

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA**  
**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**JULIENE MEDEIROS DE MARCO**

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DE PARACETAMOL UTILIZANDO**  
**FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA EM *FALLING FILM REACTOR***

MANAUS

2021

**JULIENE MEDEIROS DE MARCO**

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DE PARACETAMOL UTILIZANDO  
FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA EM *FALLING FILM REACTOR***

**Monografia apresentada ao Curso de Graduação  
em Engenharia Química da Escola Superior de  
Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas,  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química.**

**Orientador: Prof. Dr. Clairon Lima Pinheiro**

**MANAUS**

**2021**

### **Ficha Catalográfica**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

J94t Marco, Juliene Medeiros De  
Tratamento de efluente de paracetamol utilizando fotocatalise heterogenea em falling film reactor / Juliene Medeiros De Marco. Manaus : [s.n], 2021.  
60 f.: color.; 29 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Química -  
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2021.  
Inclui bibliografia  
Orientador: Clairon Lima Pinheiro  
Coorientador: Bayardo Dupotei Ribas

1. Fotocatálise. 2. POA. 3. Paracetamol. I. Clairon Lima Pinheiro (Orient.). II. Bayardo Dupotei Ribas (Coorient.). III. Universidade do Estado do Amazonas. IV. Tratamento de efluente de paracetamol utilizando fotocatalise heterogenea em falling film reactor

**Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463**

JULIENE MEDEIROS DE MARCO

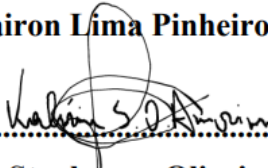
TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FÁRMACO UTILIZANDO POA EM  
*FALLING FILM REACTOR*

Monografia de Conclusão de Curso para obtenção do título de Engenheiro, Habilitação em  
Engenharia Química – Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do  
Amazonas

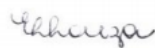
**Banca Examinadora:**



Prof. Dr. Clairon Lima Pinheiro – Orientador



Msc. Valéria Stephanny Oliveira Amorim – UNICAMP



Profa. Dra. Érica Simplício de Souza – UEA

**Conceito: APROVADO.**

Manaus, 23 de Julho de 2021.

*“Cada pessoa deve trabalhar para seu aperfeiçoamento e ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda humanidade”*

*Marie Curie*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus familiares, que sempre me suportaram (em todos os sentidos possíveis) ao longo desta faculdade, me guiaram por todo caminho e me indicaram sempre o melhor caminho a se seguir. Aos meus pais, Jeane e Jorge, sem vocês eu não seria nada. Um especial obrigada ao meu pai, por chegar do trabalho tarde da noite, e ainda assim ter tido paciência de me orientar e ajudar a montar a estrutura física do experimento, lixando, pintando, colando e dando vida ao que se tornou este trabalho, sempre com muito carinho e uma dica valiosa para melhorar ainda mais o desempenho do que estávamos concluído. Um agradecimento também ao meu irmão Lucas, minha avó Iracema e Bruno, meu namorado, que sempre me ajudaram, seja com uma palavra de encorajamento, caronas de carro até a EST ou companhia nas longas horas de escrita.

Agradeço também ao Congresso Brasileiro de Engenharia Química, que me abriu os olhos em 2018 para o mundo de possibilidades que a Engenharia Química poderia oferecer, em sua gama diversa de atuações, dentro e fora do Brasil, mostrando que ciência sempre é o caminho para evolução da humanidade. Em especial ao PhD. Vitor Villar, que tive o prazer de prestigiar à diversas palestras neste referido evento e cujos trabalhos serviram de grande inspiração para os estudos realizados neste TCC, e com quem tive o prazer de também conhecer e conversar durante o Congresso.

Por fim, obrigada ao meu orientador Prof. Dr. Clairon Lima Pinheiro, que coincidentemente trabalhava na mesma área de interesse, e de primeira vista “comprou” a ideia, mesmo que desafiadora, sempre fornecendo ideias construtivas e guiando o futuro deste trabalho. Grata também ao professor Bayardo Ribas, que iniciou o trabalho como co-orientador, mas precisou regressar à Cuba, sendo também um professor incrível. Obrigada à Sara Loiola, que me acompanhou e deu suporte essencial para o andamento das análises nos laboratórios da EST. Grata à todos os colegas de turma que conheci, que me ajudaram a construir o meu caminho e evolução ao longo destes anos na universidade.

## RESUMO

O consumo excessivo de fármacos é um problema que tem se tornado cada vez mais comum, principalmente em grandes centros urbanos. Além de um caso de saúde pública, devido ao consumo excessivo de medicamentos e desenvolvimento de superbactérias, existem também os danos ambientais decorrentes destes acontecimentos, causando bioacumulação em vários seres vivos, visto que os métodos tradicionais de tratamento de efluentes não são específicos para remoção destes tipos de compostos. Além disso, há a falta de fiscalização para que sejam cumpridas as legislações ambientais. Ao fim, estes medicamentos acabam sendo ingeridos pelas pessoas ainda que a água seja submetida à uma gama de tratamentos físicos e químicos, mas que não os removem do recurso fornecido. Dentro deste conceito, o paracetamol é um dos fármacos mais presentes após a água ser passada por tratamento. Já existem métodos não convencionais para o tratamento, principalmente utilizando lâmpadas ultravioleta e componentes de reação como dióxido de titânio e peróxido de hidrogênio para promover a degradação dos fármacos presentes na água, mas poucos são aqueles utilizando luz solar para ativação da reação, além de tratar volumes relativamente pequenos. Os estudos do presente trabalho feitos a partir da construção de um reator de *Falling Film Reactor* (FFR), ou reator de filme em queda. Foram avaliados aspectos como inclinação da chapa metálica (0 até 50°) e vazão (máxima e mínima) do efluente, tempo de batelada para reação, além da capacidade de tratamento (em litros), realizando bateladas em triplicata em inclinações definidas após testes (10°, 20° e 30°), e todos na vazão máxima, a única que possibilitou a formação de filme. A chapa foi pintada com tinta branca e dióxido de titânio em pó, para melhorar o contato entre a chapa metálica construída e o efluente estudado. Todas as soluções-mãe foram preparadas com paracetamol e água destilada, sem necessidade de regulação do pH no presente de estudo. A maior degradação de fármaco encontrada foi de 17,97% na inclinação de 30°, diferentemente do que foi pensado inicialmente, onde se supunha que a menor inclinação geraria uma degradação maior de paracetamol devido à velocidade de passagem na chapa. No entanto, uma maior inclinação possibilitou mais passagens do efluente na chapa devido à possibilidade de maior exposição à luz solar. A partir dos resultados obtidos, foi possível comprovar que o método escolhido possui eficiência comparável à estudos semelhantes da literatura, sendo necessária a realização de adaptações para melhorias no sistema e aumento de eficiência.

## ABSTRACT

The excessive consumption of several drugs is becoming day by day more common, especially in large urban centers. Besides being a matter of public health, due to the major and unrestrained use of pills, medicines and drugs, leading to the development of super bacteria. We also have the occurrence of environmental damages, such as bioaccumulation in aquatic live beings, the non-existence of quaternary sewage treatment and the lack of environmental laws for this type of pollution. At the end, these compounds are ingested by people even after the water treatment, which also doesn't remove them properly. Inside this concept, the Paracetamol is one of the major drugs present even after the water treatment. There are methods that already exist, such as using ultraviolet light and hydrogen peroxide to promote the drug degradation, but few of those use the solar light to activate the reaction and don't treat large volumes. The present study was developed from the construction of a *Falling Film Reactor* (FFR), which had a range of inclination's angles (0° to 50°). The objective was to evaluate the aspects of inclination, flow rate (minimum and maximum), time reaction batch, besides the capacity of treatment (in liters), executing the batches in triplicate on 3 inclination's angles (10°, 20° e 30°), all in maximum flow rate. The plate where the reaction occurred was painted with white wall ink and titanium dioxide, to improve the contact between the plate and the solution and promote better chemical reaction. All main solutions were made using distilled water, no need to regulate pH. The major degradation encountered was 17,97% at the angle of 30°, in contrast to what was thought initially, that the lower angle (10°) would generate more degradation due to the velocity of the flow in the plate. The higher angle enabled the solution to pass through the plate several times, improving the results. From the results generated, it was able to prove the efficiency comparable to the literature, being possible the development of improvements and increase the drug degradation on the system built.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da água no planeta.....	16
Figura 2- Possíveis rotas dos fármacos no meio ambiente.....	25
Figura 3 - Esquematização dos processos de foto excitação dos elétrons de TiO <sub>2</sub> .....	29
Figura 4 - Desenho estrutural do Reator de Calha Parabólica (PTC).....	30
Figura 5 - Geometria básica do Reator tipo CPC .....	31
Figura 6 – Esquema básico do Reator Fotocatalítico de Cascata de Película Fina .....	32
Figura 7 - Desenho do Reator de Filme em Queda (FFR).....	32
Figura 8 - Fluxograma/Diagrama de blocos de um FFR .....	34
Figura 9 - escoamento de um filme líquido em um plano inclinado.....	40
Figura 10 – Esquema de escoamento do filme de um reator com Reciclo.....	42
Figura 11 - Esquema (Frontal e lateral, respectivamente) em AutoCad com cotas.....	36
Figura 12 - Aplicativo utilizado para medir inclinação da chapa metálica .....	36
Figura 13 - Chapa de madeira utilizada para uniformizar o fluxo.....	37
Figura 14 - Reator construído e apto para uso .....	39

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Destinação e disposição de resíduos sólidos no planeta.....	19
Tabela 2 - Principais classificações dos micropoluentes existentes .....	26
Tabela 3- Potenciais de oxidação dos radicais aplicados em POA .....	27
Tabela 4- Classificações dos Processos Oxidativos Avançados.....	28
Tabela 5 - Listagem de materiais de PVC utilizados na montagem do reator.....	35
Tabela 6 - Especificações da tinta conforme fabricante .....	38
Tabela 7 - Tabela com dados de experimento inicial .....	43
Tabela 8 - Listagem de condições dos experimentos realizados .....	46
Tabela 9 - Resultados de absorvância medidos nas amostras.....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$F'_{A0}$	Corrente de alimentação do reciclo
$F_{A0}$	Corrente de alimentação nova
$h^+$	Gap do Elétron
$C_{A0}$	Concentração da alimentação nova
$C_{A1}$	Concentração da solução nova + reciclo
$H_2O$	Água
$V_x$	Velocidade na direção X
$V_y$	Velocidade na direção Y
$V_z$	Velocidade na direção Z
$X_{A0}$	Fração molar na alimentação nova
$X_{A1}$	Fração molar na alimentação nova + reciclo
$e^-$	Elétron
$t_i$	Tempo da amostra
$t_m$	Tempo médio de residência
$\sigma^2$	Desvio Padrão
$\Delta t_i$	Intervalo entre amostras
•OH	Hidroxila
ANA	Agência Nacional de Águas
BC	Banda de Condução
BV	Banda de Valência
Cl <sub>2</sub>	Cloro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP	Conferência das Partes
CPC	Reator Coletor Parabólico Composto
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DDT	Diclorodifenilcloroetano
DTR	Determinação do Tempo de Residência
E(t)	Densidade (de probabilidade) de tempos de residência
FECOMERCIO	Federação do Comércio
FFR	Reator de Filme em Queda
H	Hidrogênio

$H_2O_2$	Peróxido de Hidrogênio
HCB	Hexaclorobenzeno
HCH	Hexaclorociclohexano
$HO_2\cdot$	Peridroxil
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
O	Oxigênio
$O_2$	Oxigênio
$O_2^-$	Supeóxido
$O_3$	Ozônio
ONU	Organização das Nações Unidas
PCB	Pentaclorobenzeno
POA	Processos Oxidativos Avançados
POP	Poluentes Orgânicos Persistentes
PTC	Reator de Calha Parabólica
PVC	Policloreto de Vinila
$TiO_2$	Dióxido de Titânio
UNFCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança no Clima
UV	Ultravioleta
$P$	Pressão
$R$	Corrente de Reciclo
$R\cdot$	Radical
$V$	Volume
$g$	Gravidade
$sen$	Seno
$\delta$	Espessura da película de filme
$\theta$	Ângulo
$\mu$	Viscosidade do fluido
$\rho$	Densidade do fluido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1	ÁGUA NO BRASIL E NO MUNDO .....	16
2.2	POLUIÇÃO DAS ÁGUAS .....	17
2.3	DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS (DOMÉSTICOS E INDUSTRIAIS) .....	19
2.4	PARÂMETROS DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES .....	21
2.5	NÍVEIS DE TRATAMENTO .....	21
2.6	TRATAMENTOS TERCIÁRIOS .....	22
2.7	MICROPOLUENTES .....	23
2.8	PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POA) .....	26
2.9	FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA .....	28
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
3.1	EQUAÇÕES DO REGIME DE FLUXO .....	34
3.2	EQUAÇÕES DO REATOR DE MISTURA PERFEITA .....	42
3.3	MATERIAIS .....	34
3.4	CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA .....	36
3.5	TESTE DE ESTANQUEIDADE .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.6	DETERMINAÇÃO DO PLANEJAMENTO .....	43
<b>3.6.1</b>	<b>Vazões e Inclinações .....</b>	<b>43</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Volume do Reator .....</b>	<b>44</b>
3.7	EFLUENTE SINTÉTICO .....	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>PERSPECTIVAS .....</b>	<b>53</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>54</b>
	ANEXO A – Parâmetros de Lançamento de Efluentes e Qualidade d’água listados no CONAMA 430/2011 .....	54
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água, apesar de ser considerada como um recurso esgotável, segue um ciclo hídrico bem definido, que envolve os fenômenos sequenciais (LIMA, 2008):

- **Evaporação**, onde a água muda do estado líquido para o gasoso, seja ela proveniente dos rios e mares, ou por evapotranspiração nos vegetais, tornando-se parte da atmosfera;
- **Precipitação**, a umidade acumulada nas nuvens transforma-se em líquido que irá introduzir-se novamente aos continentes e mares;
- **Escoamento**, promovida por áreas de terreno que captam a água, sejam bacias hidrográficas, mares ou vegetação, perdendo uma parte por evaporação, por meio de sua declividade que favorece o processo de escoamento superficial;
- **Acumulação**, quando a água é interceptada por meio da infiltração no solo até os lençóis freáticos, ou a vegetação existente na superfície, além de outras massas de água, onde ocorrerá novamente a evaporação e precipitação, iniciando novamente o ciclo.

A ação antrópica, caracterizada pelo crescimento dos grandes centros urbanos e o aumento substancial das quantidades de água necessária para abastecê-los, vem intimamente ligada ao crescimento da demanda hídrica, novos processos, tecnologias industriais e modelos de expansão urbana, que causam um forte impacto ao ciclo natural da água descrito anteriormente. (NEWMAN, 2011)

Esta interferência humana tem prejudicado este ciclo de diversas formas: seja pelo manejo inadequado dos recursos hídricos, destinação imprópria de toneladas de resíduos sólidos, efluentes líquidos e micropoluentes na natureza, tornando mais complexo o tratamento e recuperação da água para consumo humano. Gradualmente, os corpos hídricos têm sido comprometidos com formas químicas mais complexas e dificultosas em termos de remoção. À vista disso, têm se realizados altos investimentos em estudos de novos tratamentos de reaproveitamento e potabilidade da água, aplicando os métodos terciários de tratamento de efluentes. (SPERLING, 1996)

São conhecidos como tratamentos terciários aqueles processos removedores de impurezas não eliminadas por meio de tratamento de efluentes convencionais (aeróbicos e anaeróbicos) como lodos ativados, lagoas facultativas, reatores anaeróbios de fluxo ascendente e etc. Sua aplicação

visa muitas vezes a remoção de organismos patogênicos, remoção de partículas tóxicas n em excesso, como Nitrogênio e Fósforo, e a potabilidade da água. (MELLO, 2007)

Desta forma, países de primeiro mundo iniciaram estudos na área de Processos Oxidativos Avançados (POAs), uma metodologia de tratamento emergente e promissora, que visa a degradação de compostos denominados micropoluentes, constituídos na maioria das vezes de compostos orgânicos que podem ser encontrados na água em concentrações na ordem de  $\mu\text{g/L}$  a  $\text{ng/L}$ . Têm como característica serem contaminantes fortemente resistentes a descontaminações e remediações ambientais. Os POAs possuem a vantagem de operarem, com resultados satisfatórios, à pressão e temperatura ambiente, e com simples mecanismos de oxirredução. Todavia, ainda possuem o entrave dos altos custo de implantação, o que inviabiliza muitas vezes a sua replicabilidade em escala industrial. (SATINDER, 2009; BILA; DEZOTTI, 2007)

Pesquisas que buscam baratear as aplicações de POA têm se tornado cada vez mais frequentes. Dentre os recentes achados estão a substituição da lâmpada Ultra Violeta pela incidência de luz solar para promover a chamada fotocatalise heterogênea na presença do catalisador de Dióxido de Titânio, que é fotoativado nos comprimentos de onda da luz UV, extremamente incidente em Manaus nos períodos de verão (dos meses de Junho a Setembro). (FERREIRA, 2014; INPE, 2015)

Assim o objetivo geral do presente trabalho consiste em construir (de forma econômica e viável) um reator de tratamento de efluente de paracetamol com fotocatalise heterogênea em *falling film reactor*. Os objetivos específicos são:

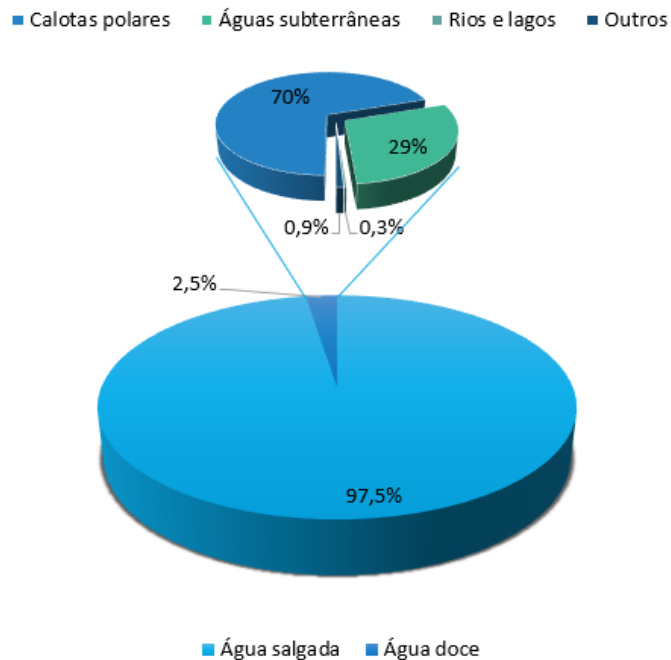
- Promover a montagem de um *falling film reactor* utilizando luz solar;
- Realizar testes de vazão e identificar possíveis falhas hidráulicas;
- Realizar a Determinação do Tempo de Residência com água;
- Promover o teste para remoção do paracetamol com solução produzida em laboratório.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ÁGUA NO BRASIL E NO MUNDO

É de notório conhecimento que a água é um recurso de suma importância para nossa sobrevivência. Apesar de receber o nome “Planeta Água”, a Terra não faz jus à este título quando se trata da disponibilidade e acessibilidade deste recurso na forma própria para consumo: estima-se que cerca de 97,5% da água existente no mundo é salgada, portanto não adequada para o uso direto ou irrigação. Dos 2,5% de água doce disponíveis, 69% encontram-se em difícil acesso (geleiras), cerca de 30% são de fontes subterrâneas e apenas 1% está em rios, lagos e outras formas de captação superficial (ANA, 2019), conforme demonstra Figura 1:

Figura 1 - Distribuição da água no planeta



Fonte: ANA (2019)

O Brasil pode ser considerado um dos países mais abundantes em disponibilidade de água doce no mundo: concentra 12% do total mundial, compartilhando 82 rios com países vizinhos, bacias de tamanho considerável e grandes sistemas de aquíferos, centralizados nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste, e, ainda que haja uma quantidade abundante, esta raramente é fornecida em boa qualidade. Até 2016, a população rural demandava 33,8 m<sup>3</sup>/s para o seu devido sustendo, feito por meio de captações subterrâneas ou cisternas. Já em regiões metropolitanas, são usados

488,3 m<sup>3</sup>/s, o que contabiliza quase 15 vezes mais água que o abastecimento rural, fornecidos usualmente pelas companhias de abastecimento público ou privado. (EBC, 2018; ANA, 2019)

Quando se trata do consumo por habitante no Brasil, o estado de São Paulo possui um consumo de 200 L/hab.dia, paralelo ao consumo europeu, que gira em torno de 140 a 200 L/hab.dia. Já o norte americano encontra-se no topo: 250 L/hab.dia. O consumo por habitante varia em cada país, de acordo com o nível de industrialização e a disponibilidade hídrica. Quanto mais industrializado, maiores serão suas necessidades para uso industrial. (FECOMERCIO, 2015)

O tratamento devido da água, seu manejo de forma igualitária e acesso ao esgotamento sanitário próprio é um dos pontos focais da ONU em seu programa de “Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável”, que engloba países ricos, pobres e emergentes. Segundo o site da Organização das Nações Unidas, todo dia, aproximadamente 1.000 crianças morrem devido a doenças relativas ao consumo de água inapropriada, que poderiam ter sido prevenidas com simples formas de tratamento. (ONU, 2019)

## 2.2 POLUIÇÃO DAS ÁGUAS

Conforme foi dito pela revista VEJA em 2017, a água é o novo petróleo do mundo: sua presença é essencial para movimentar a economia, indústrias e a vida. Desde o começo do século XXI a questão da falta d'água e suas fontes de poluição vêm sendo debatida. A China até o ano de 2010, por exemplo, contava com 70% dos seus rios e lagos poluídos e com mais da metade de suas cidades com problema de abastecimento de água (EXAME, 2010). Somente o rio Yangtzé, o maior rio da Ásia, é responsável sozinho por carrear milhões de toneladas por ano de resíduos plásticos. (ONU, 2018)

Os ecossistemas numa forma geral são capazes de se auto depurar até um determinado limite de carga orgânica, ou seja, restaurar suas características ambientais de forma natural decompondo os poluentes que nele são lançados. A questão da poluição reside quando a quantidade de efluentes que adentra este corpo hídrico passa a ser maior do que a capacidade de degradá-los. (OLIVEIRA; MOLICA, 2017)

As fontes de poluição podem ser de origem pontuais/fixas ou de origem difusa. As fontes fixas se relacionam ao lançamento de um ponto específico de descarga, por exemplo, o esgoto doméstico, efluentes industriais e etc. Já as difusas não são ligadas à um tipo específico, pois abrangem uma ampla área de estudo, recebendo contribuições de numerosos pontos e poluentes

em baixas concentrações. Este tipo exige métodos de análise mais específicos, onde as técnicas de determinação são usualmente mais caras. A drenagem urbana, navegação e resquícios de medicamentos são exemplos disso. Dentre os tipos de poluição fixa mais recorrentes estão: (SILVA; PORTO, 2003)

- Esgoto de Origem Doméstica

Os efluentes domésticos são constituídos por uma grande quantidade de matéria orgânica biodegradável, onde há 99,9% de água e 0,1% de sólidos. Os sólidos por sua vez se subdividem em orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, e os microrganismos. A elevada carga orgânica neste tipo de efluente é responsável por dificultar a solubilização do oxigênio na água e favorecer a proliferação de bactérias maléficas para o corpo receptor. A quantificação de poluentes biodegradáveis pode ser medida a partir do parâmetro da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), indicando o potencial de consumo do oxigênio dissolvido, e é amplamente utilizado para a caracterização do grau de poluição em que o efluente se encontra. (MARA; SILVA, 1979; SPERLING, 1996)

A legislação do CONAMA nº 430/2011, que legisla acerca dos parâmetros de lançamento de águas residuárias, determina que os efluentes com características domésticas define que a “Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias, 20°C): máximo de 120 mg/L, sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor”. (BRASIL, 2011)

- Efluentes Industriais

As indústrias correspondem a 22% do consumo total de água captada. Sua utilização nas fábricas vai desde matéria-prima principal até lavagem de equipamentos, banhos metálicos, refrigeração e mineração. De acordo com um levantamento realizado pela Agência Nacional de Águas em 2017, as indústrias de fabricação de produtos alimentícios, fabricação de bebidas, indústria do papel, derivados de petróleo e combustíveis, produtos químicos e metalurgia correspondem a cerca de 85% da demanda hídrica (vazões de retirada) e cerca de 90% das vazões consumidas pela indústria nacional, dado a estas o termo de “indústrias com maior

hidrointensividade no Brasil”, onde hidrointensividade representa um processo produtivo em que se utiliza, proporcionalmente ao valor adicionado, grande quantidade de água. (ANA, 2017)

Cada indústria é responsável pelas características de seus efluentes de acordo com as matérias primas utilizadas em seu processo produtivo e seu porte. Nas indústrias de cosméticos, por exemplo, merecem destaque os altos valores de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), a presença de alguns íons de metais pesados e compostos ativos dos produtos farmacêuticos (FERRAZ, 2013). Já em indústrias alimentícias (atacadista de frutas e verduras), há uma dificuldade maior de degradação da matéria orgânica, possivelmente devido à quantidade de cloro utilizado na esterelização/lavagem, com características de pH levemente ácidas. (STEIN, 2012)

O reuso dos efluentes industriais já ocorre em diversos lugares, utilizando-os em sistemas de aquecimento de caldeiras, lavagem de máquinas, resfriamento e água em processos sanitários, de forma a contribuir para a economia e maior equilíbrio dos recursos hídricos utilizados. (FERRAZ, 2013)

### 2.3 DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS (DOMÉSTICOS E INDUSTRIAIS)

As práticas mal realizadas da gestão de resíduos sólidos resultam na contaminação de águas, tanto superficiais quanto subterrâneas. De acordo com um levantamento feito pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), realizado em 2014, a destinação de resíduos sólidos no ambiente se dispõe conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Destinação e disposição de resíduos sólidos no planeta

<b>Disposição de resíduos sólidos no planeta: Locais, Quantidades e Porcentagem Equivalente</b>		
<b>Local de Disposição</b>	<b>Quantidade (em Milhões de toneladas)</b>	<b>% Equivalente</b>
Aterros Controlados ou lixões	800.000.000	53
Reciclagem	300.000.000	20
Recuperação Energética	200.000.000	13
Aterros Sanitários	200.000.000	13

Fonte: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (2014)

A matéria orgânica disposta em aterros sofre dois processos principais: a produção de biogás e de chorume. Em ausência de oxigênio, os resíduos sofrem a decomposição por microrganismos anaeróbios que realizam a produção de biogás (50% a 70% de metano), que pode

ser canalizado e utilizado para outros fins (SEEG, 2018). Com o passar dos anos, esta produção vai diminuindo gradativamente. Já o chorume, líquido de coloração escura e altamente tóxico, oferece um risco muito maior devido à carga de metais pesados e contaminação bacteriológica. Caso ocorra escoamento para corpos hídricos ou infiltração no solo, o risco de contaminação é altíssimo. (COSTA, 2004)

A poluição por cargas difusas não era amplamente conhecida até a década de 60. Desta forma, todos os esforços, até então, estavam concentrados em controlar os poluentes oriundos das cargas pontuais, até porque seus danos traziam mais efeitos visuais. São usualmente associadas ao uso do solo, e morfologia da bacia de drenagem. Apesar disto, atualmente as cargas difusas são responsáveis por 50% das cargas totais despejadas nos corpos hídricos sem tratamento, destacando-se os principais: sedimentos, poluentes minerais, nutrientes, pesticidas, poluentes biodegradáveis etc. (LIMA; RIEIRO; BARBOSA, 2016):

- Nutrientes de Fósforo e Nitrogênio: Os nutrientes de fósforo e nitrogênio são conhecidos como os compostos de fator limitante para o avanço da eutrofização (SILVA, 2013). Ambos são provenientes da adubação de extensos hectares de terra em zonas rurais, onde estima-se que somente 15 a 20% são absorvidos pelas plantas. O restante é encaminhado para corpos hídricos e comprometem a qualidade das águas para recreação e utilização para consumo. Seus limites são determinados pelo CONAMA 430/2005. (KLEIN, 2012)
- Pesticidas: A contribuição agrícola é uma das principais fontes de contribuição difusa, principalmente nos Estados Unidos, da poluição dos solos e lençóis freáticos. Os pesticidas ganham um destaque especial, pois sua alta deposição ocorre via infiltração, enchentes ou erosão, carreando os sedimentos para lagos e rios e promovendo a eutrofização (SILVA, 2003). Muitas vezes, há o escoamento deste efluente para a drenagem pluvial, onde não há tratamento devido. Atualmente, não há uma legislação forte que determine os limites de uso e aplicações no solo, dando abertura para utilização de forma desenfreada. (SIGRH, 2014)
- Poluentes biodegradáveis: É caracterizado como um tipo de poluição química. O termo biodegradabilidade não indica que não cause danos ao meio ambiente, mas sim que podem ser degradados pela ação de bactérias e outros microrganismos. Se depositados em quantidades reduzidas nos corpos hídricos, podem ser removidos via

processo de autodepuração, que contempla as etapas de decomposição da matéria orgânica e posteriormente a recuperação do oxigênio dissolvido por meio da reaeração (PEREIRA, 2004). Caso contrário, acarreta a morte do corpo hídrico.

## 2.4 PARÂMETROS DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES

A Resolução nº 430 de 13 de Maio de 2011 dispõe acerca das condições adequadas de lançamento de efluentes de acordo com a classificação do corpo receptor, sendo previamente tratado e dentro dos limites exigidos pela legislação, conforme listado no Apêndice A. Além disso, é necessário realizar estudos acerca da zona de mistura, monitoramento ambiental e padrões de balneabilidade após o lançamento do efluente, de modo a avaliar os impactos causados.

## 2.5 NÍVEIS DE TRATAMENTO

De forma a atender à legislação vigente, foram criados métodos de tratamento de efluentes, conjuntos de operações e processos unitários que são utilizados simultaneamente em uma mesma planta de tratamento, com o objetivo de remover o máximo possível de matéria orgânica do mesmo (SPERLING, 1996). Existe então a classificação de acordo com o nível, que podem ser subdivididos geralmente em (METCALF; EDDY et al., 1991; SPERLING, 1996):

- Tratamento preliminar: Esta etapa visa a remoção de constituintes que possam gerar problemas operacionais caso adentrem o tratamento. Haverá a separação dos sólidos de maior tamanho, conhecidos também como grosseiros, por meio dos processos denominados de caixa de areia (espécie de decantação de sólidos), gradeamento (que pode se subdividir em grosseiro, médio ou fino, de acordo com o espaçamento entre as barras), peneiramento (remoção de sólidos de granulometria superior a 0,25 mm) e caixas de gordura (remoção de quantidades excessivas de óleos e graxas). O efluente é submetido à todas estas etapas para que possa ser tratado devidamente nas fases subsequentes.
- Tratamento primário: Caracteriza-se pela remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica, lançando mão de processos de separação física, sedimentação por equipamentos, aditivo de químicos aglutinadores e floculantes, para que o processo não possua um tempo de retenção muito alto. Os tanques de decantação primária possuem usualmente um formato cônico na base, o que facilita a sedimentação e eventuais limpezas a serem realizadas no sistema.

- Tratamento secundário: Consistido normalmente de um tratamento biológico, que será responsável pela remoção da matéria orgânica biodegradável e os sólidos suspensos remanescentes, a serem consumidos pelos microrganismos nos chamados reatores biológicos (aeróbios ou anaeróbios normalmente aliados em sequência). Juntamente à remoção de matéria orgânica, há também o consumo dos nutrientes como fósforo e nitrogênio. Em algumas plantas de tratamento existem os decantadores secundários, responsáveis por reduzir a suspensão de microrganismos por meio da sedimentação e formação de lodo.
- Tratamentos terciários: Trata de remover os poluentes que não puderam ser retirados no tratamento secundário, como organismos patogênicos, suspensões e poluentes específicos usualmente tóxicos. São tratáveis por processos físico-químicos não usuais, como adsorção por carvão ativado, coagulação, desinfecção, fotocatalise heterogênea e osmose reversa.

## 2.6 TRATAMENTOS TERCIÁRIOS

Os métodos terciários são utilizados para tratamento de água e efluentes em modo geral que, como já citado anteriormente, deseja-se remover poluentes microbiológicos patogênicos e poluentes inorgânicos tóxicos. (OPERSAN, 2015) Dentre os que se destacam estão:

- Adsorção por carvão ativado: Devido à existência de substâncias de difícil tratamento, são utilizados métodos físico-químicos e biológicos avançados para promover a remoção de cor, carbono orgânico total etc. por meio da retenção de partículas orgânicas e produtos químicos. O melhor tratamento ocorre quando os poros de carbono são suficientemente grandes para admitir a adsorção de nutrientes. Sua aplicação é mais direcionada na remoção de metais pesados, toxinas de algas, halometanos e taninos. (LAZO et al., 2014)
- Osmose reversa: O fenômeno de osmose reversa ocorre quando duas soluções de diferentes concentrações são separadas por uma membrana parcialmente permeável que retém sais e componentes nocivos à saúde, onde será retido o soluto e passará o solvente. Ao passar por essa membrana, a água sai purificada. Sua aplicação é intimamente ligada à separação de íons, principalmente em processos de dessalinização e produção de produtos químicos. (JUSTO et. al, 2015)

- Troca iônica: Normalmente aplicada com a utilização de uma resina ou membrana. Quando a solução se encontra em equilíbrio, é possível analisar os íons de solução presentes por coeficientes de seletividade, que irão medir um determinado pH da solução. Quanto maior o coeficiente de seletividade, maior a afinidade com os íons a determinada resina possui. Amplamente aplicada à indústria de mineração na recuperação de metais, potabilização de água e galvanoplastia. (AQUINO, 2009)
- Remoção de microrganismos patogênicos: A forma mais simples de combate aos microrganismos é a aplicação de desinfecção, onde o Cloro age como um forte agente oxidante, responsável também pela remoção da amônia. Pode ser misturado por meio do gás cloro, hipoclorito de cálcio ou hipoclorito de sódio. O tempo de reação é considerado rápido e as condições de pH e temperatura podem ser mantidas constantes facilmente, além da necessidade de pouca área de contato.
- Coagulação Química: A coagulação promove a instabilidade química das ligações entre cargas negativas e positivas por adição de polímeros e sais com metal na água. As cargas hidrolisadas entram em contato e começam a formar partículas em suspensão que posteriormente irão sedimentar devido à diferença de densidade em relação à água. A coagulação está intimamente ligada ao aumento das relações de força de atração entre moléculas, promovendo uma maior aglutinação.
- Oxidação química: São utilizados para tratar compostos orgânicos persistentes, onde se produzem radicais extremamente oxidantes e pouco seletivos, como o radical hidroxila (-OH), que são capazes de mineralizar os contaminantes, gerando como produto a combinação  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ , ou dependendo da substância de reação, compostos orgânicos mais simples (biodegradáveis e não tóxicos). Estes radicais podem ser obtidos por meio de incidências de luz solar, radiação ultravioleta, peróxido de hidrogênio e ozônio. (COLOMBARI; GENENA; LENHARD et al., 2014)

## 2.7 MICROPOLUENTES

Originados tanto de cargas difusas quanto fixas, os micropoluentes têm se tornado um problema recorrente e que tem ganhado destaque nas últimas décadas, principalmente a partir dos

anos 70, quando as ações antrópicas ficaram mais intensas. Os estudos realizados por Hignite e Azarnof (1977), foram os primeiros a detectar níveis alarmantes de concentração de fármacos como clofibrato, etofibrato, ácido clofíbico e metabólito dos antilipêmicos. (STEIN, 2012) Os micropoluentes recebem este nome uma vez que somente são identificados no meio ambiente em concentrações na ordem de  $\mu\text{g/L}$  a  $\text{ng/L}$  que, mesmo quando submetidos ao tratamento usual de esgoto doméstico, atingem um baixíssimo nível de remoção, onde somente 25% dos tratamentos convencionais alcançam a remoção de suas concentrações em níveis superiores a 75%. (DALLAZEN; LENHARD; VETTORELLO et al., 2017; SAB, 2018)

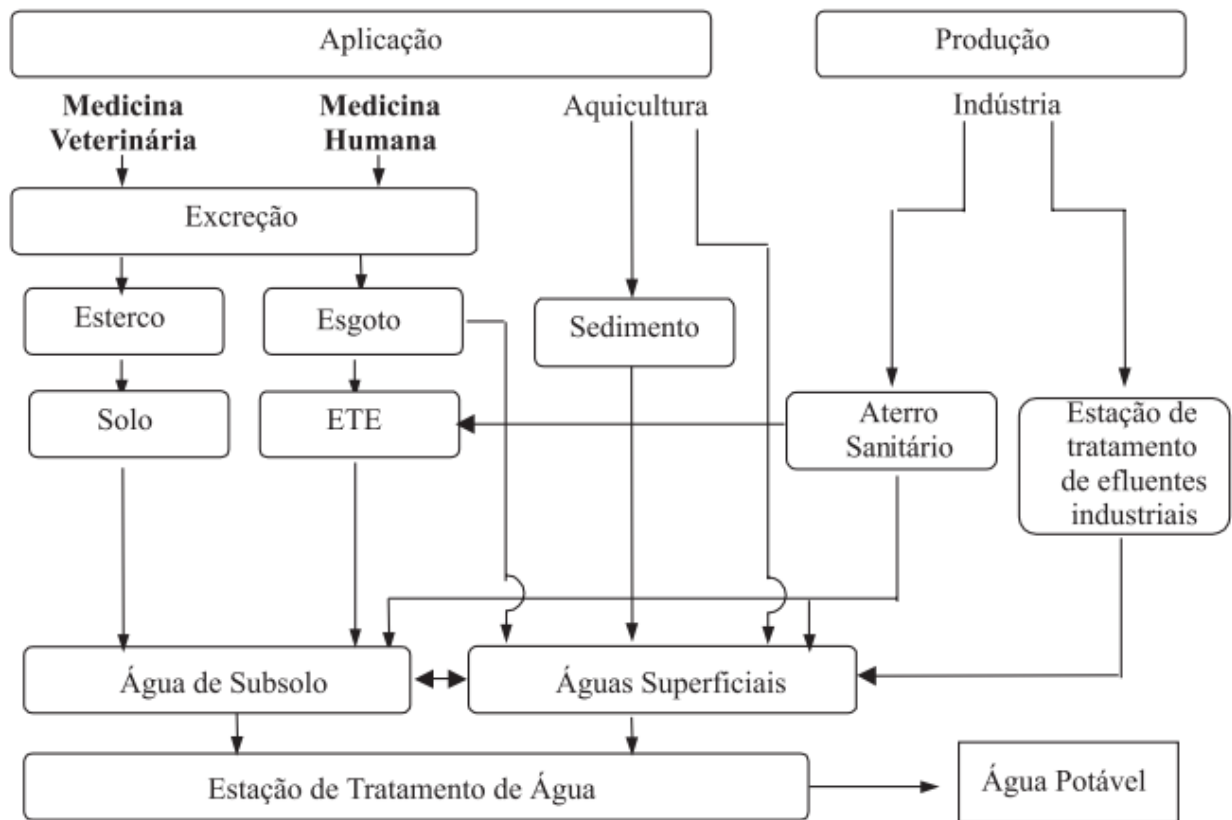
Os micropoluentes possuem duas classificações principais: os Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) e Micropoluentes Emergentes. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, os POPs são substâncias amplamente utilizadas para fins industriais como agrotóxicos, além de possuir alta resistência à degradação. Dentre os utilizados em larga escala, estão os agrotóxicos organoclorados, organofosforados e derivados de triazinas que devido à sua estabilidade química, podem bioacumular em organismos vivos, sendo liberados de forma irregular, devido à falta de conhecimento acerca dos seus impactos ao meio ambiente. (FLORES; RIBEIRO; NEVES, 2004)

Após a ciência dos prejuízos que estes poluentes podem causar aos ecossistemas, foi determinada durante a Convenção de Estocolmo, em maio de 1995, a regulamentação de 12 tipos de POPs de forma a controlar produção, importação, exportação, uso e destinação final. Com o passar dos anos e a realização de vários eventos de Conferência das Partes (COP), o órgão supremo da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança no Clima (UNFCCC), promovendo a Convenção de Estocolmo em 2001, conscientes de que os POPs representam grandes e crescentes ameaças à saúde humana e ao meio ambiente, incluindo aproximadamente mais 15 POPs a serem eliminados até 2017. Os três anexos da Convenção da Conferência classificam-se como: Eliminação, Restrição e Produção não intencional, reunindo agrotóxicos e químicos de uso industrial. (BRASIL, 2019)

Os micropoluentes emergentes atingiram também proporções elevadas nas últimas décadas. São estreitamente ligadas ao surgimento de novas substâncias – também ditas de emergentes – cujos riscos para o meio ambiente e a saúde pública ainda não foram profundamente estudados, mas que são diariamente introduzidas no solo e águas superficiais. Sua origem é contígua ao surgimento de novos medicamentos e compostos farmacêuticos, que são eliminados via fezes e urina, descarte de medicamentos fora da validade por meio da descarga (banheiro), efluentes

oriundos de hospitais e indústrias farmacêuticas (Figura 2). Os fármacos representam um grupo significativo consumido tanto por animais quanto por seres humanos, que ao entrarem em contato com o bioma externo, possuem resistência à degradação, assim como os POPs, e perigosas propriedades bioativas, características de baixa massa molecular que apresentam uma ampla diversidade química e efeitos diversos sobre organismos vivos, sendo associadas às mudanças em seu comportamento, fisiologia ou metabolismo. (EMBRAPA, 2019; FERREIRA, 2014)

Figura 2- Possíveis rotas dos fármacos no meio ambiente



Fonte: FERREIRA (2014)

Apesar de ser um tema em pauta em diversos países da Europa, os estudos envolvendo micropoluentes ainda se encontram rudimentares, devido à complexa identificação nos efluentes e um amplo nicho de substâncias que ainda poderão ser classificadas, além das que atualmente são catalogadas (Tabela 2).

Tabela 2 - Principais classificações dos micropoluentes existentes

<b>Substâncias</b>	<b>Descrição</b>
<b>Agrotóxicos</b>	Agrotóxicos organoclorados: Aldrin, Dieldrin, Endrin, Clordano, Clordecone, Heptacloro, Hexaclorobenzeno (HCB), Alfa Hexaclorociclohexano (alfa HCH), Beta hexaclorociclohexano (beta HCH), Lindano, Mirex (dodecacloro), Pentaclorobenzeno (PeCB), Endossulfam, Toxafeno, Pentaclorofenol e seus sais e ésteres, Diclorodifeniscloroetano (DDT).
<b>Químicos de uso industrial</b>	Hexaclorobenzeno (HCB) e Bifenilos Policlorados (PCBs)
<b>Medicamentos</b>	Antibióticos, anti-convulsionantes, anti-depressivos, anti-hipertensores, Contrastes radiológicos, Citotóxicos, Hormônios, Analgésicos, Reguladores lipídicos e Psico-estimulantes
<b>Subprodutos</b>	Dibenzeno-p-dioxinas, dibenzofuranos-policlorinados, Hexaclorobenzeno e PCBs

Fontes: GAFFNEY (2013); PNUMA (2010); MMA (2019)

## 2.8 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POA)

Atualmente no Brasil, é considerada potável a água que atende aos parâmetros descritos na Portaria N° 5/2017 do Ministério da Saúde, que rege as modalidades e padrões de qualidade do abastecimento coletivo para consumo humano com captação subterrânea e superficial, com ou sem canalização da rede de distribuição. A ineficiência dos tratamentos de efluentes pelas vias convencionais em relação aos micropoluentes fez surgir um novo ramo de processos alternativos, chamados de processos oxidativos avançados, que se utilizam do princípio de oxidação química, já mencionado anteriormente no tópico de Tratamentos Terciários. (DALLAZEN; LENHARD; VETTORELLO et al., 2017)

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) vêm sendo amplamente estudados nas últimas décadas por se tratar de processos sustentáveis que se baseiam na alta reatividade de radicais hidroxilas para degradar uma vasta gama de substâncias não removíveis no tratamento convencional, de forma rápida e promovendo a mineralização completa em alguns casos. O

processo baseia-se na formação de radicais altamente reativos, substâncias como o radical Hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ), Ozônio ( $\text{O}_3$ ), o Superóxido ( $\text{O}_2^-$ ) e o Peróxido de Hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), para oxidar os poluentes e transformá-los em compostos simples como água, dióxido de carbono etc. (FERREIRA, 2014; FLORES; RIBEIRO; NEVES et al., 2004)

Tabela 3- Potenciais de oxidação dos radicais aplicados em POA

Espécie	E° (V)
Radical Hidroxila, $\bullet\text{OH}$	+ 2,80
Ozônio, $\text{O}_3$	+ 2,07
Peróxido de Hidrogênio, $\text{H}_2\text{O}_2$	+ 1,77
Hipoclorito, $\text{ClO}^-$	+ 1,43
Radical Peridroxil, $\text{HO}_2\bullet$	+ 1,42
Cloro, $\text{Cl}_2$	+ 1,36
Oxigênio, $\text{O}_2$	+ 1,23

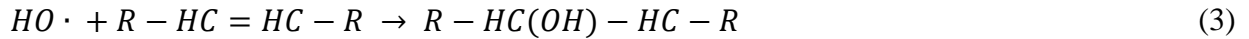
Fonte: ARAÚJO; ANTONELLI, GAYDECZKA et al. (2016)

Conforme observado na Tabela 3, o radical Hidroxila possui o maior potencial de oxidação não seletivo dentre os citados anteriormente. Desta forma, este reage de forma rápida, sendo muitas vezes econômico se comparado com outros agentes oxidantes. Ele passa por uma série de reações em cadeia, onde ocorre a transferência do radical seguindo o mecanismo (FIOREZE; SANTOS; SCHMACHTENBERG, 2014; DUARTE, 2015):

- Remoção do átomo de hidrogênio: é a etapa inicial para a oxidação de compostos orgânicos a partir da remoção do átomo de hidrogênio do radical em questão para formar água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (equação 1). Posteriormente, é adicionado Oxigênio para promover a formação do radical peróxido, que é o radical intermediário para as reações de transformação de hidrocarbonetos e compostos orgânicos em  $\text{CO}_2$ , água e sair orgânicos



- Adição eletrofílica: Adição de radicais hidroxila a compostos orgânicos que contenham ligações duplas ( $\pi$ ), formando radicais orgânicos simples conforme a Equação 3.



- Transferência eletrônica: Mais frequente em hidrocarbonetos clorados quando não há favorecimento das adições eletrofílicas ou da remoção de hidrogênio (4):



Seguindo o mesmo princípio de reação explicado acima, foram desenvolvidos muitos tipos e classificações de POA, de acordo com o tipo de efluente a ser tratado e disponibilidade de recursos. As duas subdivisões principais são processos homogêneos (com ou sem energia) e processos heterogêneos (ozonização) (Tabela 4)

Tabela 4- Classificações dos Processos Oxidativos Avançados

<b>Processo</b>	<b>Homogêneo</b>	<b>Heterogêneo</b>
Com irradiação	$O_3/UV$	Fotocatálise Heterogênea $TiO_2/ O_2/UV$
	$H_2O_2/UV$	
	$O_3/H_2O_2/UV$	
	Foto-Fenton	
Sem irradiação	$O_3/HO^-$	$O_3/catalisador$
	$O_3/H_2O_2$	
	Reativo de Fenton	

Fonte: FIOREZE; SANTOS; SCHMACHTENBERG (2014)

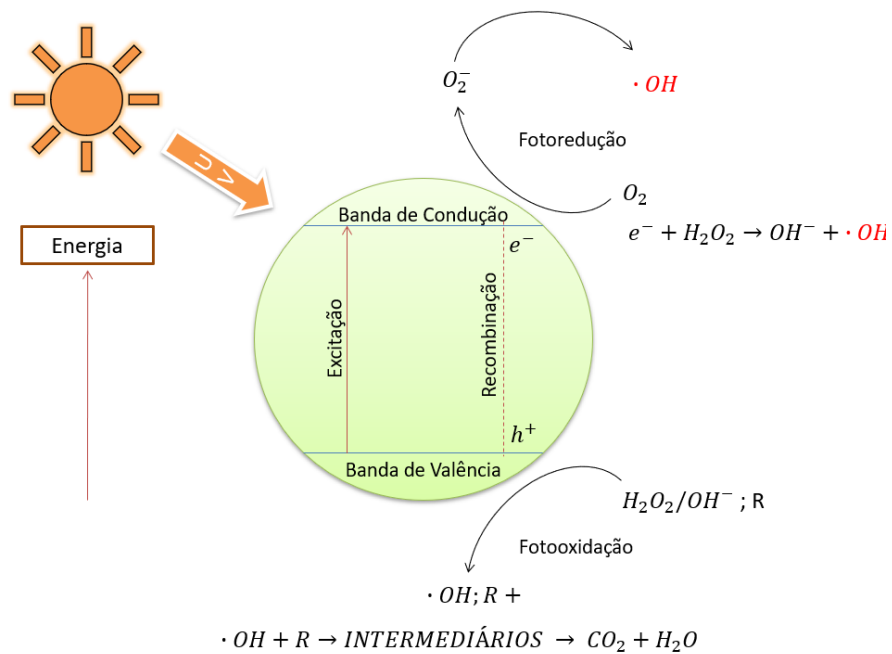
## 2.9 FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA

A fotocatalise é classificada como um tipo de POA fotoquímico que foi desenvolvido em meados dos anos 70, quando se estudava a conversão de energia solar em química com o objetivo de produzir combustíveis e depois evoluindo para sistemas de desinfecção e degradação de íons

orgânicos em suspensões de Dióxido de Titânio (TiO<sub>2</sub>). É uma tecnologia de foto indução que atua sobre um catalisador na forma sólida, seja este afixado na superfície ou em suspensão na solução de efluente, sob incidência de uma luz visível ou Ultravioleta (UV).

O catalisador possui um “gap” de energia entre a sua zona de energia mais baixa (Banda de Valência – BV) e a banda de energia mais alta (Banda de Condução – BC). Quando a quantidade de energia incidente proveniente da luz for maior do que o bandgap existente entre BV e BC, o elétron é promovido de uma banda a outra, deixando uma lacuna ( $h^+$ ) na BV. Devido ao movimento realizado pelo elétron e as lacunas deixadas, são criados sítios redutores e oxidantes que servirão de catalisador das reações químicas. Devido aos potenciais químicos adquiridos, há energia o suficiente para gerar radicais  $\cdot OH$  a partir das moléculas de água adsorvidas na superfície do semiconductor (no caso, TiO<sub>2</sub>), promovendo a oxidação do contaminante orgânico (Figura 3). (ARAÚJO; ANTONELLI, GAYDECZKA et al., 2016; FIOREZE; SANTOS; SCHMACHTENBERG, 2014)

Figura 3 - Esquematização dos processos de foto excitação dos elétrons de TiO<sub>2</sub>



Fonte: FIOREZE; SANTOS; SCHMACHTENBERG (2014)

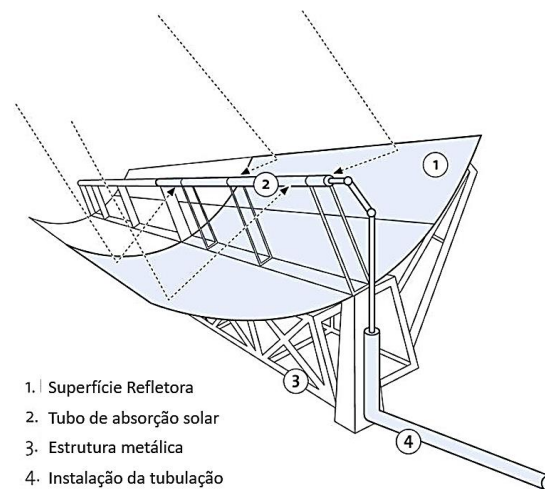
A aplicação de um reator de Processos Oxidativos Avançados é extremamente ampla, além de abrir opções de tratamento de diversos tipos de efluentes. Como é necessário a ativação com radiação UV do catalisador, há o destaque para este tipo de método por ser ativado através da luz

solar, economizando materiais e energia de forma crucial em relação à outros métodos terciários de tratamento, a baixo custo e estabilidade em amplas faixas de pH e ausência de toxicidade.

Devido à disseminação de sistemas de aquecimentos de água com a energia solar, muitos fotoreatores possuem geometrias inspiradas em seus projetos. Podem ainda ser de dois tipos: Estacionário ou Tracking type (acompanha o movimento do sol). Dentre as geometrias mais comuns existentes para os fotoreatores, estão o Reator de Calha Parabólica (PTC), Reator Coletor Parabólico Composto (CPC), Reator Fotocatalítico de Cascata de Película Fina e o Reator de Filme em Queda (FFR). (TÔRRES, 2007)

- **Reator Coletor de Calha Parabólica (PTC):** O PTC consiste em um coletor parabólico construído a partir de um material refletor que irá direcionar a intensidade dos raios de sol para o ponto focal central (tubo), onde a substância de interesse irá fluir e promover a reação em seu interior. O tubo deve ser confeccionado com material que permita a luz UV de penetrar, como borosilicato ou quartzo. Possui a desvantagem de possui “zonas escuras”, onde a radiação não incide e há perda de área útil da superfície refletora (NASCIMENTO; ALVES FILHO; LIMA et al., 2014)

Figura 4 - Desenho estrutural do Reator de Calha Parabólica (PTC)

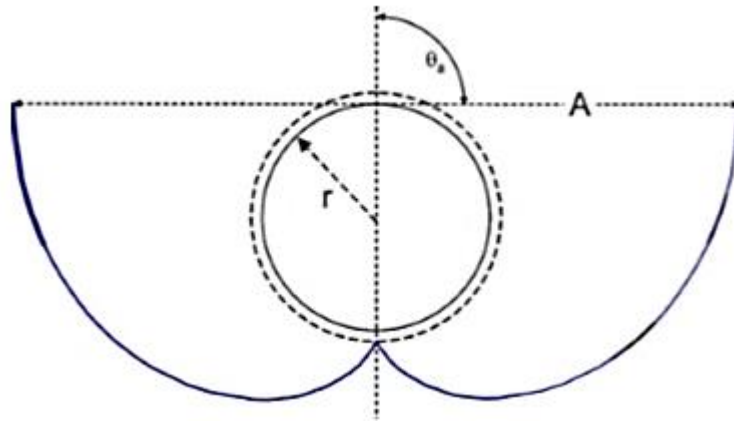


Fonte: NASCIMENTO; ALVES FILHO; LIMA et al. (2014)

- **Reator Coletor Parabólico Composto (CPC):** Os coletores parabólicos compostos possuem uma configuração de “dupla” parábola na superfície refletora, de forma a concentrar a incidência solar no centro da mesma, onde uma tubulação

transpassa no eixo longitudinal (Figura 4). Sua geometria favorece a concentração da radiação difusa na tubulação central, aumentando a incidência de UV e consequentemente a eficiência do processo. (CASTRO; MARCELINO; STARLING et al., 2014)

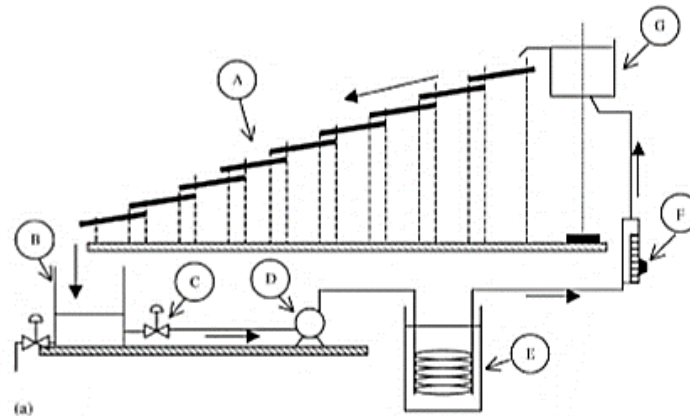
Figura 5 - Geometria básica do Reator tipo CPC



Fonte: CASTRO; MARCELINO; STARLING, et al. (2014)

- **Reator Fotocatalítico de Cascata de Película Fina:** O reator fotocatalítico de cascata fina funciona como um sistema fechado de recirculação de líquido. Mais comumente aplicado à locais fechados, onde são utilizadas luzes fluorescentes UV para emanar a radiação de reação necessária. A cascata é constituída de pratos revestidos com o catalisador de interesse, com uma distância vertical pré-definida entre cada prato, e inclinados em um ângulo de grau  $\theta$  horizontalmente, para promover o escoamento (CHAN; CHAN; BARFORD et al., 2002)

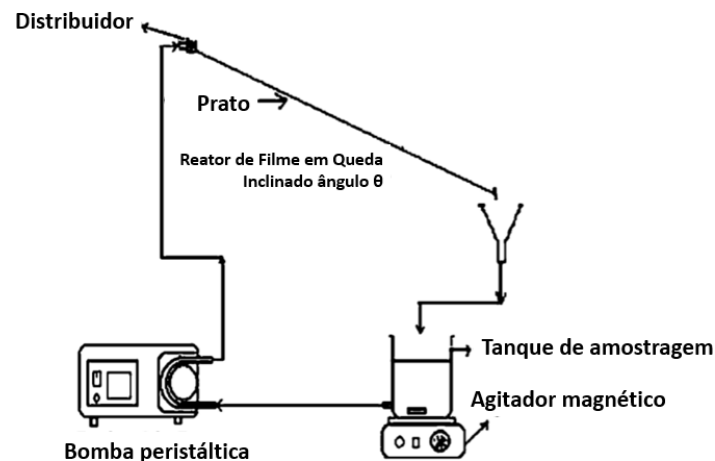
Figura 6 – Esquema básico do Reator Fotocatalítico de Cascata de Película Fina



Fonte: CHAN; CHAN; BARFORD et al. (2002)

- Reator de Filme em Queda (FFR):** Este tipo de reator utiliza uma placa com uma inclinação  $\theta$  para promover o deslizamento laminar do fluido devido à ação gravitacional. Forma-se então uma película de líquido com espessura de 0,5 a 3mm, com velocidade de queda variando de acordo com a inclinação do prato, que se encontra em constante contato com a placa e o catalisador, imobilizado na superfície. Possui a vantagem de captar a radiação solar em sua forma direta e difusa, promover a troca de oxigênio com o líquido e grande área para absorção e reação. Sua construção e projeto são simples, além de possuírem um custo baixo em relação aos citados anteriormente (DAMONAR; JAGANNATHAN; SWAMINATHAN, 2006; YEONG; GAVRIILIDIS; ZAPF et al., 2003)

Figura 7 - Desenho do Reator de Filme em Queda (FFR)



Fonte: DAMONAR; JAGANNATHAN; SWAMINATHAN (2006)

Em casos de estudos de processos oxidativos avançados utilizando o catalisador de  $\text{TiO}_2$ , avaliam-se parâmetros como: (PUMA, 2003)

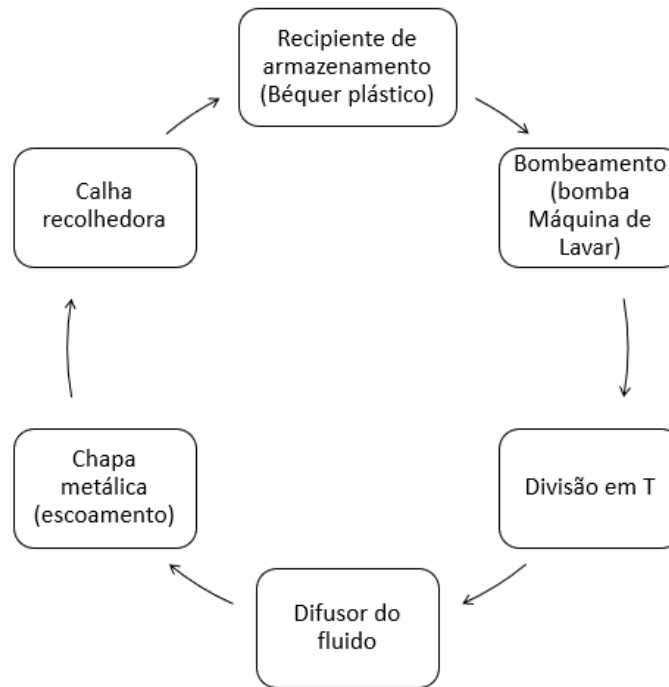
- A temperatura em que se está ocorrendo a reação;
- Aplicação de um oxidante ameno;
- Catalisador seguro e estável ( $\text{TiO}_2$ );
- Uso de luz (Ultravioleta ou Solar) como única fonte de energia;
- Diminuição ou destruição dos poluentes de interesse;
- Produção de poderosos radicais hidroxila.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MONTAGEM DO RETOR

O modelo do reator escolhido para execução dos experimentos de fotocatalise heterogênea foi o *Falling Film Reactor* - FFR. Foram em consideração nos cálculos aspectos de projeto do reator como: material utilizado para construção, inclinação da rampa de escoamento, vazão aplicada, área de contato com o catalisador, espessura do filme, aplicação de um difusor de fluido. O fluxograma básico do processo pode ser verificado na Figura 8:

Figura 8 - Fluxograma/Diagrama de blocos de um FFR



Fonte: Própria

#### 3.1.2 Materiais utilizados

Para a montagem do reator foram utilizados materiais alternativos: as estruturas de sustentação que suportam a rampa de inclinação foram feitas de tubos de canos soldáveis de Policloreto de Vinila (PVC),  $\frac{3}{4}$ ". Foram utilizados os seguintes materiais nas medidas indicadas na Tabela 5:

Tabela 5 - Listagem de materiais de PVC utilizados na montagem do reator

Material de PVC	Quantidade de peças	Medidas (mm)
Tubo de PVC ¾" superior	4	718,0
Tubo de PVC ¾" apoio	4	464,0
Tubo de PVC ¾" inferior	4	182,0
Tê 90° PVC ¾" soldável	8	-
Curva 90°	4	-

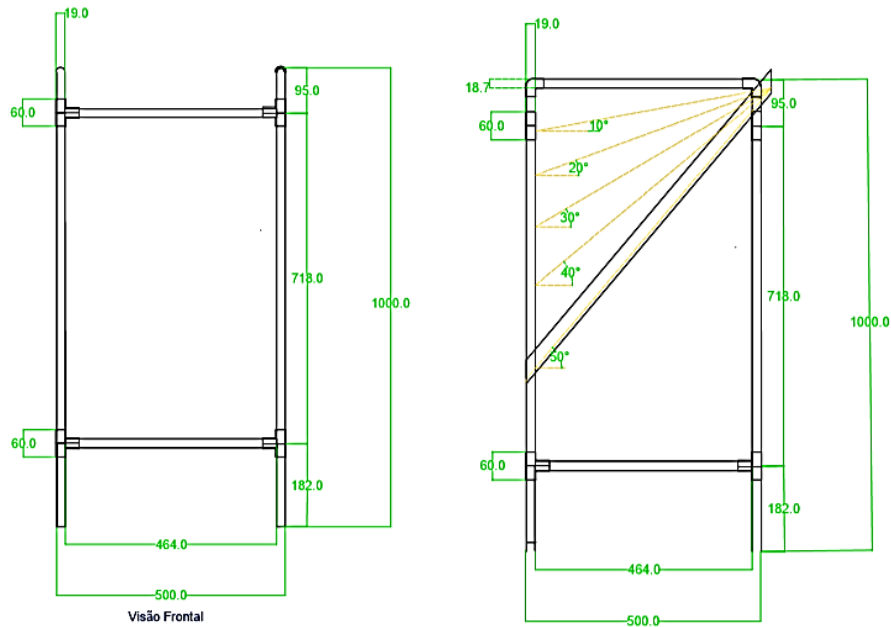
Além dos materiais listados na tabela também foram utilizados os materiais:

- Trena Lufkin de 5,0 metros;
- Tubulações de PVC em diferentes diâmetros (¾", ½");
- Serrote para talho;
- Cola Adesiva Siloc para tubos de PVC Rígido;
- Folhas de Lixa de diferentes espessuras;
- Esmeril;
- Chapa de galvanizado;
- Tinta branca Iquine;
- Pincel para pintura;
- Dióxido de titânio em pó 99% PA;
- Mangueiras de plástico transparente;
- Sistema de bombeamento composto por uma bomba centrífuga de 127 V, 60 Hz e 34 W;

As tubulações foram cortadas utilizando um serrote para talho como ferramenta de corte, após medição com uma trena. As extremidades dos canos foram polidas com esmeril e lixas, para que a cola pudesse atuar efetivamente.

A chapa utilizada para escoamento foi confeccionada com material de alumínio, e dobrada em ambas as laterais para obtenção do formato de calha. Para melhor visualização, foi feito um desenho técnico do reator no software *AutoCad*, conforme Figura 11:

Figura 9 - Esquema (Frontal e lateral, respectivamente) em AutoCad com cotas



Fonte: Própria

### 3.1.3 Montagem da estrutura do reator

Foi utilizada uma chapa de alumínio posicionada sobre a estrutura, com inclinação ajustável, para que fosse feita a regulação da velocidade de queda do filme, e por consequência, o tempo de retenção do líquido na superfície de contato. A regulação da altura será feita a partir dos apoios dianteiros por meio de orifícios em diferentes alturas, alternando os ângulos de 7,5° a 40°, em intervalos de 10°, totalizando 5 medidas diferentes. A medição da inclinação para demarcação dos furos foi realizada utilizando o aplicativo de smartphone “Medida”, que indica a angulação de superfícies inclinadas, conforme a Figura 12

Figura 10 - Aplicativo utilizado para medir inclinação da chapa metálica



Fonte: Apple Inc., 2019

Na parte superior da chapa foi instalado um difusor confeccionado com tubos de PVC ½". Os furos foram feitos utilizando uma broca de 2 mm, e distância de 1 cm entre cada que irão promover a distribuição do fluido na chapa

Devido à falta de uniformidade no escoamento em algumas situações, foi instalado um corte de madeira que funciona como uniformizador de fluxo, represando a água e promovendo a formação de uma lâmina na extensão da chapa, conforme Figura 13.

Figura 11 - Chapa de madeira utilizada para uniformizar o fluxo



Fonte: Própria

Esta madeira restringe a passagem de água, juntamente com uma barra metálica na parte debaixo da chapa, presas juntas por meio de elásticos de borracha nas extremidades. As braçadeiras instaladas junto à barra metálica são ajustáveis para distribuir o fluxo, caso a retenção de madeira não seja o suficiente.

A chapa foi confeccionada com alumínio por meio de cortes e dobras do material. Após a confecção, foi iniciada a preparação para pintura. Primeiramente esta foi lixada com uma folha de lixa para metal, para facilitar a penetração da tinta e propiciar a criação de sítios ativos para o catalisador. Para pintura, foi utilizada uma mão inicial de 80 mL de tinta comercial branca. Para segunda mão de tinta, foi realizada a mistura com Dióxido de Titânio, obtido no laboratório de Química Experimental C-34 da Escola Superior de Tecnologia – EST UEA, em uma proporção de 50% m/v para o  $\text{TiO}_2$  / Tinta. A proporção necessária de  $\text{TiO}_2$  para a pintura da placa foi calculada a partir da especificação contida no rótulo da tinta, conforme tabela abaixo:

Tabela 6 - Especificações da tinta conforme fabricante

Superfície	m <sup>2</sup> /demão	Rendimento
		Embalagem
Demais superfícies	Até 70	galão (3,6 L)
	Até 18	1/4 galão (0,9 L)
	Até 4,5	1/16 galão (0,225 L)
	Até 2,2	1/32 galão (0,112 L)
Madeiras novas	Até 70	galão (3,6 L)
	Até 18	1/4 galão (0,9 L)
	Até 4,5	1/16 galão (0,225 L)
	Até 2,2	1/32 galão (0,112 L)

Fonte: SUVINIL, 2021

Foi calculada a área da chapa para 0,45 x 0,8, obtendo 0,36 m<sup>2</sup>. Foi adquirido ¼ galão de tinta, equivalente à 900mL. Para verificar o quanto de tinta deveria ser usado na pintura, foi feita seguinte proporção:

$$\begin{array}{r} 900 \text{ mL} \quad 18 \text{ m}^2/\text{demão} \\ x \quad \quad \quad 0,36 \text{ m}^2 \\ x = 18,0 \text{ mL} \end{array}$$

Como a proporção indicada é de 50% m/v, foram pesados 9g de TiO<sub>2</sub> em pó para serem misturados à 18 mL da tinta da segunda demão.

Após a pintura, esta foi deixada para secar naturalmente por 24h. A superfície pintada foi lixada primeiramente com uma lixa de P220 e posteriormente com uma lixa d'água grão 1000, para promover a ativação do catalisador imobilizado e corrigir o escoamento irregular pela chapa. O resultado do reator construído pode ser visualizado na figura abaixo:

Figura 12 - Reator construído e apto para uso



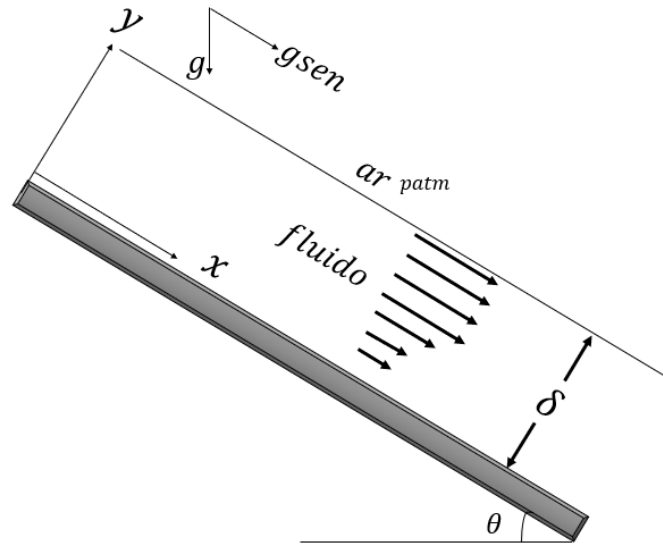
Fonte: Própria

Para promover a movimentação da água no sistema, foi utilizado um motor monofásico (127 V, 34 W), aplicado em sistemas de máquinas de lavar roupa, e mangueiras plásticas.

### 3.2 EQUAÇÕES DO REGIME DE FLUXO

Seguindo o modelo proposto por Dabri, Riazi e Davoudirad (1996), observa-se o escoamento de um filme líquido em um plano inclinado com as equações de Navier-Stokes:

Figura 13 - Escoamento de um filme líquido em um plano inclinado



Fonte: Adaptado de BIRD; STEWART; LIGHTFOOT (1960)

O escoamento laminar ocorre sobre uma superfície com a inclinação  $\theta$  na direção  $x$ , por ação da gravidade  $g$  e uma película de filme de espessura  $\delta$ . Para escoamentos permanentes e incompressíveis em termos de  $x$  e  $V$ , as equações da continuidade e Navier-Stokes, são, respectivamente Equações 5, 6 e 7:

$$\frac{\partial \rho V_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (5)$$

Em  $x$ :

$$\rho \left( \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Em  $y$ :

$$\rho \left( \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Para a equação da continuidade, é possível observar que o gradiente de velocidade varia na direção  $y$ , conforme Equação 8:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

Para as equações de Navier-Stokes, fazem-se as seguintes considerações:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = \frac{\partial V_y}{\partial t} = 0 \rightarrow \text{Escoamento permanente, não varia com o tempo;}$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = 0 \rightarrow \text{Equação da continuidade;}$$

$$V_y = V_z = 0 \rightarrow \text{Escoamento unidirecional;}$$

$$\partial P = 0 \rightarrow \text{Gradiente de pressão nulo: escoamento pela gravidade}$$

Obtendo assim, a Equação 9 abaixo:

$$\rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (9)$$

Considerando que  $g_x = g \sin \theta$ , pode-se obter a Equação 10:

$$-\frac{\rho g \sin \theta}{\mu} = \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \quad (10)$$

A partir da integração desta equação, obtemos a Equação 11:

$$V_x(y) = -\frac{\rho g \sin \theta}{2\mu} y^2 + c_1 y + c_2 \quad (11)$$

Para que sejam determinadas as constantes, as condições de contorno são ditas como: tensão de cisalhamento em  $\delta$  e a velocidade do fluido na superfície são nulas. Por fim, obtemos o perfil de velocidade, conforme descrito na Equação 12:

$$V(y) = -\frac{\rho * g * \sin \theta}{2\mu} \delta^2 \left[ \left( \frac{y}{\delta} \right)^2 - 2 \frac{y}{\delta} \right] \quad (12)$$

A partir de outras considerações adicionais, também é possível determinar as equações de:

Velocidade máxima (Equação 13):

$$V_{\text{máx}} \quad y = \delta \quad V_{\text{máx}} = \frac{\rho * g * \sin \theta}{2\mu} \delta^2 \quad (13)$$

Velocidade média (Equação 14):

Onde para o escoamento laminar:  $V_{\text{méd}} = (2/3 V_{\text{máx}})$ , substituindo-se em (13):

$$V_{\text{méd}} = \frac{\rho * g * \sin \theta}{3\mu} \delta^2, \quad (14)$$

Vazão volumétrica (Equação 15):

$$Q = Vméd * \delta = \frac{\rho * g * \text{sen}\theta}{3\mu} \delta^3 \quad (15)$$

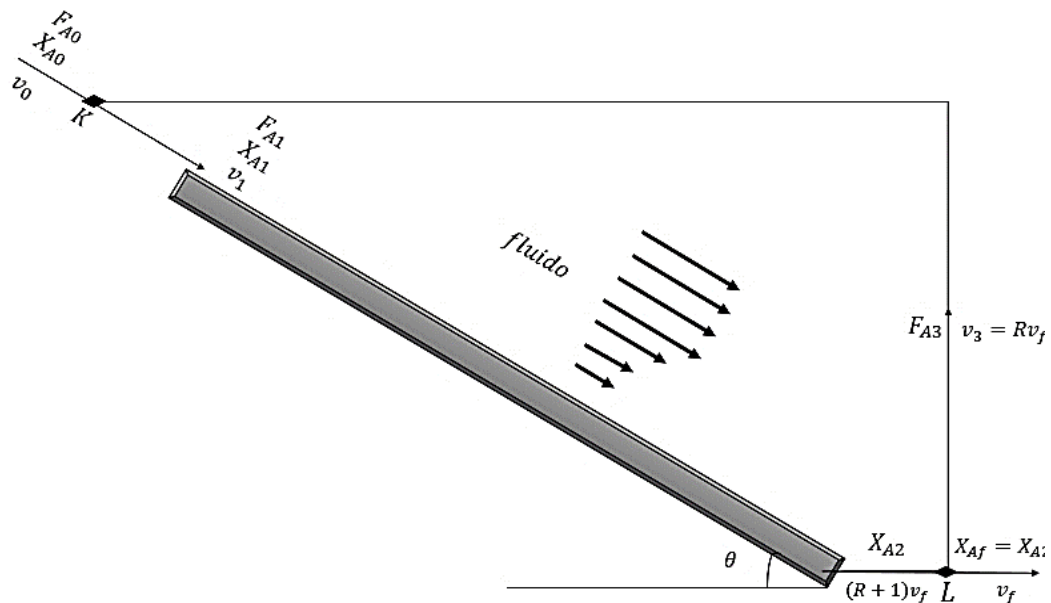
### 3.2.1 Equações do reator de mistura perfeita

Segundo Levenspiel, 2013, o reator em questão pode ser classificado como uma mistura perfeita com reciclo, visto que o fluido será introduzido ao reator consecutivas vezes para obter a conversão desejada, e seu comportamento se aproxima do ideal, conforme a equação da taxa de reciclo  $R$  na Equação 16:

$$R = \frac{\text{volume de fluido que retorna à entrada do reator}}{\text{volume que sai do sistema}} \quad (16)$$

O escoamento que entra no reator inclui a alimentação nova  $F_{A0}$  e a corrente de reciclo  $F_{A3}$ . O reciclo proporciona um meio de se obter vários graus de mistura e diferentes remoções do poluente com o passar do tempo, reciclo que se soma à corrente de entrada no ponto  $K$ . O fluido escoava sobre a superfície, sendo convertido à uma fração final  $X_{A2}$ , onde parte será retirada para reciclo no ponto  $L$ , dando origem à corrente  $F_{A3}$ , conforme Figura 10:

Figura 14 – Esquema de escoamento do filme de um reator com reciclo



Fonte: Adaptado de LEVENSPIEL (2013)

A equação relaciona as variáveis envolvidas na Figura 7 acima. O escoamento que entra no reator  $F_{A1}$  é determinado pela soma da alimentação nova com a corrente de reciclo retirada no ponto  $L$ , onde:

$$F_{A1} = (R + 1)F_{A0} \quad (17)$$

Para determinação da composição  $X_{A1}$  da corrente  $F_{A1}$ , utiliza-se a Equação 18:

$$X_{A1} = \frac{1 - \frac{C_{A1}}{C_{A0}}}{1 + \varepsilon_A \frac{C_{A1}}{C_{A0}}} \quad (18)$$

Ou também

$$X_{A1} = \left( \frac{R}{R + 1} \right) X_{Af} \quad (19)$$

Ao realizar o balanço de massa para o reator em questão e combiná-lo com a Equação 17, obtém-se o modelo de desempenho para reatores com reciclo, onde  $X_{A0} = 0$  e qualquer valor de  $\varepsilon_A$ :

$$\frac{V}{F_{A0}} = (R + 1) \int_{X_{Af} \left( \frac{R}{R+1} \right)}^{X_{Af}} \frac{dX_A}{-r_A} \quad (20)$$

### 3.6 DETERMINAÇÃO DO PARÂMETROS DE EXPERIMENTO

#### 3.6.1 Vazões e Inclinações

Foram realizados testes utilizando as vazões por meio da abertura de uma válvula esfera de  $\frac{1}{2}$ ", sendo a vazão máxima (0,083 L/s) quando a válvula estava totalmente aberta, e a vazão mínima (0,016 L/s) quando a mesma estava levemente aberta, sem o estrangulamento da bomba, nas inclinações de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $30^\circ$ , obtendo os seguintes dados:

Tabela 7 - Tabela com dados de experimento inicial

Inclinação	Q <sub>máx</sub> (L/s)	Espessura do filme (mm)	Q <sub>mín</sub> (L/s)	Espessura do filme (mm)
$\Theta = 10^\circ$	0,0785	2,0000	0,0158	Não foi possível determinar
$\Theta = 20^\circ$	0,0811	1,0000	0,0163	Não foi possível determinar
$\Theta = 30^\circ$	0,0884	0,8000	0,0158	0,5000

Fonte: Própria

Com isso, optou-se por utilizar somente a vazão máxima, sendo esta assumida como a de operação, visto que a vazão mínima em praticamente todas as inclinações testadas não obteve resultados de espessuras significativos.

Como houve somente uma variável do processo, sendo esta a inclinação, foi determinado que seriam realizados 3 testes de 1h em cada inclinação (10°, 20° e 30°), totalizando 9 experimentos com a solução padrão de Paracetamol.

### 3.6.2 Volume do Reator

Para determinação do volume contido no reator, foram realizados 3 testes utilizando a água da torneira, onde todas as conexões, mangueiras, recipiente de armazenamento e calhas foram preenchidas com o fluido e depois esgotadas, tendo seu volume medido em uma proveta. O resultado foi um volume aproximado de 3,650 L. Esta medição foi necessária para estimar a quantidade de solução que deveria ser preparada para realizar o experimento.

Baseado nesta estimativa, seriam necessários 32,850 L de solução para finalizar os 9 experimentos. Com isso, foram preparados dois galões de 20 L para suprir a demanda, com as seguintes concentrações: Solução 1 (com 16,50 mg/L de paracetamol) e a Solução 2 (17,55mg/L), que foram utilizadas nas experimentações, totalizando 40L preparados em laboratório (adicionadas as devidas margens de erro).

### 3.7 EFLUENTE SINTÉTICO

As soluções 1 e 2 citadas na seção 3.6.2 foram preparadas da seguinte maneira:

- 5 comprimidos de paracetamol comercial (750 mg, Prati-Donaduzzi) foram pesados em uma balança semi-analítica (Shimadzu UW620 H, 0,001 g), obtendo-se uma massa média de comprimido igual a 0,823 g  $\pm$  0,002 g e uma massa total de 4,144 g. Logo, da massa do comprimido, 91,15% é de paracetamol e o restante da massa é de excipientes citados na bula;
- Os 5 comprimidos foram macerados com auxílio de almofariz e pistilo até obtenção de um pó fino;
- Para a solução 1, utilizou-se 0,362 g de paracetamol comercial, diluindo-o em 20 L de água destilada e obtendo-se a concentração de 16,50 mg/L;
- Para a solução 2, utilizou-se 0,385 g de paracetamol comercial, diluindo-o em 20 L de água destilada e obtendo-se a concentração de 17,55 mg/L.

### 3.8 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Todas as soluções (analíticas, experimentais e o teste em branco) foram analisados no espectrofotômetro SHIMADZU modelo UV-1800. Para as soluções analíticas, pegou-se 2mL de cada solução e colocou-se em uma cubeta de quartzo com o caminho ótico de 3 cm usando a água destilada como base. O mesmo procedimento foi feito para as soluções experimentais.

A varredura para encontrar o comprimento de onda de absorção do fármaco foi feita com velocidade de 1 nm na faixa de 190 nm a 650 nm a 25°C, limpando a cubeta com água destilada e adicionando 2 mL de solução de interesse. Com base na varredura e nos valores escrito em forma de tabela informada pelo equipamento, montou-se a Tabela 9 descrita nos resultados e discussão.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando a vazão máxima e promovendo as alterações das inclinações conforme indicado no item 3.6.1 Vazões e Inclinações, os experimentos foram iniciados. Estes foram realizados em dias de céu limpo, com poucas nuvens e sol intenso, para que a reação de foto catálise heterogênea ocorresse sem restrições.

Os experimentos foram realizados entre os horários de 11h às 14h, período em que ocorre a máxima intensidade de radiação solar no Município de Manaus, Amazonas. Na tabela abaixo é possível verificar os dados relativos aos experimentos realizados e amostras coletadas:

Tabela 8 – Numeração das amostras, inclinações, dias e horários e soluções utilizadas para execução dos experimentos

Nº	Experimento	Amostra	Inclinação	Data experimento	Hora Coleta	Início/Final	Solução utilizada
1	Experimento 1	Amostra 1	30°	03/06/2021	11:01	Início	Solução 2
2	Experimento 1	Amostra 2	30°	03/06/2021	12:01	Final	Solução 2
3	Experimento 2	Amostra 3	30°	03/06/2021	12:17	Início	Solução 2
4	Experimento 2	Amostra 4	30°	03/06/2021	13:17	Final	Solução 2
5	Experimento 3	Amostra 5	30°	03/06/2021	13:28	Início	Solução 2
6	Experimento 3	Amostra 6	30°	03/06/2021	14:28	Final	Solução 2
7	Experimento 4	Amostra 7	20°	04/06/2021	11:18	Início	Solução 2
8	Experimento 4	Amostra 8	20°	04/06/2021	12:18	Final	Solução 2
9	Experimento 5	Amostra 9	20°	04/06/2021	12:24	Início	Solução 2
10	Experimento 5	Amostra 10	20°	04/06/2021	13:24	Final	Solução 2
11	Experimento 6	Amostra 11	20°	04/06/2021	13:37	Início	Solução 2
12	Experimento 6	Amostra 12	20°	04/06/2021	14:37	Final	Solução 2
13	Experimento 7	Amostra 13	10°	19/06/2021	11:22	Início	Solução 1
14	Experimento 7	Amostra 14	10°	19/06/2021	12:22	Final	Solução 1
15	Experimento 8	Amostra 15	10°	19/06/2021	12:47	Início	Solução 1
16	Experimento 8	Amostra 16	10°	19/06/2021	13:47	Final	Solução 1
17	Experimento 9	Amostra 17	10°	19/06/2021	13:57	Início	Solução 1
18	Experimento 9	Amostra 18	10°	19/06/2021	14:57	Final	Solução 1
19	Solução 2	Amostra 19	-	03/06/2021	-	-	Solução 2
20	Solução 1	Amostra 20	-	19/06/2021	-	-	Solução 1

As amostras foram coletadas ao início e ao final de cada experimento, e também amostras das soluções-mãe ainda não utilizadas de dentro dos galões. Os *ranges* de horário foram praticamente os mesmo durante todos os dias de experimento, de forma a garantir a não

variabilidade dos dados. As análises das amostras foram em espectrofotômetro na região do UV-VIS.

Primeiramente, coletou-se uma alíquota inicial (antes do experimento) e uma final (após o experimento). Para encontrar a região de absorbância do fármaco, foi realizada a varredura conforme descrito no item 3.8, encontrou-se a absorbância máxima em torno de 190 nm, porém, de acordo com a literatura a região da absorbância a ser trabalhada é a de 243 nm, esta foi selecionada para a análise dos experimentos.

Devido à concentração elevada, as amostras foram diluídas em 2 vezes, onde a alíquota de 3,0 mL foi dividida em 1,5 mL de amostra e 1,5 mL de água destilada.

Na Tabela 9 da próxima página, é possível verificar os resultados obtidos nos experimentos, além das variações de volume (final e inicial), condições meteorológicas no dia do experimento (temperatura média, umidade relativa e velocidade do vento). (THE WEATHER CHANNEL, 2021)

Informações sobre o índice UV não foram encontradas com precisão em sites de domínio público, somente a afirmação que Manaus é localizada em uma área de altos Índices de Ultravioleta (entre 11 e 12) na escala de medição.

Para cálculo da massa de fármaco obtida na solução e conversão relacionando à absorbância, foi utilizada a seguinte fórmula: (GOMES, 2020)

$$ABS_{Paracetamol} = 0,0633 * [Paracetamol] - 0,0237 \quad (21)$$

Houve perdas no experimento 2 relacionadas à quebra do recipiente de armazenamento (frasco âmbar), devido ao armazenamento em baixas temperaturas, não sendo possível contabilizar sua absorbância, então o mesmo foi desconsiderado nos resultados analisados.

Na próxima página, é possível visualizar os resultados obtidos listados na Tabela 9:

Tabela 9 - Resultados de absorvância medidos nas amostras

Nº Experimento	ABS medida	Volumes (Inicial/Final)	Concentração (mg/L)	Massa de fármaco (mg)	Degradação (%)	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Velocidade vento (mph)
1 - Inicial	0,529	3,600	16,04	57,75	-20,68%	25,7	87,6	6,7
1 - Final	0,678	3,355	20,77	69,69		25,7	87,6	6,7
3 - Inicial	0,537	3,625	16,30	59,07	17,97%	25,7	87,6	6,7
3 - Final	0,470	3,420	14,17	48,46		25,7	87,6	6,7
4 - Inicial	0,620	3,400	18,93	64,36	6,90%	27,5	81,1	8,5
5 - Final	0,609	3,225	18,58	59,92		27,5	81,1	8,5
5 - Inicial	0,616	3,430	18,80	64,49	9,60%	27,5	81,1	8,5
5 - Final	0,657	2,900	20,10	58,30		27,5	81,1	8,5
6 - Final	0,770	3,655	23,69	86,59	15,08%	27,5	81,1	8,5
6 - Inicial	0,701	3,420	21,50	73,54		27,5	81,1	8,5
7 - Final	0,514	3,000	15,57	46,70	4,22%	26,4	84,7	10,6
7 - Inicial	0,518	2,850	15,69	44,72		26,4	84,7	10,6
8 - Final	0,529	3,000	16,04	48,12	4,34%	26,4	84,7	10,6
8 - Inicial	0,551	2,750	16,74	46,03		26,4	84,7	10,6
9 - Final	0,627	2,950	17,50	51,63	6,15%	26,4	84,7	10,6
9 - Inicial	0,575	2,530	19,15	48,45		26,4	84,7	10,6

Fonte: Própria

A partir dos dados obtidos, foi possível observar uma degradação máxima de 17,97% na inclinação de 30° (Experimento 3), no pico de horário em incidência solar e temperatura (13h ~14h).

Pode-se observar também que as maiores degradações foram obtidas nos últimos experimentos de cada dia, todos na faixa de horário mencionado anteriormente (Experimentos 6 e 9). Em contrapartida, houve ainda uma “degradação negativa” no Experimento 1, onde aparentemente ocorreu uma concentração maior do fármaco na solução ou indicativo de formação de subprodutos que podem absorver no mesmo comprimento de onda analisado para o Paracetamol, premissa interessante de ser observada, visto que o objetivo do presente trabalho é promover a remoção de substâncias nocivas.

Houve perdas de volume inerentes ao processo, podendo ser atribuídos à evaporação natural e a vazamentos em algumas conexões de mangueiras e tubos do sistema (que podem ser melhoradas em projetos futuros), e que influenciaram nos resultados de variação de volume final/inicial.

Mediante os resultados obtidos e registrados na Tabela 9, foi possível promover uma análise crítica dos dados. Sabe-se, conforme já mencionado, que os experimentos ocorreram em três diferentes inclinações (10°, 20° e 30°), estipuladas no começo deste trabalho. É importante salientar que o principal foco deste trabalho, além de provar a efetividade de degradação do paracetamol, é realizar um teste com uma nova geometria de reator, que permitisse fácil absorção da radiação ultravioleta proveniente da luz solar, e que também se mostrasse acessível em preço e montagem, além de tratar maiores quantidades de efluente, visto que, em um futuro, seria possível aplicá-lo à tratamentos de grande porte. A maioria dos trabalhos voltados à área de Processos Oxidativos Avançados que utilizam fotocátalise, lançam mão da utilização de luz ultravioleta artificial, que é um artifício interessante e que demonstra bons resultados, mas possui um alto valor agregado para obtenção e consertos em eventuais queimas. Em contrapartida, a luz solar não agrega custo nenhum, e é abundante em toda zona tropical, em especial no estado do Amazonas.

Os maiores resultados de degradação foram obtidos nos experimentos 3 (17,97%), 6 (15,08%) e 5 (9,60%), em ordem decrescente. Foi possível observar um denominador comum entre as degradações, que seria o horário de maior incidência solar (12h ~14h) e maior temperatura média durante o dia, de forma que pode-se vincular estes dados à uma relação direta de proporcionalidade: quanto maior a incidência solar, maiores são as degradações do fármaco. Outra questão importante, foi o ângulo de inclinação da chapa metálica. No início deste estudo, foi pensado que as maiores

degradações ocorreriam na menor inclinação possível ( $10^\circ$ ), visto que a solução escoaria de forma mais lenta, aumentando o tempo de contato. Porém mediante os resultados obtidos, foi possível verificar o oposto: a maior inclinação ( $30^\circ$ ) obteve o melhor resultado. Uma suposição levantada para embasar este desenlace seria que, ao inclinar mais a chapa, o efluente se desloca mais rapidamente na superfície de contato, tendo a oportunidade de realizar o ciclo de passagem mais vezes dentro do reator, sendo exposto mais vezes à luz solar na superfície contendo o  $\text{TiO}_2$ , aumentando a degradação. Este fato foi uma constatação interessante obtida através da experimentação e teste do reator solar, ainda que os índices de degradação não se mostraram os maiores possíveis

Quando verificamos a literatura, os resultados são um pouco desafiadores de serem comparados, pois:

- 1) O método de POA solar não é amplamente difundido e utilizado, sendo mais comum os que utilizam lâmpadas UV
- 2) Outros efluentes são utilizados, não somente o efluente contendo paracetamol
- 3) A geometria e volume de tratamento se diferem dos utilizados usualmente.

Ainda assim, quando comparados com resultados da literatura, como Batista (2019), onde a degradação foi de 17,42% para concentrações de paracetamol semelhantes, é possível verificar que os dados obtidos são condizentes com a degradação esperada.

Além desta, é possível verificar também em Azevedo (2018), uma degradação de 20% do fármaco paracetamol, porém ambas utilizando pequenas quantidades de solução em béqueres. Em outros estudos, foram utilizadas concentrações iniciais diferentes (7 mg/L), e obtendo conversões de 97%, porém com utilização de lâmpadas UV combinadas, e 5 horas de experimento, provando que talvez o tempo de ciclo do efluente dentro do sistema tenha ligação com a degradação, o que pode ser comprovado em experimentos futuros. (BARROS, 2014).

Em referência à degradação obtida, conforme determinado em estudos prévios, existe o fator de rendimento quântico do paracetamol, que está relacionado a quantidade de fótons que são necessários para fazer a degradação, ou seja, nesses ensaios a quantidade de fótons não foi suficiente para prosseguir com a degradação, ou o tempo de experimento não foi o suficiente para uma melhor conversão. (KATSUMATA, 2014)

Já ao discutir-se sobre a geometria do sistema, existem inúmeros trabalhos na literatura utilizando a metodologia de POA Solar, como nos trabalhos de Vilar (2011), onde foi construído

um reator de geometria de coletor parabólico (Compound Parabolic Collector — CPC), mas em escala maior, tratando cerca de 100L de efluente de aterro sanitário (pós tratamento), sendo os tubos do CPC confeccionados de borossilicato, material com alto valor agregado, mas que cumpre perfeitamente as funções de reações de POA, pois não retém os raios UV. Foi inclusive constatado neste artigo, uma maior eficiência utilizando o método de foto-Phenton quando comparada à fotocatalise utilizando  $\text{TiO}_2$  (devido ao aumento de sensibilidade à luz para 35%, comparado à 5% do  $\text{TiO}_2$ ), alcançando uma remoção aproximada de 25% (DOC *degradation of landfill leachate* mg/L).

Em outros estudos, também já foi comprovada a eficiência do reator de POA solar para degradação de fármacos, como em Dias (2015), onde foi mencionada a geometria do *Falling Film Reactor* como uma boa opção, porém o reator em questão foi desenvolvido na geometria CPC, por ser a mais eficiente atualmente. Argumenta-se a escolha de reatores do tipo FFR ou CPC pois apresentam a vantagem de não possuírem controles automatizados ou lançarem mão de movimento, mantendo-se estáticos, e por estes motivos, são mais baratos. Assim como no presente trabalho, o índice de remoção dos fármacos foi de 15% chegando à 54% em alguns casos.

Também em Freire (2014), estudos foram desenvolvidos para a degradação de fenol na água, utilizando a mesma geometria de reator *FFR* e aplicação de luz solar durante os experimentos, mas no método de foto-Phenton, obtendo degradações de até 99% do fenol em concentrações iniciais de 200mg/L, efetuando testes que variavam de 1h até 4h, em diferentes concentrações de catalisadores de peróxido de hidrogênio e foto-Phenton.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo da construção deste estudo foi avaliar as influências de uma nova geometria de reator na remoção do paracetamol, além da utilização de luz solar, aproveitando a incidência de ultravioleta (que é extremamente alta na cidade de Manaus) para degradação do fármaco, buscando inovar na contrapartida dos estudos que tradicionalmente utilizam lâmpadas UV, tecnologia com alto valor agregado e que dispõe de uma estrutura e recursos financeiros envolvidos. Pode-se afirmar que os resultados foram satisfatórios para o presente estudo, que não obteve altos índices de rendimento, mas para um protótipo inicial, é possível que sejam sanadas as anormalidades que ocorreram dentro do presente experimento.

Em retrospectiva aos objetivos supramencionados no início deste projeto, pôde-se avaliar que estes foram alcançados com êxito. Dentre os objetivos, consistia-se em fazer os cálculos e experimentação que obtivesse os melhores rendimentos para um reator Solar de POA, o que foi comprovado a partir da comparação dos rendimentos deste trabalho com os dados da literatura, além das conclusões empíricas promovidas, com auxílio da experimentação in loco. Como já mencionado, de fato é possível realizar melhorias no projeto, mas os resultados foram satisfatórios para um primeiro protótipo de reator solar de POA. O tempo de residência foi determinado como 1h devido às variações constantes na incidência do sol, podendo ser variado em experimentos futuros visando melhores resultados. E por fim, a eficiência foi comprovada por meio dos experimentos realizados e citados no tópico “Resultados e Discussão”.

## 6 PERSPECTIVAS

Baseados nos estudos realizados no presente trabalho, buscando também embasamentos da literatura e estudos desenvolvidos na área de reatores solares de POA, foi possível chegar às seguintes sugestões de melhoria e perspectivas, visando futuros trabalhos:

- Melhorar vedação das conexões do reator
- Aumentar o tempo de experimento, tendo em vista que outros trabalhos da literatura utilizam 2 horas ou mais para processos oxidativos avançados
- Buscar planejar os experimentos para os horários de maior incidência solar, onde houve os melhores resultados (12h ~ 14h)
- Utilização da inclinação de 30° nos próximos experimentos, pois esta se mostrou a mais eficiente dentre os resultados
- Ao realizar os experimentos, ter equipamentos meteorológicos capazes de medir fatores como: temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e índice UV no local de realização, para melhor aferição das influências
- Melhorar na pintura da chapa metálica. Foi utilizada tinta de alvenaria ao invés da tinta metálica, o que pôde ter ocasionado a formação dos subprodutos mencionados nos resultados obtidos;
- Realizar análises mais aprofundadas da composição da tinta (Cromatografia líquida de alta eficiência, difração de Raio-X, Espectrometria por absorção atômica) no início e ao final dos experimentos;
- Testar a mudança da geometria do reator para CPC, mais comumente utilizado e se mostra mais eficiente segundo a literatura consultada.

## ANEXOS

## ANEXO A – PARÂMETROS DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES E QUALIDADE D'ÁGUA LISTADOS NO CONAMA 430/2011

Parâmetros	Limite máximo requerido/permitido
pH	5,0 a 9,0
Temperatura	Inferior a 40°C
Materiais sedimentáveis	1,0 mL/L
Óleos minerais	20,0 mL/L
Óleos vegetais e gorduras animais	50,0 mL/L
DBO5,20	Remoção mínima de 60% ou 120 mg/L
Arsênio total	0,6 mg/L
Bário total	5,0 mg/L
Boro total	5,0 mg/L
Cádmio total	0,2 mg/L
Chumbo total	0,5 mg/L
Cianeto total	1,0 mg/L
Cianeto livre	0,1 mg/L
Cobre dissolvido	1,0 mg/L
Cromo hexavalente	0,1 mg/L
Cromo trivalente	1,0 mg/L
Estanho total	4,0 mg/L
Ferro dissolvido	15,0 mg/L
Fluoreto total	10,0 mg/L
Manganês dissolvido	1,0 mg/L
Mércurio total	0,01 mg/L
Níquel total	2,0 mg/L
Nitrogênio amoniacal Total	20,0 mg/L
Prata total	0,1 mg/L
Selênio total	0,30 mg/L
Sulfeto	1,0 mg/L
Zinco total	5,0 mg/L
Benzeno	1,2 mg/L
Clorofórmio	1,0 mg/L
Dicloroetano	1,0 mg/L
Estireno	0,07 mg/L
Etilbenzeno	0,84 mg/L
Fenóis totais	0,5 mg/L
Tetracloroeto de carbono	1,0 mg/L

Tricloroetano	1,0 mg/L
Tolueno	1,2 mg/L
Xileno	1,6 mg/L

Fonte: BRASIL (2011)

## REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas. **Água na indústria: uso e coeficientes técnicos. Estudo da Agência Nacional de Águas.** Brasília, 2017.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Panorama das águas (Brasil e mundo).** Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas>. Acesso em 23/03/2019

AQUINO, V. **A importância da resina de troca iônica seletiva no reúso da água industrial,** 2009 Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigos-categoria/abastecimento-de-agua/>. Acesso em 28/03/2019.

BARROS, A. L. **Estudos de degradação de fármacos em meio aquoso por processos oxidativos avançados.** Disponível em: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16940/3/2014\\_dis\\_albarros.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16940/3/2014_dis_albarros.pdf). Acesso em: 08/07/2021.

BATISTA, G. R. **Estudo da Degradação de Paracetamol (Acetaminofeno) por Fotocatálise Heterogênea.** Disponível em: <http://repositorioinstitucional.uea.edu.br/bitstream/riuea/2458/1/Degrada%C3%A7%C3%A3o%20de%20amoxicilina%20por%20processos%20oxidativos%20avan%C3%A7ados.pdf>. Acesso em: 08/07/2021.

BILA, D. M.; DEZOTTI, M. **Fármacos no meio ambiente.** Química Nova, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, p. 523-530, jul/ago. 2003.

BIRD, R. B. STEWART, W. E. EDWIN; N. LIGHFOOT. **Fenômenos de Transporte.** 2ª Ed. Editora LTC, 1960.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rede de distribuição interna para gás combustível em instalações de uso não residencial de até 400 kPa — Projeto e execução, 2017. 36 p.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasil: Ministério do Meio Ambiente, 2001. 8 p.

CASRO, L. A. S.; MARCELINO, R. B. P. M.; STARLING; AMORIM C. C. C., D. LEÃO M. M. Foto Reator Solar para remoção de Poluentes e Desinfecção de Água: Critérios De Projeto E Montagem. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ.** 2014.

CASTRO, L. A. S.; MARCELINO, R. B. P.; STARLING M. C.; AMORIM, C. C, M. LEÃO, M. D. Foto Reator Solar Para Remoção de Poluentes e Desinfecção De Água: Critérios de Projeto e Montagem. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ),** 2014.

CHAN A. H. C, CHAN, C. K., BARFORD, J. P., PORTER, J. F. Photocatalytic thin film cascade reactor for treatment of organic compounds in wastewater. **Water Science and Technology.** Vol. 44, Nº 5, Pags: 187 – 195, 2001.

CHAN A. H. C. CHAN, C. K. BARFORD, J. P., PORTER, J. F. Solar photocatalytic thin film cascade reactor for treatment of benzoic acid containing waste water. **Water Research**. Pag 1125-1135, 2003.

COLOMBARI; F. S. GENENA; A. K. LENHARD, D. C.; CAVALLI, A. Tratamento terciário de efluente frigorífico por processo fenton. Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), 2014.

CONSUMO DE ÁGUA NOS PAÍSES DEPENDE DE DISPONIBILIDADE E NÍVEL DE INDUSTRIALIZAÇÃO. **FECOMERCIO, Federação do Comércio de Bens, Serviços e Turismo do Estado de São Paulo**. 2015. Disponível em: <http://www.fecomercio.com.br/noticia/consumo-de-agua-nos-paises-depender-de-disponibilidade-e-nivel-de-industrializacao>

Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes. **MMA – Ministério do Meio Ambiente**, 2019. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/seguranca-quimica/convencao-de-estocolmo>.

COSTA, G. L. **Tratamento terciário – Tecnologias utilizadas no litoral norte**. Tese de Mestrado UNESP, 2015.

COSTA, W. D. Contaminação de Água subterrânea por resíduo sólido o município de Belo Horizonte. **XIII Congresso Brasileiro de águas Subterrâneas**, 2014.

DAMONAR; JAGANNATHAN; SWAMINATHAN (2006) Decolourization of reactive dyes by thin film immobilized surface photoreactor using solar irradiation. **Solar Energy**. Cap. 8. Pag 1-7. 2007.

DIAS, I. N. **Degradação de fluoreno, sulfametoxazol e trimetoprima por fotocatalise, foto-fenton e foto-fenton mediado por complexos de ferrioxalato utilizando radiação solar natural e artificial**. Tese de Doutorado. UFRJ, 2015

DUARTE, E. **Processos Oxidativos Avançados (POA) – Tratamento de Água/Água Residual**. 2015.

EBA. Empresa Brasileira de Comunicação. “Onde está a água no Brasil?” <http://www.ebc.com.br/especiais-agua/agua-no-brasil/>. Acesso em 23/03/2019.

EMPRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária. **Grupo de pesquisa de Substâncias bioativas e nanomateriais**. Disponível em: [http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/36414/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o\\_Sofia%20M.%20N.%20Ferreira\\_2014.pdf](http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/36414/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Sofia%20M.%20N.%20Ferreira_2014.pdf). Acesso em 28/03/2019.

EXAME, 2017. “Água já tão valiosa quanto petróleo”, Disponível em: <https://exame.abril.com.br/mundo/agua-ja-tao-valiosa-quanto-petroleo-515371/>. Acesso em 28/03/2019.

- FERRAZ, V. V. S. **Caracterização de efluentes líquidos de uma indústria do setor de produção de cosméticos**. Revisão Bibliográfica UniLasalle, 2013.
- FERREIRA, S. M. N. **Fotodegradação de micropoluentes orgânicos emergentes**. Universidade do Minho, 2014.
- FIGUEIREDO, M., SANTOS, E. P., & SCHMACHTENBERG, N. (2014). Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, 18(1), 79-91.
- FLORES, A. V. RIBEIRO, J. N. NEVES, A. A. QUEIROZ, E. L. R. Organoclorados: um problema de saúde pública. **Ambiente e Sociedade**. Vol 7, Nº 2. 2004.
- FREIRE, L. F. A., FONSECA, F. V., YOKOYAMA, L., TEIXEIRA, L. A. C. Study of solar photo-Fenton system applied to removal of phenol from water. **Water Science & Technology**. 2014.
- GAFFNEY, V. J. CARDOSO, V. V., RODRIGUES, A., FERREIRA, E., BENOLIEL, ALMEIDA, C. M. M. **Análise de fármacos em águas por SPE-UPLC-ESI-MS/MS**. Lisboa, Portugal, 2013.
- GOMES, K. P. Estudo da Degradação do Atenolol e do Paracetamol em Reator Batelada pPor Fotólise Direta, peroxidação Fotoassistida e Fotocatálise Heterogênea. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Estado do Amazonas, 2020.
- GOURBESVILLE, P. Challenges for integrated water resources management. **Physics and Chemistry of the Earth**. 33, 284-289. 2008
- INPE, INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Verificação do índice diário de UV. 2019 Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. <https://www.cptec.inpe.br/am/manaus>
- JUSTO, G. C. SPURI R., FRANCISCO F. V. F. F. **A Tecnologia de Filtração por Osmose Reversa para reuso de Efluentes em Indústria Alimentícia** - Unidade Bunge Jaguaré, 2015.
- KATSUMATA, P. C. **Degradação de Fármacos em Meio Aquoso por Meio de Fotólise e Peroxidação Fotoassistida**. 2014. 116p. Dissertação Mestrado em Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- LAZO, E.A. H. XAVIER, C.R. **Tratamento Terciário de Adsorção em Carvão e Argila Aplicado a Efluentes de Celulose Kraft**. Congresso Brasileiro de Química, 2014.
- LIMA, R. N. RIBEIRO, C. B. M., BARBOSA, C. C. F. **Estudo da poluição pontual e difusa na bacia de contribuição do reservatório da usina hidrelétrica de Funil utilizando modelagem espacialmente distribuída em Sistema de Informação Geográfica**, 2016.
- LIMA, W. P. Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas. Dezembro, 2008.
- LOPES, V. E. S. **Degradação De Paracetamol Por Fotólise Direta E H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV em Reator Tubular**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Estado do Amazonas, 2019.

MELLO, E. J. R. **Tratamento de Esgoto Sanitário – Avaliação da estação de tratamento de esgoto do Bairro Novo Horizonte na cidade de Araguari – MG.** Uberlândia, 2007.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: treatment, disposal, and reuse.** 3rd Ed. New York: McGraw- Hill, 1991.

NAPOLEÃO, D. C., MENDES, L. E., ZAIDAN, C., SALGADO, J. B. A., SALES, R. V. L., SILVA, V. L. Degradação do Contaminante Emergente Paracetamol Empregando Processos Oxidativos Avançados. Santa Maria, v. 19, n. 3, p. 725-734 **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas.** UFSM ISSN 2236117. set-dez, 2015

NASCIMENTO, D. J. FILHO ALBEZ, H. T. LIMA, G. G. C. L. Utilização do Reator PTC no Tratamento de águas de Lavagem de Biodiesel através da Fotocatálise Heterogênea TiO<sub>2</sub>/UV solar. Agência Brasileira de Esgotamento Sanitário – ABES. 2014.

NEWMAN, P. Sustainable urban water systems in rich and poor cities - steps towards a new approach. **Water Science and Technology**, 43(4), 93–99, 2001.

OLIVEIRA, E. J. A. MOLICA, R. J. R. **A Poluição das águas e as cianobactérias.** Recife, IFPE, 2017.

ONU Meio Ambiente e parceiros miram a poluição nos rios para reduzir lixo marinho. **ONU – Organização das Nações Unidas.** 2017. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/onu-meio-ambiente-e-parceiros-miram-a-poluicao-nos-rios-para-reduzir-o-lixo-marinho/>. Acesso em 28/03/2019.

OPERSAN. Os níveis de tratamento de efluentes. Disponível em: <http://info.opersan.com.br/n%C3%ADveis-de-tratamento-de-efluentes>. Acesso em 28/03/2019.

ORTEGA, J. A. T., MEDINA, G. M. PALACIOS, O. Y. S. CASTELLANOS, F. J. S. Mathematical Model of a *Falling Film Reactor* for Methyl Ester Sulfonation. **Chemical Product And Process Modeling.** Vol. 4: Iss. 5, Artigo 12, 2009.

PEREIRA, R S. Identificação e caracterização das fontes de poluição em sistemas hídricos. **Revista Eletrônica de recursos hídricos.** UFRGS, 2004.

RAÚJO, K. S. ANTONELLI, R. GAYDECZKA, B. GRANATO, A. C. MALPASS, G. R. P. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science.** Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais, 2016.

Relatório 40.674. **SIGRH – Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo.** Cap. 7, , 2014.

SATINDER, A. **Handbook of water purity and quality.** London: Academic, 2009.

SILVA, A. L. **A utilização do modelo WinHSPF no estudo das cargas difusas de poluição da bacia do ribeirão da estiva, SP.** Tese de Mestrado, 2013.

SILVA, J. C. A. **Recuperação de córregos urbanos através do controle de cargas pontuais e difusas**. Estudo de caso: córrego Ibiraporã e do Sapé. São Paulo, 2013.

SILVA, S. A., MARA, D. D. Tratamentos biológicos de águas residuárias: lagoas de estabilização. Rio de Janeiro: ABES. 1979, 139p.

Sistemas de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa Emissões do setor de resíduos: Avaliação período 1990-2016 – SEEG, 2018.

STEIN, R. T. **Caracterização e avaliação do sistema de tratamento e efluentes de uma indústria alimentícia, visando o reuso**. Trabalho de Conclusão de Curso. Lajeado, 2012.

Sustainable Development Goals: 6. Clean water and Sanitation. ONU – **Organização das Nações Unidas**. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/> Acesso em: 23/03/2019.

SUVINIL. Boletim técnico: tinta fosca branca para parede. Disponível em: <https://www.suvinil.com.br/upload/21277ac4-642f-420a-9b6b-7114c70afc79-suvinil-classicamaio2018pt.pdf>

THE WEATHER CHANNEL. Previsão meteorológica mensal para Manaus – Amazonas. Disponível em: <https://weather.com/pt-BR/clima/mensalmente/l/31e462c58d5ba1ab163461ff0a50018c812d8f2491b43a8e71db82e80679bc57>

TÔRRES, A. R. **Modelagem E Simulação De Reatores Fotocatalíticos**. COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Química. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 296p, 2007

Tratamento de esgoto falha na remoção de fármacos. Scientific American Brasil. 2019. Disponível em: <https://www2.uol.com.br/sciam/>. Acesso em 12/03/2019.

VETTORELLO, G. BRANDT, V. DALLAZEN, M. C. KUNH, D. ETGETON, HR. P. SPELLMEYER. J. G. CARLESSO, W. M. HOEHNE. L. Micropoluentes em água – o novo desafio emergente. **Revista Caderno Pedagógico**. Vol. 14, nº 01, Lajeado, 2017.

VILAR, V. J. P., ROCHA, E. M. R. **Landfill leachate treatment by solar-driven AOPs**. Tese de Doutorado, UFPB, 2011.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte, UFMG. v.2. 1996.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte, UFMG. v.2. 1996

YEONGA, K. K., ASTERIOS GAVRIILIDISA, A RALF ZAPFB, VOLKER HESSELB Catalyst preparation and deactivation issues for nitrobenzene hydrogenation in a microstructured *falling film reactor*. **Catalysis Today**. 81. 641–651. 2003

ZAHED FILHO, K. PORTO, M. F. A.; SOARES, P. F. **Cargas Difusas de Poluição e seu Impacto em Mananciais para Abastecimento Público**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Universidade de São Paulo.