destes fatores contribui para a formação de estruturas denominadas de vórtices, nos quais está diretamente no transporte de massa, momento e calor na maioria dos escoamentos. (74) Apesar de ter um estado extremamente caótico os regimes turbulentos, é possível identificação de perfil de estruturas via teoria ou em observações correntes durante as experimentações.

Este conceito de vórtices está associado a estruturas coerentes presentes nos escoamentos (Equação 11), nos quais são formados em regimes turbulentos.

Os vórtices tem diferentes tamanhos e poderão se somar propiciando assim a troca de energias, o range de formação para as grandes formações tem como limite a largura do tubo no qual está sendo escoado e o limite de menor escala, ou seja o mínimo de formação é o tamanho das moléculas presentes nos fluidos, assim é concluído que jamais um vórtice poderá ter tamanho menor que as estruturas moleculares presentes nos fluidos, neste ponto a viscosidade molecular se torna muito efetiva e estes previnem a geração de vórtices, este mecanismo garante que os

menores vórtices sejam maiores que as dimensões moleculares tendo assim à hipótese do *continuum*.(75)

Outro ponto a se atentar é pelo fato de que os vórtices menores contribuem energeticamente para os vórtices maiores, ou seja, utilizando como exemplo a imagem acima os vórtices visualizados são os de maior valor energético naquele sistema e sendo os de maiores energias, pois contribuem para o transporte turbulento de massa, energia e momento. Esses processos são conhecidos como cascata de energia e foram descritos por *Kolmogorov* em 1941. (76)

Assim para se calcular a vorticidade e o momento entregue no sistema de jato livre perfizemos os seguintes passos:

Equação 11 - Cálculo do número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu} \quad (24)$$

Re = nº Reynolds | ρ = Densidade do fluido | d = diâmetro do tubo | μ = viscosidade dinâmica

Equação 12 - Energia de dissipação de vórtice pelo fator de atrito:

$$e = \left(\frac{L_T * (v^2)}{2 * a * d} \right) \quad (25)$$

L_T = Comprimento do tubo | v = velocidade do fluido | e = energia de dissipação

As Escala de Kolmogorov, primeiramente foi calculado as escalas menores e seguidamente as maiores perfazendo a ordem de vorticidade e momento, através do seguinte equacionamento:

Equação 13 - Escalas menores de vorticidade e momento (Escala de Kolmogorov)

$$Vort_1 = \left(\frac{Re}{\mu}\right)^{0,5} \quad (26)$$

$$Momento = M_1 = (\mu * e)^{0,5}$$

Equação 14 - Escalas maiores de vorticidade e momento (Escala de Kolmogorov)

$$Vort_2 = \left(\frac{Vort_1}{Re^{0,5}}\right) \quad (27)$$

$$Momento = M_2 = (Re)^{0,5} * M_1$$

Com tanto é possível termos os seguintes resultados, para cada vazão aplicada no experimento (Figura 47).

Figura 47 - Cálculo da energia de vorticidade e momento em escalas menores de formação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura acima é possível identificar, através da comparação das escalas de medidas, que para as escalas menores, a formação de vorticidade, ou seja formações

geométricas menos aparentes e com menores energias de conservação e sim maiores influências de energias dissipativa causada por efeitos viscosos moleculares, tem-se uma menor energia do *continuum* (momento), devido a variação de vazão do experimento, mas há um veemente aumento no comportamento isotrópico do sistema.

Nesta análise verificasse que a vorticidade está contribuindo para a dissipação de energia, e a consequência de tal fator é que a energia é transferida para as escalas maiores assim é esperado que a determinação da cascata de energia determine que o momento ao sistema está sendo entregue preferencialmente pelas escalas maiores de vorticidade.

Pois é observado durante a experimentação a formação de efeitos caóticos dentro do sistema de recirculação de água, para um melhor entendimento conseguidamente é realizado o cálculo do comportamento de escalas maiores e a relação do momento *versus* a vorticidade gerada (Figura 48).

Figura 48 - Cálculo de energia de vorticidade e momento em escalas maiores de formação

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nestes cálculos das características das escalas maiores que temos uma inversão clara, em que o jato livre contribui de forma veemente para o movimento caótico dos vórtices de menores escalas, ou seja, o momento tem um aumento quando há um aumento na vazão, e como é mostrado em resultados precedentes vemos que uma

velocidade elevada contribui de forma eficaz para a taxa de retirada de microrganismo presente no vegetal e consequentemente a descontaminação.

Outro ponto que podemos compreender nestes cálculos são que a sumarização conforme visto acima, dos vórtices contribui de maneira positiva para os nossos resultados.

Está conjectura das escalas maiores de turbulência, evidência um fato denotado na experimentação em que a está apresentada na Figura 48, em que na parte C mostra que a vazão de 60 L/min tem maior capacidade e inativação frente 80 L/min, no entanto o momento entregue é de ~1500 e 2500 respectivamente.

Assim denotasse que em uma velocidade maior se tem maiores níveis energéticos sendo entregue no sistema, fato este que mostra uma boa influência a taxa de lavagem do vegetal.

4.7 Descontaminação dos líquidos circulantes: indo além dos alimentos

A descontaminação de fluídos circulantes em órgãos, é um campo de estudo novo na ciência moderna, e devido as conjecturas sociais mundiais há uma grande relevância, pois, a mesma poderá auxiliar na redução dos altos custos operacionais do transplante e a abertura da possibilidade de transformação de como consequência do efeito pandêmico no qual vivenciamos que cresce fortemente a aplicação e desenvolvimento de novas configurações construtivas.

Fato que em um período brevemente ao surgimento do COVID-19, após a pandemia se evidência o grau de super-importância na área, logo com característica de inovação já está descrito em literatura duas publicações de estudos que foram realizados com parceiros (Universidade de Toronto-Canadá) do laboratório no qual perfiz este projeto de doutorado e de forma conceitual obtive a participação preliminar, no qual desenvolvi a conjectura físico-matemática da óptica do reator e a preposição de uma nova configuração construtiva, e em consequência outros pesquisadores publicaram dois trabalhos o primeiro é: ***“Inactivating hepatitis C vírus in donor lung using light therapies during normothermic ex vivo lung perfusion.*** NATURE

COMUNICATION consequência deste foi confeccionado e produzido o: Galasso M; *et al*; ***“Prevention of viral transmission during lung transplantation with hepatitis C-viraemic donors: an open label, single-centre, pilot trial***. LANCET+. Cypel, M. *et al*’.

Assim, descreverei resultados não publicados fortalecendo e endossando os espetaculares resultados obtidos nos experimentos preliminares, e de fato o conceito envolvido nestas duas publicações é a descontaminação de líquidos circulantes, no entanto aplicados nos transplantes de órgãos e utilizado um fluído para a preservação e consequentemente transplantar ao humano receptor.

Após a retirada do órgão do paciente doador é realizado um procedimento de infusão e manutenção das características vivas do tecido, durante este protocolo é aplicado um fluído que posteriormente é descartado e no caso do fígado o líquido é realizado a perfusão do fígado em ex-vivo (PFEV) com uma solução na base de proteínas, dentre outros constituintes denominada de Steen® (XVIVO perfusion, CO,USA).

Esse fluído auxilia na manutenção reparação do tecido do órgão, assim devido ao elevado custo deste procedimento, idealizou a possibilidade de descontaminar o mesmo para aplicações futuras, logo foi inserido no sistema primeiramente um reator divergente utilizando uma lâmpada central no comprimento de onda brevemente utilizado neste projeto na faixa do UVC com o comprimento de onda de ~254 nm, da marca OSRAM.

Assim, é observado que o fluxograma de desenvolvimento do equipamento utilizado, estão baseados nos estudos preliminares descrito no decorrer deste texto. (Figura 49).

Figura 49 - Fluxograma para descontaminação de fluidos circulantes: 1-) Objeto a ser descontaminado por líquidos circulantes; 2-) Reator de UV, podendo ser o divergente ou o convergente; 3-) Sistema elétrico mecânico para forçar o escoamento criando uma circulação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Logo, conceitualmente é entendido a passibilidade de descontaminar quais fluidos no qual escoa, desde que o mesmo tenha uma característica mínima de sistema de escoamento, no caso do fluido *Steen*, temos que sua característica é um comportamento aparente de fluido Newtoniano, transparente com viscosidade aparente baixa, no entanto contêm 25% de proteínas em solução isso acarreta um alto coeficiente de absorção, pois a proteína tem por característica físico-estrutural absorver a energia nas faixas do UV, com já descrito em especial a faixa do UV.

Durante a experimentação preliminar no laboratório no Brasil, foi mensurado o coeficiente e o número obtido foi de $\sim 6,015 \text{ cm}^{-1}$ (α). Baseando neste α e utilizando a base de conjectura equacional descrita é possível perfazendo o a estimativa da dose. Logo, para o entendimento da dose entregue em solução em razão foi determinado um resultado que correlaciona a dose entregue em solução *versus* a vazão (Figura 50).

Figura 50 - Descrição da dose entregue em solução versus a vazão do sistema, assim é possível determinar a dose real entregue em uma passagem do fluido em um *range* de vazão.

Fonte: Elaborada pelo autor

Visto que o escoamento do EVLP é de ~ 17 mL/s (1 L/min), podemos que a velocidade média do fluido interno ao reator é de $\sim 2,52$ mL/s e que o perfil de velocidade é de $\sim 3,78$ mL/s, assim a dose é de $\sim 0,15$ mJ. Assim é possível determinar a dose entregue por tempo de experimentação (Figura 51).

Figura 51 - Determinação da dose entregue em solução em um tempo de circulação de 9 hora totais, em que se obteve um máximo de ~ 42 mJ de energia descontaminantes na *Steen*.

Fonte: Elaborada pelo autor

Utilizando a ferramentas de mineração de dados presentes no *software Matlab*, foi possível extrair os resultados discutidos no artigo de circulação, logo como temos toda a determinação das doses entregues, perfiz uma correlação da dose entregue e a taxa de inativação em algumas situações mostradas no artigo. (77-78)

Deforma conjunta é descrito a relação da diminuição da carga viral no órgão transplantado utilizando o reator, o descenso da carga viral no fluído circulante (*Steen*), a relação do PCR em tempo real de fragmentos de proteínas inativadas, e pôr fim a inativação de HCV (Figura 52).

Figura 52- Plotting dos resultados extraídos e a correlação da dose entregue; A-) Carga viral do tecido transplantado; B-) Carga viral da *Steen*; C-) PCR em tempo real; D-) Taxa de inativação do HCV.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em possível compreender que a taxa de inativação é inversamente proporcional a dose acumulada no tempo de experimentação, fato é que temos um decréscimo da concentração da carga viral tanto no órgão como na solução de *Steen* e um curva de crescimento na dose real ao sistema.

O resultado é observado que de 100% da carga viral a dose de ~42 mJ teve capacidade de reduzir 60 % dos microrganismos presentes tanto em solução como no órgão transplantado (77-78)

Para um melhor entendimento foi realizado uma experimentação em que não há órgão na linha de descontaminação, somente um sistema baseado nos testes preliminares da descontaminação do vegetal, em que per fez o teste usando a técnica de PCR para mensuração do HCV do número de partículas virais presentes (Figura 53).

Figura 53 - Plotting dos resultados extraídos e a correlação da dose entregue circulação da Steen sem a utilização de um órgão no sistema.

Fonte: Elaborada pelo autor.

É observado que o número de partículas virais presentes no controle se mantêm de forma constante entre a faixa de 140 -160 IU/mL, no entanto quando aplicado a irradiação de UVC no sistema circulante é possível verificar uma redução em escala de 160 IU/mL para 40 IU/mL, ou seja em linhas gerais ocorreu uma redução de ~73% nos números de partículas virais presentes e mensuradas pela técnica de PCR em tempo real com uma dose de ~15 mJ.

Se olharmos a mesma conjectura mensurando o vírus em FFC/ML neste mesmo experimento obtemos a seguinte configuração de resultados (Figura 54).

Figura 54-Inativação do HCV presente no líquido circulante *versus* a dose entregue ao sistema

Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado mostra que em um tempo de ~110 min não traços de HCV em solução, e que a dose de luz UVC para a inativação foi de aproximadamente 10 mJ, e este resultado manteve até ~180 min. Ou seja neste sistema não ocorreu o fato de haver recontaminação, fato transcrito no sistema de lavagem do vegetal.

Isso é devido o fato da estrutura experimental de escoamento e da baixa capacidade do sistema em entregar momento e ocasionar efeitos de vorticidade no sistema circulante. Fato é que um sistema em que temos controlado o perfil de escoamento sem adição de efeitos turbulento faz com que tenhamos uma inativação total dos microrganismos presentes neste caso vírus em solução.

5 CONCLUSÃO

É possível concluir que a aplicação dos reatores divergentes há um efeito de inativação microbiológica neste objeto de estudo foram utilizados cepa de E. Coli, no entanto foi denotado uma limitação no sistema para um escalonamento, pois o comportamento óptico descreve de forma exponencial quando temos um aumento da relação do diâmetro.

Mas é visto que temos a possibilidade de dimensionais o sistema para outras aplicações tais como transplante de órgãos, e nesta configuração temos uma vasta gama de aplicação em fluídos circulantes, pois desde que tenhamos o coeficiente de absorção mensurável há possibilidade de determinação da dose realmente entregue na solução independente da vazão utilizada e o tempo experimental.

Para o *scaling-up* do sistema e aplicação em situação industriais de alto fluxos e uma necessidade de segurança devido aos volumes de capacidades de produção do setor produtivo, foi mostrado que a nova configuração construtiva tem uma boa homogeneidade em sua distribuição óptica, podendo e devendo em trabalhos futuros novas aplicações tais como um *scaling-down* para utilização do aumento da capacidade de dose entregue no sistema de circulação extracorpórea e aplicação na área de transplantes.

Temos a conclusão definitiva que é possível escalonar, desenvolver, dimensionar e calcular a energia realmente entregue para aplicação de descontaminação em quaisquer situações de escoamento. Pois é amplamente, conhecidos os efeitos de escoamentos e as fenomenologias dos perfis de escoamentos presentes nos mais diversos sistemas, já este trabalho tivemos a oportunidade de descrever de maneira ampla os efeitos ópticos contidos e formular de forma comprovada uma conjectura físico-matemática para o dimensionamento de qualquer escala e fluido que circula e por assim inativar os microrganismos que estudos posteriores em questão tenham interesse.

Por fim, devido aos graves efeitos ocasionados pelo COVID-19, e devido a necessidade de técnicas que demande a não utilização de agentes químicos, vemos a aplicação deste sistema nos mais diversos setores e motivo áreas tais como: aeronáutica, farmacêutica a teste e aplicações destes sistemas.

REFERÊNCIAS

- 1 VON HOLY, A.; HOLZAPFEL, W. H. The influence of extrinsic factors on the microbiological spoilage pattern of ground beef. **International Journal of Food Microbiology**, v. 6, n. 4, p. 269-280, 1988.
- 2 KIM, J.-G.; YOUSEF, A. E.; DAVE, S. Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: a review. **Journal of Food Protection**, v. 62, n. 9, p. 1071-1087, 1999.
- 3 BAGNATO, V. S. **Físico brasileiro apresenta no vaticano alternativas aos antibióticos**. 2016. Disponível em: <https://domtotal.com/noticia/1103998/2016/12/fisico-brasileiro-apresenta-no-vaticano-alternativas-aos-antibioticos/>. Acesso em: 23 jul. 2020
- 4 KHADRE, M.; YOUSEF, A.; KIM, J. G. Microbiological aspects of ozone applications in food: a review. **Journal of Food Science**, v. 66, n. 9, p. 1242-1252, 2001.
- 5 PLECHKOVA, N. V.; SEDDON, K. R. Applications of ionic liquids in the chemical industry. **Chemical Society Reviews**, v. 37, n. 1, p. 123-150, 2008.
- 6 MEYER, N. MIT researcher's new warning: at today's rate, half of all US children will be autistic by 2025. Retrieved January, v. 3, p. 2015, 2014
- 7 PERRY, D. **A Movement has begun to change the way we grow our food**. 2017. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2017/06/how-consumer-demand-and-new-technologies-will-drive-sustainable-agriculture/>. Acesso em: 30 ago. 2019
- 8 **ANVISA proíbe lote de peito de frango em todo país por risco de meningite**. 2018 Disponível em: <https://exame.abril.com.br/negocios/anvisa-proibe-lote-de-peito-de-frango-em-todo-pais-por-risco-de-meningite/>. Acesso em: 23 jan. 2020.
- 9 INGELFINGER, J. R. Melamine and the global implications of food contamination. **New England Journal of Medicine**, v. 359, n. 26, p. 2745-2748, 2008.
- 10 OGUMA, K.; KITA, R.; TAKIZAWA, S. Effects of arrangement of UV light-emitting diodes on the inactivation efficiency of microorganisms in water. **Photochemistry and Photobiology**, v. 92, n. 2, p. 314-317, 2016
- 11 WANG, G-S.; HSIEH, S-T.; HONG, C-S. Destruction of humic acid in water by UV light—catalyzed oxidation with hydrogen peroxide. **Water Research**, v. 34, n. 15, p. 3882-3887, 2000.
- 12 GLAZE, W. H.; KANG, J-W.; CHAPIN, D. H. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. **Ozone**, v. 9, n. 4, p. 335, 1987.
- 13 OLLER, I.; MALATO, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination—a review. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 20, p. 4141-4166, 2011
- 14 GUERRERO-BELTRN, J. A.; BARBOSA-CANOVAS, G. V. Advantages and limitations on processing foods by UV light. **Food Science and Technology International**, v. 10, n. 3, p. 137-147, 2004.

- 15 ANDERSON, J. G. *et al.* Inactivation of food-borne enteropathogenic bacteria and spoilage fungi using pulsed-light. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 28, n. 1, p. 83-88, 2000.
- 16 GOMEZ-LOPEZ, V. M. *et al.* Pulsed light for food decontamination: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 18, n. 9, p. 464-473, 2007.
- 17 PEREIRA, V. J. *et al.* UV degradation kinetics and modeling of pharmaceutical compounds in laboratory grade and surface water via direct and indirect photolysis at 254 nm. **Environmental Science & Technology**, v. 41, n. 5, p. 1682-1688, 2007.
- 18 WHITBY, G. E.; PALMATEER, G. The effect of UV transmission, suspended solids and photoreactivation on microorganisms in wastewater treated with UV light. **Water Science and Technology**, v. 27, n. 3-4, p. 379-386, 1993
- 19 WATTS, R. J. *et al.* Photocatalytic inactivation of coliform bacteria and viruses in secondary wastewater effluent. **Water Research**, v. 29, n. 1, p. 95-100, 1995
- 20 ROBINSON, T. *et al.* Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Bioresource Technology**, v. 77, n. 3, p. 247-255, 2001.
- 21 BILOTTA, P. *et al.* Swine effluent post-treatment by alkaline control and UV radiation combined for water reuse. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, Part 3, p. 1247-1254, 2017.
- 22 LUO, W. *et al.* Comparison of sterilization efficiency of pulsed and continuous UV light using tunable frequency UV system. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 26, p. 220-225, 2014. DOI: 10.1016/j.ifset.2014.10.002.
- 23 DAI, T. *et al.* Ultraviolet C irradiation: an alternative antimicrobial approach to localized infections?. **Expert Review of Anti-Infective Therapy**, v. 10, n. 2, p. 185-195, 2012.
- 24 ZHAORIGETU, S. *et al.* Inhibitory effects of silk protein, sericin on UVB-induced acute damage and tumor promotion by reducing oxidative stress in the skin of hairless mouse. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: biology**, v. 71, n. 1-3, p. 11-17, 2003.
- 25 SELTSAM, A.; MÜLLER, T. H. UVC irradiation for pathogen reduction of platelet concentrates and plasma. **Transfusion Medicine and Hemotherapy**, v. 38, n. 1, p. 43-54, 2011.
- 26 GAYÁN, E.; CONDÓN, S.; ÁLVAREZ, I. Biological aspects in food preservation by ultraviolet light: a review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 1, p. 1-20, 2014.
- 27 SETLOW, R. B. *et al.* Wavelengths effective in induction of malignant melanoma. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 90, n. 14, p. 6666-6670, 1993.
- 28 GAYÁN, E.; CONDÓN, S.; ÁLVAREZ, I. Biological aspects in food preservation by ultraviolet light: a review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 1, p. 1-20, 2014.
- 29 KOUTCHMA, T. Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods. **Food and Bioprocess Technology**, v. 2, n. 2, p. 138-155, 2009.
- 30 KOUTCHMA, T. Challenges of UV light processing of low UVT foods and beverages. **Proceedings of SPIE**, v. 7789, 2010. DOI: 10.1117/12.860259.

- 31 BOYCE, R. P.; HOWARD-FLANDERS, P. Release of ultraviolet light-induced thymine dimers from DNA in *E. coli* K-12. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 51, n. 2, p. 293, 1964.
- 32 WOOD, R. D. *et al.* Human DNA repair genes. **Science**, v. 291, n. 5507, p. 1284-1289, 2001.
- 33 CURTIN, J. A. *et al.* Distinct sets of genetic alterations in melanoma. **New England Journal of Medicine**, v. 353, n. 20, p. 2135-2147, 2005.
- 34 BRASH, D. E. *et al.* A role for sunlight in skin cancer: UV-induced p53 mutations in squamous cell carcinoma. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 88, n. 22, p. 10124-10128, 1991.
- 35 LAKIN, N. D.; JACKSON, S. P. Regulation of p53 in response to DNA damage. **Oncogene**, v. 18, n. 53, p. 7644-7655, 1999.
- 36 SETLOW, R. B. *et al.* Wavelengths effective in induction of malignant melanoma. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 90, n. 14, p. 6666-6670, 1993.
- 37 WEI, H. *et al.* DNA structural integrity and base composition affect ultraviolet light-induced oxidative DNA damage. **Biochemistry**, v. 37, n. 18, p. 6485-6490, 1998.
- 38 MURPHY, M. P. How mitochondria produce reactive oxygen species. **Biochemical Journal**, v. 417, n. 1, p. 1-13, 2009.
- 39 SABHARWAL, S. S.; SCHUMACKER, P. T. Mitochondrial ROS in cancer: initiators, amplifiers or an Achilles' heel?. **Nature Reviews Cancer**, v. 14, n. 11, p. 709-721, 2014.
- 40 FÉRAUD, G. *et al.* Excited states of proton-bound DNA/RNA base homodimers: pyrimidines. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 119, n. 6, p. 2219-2228, 2015.
- 41 STOJANOVIĆ, L. *et al.* New insights into the state trapping of UV-excited thymine. **Molecules**, v. 21, n. 11, p. 1603, 2016.
- 42 BANYASZ, A. *et al.* Electronic excited states responsible for dimer formation upon UV absorption directly by thymine strands: joint experimental and theoretical study. **Journal of the American Chemical Society**, v. 134, n. 36, p. 14834-14845, 2012.
- 43 RAMAZANOV, R. R.; MAKSIMOV, D. A.; KONONOV, A. I. Noncanonical stacking geometries of nucleobases as a preferred target for solar radiation. **Journal of the American Chemical Society**, v. 137, n. 36, p. 11656-11665, 2015.
- 44 CANNISTRARO, V. J. *et al.* Rapid deamination of cyclobutane pyrimidine dimer photoproducts at TCG sites in a translationally and rotationally positioned nucleosome in vivo. **Journal of Biological Chemistry**, v. 290, n. 44, p. 26597-26609, 2015.
- 45 YOKOYAMA, H.; MIZUTANI, R. Structural biology of DNA (6-4) photoproducts formed by ultraviolet radiation and interactions with their binding proteins. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 15, n. 11, p. 20321-20338, 2014.
- 46 SINHA, R. P.; HÄDER, D-P. UV-induced DNA damage and repair: a review. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 1, n. 4, p. 225-236, 2002.
- 47 GIUSSANI, A. *et al.* Photoinduced formation mechanism of the thymine–thymine (6–4) adduct. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 117, n. 7, p. 1999-2004, 2013.

- 48 RAINA, S.; MISSIAKAS, D. Making and breaking disulfide bonds. **Annual Review of Microbiology**, v. 51, n. 1, p. 179-202, 1997.
- 49 SMITH, K. C.; APLIN, R. T. A mixed photoproduct of uracil and cysteine (5-S-cysteine-6-hydrouracil). a possible model for the in vivo cross-linking of deoxyribonucleic acid and protein by ultraviolet light. **Biochemistry**, v. 5, n. 6, p. 2125-2130, 1966.
- 50 BARKER, S.; WEINFELD, M.; MURRAY, D. DNA–protein crosslinks: their induction, repair, and biological consequences. **Mutation Research/Reviews in Mutation Research**, v. 589, n. 2, p. 111-135, 2005.
- 51 SUN, G. *et al.* DNA– protein cross-linking: Model systems for pyrimidine– aromatic amino acid cross-linking. **Organic Letters**, v. 8, n. 4, p. 681-683, 2006.
- 52 RAINA, S.; MISSIAKAS, D. Making and breaking disulfide bonds. **Annual Review of Microbiology**, v. 51, n. 1, p. 179-202, 1997.
- 53 CORREIA, M. *et al.* Photophysics, photochemistry and energetics of UV light induced disulphide bridge disruption in apo- α -lactalbumin. **Journal of Fluorescence**, v. 22, n. 1, p. 323-337, 2012.
- 54 THORNTON, J. M. Disulphide bridges in globular proteins. **Journal of Molecular Biology**, v. 151, n. 2, p. 261-287, 1981.
- 55 DAGGETT, V. Molecular dynamics simulations of the protein unfolding/folding reaction. **Accounts of Chemical Research**, v. 35, n. 6, p. 422-429, 2002.
- 56 KRISKO, A.; RADMAN, M. Protein damage and death by radiation in *Escherichia coli* and *Deinococcus radiodurans*. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 32, p. 14373-14377, 2010.
- 57 CALAWAY, M. J. *et al.* **Decontamination of Genesis array materials by UV ozone cleaning.** 2007. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070003746/downloads/20070003746.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2020.
- 58 DAVIES, M. J. Singlet oxygen-mediated damage to proteins and its consequences. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v. 305, n. 3, p. 761-770, 2003.
- 59 ZHAORIGETU, S. *et al.* Inhibitory effects of silk protein, sericin on UVB-induced acute damage and tumor promotion by reducing oxidative stress in the skin of hairless mouse. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: biology**, v. 71, n. 1-3, p. 11-17, 2003.
- 60 MANNING, G. S. The molecular theory of polyelectrolyte solutions with applications to the electrostatic properties of polynucleotides. **Quarterly Reviews of Biophysics**, v. 11, n. 2, p. 179-246, 1978.
- 61 KEYSER, M. *et al.* Ultraviolet radiation as a non-thermal treatment for the inactivation of microorganisms in fruit juice. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 9, n. 3, p. 348-354, 2008.
- 62 HARRIS, R. F. Effect of water potential on microbial growth and activity. **Water Potential Relations in Soil Microbiology**, v. 9, p. 23-95, 1981.
- 63 KOOP, T. *et al.* Water activity as the determinant for homogeneous ice nucleation in aqueous solutions. **Nature**, v. 406, n. 6796, p. 611-614, 2000.

- 64 FDA. **Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies**. 2000. Disponível em: <https://www.fda.gov/files/food/published/Kinetics-of-Microbial-Inactivation-for-Alternative-Food-Processing-Technologies.pdf>. Acesso em 23 jan. 2020.
- 65 YE, Z. **UV disinfection between concentric cylinders**. 2007. Ph D. Thesis (Doctor) - Georgia Institute of Technology, Georgia, 2007.
- 66 KOUTCHMA, T. Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods. **Food and Bioprocess Technology**, v. 2, n. 2, p. 138-155, 2009.
- 67 BIRD, R. B. Transport phenomena. **Applied Mechanics Reviews**, v. 55, n. 1, p. R1-R4, 2002.
- 68 MATHIEU, J.; SCOTT, J. **An introduction to turbulent flow**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- 69 LÓPEZ, M. A. *et al.* Ultraviolet light and food preservation. *In*: BARBOSA-CANOVAS, G. V.; TAPIA, M. S.; CANO, M. P. (ed.). **Novel food processing technologies**. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- 70 MOR-MUR, M.; YUSTE, J. Microbiological 3. **Introduction to Food Engineering**, p. 47, 2001.
- 71 CAPPELLI, D.; MANSOUR, N. N. Performance of Reynolds averaged Navier-Stokes models in predicting separated flows: study of the hump flow model problem. 2013. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20130001741/downloads/20130001741.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.
- 72 MIKELLIDES, I. G. *et al.* The viscous fluid mechanical particle Barrier for the prevention of sample contamination on the Mars 2020 mission. **Planetary and Space Science**, v. 142, p. 53-68, 2017. DOI: 10.1016/j.pss.2017.05.002.
- 73 FOUST, A. S. **Principles of unit operations**. New York: John Wiley & Sons, 1960.
- 74 IWAN, W. D.; BLEVINS, R. D. A model for vortex induced oscillation of structures. **Journal of Applied Physics**, v. 41, n. 3, p. 581, 1974.
- 75 KOLMOGOROV, A. N. Equations of turbulent motion in an incompressible fluid. **Doklady Akademii Nauk SSSR**, v. 30, n. 4, p. 299-303, 1941
- 76 FRISCH, U.; KOLMOGOROV, A. N. **Turbulence: the legacy of AN Kolmogorov**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- 77 GALASSO, M. *et al.* Inactivating hepatitis C virus in donor lungs using light therapies during normothermic ex vivo lung perfusion. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2019.
- 78 CYPEL, M. *et al.* Prevention of viral transmission during lung transplantation with hepatitis C-viraemic donors: an open-label, single-centre, pilot trial. **Lancet Respiratory Medicine**, v. 8, n. 2, p. 192-201, 2020

ANEXO A - Pedido de patente do reator perimetral.

04/01/2018 870180000834
16:11

3158861706629427

**Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de
Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT**

Número do Processo: BR 10 2018 000208 2

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 63025530000104

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Órgão Público

Endereço: Rua da Reitoria, 374 - Butantã

Cidade: São Paulo

Estado: SP

CEP: 05508220

País: Brasil

Telefone: (11) 3091.4474

Fax:

Email: pidireto@usp.br

ANEXO B - Carta de aceite para apresentação em um congresso internacional no país Índia.

Dear Ms. Bruno Pereira de Oliveira (Abstract # 17)

Greetings from IUFOST World Congress of Food Science and Technology, Mumbai, India 2018 !

We from IUFOST Mumbai World Congress Secretariat, thank you for submitting an Oral Presentation abstract for consideration by the Scientific Committee.

Your abstract was received along with a large number of other oral abstracts. The Scientific Review Committee has carefully looked at the theme of the Congress and the comparative abstracts in the same subject from different countries as well as relative to the Scientific Sessions that are listed. The Committee has now recommended your abstract for the Oral Presentation Session. Therefore it is important that you now proceed to register following the Registration pathway to make use of the highly affordable Early Bird tariff that is currently offered up to May 15, 2018. Kindly ensure that you pick the right category of country you belong if you are an International Participant to such as low income, high income etc., to get the right lowest rate in the enclosed Registration Proforma and immediately Register.

At the same time, I also invite you to look at the Pre-Conference Workshop list and Register to one of the Workshops of your choice at a marginal cost as indicated in the proforma which will be highly beneficial to your scientific career.

We therefore, look forward to hearing from you at the earliest, with your registration details, to send you further updates regarding your participation as Oral presenter in the congress in the Scientific Session for a 10 minutes Presentation with 3 minutes of Q&A.

In case there are multiple authors for your abstract, please encourage them to also register & attend the congress as individual delegates.

I might indicate to you that there are a number of awards that the Event Manager / Organizers have initiated for recognizing the Young talent in Oral Presentations in all the subject areas amounting to 10 Nos. Please ensure the quality of Science and Presentation that will make you one in that 10 is our wish. The Best of Luck !

You may fill in the attached registration form and fax the Registration details (Fax: +91-22-2437 9882) or also send your Demand Draft or Pay Order or by Bank Transfer or Credit Card by courier to the following address or send a scanned copy of registration and payment details to the email address secretariat@iufost2018.com with a copy to talks@iufost2018.com whichever mode is convenient to you, but ensure you are registered before May 15, 2018 for Early Bird Offer.

Warm Regards,

Gwyneth Alphonso
Director Conferences
19th IUFOST World Congress 2018 India Secretariat

Event Secretariat

MM Active Science & Technology Communications: 133, Kalandas Udyog Bhavan, Gabasaheb Wadalkar Marg, Near Century Bazaar, Prabhadevi, Mumbai - 400 025, India.
Tel. : +91- 22-2438 5007/8/9 | Fax : +91-22-24379682 | Email: secretariat@iufost2018.com

www.iufost2018.com

ANEXO C - Artigo publicado

American Journal of Applied Chemistry

2019; 7(6): 161-167

<http://www.sciencepublishinggroup.com/ajac>

doi: 10.11648/ajac.20190706.12

ISSN: 2330-8755 (Print); ISSN: 2330-8745 (Online)

Perimetric Distributed UV Reactor and Its Validation and the Decontamination of Fresh Broccolis

Bruno Pereira de Oliveira*, Shirlei Lara, Daniel Chianfrone, Kate Cristina Blanco, Vanderlei Salvador Bagnato

São Carlos Institute of Physics, University of São Paulo, São Carlos, Brazil

Email address:

PereiraBruno1@gmail.com (B. P. de Oliveira), vander@ibsc.usp.br (V. S. Bagnato)

*Corresponding author

To cite this article:

Bruno Pereira de Oliveira, Shirlei Lara, Daniel Chianfrone, Kate Cristina Blanco, Vanderlei Salvador Bagnato. Perimetric Distributed UV Reactor and Its Validation and the Decontamination of Fresh Broccolis. *American Journal of Applied Chemistry*. Vol. 7, No. 6, 2019, pp. 161-167. doi: 10.11648/ajac.20190706.12

Received: October 16, 2019; Accepted: November 25, 2019; Published: December 2, 2019

Abstract: The ultraviolet (UV) irradiation as a non-thermal processing technique for microbial decontamination of food (MDF) has been the gainer in many variations after the inclusion of UV light as an alternative for MDF by the US FDA. However the lasts years increase the application of the UV light in food, water and pharmaceutical utilization. In this report, we describe a new type of reactor, where the UV emitters are parametrically distributed for decontaminating fresh broccolis. We described the constructed reactor and its characterization with the validation of the system with controlled contaminated broccolis. The overall liquid was contaminated with 10^6 UFC/mL *E. coli* operating with a flow rate of 80 L/min in 30 L and six lamps in the reactor and the collection of samples in intervals of 25 min. The *E. coli* used in this experiment was eliminated in 99,99% The intensity of UVC light distributed in the internal part of the reactor is practically homogeneous due to the developed geometry. The kinetics of microbial death presented no great influence on this variation. That is, any volume of water contained in the process can be decontaminated. A relation between UV and the flow rate was established. The system demonstrated its capacity in inactivating the microorganism.

Keywords: Reactor, Foods, Innovation, Decontamination

1. Introduction

The use of ultraviolet (UV) radiation as a non-thermal processing technique for microbial decontamination of food (MDF) has been the gainer in many variations after the inclusion of UV light as an alternative for MDF by the US FDA. It turns out that directly use of UV light on the food is not always delivered due to geometry prevent light to reach all necessary parts or UV light incident on pigmented molecules may cause photobleaching with color modification [1].

For the in nature food like fresh vegetables and others, the thermal inactivation of microorganisms is not always the best choice for decontamination. Food washing with acidic water is the most employed alternative. In that case, vast amounts of water are necessary to reach the recommended reduction of the pathogens quantity is either economic environmental problem when the acid water is discharged [2-4].

An attractive alternative for this situation is the use of closed circuit water circulation with a stage of microbial inactivation using an efficient UV reactor. The water may remove the microorganisms that are inactivated followed by the return of the water to the circuit. That solution has many advantages: the volume used water is considerable decreased and the use of acid considerable reduced; in addition, the return of water to the environment causes no damage or needs a previous to discharge processing. For that to work, efficient UV reactor, dealing with charge water volume is necessary [2, 5, 6].

In this report, we describe a new type of reactor, where the UV emitters are parametrically distributed for decontaminating fresh broccolis. The decontamination of fresh broccolis, without thermal or high acid solution, is a challenge due to the complex geometry of the target for decontamination. If a technique to show high efficiency in decontaminating broccolis, can be possibly employed in many

ANEXO D - Convite Congresso 20º IUFOST 20

05/01/2020

Gmail - Abstract Submission Reviewed - IUFOST 20th World Congress of Food Science and Technology

Bruno Pereira <pereirabrunno1@gmail.com>

Abstract Submission Reviewed - IUFOST 20th World Congress of Food Science and Technology

IUFOST 20th World Congress of Food Science and Technology

11 de dezembro de 2019

<enquiries@iufost2020.com>

21:58

Responder a: IUFOST 20th World Congress of Food Science and Technology <enquiries@iufost2020.com>

Para: Bruno Oliveira <pereirabrunno1@gmail.com>

Dear Bruno,

Thank you for submitting the abstract detailed below to be considered for the IUFOST 20th World Congress.

We received an overwhelming response and after considering all the abstracts, we are happy to offer you a poster presentation.

Please confirm acceptance of our offer by 31st January 2020 [here](#).

Abstract Submission(s)

Title	Kinetics law of the lixiviation the broccoli in the closed-loop for photochemistry decontamination
Paper Number	188
Session Submission Status	Oral - Declined - Accepted as Poster
Proposed Sub Sessions	S45. Emerging Technologies: From Academic Research to Industrial Adaptation
IUFOST2020 Abstract Template	IUFOST2020-certo.docx

REGISTER & BOOK ACCOMMODATION TODAY

Speaker registrations are now open for the IUFOST 20th World Congress of Food Science and Technology. [Click here to register now!](#)

Don't miss out on the earlybird benefits available, particularly the accommodation in Auckland as this will book out early. To book accommodation directly with the hotels, view the hotels and rates [here](#).

FURTHER ENQUIRIES