

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO - UFTM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS E EXATAS - ICTE
Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica – PMPIT

PAULO HENRIQUE LOPES ALVES

USO DA CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA O
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

UBERABA

2018

PAULO HENRIQUE LOPES ALVES

**USO DA CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA O
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, área de concentração em Desenvolvimento e Aplicações de Tecnologia para Meio Ambiente, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Professor Orientador:
Prof. Dr. Julio Cesar de Souza Inácio
Gonçalves

Professor Co-orientador:
Prof. Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira

UBERABA

2018

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

A481u Alves, Paulo Henrique Lopes
 Uso da cavitação hidrodinâmica para o tratamento de águas res-
 duárias / Paulo Henrique Lopes Alves. -- 2018.
 111 f. : il., fig., graf., tab.

 Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) --
 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2018
 Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves
 Coorientador: Prof. Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira

 1. Águas residuais. 2. Água - Tratamento. 3. Água - Purificação. 4.
 Cavitação. I. Gonçalves, Julio Cesar de Souza Inácio. II. Universidade
 Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

 CDU 628.3

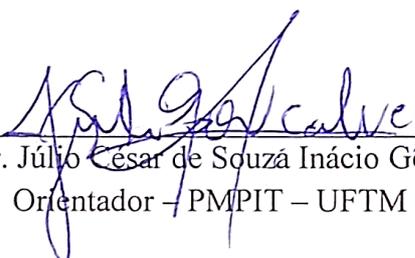
PAULO HENRIQUE LOPES ALVES

**USO DA CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA O
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, área de concentração em Desenvolvimento e Aplicações de Tecnologia para Meio Ambiente, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Uberaba, 13 de junho de 2018

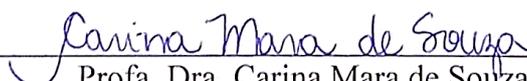
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Júlio César de Souza Inácio Gonçalves
Orientador – PMPIT – UFTM



Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva
Membro Titular – UFTM



Profa. Dra. Carina Mara de Souza
Membro titular – FACTHUS

*Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas.
Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem
grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto
as cheias as baixam para a terra, sua mãe.
(Leonardo da Vinci)*

*Dedico este trabalho a todos aqueles que entendem
que, quanto mais estudamos, menos entendemos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à vida e suas infindáveis oportunidades que, ao escolher o caminho certo, nos brinda e recompensa com resultados espetaculares.

Ao meu orientador **Dr. Júlio Cesar de Souza Inácio Gonçalves** que, de forma muito inovadora, me escolheu para orientar graças ao meu currículo de graduação. Esse mérito eu pude levar como motivação para atender suas expectativas. Dessa maneira, agradeço veementemente você Júlio, que além de orientador, foi um parceiro para que estes estudos se concretizassem. A você, minha imensurável gratidão.

Ao meu co-orientador, **Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira**, pela dedicação e apoio durante a realização desse trabalho. Sem seus conhecimentos químicos e força, nenhum cálculo estequiométrico poderia ser feito com tamanha maestria.

Aos meus pais, irmãos, família e amigos, pelas eternas parcerias.

Ao meu sócio e dileto amigo, **Pitágoras de Oliveira**, pelos momentos em que firmemente segurou sozinho os afazeres da empresa enquanto eu me dedicava a este estudo. Não se preocupe, os frutos deste trabalho, virão!

À **Labfert Análises**, que além de proporcionar um valor camarada nas análises de DQO, contribuiu com agilidade nos resultados.

Por fim, à **Refrigerantes Golé**, em nome de seu Diretor Industrial, Sr. Renato Castro, na cessão do efluente para nossas aferições para futura replicação industrial. Nosso muito obrigado.

RESUMO

O tratamento de efluentes industriais tem sido um desafio para as tecnologias modernas que combinam alta eficácia de degradação de poluentes com baixos custos do processo. O presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial da cavitação hidrodinâmica em degradar compostos orgânicos de águas residuárias. Os experimentos de degradação foram realizados em um tubo Venturi e placa de orifício. Utilizou-se um efluente sintético a partir de uma solução aquosa de sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}$), com pH 2,5 em diferentes valores de pressão (2, 4, 6 e 7,3 bar), tanto no tubo Venturi quanto na placa de orifício. Os intervalos de coleta de amostra foram de 0', 3', 6', 9', 12' e 15' e durante todo o processo, houveram variações de temperatura, chegando a 47°C. Empregou-se peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30 % (m/m) como agente oxidante, na proporção aproximada de 1 mol de $C_{12}H_{22}O_{11}$ para 20 mols de H_2O_2 . A eficiência do processo de cavitação foi determinada a partir da redução da Demanda Química de Oxigênio (DQO) do efluente sintético tratado. Os resultados encontrados foram de que a eficiência de remoção da placa de orifício mostrou consideráveis degradações (média de 82,5%), contudo a metodologia escolhida como de melhor performance e também aplicada no efluente da indústria de refrigerantes, foi a metodologia usando o tubo Venturi. Esta opção demonstrou que, além da eficiência final (média de 94%), o comportamento nos intervalos até o atingimento dos 15 minutos foi relevante, sobretudo na pressão de 4,0 bar, onde com os mesmos 48mL de peróxido utilizado em todos os ensaios, foi obtido um pico de eficiência logo aos 3' (90% de eficiência) até o atingimento dos 94% de eficiência aos 15', sendo escolhida esta metodologia e ensaio para testagem no efluente da indústria de refrigerantes (tubo Venturi a 4,0 bar). Ao replicar o ensaio em um efluente real da indústria de refrigerantes, foi obtida eficiência superior a 70%, mesmo com a diferença na relação estequiométrica calculada nos ensaios usando água e sacarose, conforme explanado no presente estudo. Assim, foram atendidos os objetivos propostos, ratificando a cavitação hidrodinâmica como um importante método a ser inserido nas indústrias como processo mitigador de impactos.

Palavras-chave: águas; eficiência; efluente; oxidação; processo.

ABSTRACT

The treatment of industrial effluents has been a challenge for modern technologies that combine high efficiency of pollutant degradation with low process costs. The present study aimed to evaluate the potential of hydrodynamic cavitation in degrading organic compounds from wastewater. The degradation experiments were performed in a venturi tube and orifice plate. A synthetic effluent was used from an aqueous sucrose solution ($C_{12}H_{22}O_{11}$), with pH 2.5 at different pressure values (2, 4, 6 and 7,3 bar), both in the Venturi tube and in the orifice plate. The sample collection intervals were 0', 3', 6', 9', 12' and 15' and throughout the process there were temperature variations, reaching 47 ° C. Hydrogen peroxide (H_2O_2) at 30% (m / m) was used as the oxidizing agent in the approximate ratio of 1 mole $C_{12}H_{22}O_{11}$ to 20 moles of H_2O_2 . The efficiency of the cavitation process was determined by reducing the Chemical Oxygen Demand (COD) of the treated effluent. The results showed that the removal efficiency of the orifice plate showed considerable degradation (mean of 82.5%), however the methodology chosen as the best performance and also applied in the effluent of the refrigerant industry was the methodology using the tube Venturi. This option demonstrated that, in addition to the final efficiency (mean of 94%), the behavior in the intervals until reaching the 15 minutes was relevant, especially in the pressure of 4.0 bar, where with the same 48mL of peroxide used in all the tests , an efficiency peak was obtained at 3' (90% efficiency) until reaching 94% efficiency at 15', and this methodology and test was chosen for testing the effluent of the refrigerant industry (Venturi tube at 4.0 Pub). By replicating the assay in an actual effluent from the refrigerant industry, an efficiency greater than 70% was obtained, even with the difference in stoichiometric ratio calculated in the assays using water and sucrose, as explained in the present study. Thus, the proposed objectives were met, ratifying the hydrodynamic cavitation as an important method to be inserted in the industries as an impact mitigation process.

Keywords: water; efficiency; effluent; oxidation; process.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Destruição de <i>E. coli</i> após tratamento com cavitação..... | 20 |
| Figura 2 - Esquema de formação de bolhas de gás no tubo Venturi por cavitação hidrodinâmica. P1 / P3 pressão estática antes / depois da garganta, P2 - pressão estática na garganta, P - pressão de vapor de líquido. | 24 |
| Figura 3 - Esquema teórico da CH como um POA..... | 25 |
| Figura 4 - Cavitação hidrodinâmica observada em um tubo Venturi | 27 |
| Figura 5 - Documentos sobre cavitação combinados com POAs no tratamento de águas residuais de 2000 a 2016 (com base nos arquivos base Scopus.com) | 28 |
| Figura 6, 7 e 8 - Esquemas do tubo Venturi utilizado neste experimento | 30 |
| Figura 9 - Protótipo desenvolvido: (1) entrada da sacarose e do efluente; (2) bombas de inserção no sistema; (3) registro controlador de vazão; (4) medidores de pressão; (5) tubo de Venturi em acrílico para visualização do processo; (6) trocador de calor. | 33 |
| Figura 10 - Protótipo utilizando placa de orifício. | 34 |
| Figura 11 - Esquema ilustrativo simplificado dos principais componentes do sistema de cavitação. P1, P2 – pontos de medição da pressão à montante e à jusante da câmara de cavitação, respectivamente; R1, R2, R3 – registros ao longo do sistema. | 35 |
| Figura 12 - Tubo de Venturi modificado, utilizado para geração da cavitação hidrodinâmica. | 36 |
| Figura 13 - utilizado para geração da cavitação hidrodinâmica..... | 36 |
| Figura 14 - Controlador digital de pressão PCT-400Ri plus da marca Full Gauge ®. | 37 |
| Figura 15 - Bomba dosadora da marca ProMinent ®. | 38 |
| Figura 16 – Análise de variação de temperatura no sistema de aquisição de dados. | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 17 - Refratômetro Instrutherm RT-280 utilizado nas aferições | 41 |
| Figura 18 - Alíquotas para detecção da possível degradação, realizado nos intervalos de 10 minutos, sendo 09 (nove) alíquotas, totalizando 90 (noventa) minutos de corrida analítica. | 41 |
| Figura 19 - Eficiência de degradação na placa de orifício | 46 |
| Figura 20 - Temperaturas aferidas no sistema em placa de orifício | 47 |
| Figura 21 - Eficiência de degradação na placa de orifício | 49 |
| Figura 22 - Temperaturas aferidas no sistema em tubo Venturi..... | 50 |
| Figura 23 - Evolução da eficiência de degradação em minutos | 51 |
| Figura 24 - Eficiência degradativa na água residuária de uma indústria de refrigerante | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Potencial de redução de alguns oxidantes..... | 22 |
| Tabela 2 – Perfil metodológico de coleta de amostras..... | 43 |
| Tabela 3 - Análise de DQO na placa de orifício (sacarose) | 45 |
| Tabela 4 - Análise de DQO no tubo Venturi (sacarose) | 48 |
| Tabela 5 - Análise de DQO no tubo Venturi (efluente da indústria)..... | 53 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | JUSTIFICATIVA | 17 |
| 3 | OBJETIVOS | 18 |
| 3.1 | OBJETIVOS GERAIS..... | 18 |
| 3.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 18 |
| 4 | REVISÃO TEÓRICA | 19 |
| 4.1 | EFLUENTES INDUSTRIAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS | 19 |
| 4.2 | TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES: PROCESSOS E TÉCNICAS ... | 20 |
| 4.2.1 | TRANSFERÊNCIA DE FASE | 20 |
| 4.3 | PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POA) | 21 |
| 4.4 | CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA | 23 |
| 5 | MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| 5.1 | TUBO VENTURI | 30 |
| 5.2 | PLACA DE ORIFÍCIO..... | 31 |
| 5.3 | APARATO EXPERIMENTAL | 33 |
| 5.4 | MONTAGEM DO SISTEMA | 34 |
| 5.5 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 39 |
| 5.5.1 | ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DA SACAROSE SEM ADIÇÃO DE PERÓXIDO..... | 40 |
| 5.5.2 | ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DA SACAROSE COM ADIÇÃO DE PERÓXIDO..... | 42 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 44 |
| 6.1 | ANÁLISE DOS RESULTADOS AFERIDOS NA PLACA DE ORIFÍCIO | 45 |
| 6.2 | ANÁLISE DOS RESULTADOS AFERIDOS NO TUBO VENTURI | 47 |
| 6.3 | RESULTADOS AFERIDOS NA PERFORMANCE ESCOLHIDA | 52 |
| 7 | CONCLUSÃO | 55 |
| | REFERÊNCIAS | 56 |
| | ANEXOS | 59 |

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de efluentes industriais tem sido um desafio para as tecnologias modernas que combinam alta eficácia de degradação de poluentes com baixos custos do processo. Ao mesmo tempo, as novas tecnologias devem incorporar o conceito cada vez mais aplicado de “Química Verde” (FERREIRA; ROCHA; SILVA, 2014).

Ferreira e colaboradores (2014) também comentam que há tempos que esta área da Química que visa mitigações ambientais, vem alertando sobre os prejuízos que os processos químicos podem causar ao meio ambiente, sendo que “o principal paradigma da Química Verde é reduzir ou eliminar o uso ou a geração de substâncias perigosas durante o planejamento, manufatura e aplicação de produtos químicos”.

Essa abordagem vem de encontro ao incentivo numa produção mais limpa e com menos poluentes industriais, garantindo que os fabricantes assumam uma maior responsabilidade para seus produtos.

É, portanto, uma área promissora de pesquisas que tratam do desenvolvimento de tecnologias eficazes para a degradação de produtos químicos específicos, compostos ou grupos selecionados de poluentes (GAŁOŁ; PRZYJAZNY; BOCZKAJ, 2018).

As empresas no mercado atual, quer seja por consciência ou rigidez legal, passaram a se preocupar mais com os quesitos ambientais para seu devido funcionamento, em aspectos ora denominados de progresso racional.

É sabido que existem uma série de poluentes que podem estar presentes nos efluentes das empresas que, sobretudo, manufaturam produtos químicos. Dessa maneira, é salutar que estas cumpram legislações ambientais para reduzir os seus impactos.

A utilização de água pela indústria pode ocorrer de diversas formas nas etapas do processo industrial ou diretamente nos produtos. Grandes volumes de água podem estar contaminadas por resíduos do processo industrial ou pelas perdas de energia térmica, originando assim os efluentes líquidos (GIORDANO, 2004).

Sabe-se que existe no mercado atual uma visão mais consciente acerca dos processos, com a implantação de ações ambientalmente corretas, atualização

constante das legislações, programas educativos empresariais, maior necessidade da conservação de recursos naturais e diminuição do impacto ambiental provocado pelos resíduos (GIORDANO, 2004).

Dessa forma, é questão de sobrevivência mercadológica a adoção de medidas que visem adaptar processos industriais, utilizando-se de pesquisas já em andamento e, também, desenvolvendo novos procedimentos e mecanismos limpos.

Há uma limitação das reservas de água doce no planeta, com aumento de sua demanda para atender o consumo humano, agrícola e industrial, e as restrições impostas em relação ao lançamento de efluentes no meio ambiente, tornando necessária a adoção de estratégias que visem racionalizar a utilização dos recursos hídricos (MARTINS, 2011).

Um método que pode ser usado atualmente é o Processo Oxidativo Avançado (POA), que trata de processos de oxidação que geram, entre outros, radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), exatamente o foco desse estudo, que são altamente oxidantes, contudo extremamente instáveis, mas em quantidade suficiente para provocar a mineralização da matéria orgânica à dióxido de carbono, água e íons inorgânicos (ABDALA NETO et al., 2014).

Os POAs possuem peculiar característica de transformar os contaminantes em outras substâncias, conforme ratificado por Domenech e Cols. (2001), sendo que combinando processos coadjuvantes, como a cavitação e ultravioleta (UV) ou, como proposto no trabalho, uso do Peróxido de Hidrogênio como oxidante, pode-se produzir resultados ainda melhores (GASHCHIN; VITEN'KO, 2011).

Para maior eficiência do método, os POAs também podem ser utilizados em conjunto com tratamentos biológicos para aumentar a biodegradabilidade, podendo diminuir o tempo de tratamento (BRITO; SILVA, 2012).

No tocante aos variados métodos inerentes aos POAs, vale aqui destacar o foco do trabalho que é o processo de cavitação hidrodinâmica. As técnicas de cavitação hidrodinâmica têm atraído a atenção de muitos pesquisadores nos últimos anos devido à sua capacidade de degradar vários poluentes orgânicos em moléculas de cadeia curta. A cavitação hidrodinâmica refere-se à formação, ao crescimento e subsequente colapso de bolhas de vapor (RAUT-JADHAV et al., 2013).

Diversos pesquisadores utilizaram a cavitação hidrodinâmica como hipótese metodológica na busca do estado da arte de seus trabalhos. Para tanto,

foram utilizados variados agentes oxidantes e efluentes a serem degradados conforme é visto a seguir.

Dentre os efluentes, pode-se citar inseticidas (RAUT-JADHAV et al., 2013) e soluções de bactérias (MEZULE et al., 2009). Como oxidantes, foram utilizados peróxido de hidrogênio (como no experimento do primeiro autor citado neste parágrafo), além de pesquisas com a ozonização (JYOTI; PANDIT, 2004a) e dióxido de cloro (MASLAK; WEUSTER-BOTZ, 2011).

Outros autores pesquisaram também a cavitação hidrodinâmica buscando seus efeitos físicos e bactericidas (JYOTI; PANDIT, 2004b) e, a exemplo deste trabalho, buscaram a melhor forma de produzir a cavitação hidrodinâmica, usando várias técnicas como o tubo Venturi, as placas de orifício, rotores, etc.

2 JUSTIFICATIVA

A justificativa desta pesquisa se dá pelo fato de que as empresas e demais órgãos que lançam os mais variados tipos de efluentes, necessitam reduzir sua carga poluidora, de forma ambiental e economicamente sustentável.

Os métodos tradicionais de tratamento de efluentes são onerosos, sendo assim, o presente estudo visa contribuir com a academia para que este método alternativo possa ser cada vez mais aperfeiçoado e implantado em escala industrial.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar o potencial da cavitação hidrodinâmica em oxidar compostos orgânicos. Para tanto, foram utilizados dois dispositivos de cavitação: uma câmara Venturi e uma placa de orifício.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Especificamente, objetivou-se medir o grau de eficiência da degradação destes compostos orgânicos, usando como parâmetro a redução da Demanda Química de Oxigênio (DQO).

4 REVISÃO TEÓRICA

4.1 EFLUENTES INDUSTRIAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Para maiores entendimentos sobre os efluentes, uma das bibliografias mais respeitadas, é a NBR 9800:1987, que aponta que “efluente líquido industrial é o despejo líquido proveniente do estabelecimento industrial, compreendendo emanções de processo industrial, águas pluviais poluídas e esgoto doméstico” (ABNT, 1987).

Como a legislação ambiental brasileira é relativamente recente, sendo a Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) de 1981 e a Lei de Crimes Ambientais de 1998, passou-se muito tempo sem existir uma preocupação em caracterizar a geração de efluentes líquidos industriais e avaliar seus impactos no meio.

A legislação vigente tem empreendido maior fiscalização e conscientização ambiental, fazendo com que algumas indústrias desenvolvam o pleno atendimento a condicionantes inerentes ao processo de licenciamento.

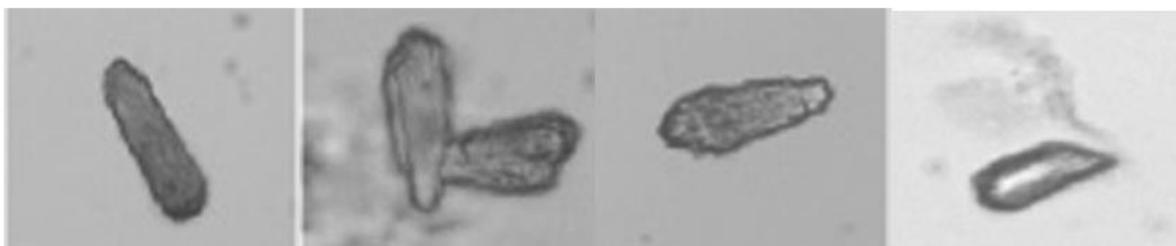
Dessa forma, usando a racionalidade do gerenciamento adequado dos efluentes, torna-se importante minimizar impactos ambientais, o que exige a adoção de procedimentos específicos de coleta e tratamento (MARTINS, 2011).

Martins (2011) enuncia ainda que a escolha da tecnologia mais adequada para o tratamento de um efluente depende da análise detalhada dos tipos e características dos contaminantes que deverão ser eliminados ou minimizados, já que a maioria dos processos e operações unitárias de tratamento, com pequenas exceções, são aplicáveis para classes muito específicas de contaminantes.

A grande maioria destes efluentes irá, de alguma forma requerer sua degradação através do uso de oxigênio, denotando assim, sua demanda, seja bioquímica, química ou ambas.

O processo de cavitação também é capaz de reduzir a carga de microrganismos, conforme experimentos, cujos estudos podem ser aferidos na imagem a seguir, que demonstra a destruição de *Escherichia coli* após tratamento com cavitação.

Figura 1 - Destruição de *E. coli* após tratamento com cavitação, aumento de 20.000 vezes.



Fonte: GASHCHIN; VITEN'KO. 2011

Os efluentes líquidos podem ainda apresentar diversas características indesejáveis e também ilegais de serem lançados sem tratamento, sendo assim necessários processos de tratamento antes de seu descarte.

Pode-se citar metais potencialmente tóxicos, pH e temperatura inadequados na zona de mistura, sólidos suspensos, excessos de nutrientes, substâncias tóxicas, matéria orgânica, levando a saturação das águas residuárias (RODRIGUES et al., 2003).

4.2 TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES: PROCESSOS E TÉCNICAS

Para maiores esclarecimentos acerca das suas características, os métodos de tratamento de efluentes industriais convencionais são divididos atualmente em dois grandes grupos: os baseados na transferência de fase e os processos oxidativos (TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

4.2.1 TRANSFERÊNCIA DE FASE

De acordo com Teixeira & Jardim (2004), estes processos baseiam-se na transferência de fase do contaminante, sendo obtidas duas fases: uma composta pela água limpa e outra pelo resíduo contaminante concentrado.

Os mesmos autores comentam ainda que, normalmente, o referido processo é empregado nas Estações de Tratamento de Água (ETA), incluindo: precipitação, coagulação, floculação, sedimentação, flotação e filtração. São métodos mais usados inclusive nas Estações de Tratamento de Água (ETA).

De forma mais específica, tem-se a centrifugação e a osmose reversa (TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

4.3 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POA)

Historicamente, a utilização de oxidantes fortes para tratamento e desinfecção de água é antiga. O primeiro trabalho utilizando ozônio como desinfetante foi feito por De Meritens em 1886. Entretanto, somente em 1973, durante o primeiro Simpósio Internacional em Ozônio para Tratamento de Águas e Efluentes, foi usada a terminologia “Tecnologias de Oxidação Avançada” (BRITO; SILVA, 2012).

Neste trabalho foi utilizada a combinação entre ozônio e radiação ultravioleta para oxidar complexos de cianeto, de acordo com os pesquisadores citados anteriormente.

Além disso, em 1972, Fujishima e Honda descrevem a oxidação da água em suspensão de óxido de titânio (TiO_2) gerando Hidrogênio e oxigênio e em 1976 foi publicado o primeiro trabalho utilizando fotocatalise heterogênea na degradação de contaminantes, tanto em fase aquosa quanto gasosa (Gálvez et al., 2001 apud TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

Ademais, um dos principais modelos matemáticos aplicados à qualidade da água foi desenvolvido por H.S. Streeter e E. B. Phelps em 1925, para o Rio Ohio. Este modelo foi utilizado para prever o déficit da concentração de oxigênio em um rio, causado pela descarga de águas residuárias (DE SOUZA SARDINHA et al., 2008).

Nos últimos anos, os POAs têm ganhado mercado nas análises e pesquisas, visto que é considerado um método eficiente na degradação de compostos, principalmente orgânicos, trazendo consigo a importância de ser considerado um método com custo operacional relativamente baixo (TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

As principais substâncias formadas são o dióxido de carbono, água e ânions inorgânicos, sobretudo com a formação de reações de degradação que envolve espécies transitórias oxidantes, principalmente os radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$), pois através do poder oxidativo dos mesmos é que será possível teoricamente a oxidação da matéria química e sua consequente redução da DQO (TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

Estes autores evidenciam que, de acordo com análises biofísicas, esses radicais têm potencial de redução de + 2,8 V, menor apenas que o do flúor, que é de + 3,03 V, como é apresentado na Tabela 1.

Este potencial de redução mede a espontaneidade, ou a tendência de uma espécie química em receber elétrons e, desse modo, ser reduzida, ou seja, quimicamente cria um processo de degradação, sobretudo da matéria orgânica, oxidada (MARTINS et al., 2011).

Stasinakis (2008) verifica que o principal mecanismo dos POAs é a geração de radicais livres hidroxila altamente reativos. Estes radicais são eficazes na destruição de produtos químicos orgânicos porque esses são eletrófilos reativos que reagem de forma rápida e não seletiva com quase todos os compostos orgânicos ricos em elétrons.

Tabela 1 - Potencial de redução de alguns oxidantes

| Espécie | Potencial redox (V) |
|--------------------------|---------------------|
| Flúor | + 3,03 |
| Radical hidroxila | + 2,80 |
| Oxigênio atômico | + 2,42 |
| Ozônio | + 2,07 |
| Peróxido de hidrogênio | + 1,78 |
| Permanganato | + 1,68 |
| Dióxido de cloro | + 1,57 |
| Cloro | + 1,36 |
| Iodo | + 0,54 |

Fonte: Domenech e cols. (2001)

O grande intuito da pesquisa é exatamente o mecanismo de desenvolvimento limpo do processo, inerente à incessante busca por sistemas mais

sustentáveis no mercado atual. Os POAs são considerados processos limpos e não seletivos, podendo degradar inúmeros compostos.

A fim de traçar uma análise comparativa ao processo de obtenção da hidroxila, que é um radical extremamente instável, é sabido que atualmente a forma de geração é através de reações envolvendo oxidantes fortes, como ozônio (O_3) e Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2), semicondutores, como dióxido de titânio (TiO_2) e óxido de zinco (ZnO) e irradiação ultravioleta (UV) (Mansilla et al., 1997).

Entretanto, podem-se complicar suas formas de obtenção através de análises técnico-financeiras, visto que estes reagentes podem vir a onerar seu processo de obtenção.

Apesar de alguns estudos mostrarem que o consumo energético pode ser reduzido, estes processos têm como desvantagem a limitação econômica que está relacionada ao alto custo da fonte de radiação UV quando comparado, por exemplo, com o custo de implementação do sistema eletroquímico, implicando em consumo de energia elétrica e custo de manutenção, ao alto custo do agente oxidante (DEZOTTI, 2008 apud SANTOS DE ARAÚJO et al., 2016).

Dezotti (2008) ainda citando Araújo (2016), comenta que tal inconveniente pode ser solucionado mediante o uso de energia solar, catalisadores de baixo custo e combinação com outros processos de tratamento, desde que não haja interferência no desempenho do processo.

Para tanto, mesmo sabendo que esses radicais podem ser formados por vários processos, aborda-se aqui, uma perspectiva científica inovadora, a fim de obter o radical $\cdot OH$ através da cavitação hidrodinâmica, utilizando para tal, um tubo de Venturi e também uma placa de orifício a fim de verificar a melhor performance metodológica, aliado a aditivos (Peróxido de Hidrogênio) e diferentes tipos de pressão em pH 2,5.

4.4 CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA

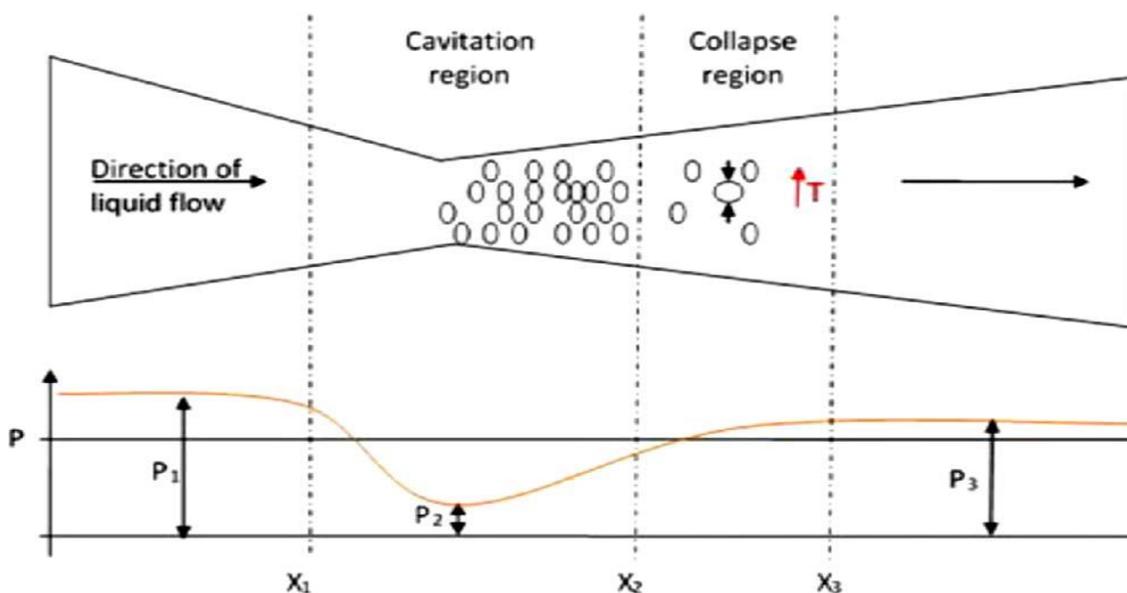
É produzida pela variação de pressão estática no escoamento de um líquido, devido à variação de velocidade do escoamento como resultado de uma mudança de geometria do conduto. É normalmente produzida numa constrição,

canais curvos ou como resultado de movimentos de corpos num líquido, como por exemplo, o movimento de uma hélice de um navio (GOMES, 2015).

Ocorrendo no líquido, a cavitação hidrodinâmica acontece quando bolhas de vapor se formam no líquido devido à queda de pressão. Dependendo do número e distribuição de partículas no líquido às quais bolhas de gás ou ar não dissolvido podem se agregar, a pressão no local de início da cavitação pode ser igual ou menor que a pressão de vapor do líquido, agindo como locais de nucleação que iniciam a vaporização (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2012).

Este fenômeno ocorre se a pressão em alguma seção do tubo é menor que a pressão de vapor do fluido. Para o processo, a cavitação se encontra na parte mais delgada do mesmo, já que ali, ao ser mínima a área e máxima a velocidade, a pressão é a menor que se pode encontrar no tubo, como visto na Figura 2 (CASSIOLATO; ALVES, 1998).

Figura 2 - Esquema de formação de bolhas de gás no tubo Venturi por cavitação hidrodinâmica. P_1 / P_3 pressão estática antes / depois da garganta, P_2 - pressão estática na garganta, P - pressão de vapor de líquido.



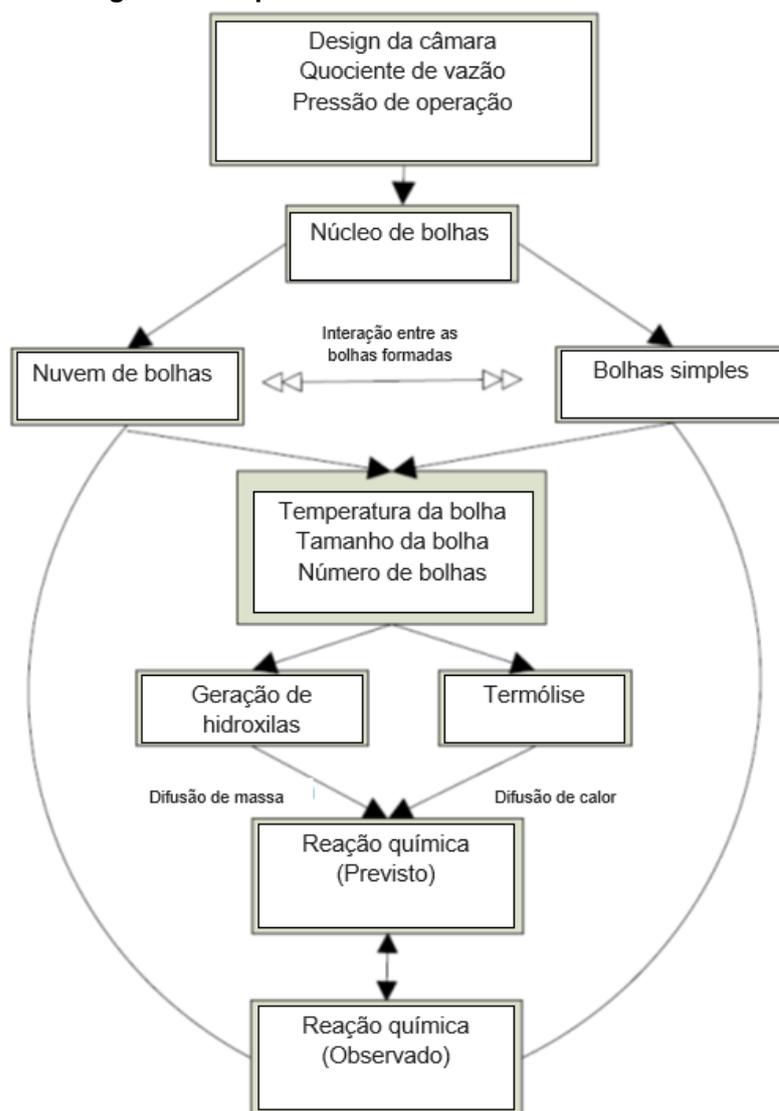
Fonte: GAĞOL; PRZYJAZNY; BOCZKAJ, 2018

Ainda de acordo com a Figura 2, Cassiolato & Alves (1998) explicam que quando ocorre a cavitação hidrodinâmica, geram-se bolhas e o líquido é capaz de mudar de estado (líquido para vapor), sendo que se trasladam ao longo do tubo.

Outro efeito importante é a geração de turbulência, que por sua vez tem efeito direto na intensidade de cavitação (GOGATE, PANDIT, 2011).

É possível entender esquematicamente na Figura 3 a cavitação hidrodinâmica como um processo de oxidação avançada.

Figura 3 - Esquema teórico da CH como um POA



Fonte: ARROJO; BENITO, 2008

Do ponto de vista da Engenharia do processo, a cavitação aplicada possui uma forma simples e eficiente de degradação de substâncias na água. A abordagem mais simples para o experimento é como uma soma de núcleo de bolhas, confrontando com um pulso de pressão e uma consequente resposta, sendo uma

crescente explosão seguida por colapsos de implosão, gerando picos de altas temperaturas (reação exotérmica) e reações químicas (ARROJO; BENITO, 2008)

A Figura 3 mostra uma simplificação deste esquema referente ao processo de cavitação hidrodinâmica. No retângulo superior (design, quociente e pressão), são apresentados os três parâmetros que definem o pulso de pressão a ser inserida no sistema.

Uma determinada população de núcleos de bolhas é confrontada, fazendo com que a oscilação da pressão permita que a cavitação ocorra. O processo pode ser estudado como uma soma de bolhas isoladas individuais ou como uma nuvem de cavidades interativas.

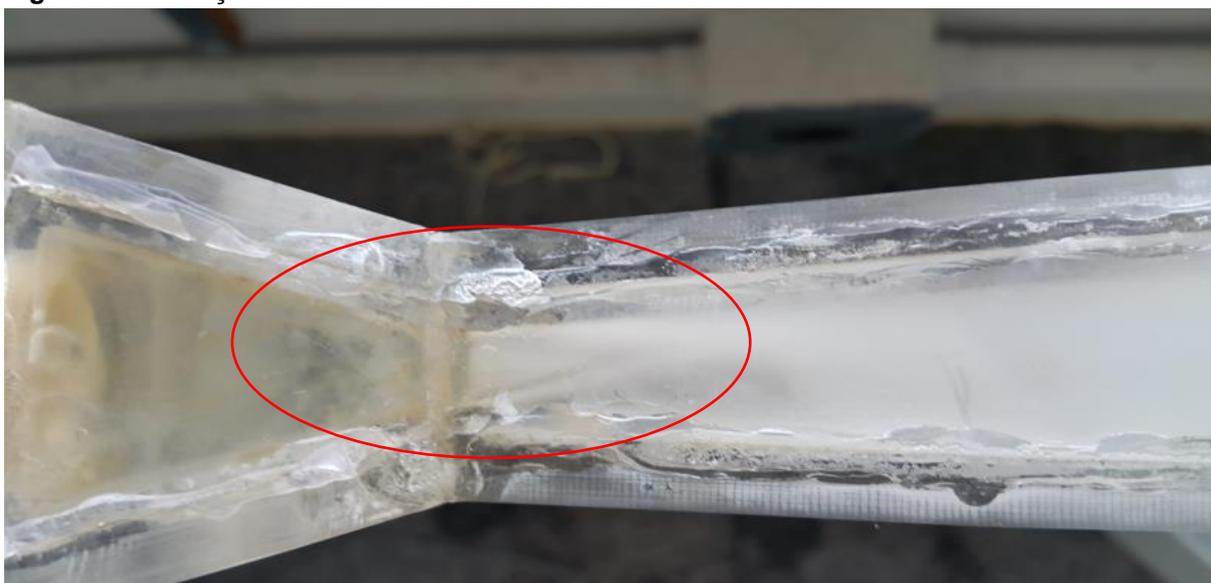
O último é uma abordagem mais realista, especialmente com grandes densidades de bolhas. O número de bolhas (número de eventos de cavitação), tamanho e aumento de temperatura pode então ser estimada experimentalmente (com reações químicas, conforme este estudo) e teoricamente (a partir de simulações computacionais) (ARROJO; BENITO, 2008).

Estes mesmos autores salientam que, eventualmente, as pesquisas devem ser capazes de prever algumas tendências básicas do sistema químico como função dos parâmetros que norteiam o estudo. Modelos matemáticos que sejam capazes de comparar estas previsões (reação química prevista) e os experimentos (reações químicas observadas) sendo usados como um feedback nos métodos de previsão.

Em outras palavras, a otimização deve ser realizada correlacionando resultados experimentais com os parâmetros norteadores. Essas correlações também devem ser usadas para construir sólidas bases teóricas para a crescente tecnologia da cavitação hidrodinâmica (ARROJO; BENITO, 2008).

Ademais, conforme explanado, a cavitação é produzida pela variação de pressão, que pode ser obtida utilizando a geometria do tubo Venturi ou uma placa de orifício. No caso do Venturi, por exemplo, com base na geometria do mesmo, diferença da pressão e cinética são capazes de gerar o fenômeno, conforme apresentado na Figura 4 (GOGATE, 2007).

Figura 4 - Cavitação hidrodinâmica observada em um tubo Venturi



Fonte: Autor, 2018

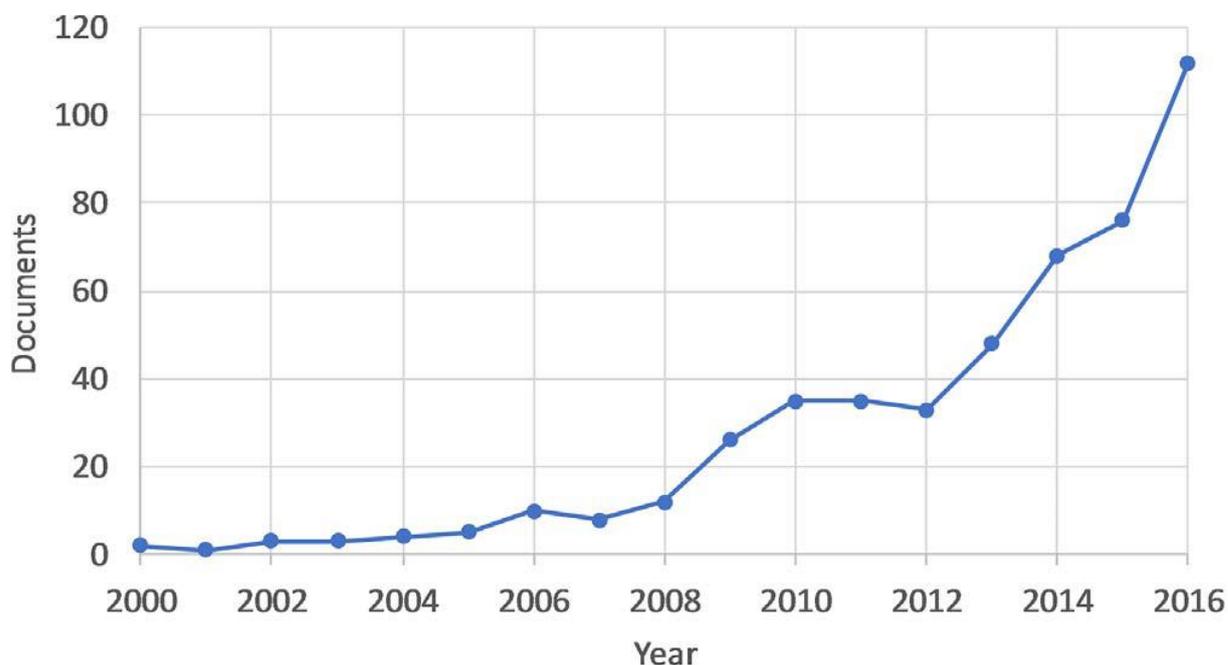
Logo a frente, no tubo, o que se analisa é exatamente o retorno ao estado líquido, gerando as hidroxilas (oxidativas) que, serão os agentes oxidantes responsáveis pela redução da matéria orgânica presente no efluente.

A degradação de poluentes orgânicos por cavitação hidrodinâmica ocorre tanto pela decomposição térmica, devido à geração de pontos quentes resultantes do colapso da cavidade, quanto pela oxidação química, devido à geração de espécies ativas como a hidroxila.

Do ponto de vista comercial e financeiro, a cavitação hidrodinâmica é vista como uma possível alternativa à cavitação ultrassônica em POA devido ao potencial de melhoria em termos de eficiência energética e acima de tudo pela capacidade desta técnica de trabalhar em grandes escalas (ARROJO; BENITO, 2008).

A afirmação do parágrafo anterior pode ser ratificada pelo aumento substancial de pesquisas acerca dos POAs combinados com a cavitação, conforme Figura 5.

Figura 5 - Documentos sobre cavitação combinados com POAs no tratamento de águas residuais de 2000 a 2016 (com base nos arquivos base Scopus.com)



Fonte: GAĞOL; PRZYJAZNY; BOCZKAJ, 2018

Verifica-se que na maioria das vezes, a cavitação hidrodinâmica auxiliada por POAs é usada na fase inicial do tratamento de efluentes, antes dos métodos biológicos, o que melhora a eficácia e reduz o custo do processo (GAĞOL; PRZYJAZNY; BOCZKAJ, 2018).

Ademais, a cavitação frequentemente tem menor eficiência de degradação quando aplicada individualmente e sua eficácia pode ser significativamente melhorada usando aditivos como o peróxido de hidrogênio, visto que, geralmente, a combinação de cavitação com estes aditivos leva a taxas de oxidação mais altas do poluente alvo devido ao aumento das espécies reativas, resistências à transferência de massa reduzida e aumento da turbulência gerada pela cavitação (RAUT-JADHAV et al., 2013).

Na literatura, verifica-se que foram usados variados métodos na tentativa de redução da DQO e outros parâmetros, como por exemplo, uso de tratamento convencional e processos de separação com membranas, contudo com resultados mínimos para a redução de DQO (ANDRES JUNIOR, 2015).

Entretanto, em um trabalho semelhante, Sereno Filho e colaboradores (2013) analisaram a eficiência da remoção de DQO de um efluente da indústria de

refrigerantes usando a técnica de tratamento primário em um reator anaeróbio de circulação interna, seguido de tratamento secundário em sistema de lagoa de aeração-polimento, obtendo resultados de média de 90% de decaimento.

Isto mostra que o presente estudo está no caminho certo em decorrência da eficiência aferida no efluente da indústria de refrigerantes (média de 70%), bastando melhorias futuras na relação estequiométrica para atingimento das eficiências aferidas na sacarose, donde surtirá efeitos ainda melhores que o trabalho dos autores supracitados, pois a técnica de cavitação hidrodinâmica tem custos menores do que os realizados usando reatores e lagoas.

A maioria dos trabalhos aponta como característica de eficiência, as análises de DQO. Ademais, de acordo com as resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, por enquanto não se preconiza analisar a DQO como um dos métodos para padronizar o lançamento de efluentes (BRASIL, 2005; 2011).

Porém, de acordo com Bado e colaboradores (2013), caminha-se para uma adequação destas normativas, visando a inserção da DQO nesse enquadramento, visto que algumas legislações ambientais estaduais já estabelecem limites máximos para este parâmetro no Índice de Qualidade de Águas (IQA) para reservatórios ou para empreendimentos industriais.

Dessa forma, métodos híbridos parecem ser a melhor solução para o tratamento de efluentes industriais, através do uso adicional de oxidantes externos, como o Peróxido de Hidrogênio, visando dar maior eficiência à metodologia, visto que estes efluentes contém uma carga complexa de poluentes.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 TUBO VENTURI

Parte fundamental do experimento apontado neste estudo, o efeito provocado pelo tubo Venturi ocorre, quando num sistema fechado, o fluido em movimento constante dentro de um duto uniforme comprime-se momentaneamente ao encontrar uma zona de estreitamento, diminuindo sua pressão e consequentemente aumentando sua velocidade ao atravessar a zona estreitada.

Nas Figuras 6, 7 e 8 são ilustrados com detalhes os desenhos utilizados para a confecção do tubo Venturi utilizado nos experimentos.

Figura 6- Esquemas do tubo Venturi utilizado neste experimento

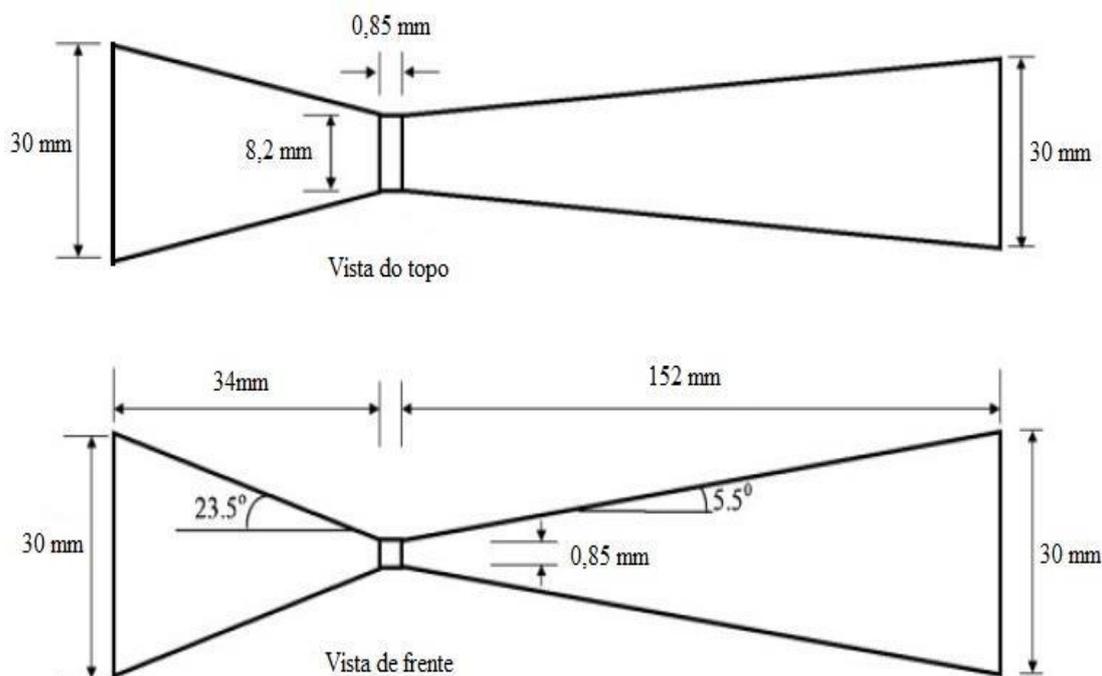


Figura 7 - Esquemas do tubo Venturi utilizado neste experimento

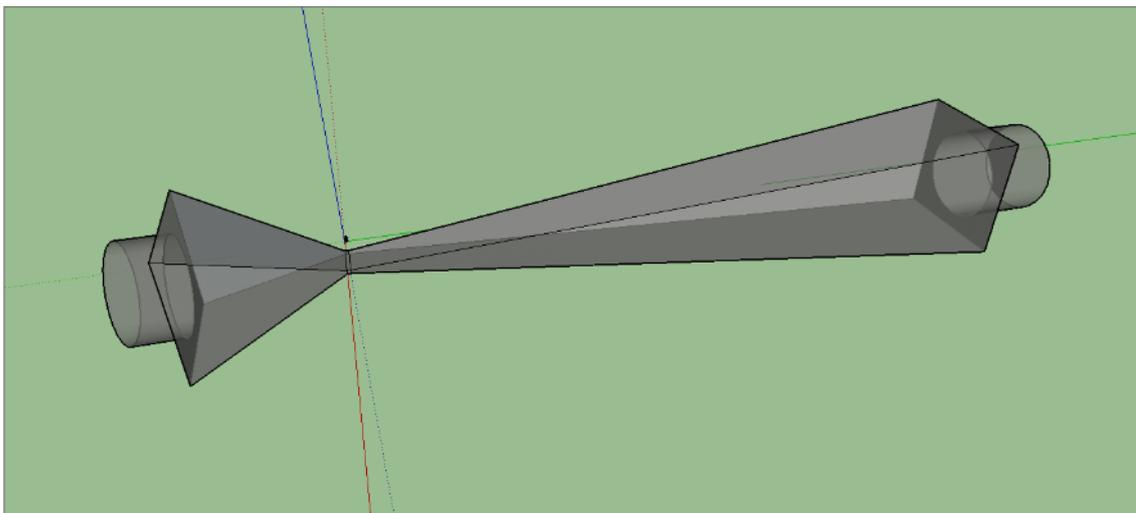
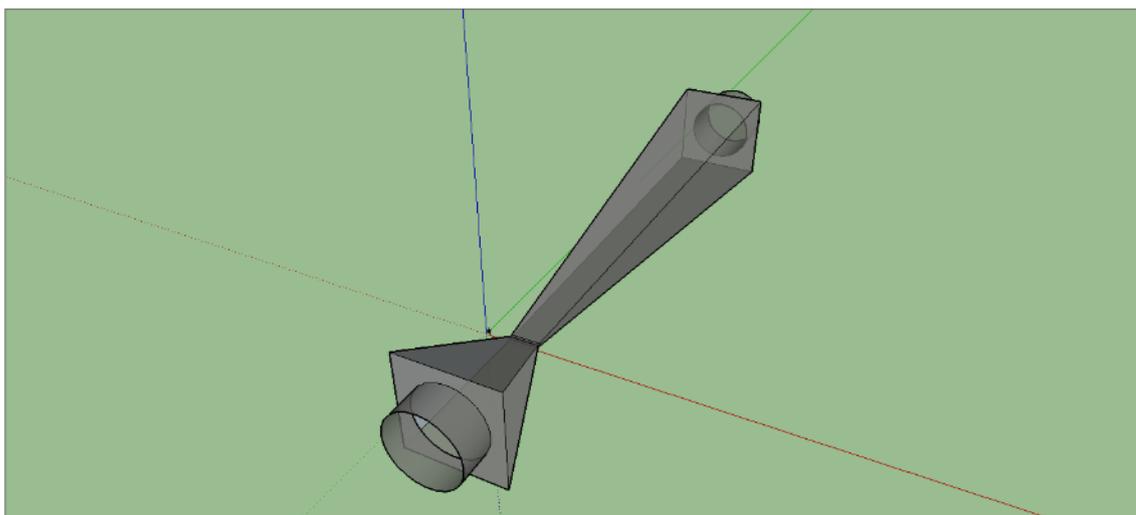


Figura 8 - Esquemas do tubo Venturi utilizado neste experimento



Fonte: Autor, 2018

5.2 PLACA DE ORIFÍCIO

A configuração da placa do orifício foi desenvolvida para gerar mais energia em comparação com outros tipos de cavitação hidrodinâmica (GOGATE et.al., 2001).

Os mesmos autores comentam ainda que existem muitos experimentos e pesquisas sobre o uso das estruturas de placas de orifício, como por exemplo, relação de abertura, espessura da placa e a forma de orifício.

De forma geral, a cavitação hidrodinâmica ocorre devido à pressão do orifício que declina a pressão de vapor saturada do líquido após a passagem do mesmo em alta velocidade através da placa com vários furos e colapsa no final da estrutura, a jusante da área há uma recuperação de pressão (JI; HE; CHEN, 2015).

De acordo com os estudos de Gogate & Kabadi (2009), a utilização de uma placa de orifício no sistema oferece uma grande flexibilidade em termos de operação (controle da pressão de entrada, velocidade do escoamento de entrada ou temperatura) e condições geométricas (número de orifícios por placa e configuração dos orifícios), podendo resultar em diferentes intensidades cavitacionais.

Contudo, devido à distribuição aleatória das “variações de pressão turbulentas de condução do movimento da bolha”, o efeito da cavitação (intensidade) produzido em reatores que utilizam placas de orifício também oscilam significativamente (dificuldade de controle) (GOMES, 2015).

A seguir demonstra-se a morfologia de uma placa de orifício, tal qual utilizada neste trabalho em comparação ao tubo Venturi, conforme figura 9.

Figura 9 - Modelo de placa de orifício



Fonte: wika.com.br

5.3 APARATO EXPERIMENTAL

O presente estudo foi realizado empregando a cavitação hidrodinâmica em um aparato experimental de sistema fechado, em várias etapas, visando a degradação de compostos orgânicos, como por exemplo a sacarose, presentes em águas residuárias.

A eficiência do processo de cavitação foi determinada a partir da redução da Demanda Química de Oxigênio (DQO) do efluente sintético tratado. Empregou-se peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30 % (m/m) como agente oxidante.

Os experimentos de cavitação hidrodinâmica foram realizados em um tubo Venturi (Figura 10) e em uma placa de orifício (Figura 10), utilizando protótipos desenvolvidos no Laboratório de Processos Ambientais do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas (ICTE) da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM).

Figura 10 - Protótipo desenvolvido: (1) entrada da sacarose e do efluente; (2) bombas de inserção no sistema; (3) registro controlador de vazão; (4) medidores de pressão; (5) tubo de Venturi em acrílico para visualização do processo; (6) trocador de calor.



Fonte: Autor, 2018

Figura 11 - Protótipo com uso de placa de orifício



Fonte: Autor, 2018

Ademais, são demonstradas as etapas a serem obedecidas para uso do aparato experimental. Neste estudo, foram realizados processos pioneiros usando a sacarose como objeto de degradação.

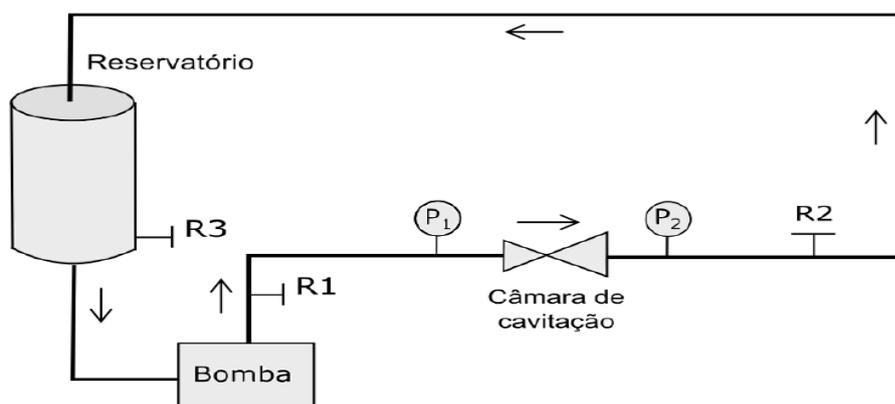
5.4 MONTAGEM DO SISTEMA

A montagem do sistema para promover o fenômeno da cavitação hidrodinâmica foi feita com o uso de tubulações e conexões de PVC, conforme apresentado nas Figuras 13 e 14. O reservatório é um tubo de 200 mm de diâmetro e as tubulações subsequentes de 1 polegada e 1 ½ polegadas, respectivamente.

Para controlar o escoamento ao longo do sistema utilizaram-se três registros. O primeiro (R3), está localizado no fundo do reservatório para fins de limpeza e coleta de amostras de água; o segundo (R1) logo após a bomba para controlar a vazão de recalque e definir as faixas de pressão em que os experimentos serão realizados; e o terceiro (R2) após o segundo ponto de medição de pressão no sistema, para fins de controle de pressão na tubulação.

Um esquema simplificado do sistema de cavitação após a montagem completa é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Esquema ilustrativo simplificado dos principais componentes do sistema de cavitação. P1, P2 – pontos de medição da pressão à montante e à jusante da câmara de cavitação, respectivamente; R1, R2, R3 – registros ao longo do sistema.



Fonte: Adaptado de Batista (2016)

A água do reservatório é bombeada para o sistema por meio de duas bombas periféricas, conforme visto na Figura 10, itens de número 2. Estas bombas são essenciais para garantir o fluxo ótimo do líquido para que possa chegar com velocidade suficiente até o tubo Venturi ou a placa de orifício (câmaras de cavitação).

O Venturi, peça utilizada para promover as condições de ocorrência do fenômeno da cavitação, é feito de acrílico, conforme demonstrado na Figura 13; a placa de orifício é confeccionada em nylon, conforme Figura 14.

Figura 13 - Tubo de Venturi modificado, para geração da cavitação hidrodinâmica



Fonte: Autor, 2018

Figura 14 – Placa de orifício, utilizada para geração da cavitação hidrodinâmica.



Fonte: Autor, 2018

A pressão foi medida em dois pontos estratégicos no sistema. O ponto 1 (P1) está localizado à montante da constrição do Venturi (e da placa de orifício) e o ponto 2 (P2), à jusante (Figura 9).

Para esta finalidade, utilizou-se o controlador digital de pressão PCT-400Ri Plus da marca FullGauge®, conforme demonstrado na Figura 14, que alcança uma faixa de medição de 0 a 34,4 bar com resolução de 0,1 bar.

Figura 15 - Controlador digital de pressão PCT-400Ri Plus da marca FullGauge®.



Fonte: Autor, 2018

Conforme metodologia delineada e proposta, as análises foram realizadas em 2, 4, 6 e 7,3 bar, medidas no controlador, tanto utilizando o tubo Venturi quanto na placa de orifício.

Em experimento anterior, analisado por Batista (2016), a ocorrência da cavitação levou ao aumento gradativo da temperatura do fluido. Assim, foi adicionado um sistema de troca de calor cuja função foi a de evitar que a temperatura do fluido se eleve demasiadamente.

Este efeito indesejado (aumento de temperatura do sistema) poderia não só danificar a bomba, as tubulações e os acessórios, como também interferir nos

resultados obtidos nos experimentos, já que o aumento da temperatura influencia na taxa de degradação do efluente em estudo (BATISTA, 2016).

Este fato foi verificado por Gagol e colaboradores (2018), visto que um aumento na temperatura resulta em uma diminuição das taxas de cavitação devido à geração excessiva de bolhas gasosas e, conseqüentemente, menor energia do colapso (efeito atenuado).

O trocador de calor é composto por uma bomba dosadora da marca ProMinent®. O tubo de sucção da bomba é submerso em uma caixa de isopor contendo água e gelo, e succiona a água na vazão máxima da bomba (conforme apresentado na Figura 17).

O tubo de recalque encaminha a água gelada para uma serpentina em espiral posicionada no fundo do reservatório, permitindo que ela circule dentro da tubulação e resfrie a amostra, que chega a atingir 47°C. Após circular por toda a serpentina, o líquido é encaminhado para outro recipiente de coleta.

Figura 16 - Bomba dosadora da marca ProMinent ®.



Fonte: Batista (2016)

Dessa forma, durante todo o experimento foi monitorada a variação de temperatura com o sistema de aquisição de dados LabQuest (Figura 18). Caso esta comece a se elevar, é necessário adicionar mais gelo ao sistema de resfriamento, pois um aumento de temperatura diminui a eficiência da cavitação devido à formação de um número excessivo de cavidades que está relacionado à supressão da cavitação e à formação da chamada “nuvem de cavitação” (GAŁOL; PRZYJAZNY; BOCZKAJ, 2018).

Figura 17 – Análise de variação de temperatura no sistema de aquisição de dados.



Fonte: Autor, 2018

5.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para montagem da bancada experimental foram necessários estudos a fim de verificar a vazão ideal para geração ·OH aliado à pressão do sistema e sua posterior modelagem.

Para tanto, foi realizada pesquisa utilizando inicialmente uma solução aquosa de sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) a 15 % (m/m) a fim de verificar a performance do

sistema na degradação de compostos orgânicos. A proporção estequiométrica, em mols, da reação de degradação da sacarose pelo radical hidroxil é 1:48, equação 1.



Contudo, para que se obtivessem dados concisos acerca do processo, foram realizados estudos acerca de reações mais complexas (em que se constituem várias etapas) envolvendo a degradação da matéria orgânica (MO) pelo radical hidroxil ($\cdot\text{OH}$), usando como referência os estudos de RAUT-JADHAV et al. (2013), que encontrou um ponto ótimo de degradação utilizando peróxido de hidrogênio a 30% (m/m) em proporção de 1 mol de sacarose para 20 mols de peróxido de hidrogênio.

Esse entendimento é indispensável para otimizar as variáveis de pressão inerentes às reações de degradação da MO na metodologia em estudo.

5.5.1 ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DA SACAROSE SEM ADIÇÃO DE PERÓXIDO

Inicialmente foram realizados experimentos a fim de detectar a performance de degradação do método de cavitação hidrodinâmica, sem a utilização de nenhum aditivo oxidante.

Utilizou-se solução aquosa de sacarose a 15% (m/m). No aparato experimental foi utilizado volume final de 5000 mL (\approx 5000 g) (capacidade do reservatório), perfazendo a utilização de 750g de açúcar refinado em 4250 mL (\approx 4250 g) de água destilada, usando para medições, balão volumétrico 1000 mL e balança analítica, marca BEL M 214AI.

O método foi aferido em 9 (nove) alíquotas em balão volumétrico de 1000mL, retirando do sistema um pequeno volume, e aferidas de 10 em 10 minutos, num total de 90 (noventa) minutos de corrida analítica, sendo a mesma detectada por um refratômetro (Figura 17) modelo RT-280, marca *Instrutherm*.

Figura 18 - Refratômetro Instrutherm RT-280 utilizado nas aferições



Fonte: Autor, 2018

O refratômetro em questão, para as devidas aferições, de acordo com o fabricante, possui escala de 0 a 90% BRIX, com resolução de 1% BRIX, precisão de 0,5%, possuindo dimensões de 30 x 36 x 200 mm e peso de 330g. A Figura 18 representa as 9 (nove) alíquotas da solução de sacarose retiradas para análise.

Figura 19 - Alíquotas para detecção da possível degradação, realizado nos intervalos de 10 minutos, sendo 09 (nove) alíquotas, totalizando 90 (noventa) minutos de corrida experimental.



Fonte: Autor, 2018

5.5.2 ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DA SACAROSE COM ADIÇÃO DE PERÓXIDO

Utilizando como base o experimento realizado por RAUT-JADHAV e colaboradores (2013), que buscou o efeito sinérgico da combinação da cavitação hidrodinâmica com adição de peróxido de hidrogênio na degradação de uma classe de inseticida chamada neonicotinóide, foi realizado um planejamento técnico-experimental para a realização dos estudos do presente trabalho.

A metodologia empregada também se baseou nos estudos de Gagol e colaboradores (2018) que verificaram que a adição de peróxido no sistema de cavitação corrobora com a eficiência de degradação dos compostos orgânicos.

Assim, as cavitações (tanto em tubo Venturi quanto em placa de orifício) foram realizadas nas pressões de 2, 4, 6 e 7,3 bar, a exemplo do estudo de RAUT-JADHAV e colaboradores (2013). Os valores da pressão inicial e final foram escolhidos pelos limites mínimos e máximos do próprio sistema.

O oxidante empregado foi o peróxido de hidrogênio a 30% (m/m), na proporção 1:20 mol, ou seja, adicionando aproximadamente 48mL do peróxido na mistura de água e sacarose (8g de sacarose PA em 8L de água destilada).

Com base nos estudos realizados por RAUT-JADHAV e colaboradores (2013), que realizaram estudos em pH 2, 2,7, 3, 4, 6 e 7,5, foi escolhido para este o pH ótimo na faixa de 2,5 a 2,7. Esta escolha também se ratifica graças aos estudos de CAPOCELLI e colaboradores (2014), que também verificou que as reações são otimizadas em pH menores.

Acerca do uso de pH ácido, vale destacar que de acordo com relatos da literatura, não existe uma faixa específica de valores de pH em que a degradação deva ocorrer para um poluente específico no meio aquoso (RAUT-JADHAV et al., 2013).

A degradação de poluentes orgânicos é mais frequente quando realizada em um meio ácido (pH <7 a 25°C), visto que condições ácidas normalmente geram maior eficiência na formação de radicais hidroxila, através da dissociação intensificada de peróxido de hidrogênio e a lise de água. Além disso, a capacidade de oxidação dos radicais hidroxila é maior em condições ácidas (GAĞOL; PRZYJAZNY; BOCZKAJ, 2018).

Em seguida, ao se aferir a melhor performance de degradação neste trinômio diluição x pressão x metodologia, através deste material e métodos apresentados, utilizou-se como metodologia proposta a análise do perfil de diminuição da DQO em cada uma das amostras (água e sacarose, nos intervalos de 0', 3', 6', 9', 12' e 15') nas diferentes pressões utilizadas na degradação de um efluente da indústria de refrigerantes, nicho de mercado com grande interesse nesta mitigação, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Perfil metodológico de coleta de amostras

| METODOLOGIAS (TUBO VENTURI E PLACA DE ORIFÍCIO) | |
|--|------------------------------|
| Pressão (bar) | Tempo de coleta (min) |
| 2 | |
| 4 | |
| 6 | 0, 3, 6, 9, 12 e 15 |
| 7.3 | |

Fonte: Autor, 2018

A metodologia analítica da DQO foi colorimétrica, denominada método colorimétrico em refluxo fechado, pois o teste de DQO corresponde a uma oxidação química da matéria orgânica, obtida através de um oxidante forte, o dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido, em elevada temperatura, sendo que durante a determinação de DQO, a matéria orgânica é convertida a CO_2 e H_2O , sendo que alguns compostos orgânicos (ex.: ácidos graxos de baixo peso molecular) não são oxidados pelo dicromato, a menos que se utilize um catalisador, neste caso, o sulfato de prata (Ag_2SO_4) (RODRIGUES et al., 2003).

As análises foram realizadas externamente pela Labfert Análises, na cidade de Uberaba/MG, utilizando metodologia acima explanada em acordo com a *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water* – 23^a Edição, conforme laudos anexos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No primeiro experimento, após a corrida analítica, os resultados alcançados mostraram baixa eficiência no método de cavitação hidrodinâmica de forma isolada, visto que não houve alterações significativas na redução dos graus BRIX (redução aferida de apenas 1%), da mesma forma que isoladamente não surtiu resultados nos experimentos de Santos (2009).

Autores e suas pesquisas demonstram que as taxas de degradação dos solutos, usando cavitação hidrodinâmica, é dependente das variáveis do processo, tais como pressão de entrada, número de cavitação e pH da solução de alimentação (ácido) e, é enfático dizer que não se obteve êxito no uso isolado da cavitação, comunicando assim a necessidade destas metodologias combinadas (cavitação e peróxido de hidrogênio), conforme revisto por Gogal et al. (2018) e aferido por RAUT-JADHAV e colaboradores (2013).

Este anseio verificado por estes autores, mostra que a adição de oxidantes ao meio tratado aumenta a taxa de geração de radicais hidroxílicos altamente reativos, que são responsáveis pela oxidação e degradação de poluentes.

Dessa forma, foram realizados novos experimentos utilizando o peróxido de hidrogênio, conforme preconizado nos estudos de diversos autores, que mostraram a maior eficiência do método com o uso do H_2O_2 (GASHCHIN; VITEN'KO, 2011); (RAUT-JADHAV et al., 2013); (ČEHOVIN et al., 2017);

De forma preliminar, de acordo com os laudos analíticos de todas as corridas experimentais, sendo placa de orifício e tubo Venturi, nas pressões 2, 4, 6 e 7.3 bar, além de cada uma das amostras coletadas (basal, 3, 6, 9, 12 e 15 minutos), foi obtido o resultado médio de Demanda Química de Oxigênio (DQO) de 953,76 mg/L, ou seja, para cada 1 litro de água, são necessários médios 953,76 mg de oxigênio para degradação química.

Em relação à água residuária de uma indústria de refrigerantes, coletada *in loco* em uma amostragem única, resultado final do experimento, a DQO aferida foi de 2.512,8 mg/L.

As análises de DQO realizadas tanto nos testes com sacarose (na placa de orifício e no tubo Venturi) quanto na amostragem da indústria de refrigerantes, estão apresentadas nas Tabelas 3, 4 e 5.

6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS AFERIDOS NA PLACA DE ORIFÍCIO

Foi realizado, em consonância com a Tabela 2, as análises da mistura de água e sacarose, utilizando a placa de orifício, usando pressões de 2, 4, 6 e 7,3 bar, em pH 2,5. Os resultados são demonstrados na tabela 3.

Tabela 3 - Análise de DQO na placa de orifício (sacarose)

| Pressão (bar) | Tempo de coleta (min) | Valores DQO (mg/L) |
|---------------|-----------------------|--------------------|
| 2 | 0 | 885,9 |
| | 3 | 416,1 |
| | 6 | 128,9 |
| | 9 | 88,6 |
| | 12 | 77,9 |
| | 15 | 72,5 |
| 4 | 0 | 783,8 |
| | 3 | 756,8 |
| | 6 | 729,7 |
| | 9 | 113,5 |
| | 12 | 108,1 |
| | 15 | 94,6 |
| 6 | 0 | 1378,4 |
| | 3 | 864,9 |
| | 6 | 810,8 |
| | 9 | 756,8 |
| | 12 | 218,9 |
| | 15 | 94,6 |
| 7,3 | 0 | 973 |
| | 3 | 973 |
| | 6 | 945,9 |
| | 9 | 864,9 |
| | 12 | 837,8 |
| | 15 | 362,2 |

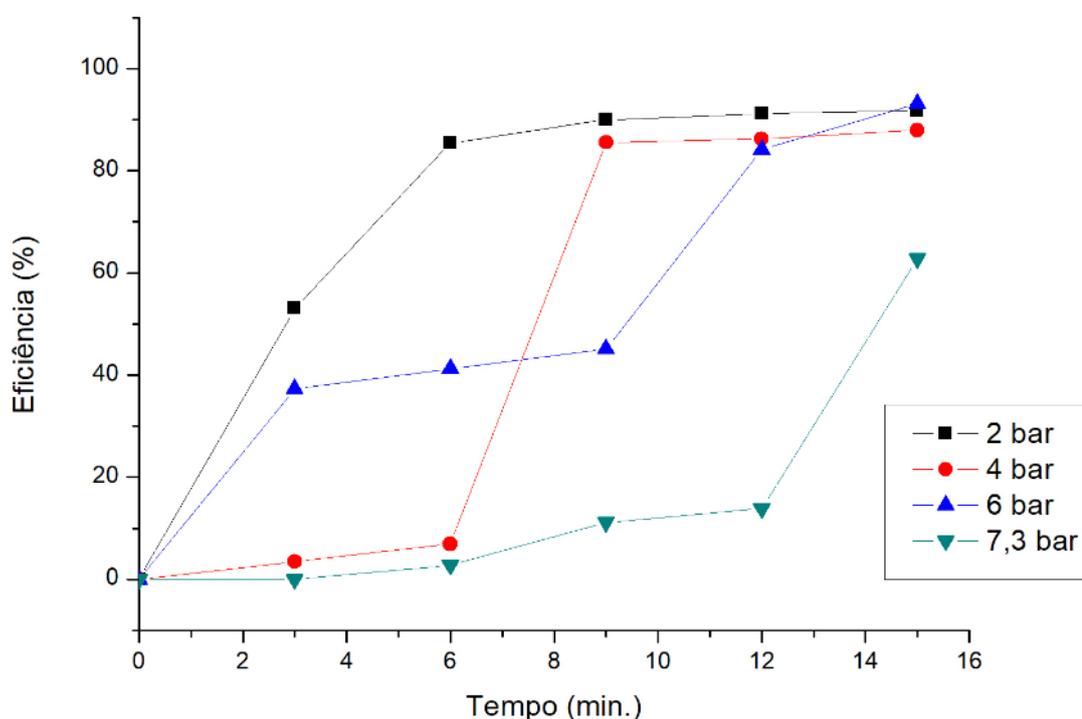
Fonte: Autor, 2018

Os resultados entre a DQO basal e a DQO passados os 15 minutos e seus intervalos são demonstrados na Figura 21 e discutidos posteriormente, além da

demonstração da temperatura adquirida pelo sistema em cada uma das pressões impostas.

A eficiência foi calculada através da análise de DQO inicial e o valor da DQO final da sacarose em cada um dos intervalos analisados.

Figura 20 - Eficiência de degradação na placa de orifício



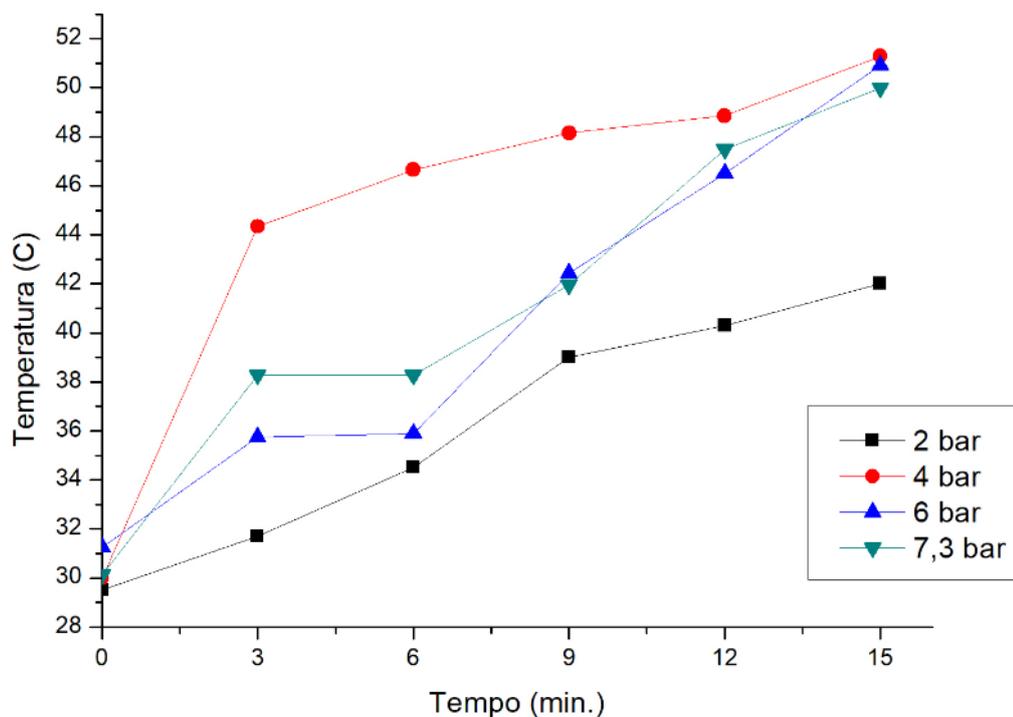
Fonte: Autor, 2018

Analisando os resultados aferidos na placa de orifício, nesta figura 21, é possível verificar que a menor eficiência foi detectada na pressão de 7.3 bar (62,7%).

Ademais, a maior eficiência fora vista na pressão de 6 bar, atingindo 93,1%, que é quase alcançada pela pressão de 2 bar, que fez 91,8% de eficiência de degradação da sacarose, reduzindo assim a DQO.

Na Figura 22, devido ao clima quente em que foram realizados os experimentos, verifica-se que a temperatura basal da reação fez uma média de 30,2°C e aumentaram significativamente sua temperatura, sendo a pressão de 7,3 bar a maior, perfazendo o valor de 50°C.

Figura 21 - Temperaturas aferidas no sistema em placa de orifício



Fonte: Autor, 2018

Por fim, nas bibliografias consultadas, não se tem registro de um estudo comparativo entre o uso da placa de orifício em concomitância com o uso do Venturi, apenas um estudo realizado por alguns pesquisadores que comparam o melhor cálculo de vazão usando estas duas metodologias (FERNANDES et al., 2016).

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS AFERIDOS NO TUBO VENTURI

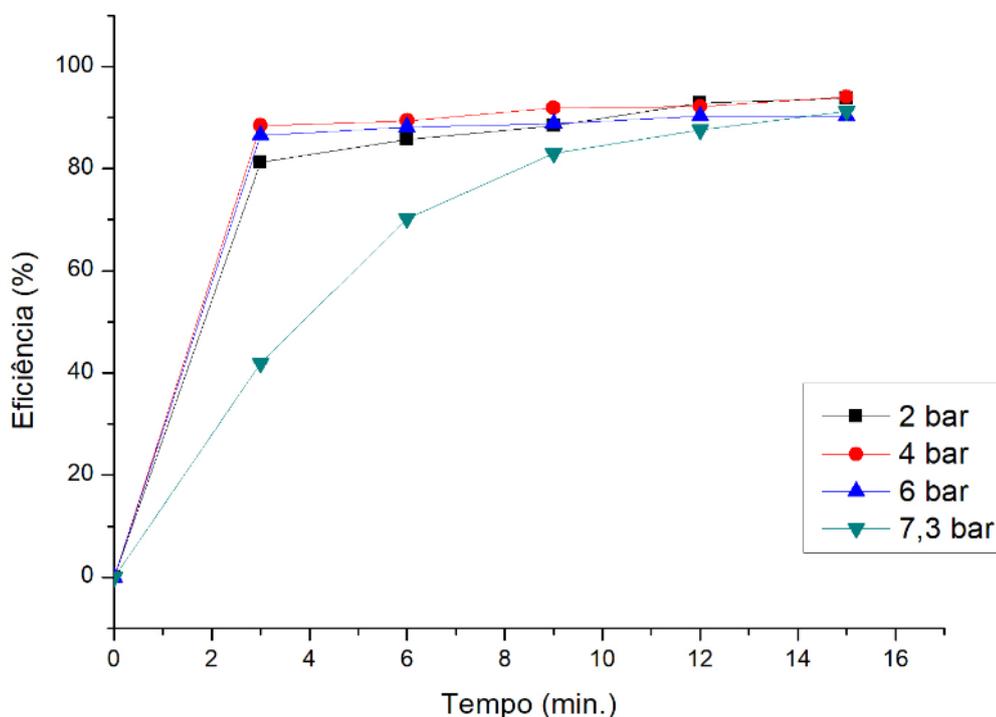
Da mesma forma metodológica, foram realizadas as análises utilizando o tubo Venturi, usando as mesmas pressões de 2, 4, 6 e 7,3 bar, em pH 2,5 e análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO), a fim de verificar a eficiência comparativa do experimento, idêntico ao realizado nos testes da placa de orifício.

Tabela 4 - Análise de DQO no tubo Venturi (sacarose)

| Pressão (bar) | Tempo de coleta (min) | Valores DQO (mg/L) |
|---------------|-----------------------|--------------------|
| 2 | 0 | 825,8 |
| | 3 | 154,8 |
| | 6 | 118,7 |
| | 9 | 95,5 |
| | 12 | 59,4 |
| | 15 | 51,6 |
| 4 | 0 | 825,8 |
| | 3 | 95,5 |
| | 6 | 87,7 |
| | 9 | 67,1 |
| | 12 | 64,5 |
| | 15 | 49 |
| 6 | 0 | 825,8 |
| | 3 | 111 |
| | 6 | 98,1 |
| | 9 | 92,9 |
| | 12 | 80 |
| | 15 | 80 |
| 7,3 | 0 | 1131,6 |
| | 3 | 657 |
| | 6 | 337,7 |
| | 9 | 192,2 |
| | 12 | 140,3 |
| | 15 | 98,7 |

Fonte: Autor, 2018

Os resultados entre a DQO basal e a DQO passados os 15 minutos e seus intervalos, são demonstrados na Figura 23.

Figura 22 - Eficiência de degradação no tubo Venturi

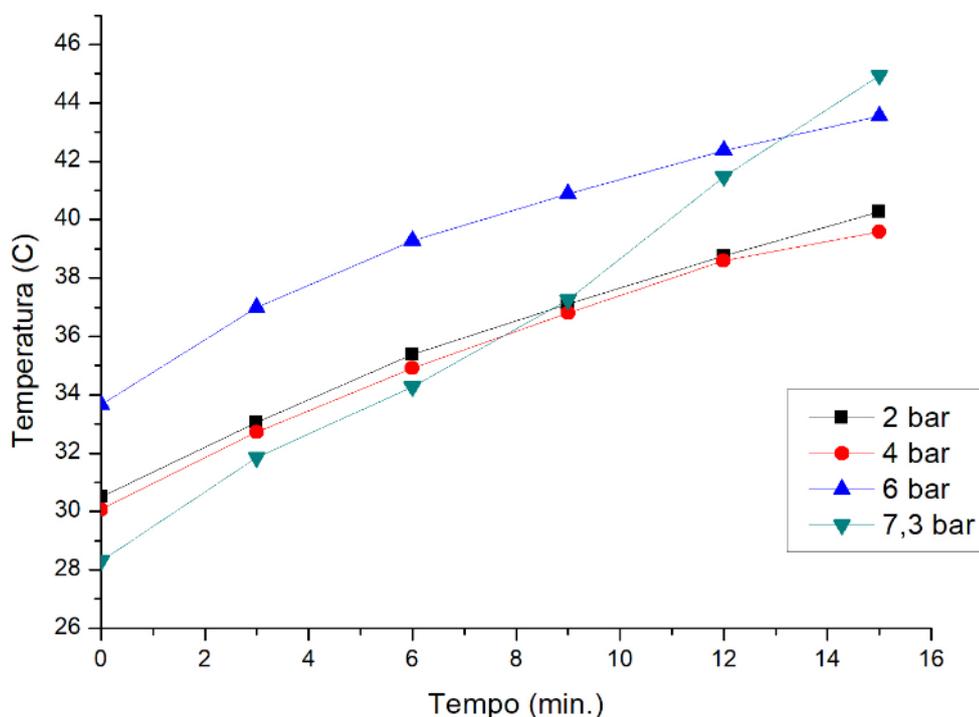
Fonte: Autor, 2018

Nesta Figura 23, utilizando o tubo Venturi, as eficiências tiveram seu ponto final muito próximos. Para melhor visualização, respectivamente tivemos os resultados das pressões sendo:

- Pressão 2.0 bar com 93,7% de eficiência;
- Pressão 4.0 bar com 94% de eficiência;
- Pressão 6.0 bar com 90,3% de eficiência;
- Pressão 7.3 bar com 91,2% de eficiência;

Na Figura 24, a temperatura basal da reação fez uma média de 30,6°C e atingiram temperaturas máximas próximas, sendo a pressão de 7,3 bar a maior delas, perfazendo o valor de 44,9°C.

Figura 23 - Temperaturas aferidas no sistema em tubo Venturi



Fonte: Autor, 2018

Nestes resultados, analisando comparativamente com os dados obtidos por RAUT-JADHAV e colaboradores (2013), é possível afirmar que a utilização da cavitação hidrodinâmica tem relação com a pressão de entrada, sendo que com pressões de entrada muito altas, a extensão da degradação é reduzida devido ao início da chamada super cavitação.

Do ponto de vista da temperatura, foi visto que a cavitação hidrodinâmica provoca um aumento da mesma, graças às formações de bolhas de vapor, aliado à reação de degradação provocada pelo uso do peróxido de hidrogênio.

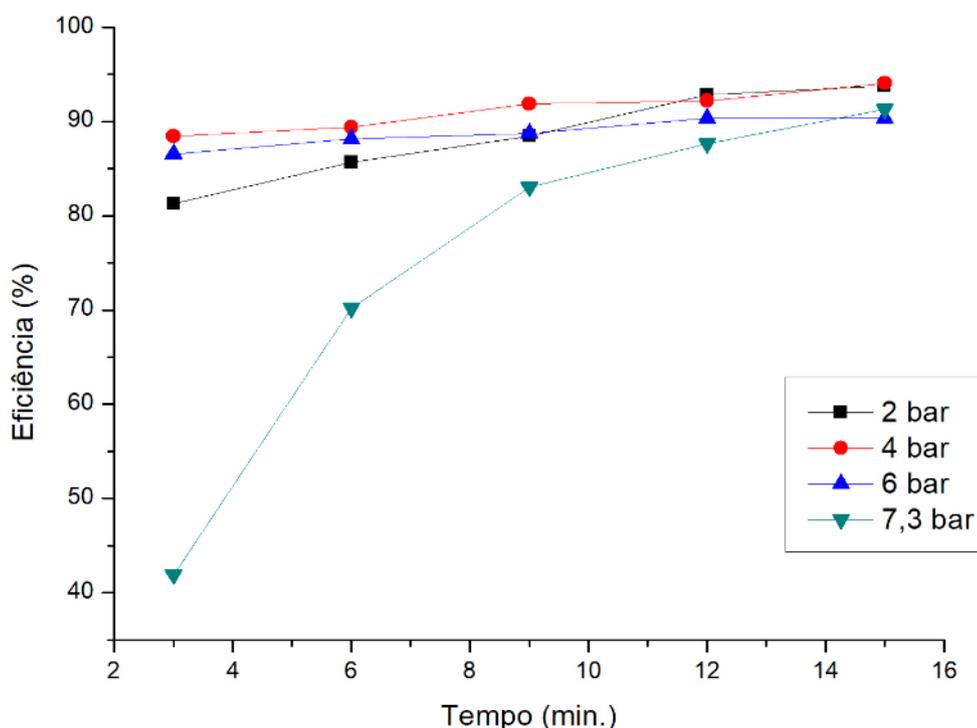
Avaliando os resultados, foi partido do pressuposto que, além da eficiência final, o comportamento nos intervalos até o atingimento dos 15 minutos é relevante, pois quanto mais rápida for a degradação de acordo com a pressão, menor é o uso do peróxido.

Dessa maneira, verifica-se que a menor eficiência foi detectada na pressão de 6.0 bar, enquanto a maior eficiência fora vista na pressão de 4 bar, atingindo 94%,

quase alcançada pela pressão de 2 bar, que fez 93,7% de eficiência de degradação da sacarose, reduzindo assim a DQO, semelhante à placa de orifício.

Outrossim, foi percebida a melhor eficiência da pressão de 4.0 bar, que manteve uma maior homogeneidade nos intervalos aferidos, sendo que, dessa maneira, do ponto de vista experimental e futuramente replicado industrialmente, é o melhor conjunto pois teoricamente se gasta menos quantidade de peróxido para atingir a eficiência desejada, conforme explanado no parágrafo anterior. Estas informações são demonstradas na Figura 25.

Figura 24 - Evolução da eficiência de degradação em minutos

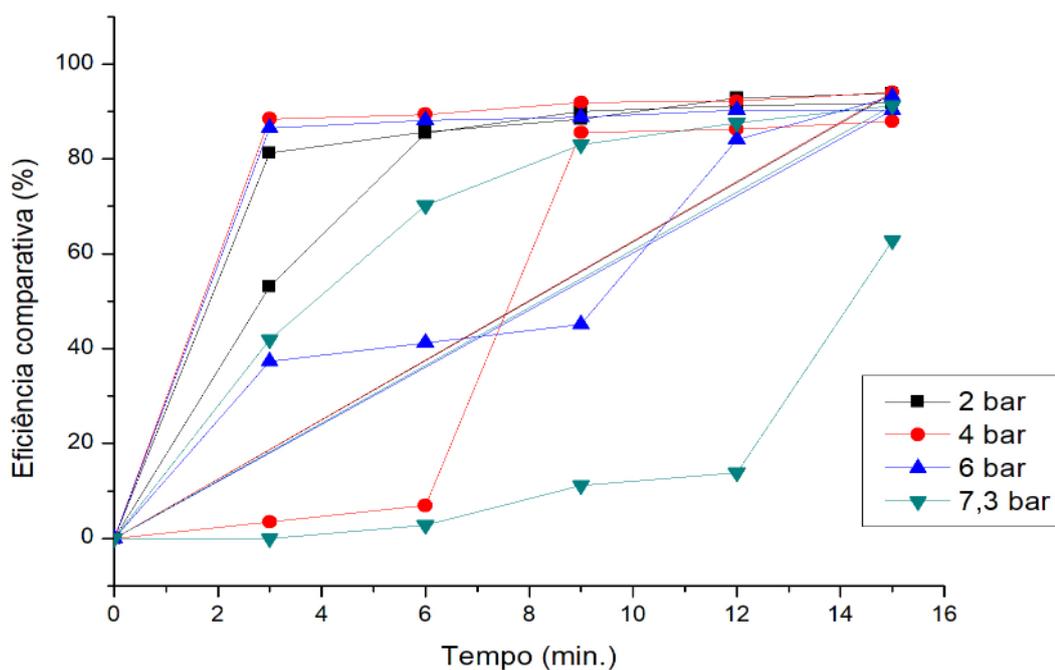


Fonte: Autor, 2018

Nota-se nesta Figura 25, que a eficiência na pressão 4,0 bar atinge um pico de eficiência de forma mais rápida que as outras pressões e, além disso, possui uma eficiência final maior tanto no experimento usando o tubo Venturi quanto nos experimentos usando a placa de orifício.

Dessa forma, o experimento usando Venturi na pressão de 4.0 bar foi o escolhido como a melhor performance analítica a ser replicada na água residuária de uma indústria de refrigerantes, conforme discutido a seguir e visto na figura 26.

Figura 25 - Comparação das eficiências das metodologias (tubo Venturi e placa de orifício) em função do tempo



Fonte: Autor, 2018

6.3 RESULTADOS AFERIDOS NA PERFORMANCE ESCOLHIDA

De posse dos resultados discutidos, fora escolhida como melhor performance, a metodologia usando o tubo Venturi e a pressão de 4.0 bar, conforme demonstrado comparativamente na figura 26.

Baseado nesta metodologia foi feita a análise no efluente da indústria de refrigerante. Os resultados medidos estão apresentados na tabela 5.

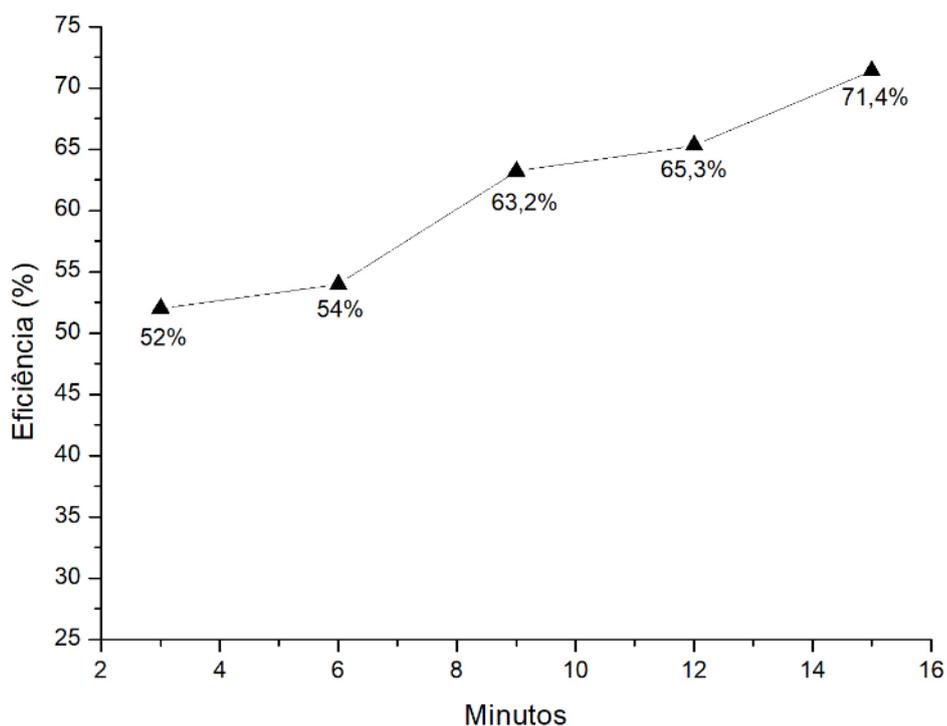
Tabela 5 - Análise de DQO no tubo Venturi (efluente da indústria)

| Pressão (bar) | Tempo de coleta (min) | Valores DQO (mg/L) |
|---------------|-----------------------|--------------------|
| 4 | 0 | 2512,8 |
| | 3 | 1205,1 |
| | 6 | 1153,8 |
| | 9 | 923,1 |
| | 12 | 871,8 |
| | 15 | 717,9 |

Fonte: Autor, 2018

O resultado aferido mostrou uma eficiência ótima de 71,4% no procedimento escolhido, obtendo dessa maneira um número satisfatório de degradação e sua conseqüente eficiência, conforme a figura 27.

Figura 26 - Eficiência de degradação na água residuária de uma indústria de refrigerante



Fonte: Autor, 2018

Ademais, vale destacar que a eficiência aqui medida não acompanhou a relação estequiométrica calculada nos ensaios usando água e sacarose, donde para

uma DQO aferida média de 953,76 mg/L foram usados em cada um dos experimentos o quantitativo de 48 mL de peróxido de hidrogênio a 30 volumes.

Já na amostragem na água residuária da indústria de refrigerantes, a DQO aferida foi de 2.512,8 mg/L e, experimentalmente, também foi utilizado o mesmo quantitativo de peróxido (48 mL), donde, ainda sim, foram obtidos mais de 70% de eficiência de tratamento.

7 CONCLUSÃO

Os experimentos demonstraram que a adição de oxidante é indispensável ao processo de cavitação hidrodinâmica para tratamento de efluentes, pois, como foi demonstrado, o uso isolado da cavitação não surtiu o efeito de degradação esperado.

Contudo, a eficiência deste processo depende da quantidade de oxidante adicionado. A quantidade ideal de peróxido de hidrogênio que foi adicionada neste estudo foi determinada de forma estequiométrica e experimental.

Portanto, a fim de garantir melhores resultados futuros, a partir dos resultados aferidos, deverão ser realizados cálculos precisos para aumento de performances, visto que a quantidade insuficiente de oxidante resulta em uma diminuição substancial da extensão da remoção dos poluentes devido à quantidade insuficiente de radicais hidroxila gerados no processo de decomposição catalítica do H_2O_2 .

É fato que são necessários maiores estudos a fim de continuar buscando a melhor pressão de entrada, diluições e condições ácidas que então são recomendadas para aumentar a extensão da degradação dos poluentes.

Dessa forma, são necessárias constantes pesquisas no intuito de encontrar de forma mais detalhada o quantitativo e o melhor binômio entre medição de DQO e a quantidade de peróxido, pois, de forma satisfatória e preliminar, foram encontrados o melhor método (Venturi) e a melhor pressão (4.0 bar).

Assim, este trabalho visa o atendimento aos anseios industriais referente ao tratamento de seus efluentes, visando contribuir na redução dos custos de aeração artificial, entre outros processos degradadores e dando maior efetividade ao sistema de tratamento, no atendimento a legislação e seus custos inerentes.

REFERÊNCIAS

ABDALA NETO, E. F. et al. O uso da cavitação hidrodinâmica aplicado ao tratamento de água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 105–112, jun. 2014.

ABNT. NBR 9800. Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 3, [1987].

ANDRES JUNIOR, D. A. Tratamento de águas residuais de indústrias de bebidas utilizando tratamento convencional e processos de separação com membranas. p. 80, [2015]. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)** – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim/RS.

ARROJO, S.; BENITO, Y. A theoretical study of hydrodynamic cavitation. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 15, n. 3, p. 203–211, mar. 2008.

BRITO, N. N.; SILVA, V. B. M. Processo oxidativo avançado e sua aplicação ambiental. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 3, n. 1, 2012.

CAPOCELLI, M. et al. Hydrodynamic cavitation of p-nitrophenol: A theoretical and experimental insight. **Chemical Engineering Journal**, v. 254, p. 1–8, out. 2014.

CASSIOLATO, C; ALVES, E; **Medição de Vazão – Controle e Instrumentação**. São Paulo. Jun/2008.

ČEHOVIN, M. et al. Hydrodynamic cavitation in combination with the ozone, hydrogen peroxide and the UV-based advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 37, p. 394–404, jul. 2017.

DE SOUZA SARDINHA, D. et al. Avaliação da qualidade da água e autodepuração do Ribeirão do Meio, Leme (SP). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 329–338, 2008.

FERNANDES et al. Estudo comparativo entre dois equipamentos de medição de vazão do tipo diferencial de pressão. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 11, 2016.

FERREIRA, V. F.; ROCHA, D. R. DA; SILVA, F. DE C. DA. Green Chemistry, Sustainable Economy and Quality of Life. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 1, 2014.

FILHO, J. A. S.; FELIPE, A.; SANTOS, M. S. Tratamento de efluentes da indústria de bebidas em reator anaeróbio de circulação interna (IC). **Revista Internacional de Ciências**, p. 21, [2014].

GAĞOL, M.; PRZYJAZNY, A.; BOCZKAJ, G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 338, p. 599–627, abr. 2018.

GASHCHIN, O. R.; VITEN'KO, T. N. The combined effect of hydrodynamic cavitation, hydrogen peroxide, and silver ions on the Escherichia coli microorganisms. **Journal of Water Chemistry and Technology**, v. 33, n. 4, p. 266–271, ago. 2011.

GIORDANO, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. **Departamento de Engenharia Sanitária e Meio Ambiente UERJ, Rio de Janeiro**, 2004.

GOGATE, P. R. Application of cavitational reactors for water disinfection: Current status and path forward. **Journal of Environmental Management**, v. 85, n. 4, p. 801–815, dez. 2007.

GOMES, M. DA S. **Cavitação hidrodinâmica para tratamentos de águas**. Master's Thesis—[s.l: s.n.].

JI, C.; HE, Z.; CHEN, Y. Experimental and numerical investigation on the performance of hydrodynamic cavitation in multi-holes orifice plate. 2015.

JYOTI, K. K.; PANDIT, A. B. Ozone and cavitation for water disinfection. **Biochemical Engineering Journal**, v. 18, n. 1, p. 9–19, abr. 2004a.

JYOTI, K. K.; PANDIT, A. B. Effect of cavitation on chemical disinfection efficiency. **Water Research**, v. 38, n. 9, p. 2249–2258, maio 2004b.

MARTINS, L. M. Estudo da Aplicação de Processos Oxidativos Avançados no Tratamento de Efluentes Têxteis Visando o Seu Reúso. **Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina-PI**, 2011.

MARTINS, L. M. et al. Aplicação de Fenton, foto-Fenton e UV/H₂O₂ no tratamento de efluente têxtil sintético contendo o corante Preto Biozol UC. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 261–270, set. 2011.

MASLAK, D.; WEUSTER-BOTZ, D. Combination of hydrodynamic cavitation and chlorine dioxide for disinfection of water. **Engineering in Life Sciences**, v. 11, n. 4, p. 350–358, ago. 2011.

MEZULE, L. et al. A simple technique for water disinfection with hydrodynamic cavitation: Effect on survival of *Escherichia coli*. **Desalination**, v. 248, n. 1–3, p. 152–159, nov. 2009.

RAUT-JADHAV, S. et al. Synergetic effect of combination of AOP's (hydrodynamic cavitation and H₂O₂) on the degradation of neonicotinoid class of insecticide. **Journal of Hazardous Materials**, v. 261, p. 139–147, out. 2013.

RODRIGUES, F. F. et al. **Desenvolvimento de Metodologia Para Determinação de Demanda Química de Oxigênio**. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, Rio de Janeiro-RJ. **Anais...**2003. Disponível em: <<http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/2/6104.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2018

SANTOS DE ARAÚJO, K. et al. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. **Ambiente&Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 11, n. 2, 2016.

SANTOS, S. L. D. Uso da cavitação hidrodinâmica como uma alternativa para a produção de biodiesel. p. 80, [2009]. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)** – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo.

TEIXEIRA, C. P. A. B.; JARDIM, W. F. **Caderno temático: Processos Oxidativos Avançados – Conceitos teóricos**. Campinas: UNICAMP, 2004.

ANEXOS

RESULTADOS DE DQO

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| Tubo Venturi | páginas 60 a 83 |
| Placa de Orificio | páginas 84 a 107 |
| Tubo Venturi, efluente industrial | páginas 108 a 113 |



RELATÓRIO DE ENSAIOS

RELATÓRIO DE ENSAIO No: 90003573

REVISÃO: 0.0

Cliente: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
Endereço: AV LEOPOLDINO DE OLIVEIRA, 579 AP 303
Município: UBERABA

Solicitante: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
Telefone: (34)9-9909-7880
Email: pauloh@factus.edu.br

DADOS DA AMOSTRA

Material amostrado: AGUA RESIDUARIA Código da amostra: 90004662
Identificação da amostra: P2 DILUIÇÃO 12:1
Data de entrada no laboratório: 21/11/2017 Data de emissão do relatório: 27/11/2017

INFORMAÇÕES DA AMOSTRAGEM

Registro:

Nota: A descrição da amostra coletada é de inteira responsabilidade do cliente.

RESULTADO DOS ENSAIOS

| Parâmetros | Resultados | Unidade | L.Q. | VR | Método | Data ensaio |
|-----------------------------|------------|---------|------|-----|-------------|-------------|
| Demanda Química de Oxigenio | 59,4 | mg/L | 5 | --- | SMWW 5220 D | 21/11/2017 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

LEGENDA

*LQ: Limite de Quantificação. *VR: Valor de referência conforme legislação adequada.
(t): Indicam ensaios realizados por laboratorio subcontratado.
(ic): Indicam ensaios realizados na instalação do cliente.
N/D: Não Detectado

REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Amostragem: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23^a Edição.
Ensaio: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23^a Edição.

OBSERVAÇÕES

Os resultados deste laudo se restringem as amostras ensaiadas. A reprodução do mesmo poderá ser realizada apenas em sua totalidade. As contra-amostras serão arquivadas até 7 dias após a emissão do relatório, exceto amostras perecíveis.

VINICIOS MARGATO
Gerente de Laboratório CRQ: 02406025

5/18

Antonio Padua de Lima
Responsável Técnico CRQ: 04412410

Versão 4.q



RELATÓRIO DE ENSAIOS

RELATÓRIO DE ENSAIO No: 90003618

REVISÃO: 1.0

Cliente: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
 Endereço: AV LEOPOLDINO DE OLIVEIRA, 579 AP 303
 Município: UBERABA

Solicitante: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
 Telefone: (34)9-9909-7880
 Email: pauloh@facthus.edu.br

DADOS DA AMOSTRA

Material amostrado: AGUA RESIDUARIA Código da amostra: 90004753
 Identificação da amostra: P 7,6/01
 Data de entrada no laboratório: 30/11/2017 Data de emissão do relatório: 06/12/2017

INFORMAÇÕES DA AMOSTRAGEM

Registro:

Nota: A descrição da amostra coletada é de inteira responsabilidade do cliente.

RESULTADO DOS ENSAIOS

| Parâmetros | Resultados | Unidade | L.Q. | VR | Método | Data ensaio |
|-----------------------------|------------|---------|------|-----|-------------|-------------|
| Demanda Química de Oxigenio | 1131,6 | mg/L | 5 | --- | SMWW 5220 D | 30/11/2017 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

LEGENDA

*LQ; Limite de Quantificação. *VR: Valor de referência conforme legislação adequada.
 (t): Indicam ensaios realizados por laboratório subcontratado.
 (ic): Indicam ensaios realizados na instalação do cliente.
 N/D: Não Detectado

REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Amostragem: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23^a Edição.
 Ensaio: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23^a Edição.

OBSERVAÇÕES

Os resultados deste laudo se restringem às amostras ensaiadas. A reprodução do mesmo poderá ser realizada apenas em sua totalidade. As contra-amostras serão arquivadas até 7 dias após a emissão do relatório, exceto amostras perecíveis.

VINÍCIOS MARGATO
 Gerente de Laboratório CRQ: 02406025

Antonio Padua de Lima
 Responsável Técnico CRQ: 04412410

Versão 4.q

1 / 6

RUA JOSE BONIFACIO 1067 - CIDADE JARDIM - 38030-140 - UBERABA/MG - 03433143980 - labfert@labfer.agr.br



RELATÓRIO DE ENSAIOS

RELATÓRIO DE ENSAIO No: 90003703

REVISÃO: 0.0

Cliente: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
Endereço: AV LEOPOLDINO DE OLIVEIRA, 579 AP 303
Município: UBERABA

Solicitante: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
Telefone: (34)9-9909-7880
Email: pauloh@factus.edu.br

DADOS DA AMOSTRA

Material amostrado: AGUA RESIDUARIA Código da amostra: 90004848
Identificação da amostra: PO / P4 - 3^1 Data de emissão do relatório: 28/12/2017
Data de entrada no laboratório: 20/12/2017

INFORMAÇÕES DA AMOSTRAGEM

Registro:

Nota: A descrição da amostra coletada é de inteira responsabilidade do cliente.

RESULTADO DOS ENSAIOS

| Parâmetros | Resultados | Unidade | L.Q. | VR | Método | Data ensaio |
|-----------------------------|------------|---------|------|-----|-------------|-------------|
| Demanda Química de Oxigenio | 756,8 | mg/L | 5 | --- | SMWW 5220 D | 20/12/2017 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

LEGENDA

*LQ: Limite de Quantificação. *VR: Valor de referência conforme legislação adequada.
(t): Indicam ensaios realizados por laboratório subcontratado.
(ic): Indicam ensaios realizados na instalação do cliente.
N/D: Não Detectado

REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Amostragem: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23^a Edição.
Ensaio: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23^a Edição.

OBSERVAÇÕES

Os resultados deste laudo se restringem as amostras ensaiadas. A reprodução do mesmo poderá ser realizada apenas em sua totalidade. As contra-amostras serão arquivadas até 7 dias após a emissão do relatório, exceto amostras perecíveis.

VINÍCIOS MARGATO
Gerente de Laboratório CRQ: 02406025

2 / 18

Antonio Padua de Lima
Responsável Técnico CRQ: 04412410

Versão 4.q



RELATÓRIO DE ENSAIOS

RELATÓRIO DE ENSAIO No: 90003703

REVISÃO: 0.0

Cliente: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
 Endereço: AV LEOPOLDINO DE OLIVEIRA, 579 AP 303
 Município: UBERABA

Solicitante: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
 Telefone: (34)9-9909-7880
 Email: pauloh@facthus.edu.br

DADOS DA AMOSTRA

Material amostrado: AGUA RESIDUARIA Código da amostra: 90004853
 Identificação da amostra: PO / P6 - 0^1
 Data de entrada no laboratório: 20/12/2017 Data de emissão do relatório: 28/12/2017

INFORMAÇÕES DA AMOSTRAGEM

Registro:

Nota: A descrição da amostra coletada é de inteira responsabilidade do cliente.

RESULTADO DOS ENSAIOS

| Parâmetros | Resultados | Unidade | L.Q. | VR | Método | Data ensaio |
|-----------------------------|------------|---------|------|-----|--------|-------------|
| Demanda Química de Oxigenio | 1378,4 | mg/L | 5 | --- | X | SMWW 5220 D |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

LEGENDA

*LQ: Limite de Quantificação. *VR: Valor de referência conforme legislação adequada.
 (t): Indicam ensaios realizados por laboratório subcontratado.
 (ic): Indicam ensaios realizados na instalação do cliente.
 N/D: Não Detectado

REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Amostragem: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23ª Edição.
 Ensaio: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23ª Edição.

OBSERVAÇÕES

Os resultados deste laudo se restringem as amostras ensaiadas. A reprodução do mesmo poderá ser realizada apenas em sua totalidade. As contra-amostras serão arquivadas até 7 dias após a emissão do relatório, exceto amostras perecíveis.

VINÍCIOS MARGATO
 Gerente de Laboratório CRQ: 02406025

Antonio Padua de Lima
 Responsável Técnico CRQ: 04412410

7 / 18

Versão 4.q



RELATÓRIO DE ENSAIOS

RELATÓRIO DE ENSAIO No: 90003703

REVISÃO: 0.0

Cliente: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
Endereço: AV LEOPOLDINO DE OLIVEIRA, 579 AP 303
Município: UBERABA

Solicitante: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
Telefone: (34)9-9909-7880
Email: pauloh@factus.edu.br

DADOS DA AMOSTRA

Material amostrado: AGUA RESIDUARIA Código da amostra: 90004855
Identificação da amostra: PO / P6 - 6[^]1
Data de entrada no laboratório: 20/12/2017 Data de emissão do relatório: 28/12/2017

INFORMAÇÕES DA AMOSTRAGEM

Registro:

Nota: A descrição da amostra coletada é de inteira responsabilidade do cliente.

RESULTADO DOS ENSAIOS

| Parâmetros | Resultados | Unidade | L.Q. | VR | Método | Data ensaio |
|-----------------------------|------------|---------|------|-----|-------------|-------------|
| Demanda Química de Oxigenio | 810,8 | mg/L | 5 | --- | SMWW 5220 D | 20/12/2017 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

LEGENDA

*LQ; Limite de Quantificação. *VR: Valor de referência conforme legislação adequada.
(t): Indicam ensaios realizados por laboratório subcontratado.
(ic): Indicam ensaios realizados na instalação do cliente.
N/D: Não Detectado

REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Amostragem: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23^ª Edição.
Ensaio: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23^ª Edição.

OBSERVAÇÕES

Os resultados deste laudo se restringem as amostras ensaiadas. A reprodução do mesmo poderá ser realizada apenas em sua totalidade. As contra-amostras serão arquivadas até 7 dias após a emissão do relatório, exceto amostras perecíveis.

VINÍCIOS MARGATO
Gerente de Laboratório CRQ: 02406025

9 / 18

Antonio Padua de Lima
Responsável Técnico CRQ: 04412410

Versão 4.q

RUA JOSE BONIFACIO 1067 - CIDADE JARDIM - 38030-140 - UBERABA/MG - 03433143980 - labfert@labfer.agr.br



RELATÓRIO DE ENSAIOS

RELATÓRIO DE ENSAIO No: 90003703

REVISÃO: 0.0

Cliente: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
 Endereço: AV LEOPOLDINO DE OLIVEIRA, 579 AP 303
 Município: UBERABA

Solicitante: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
 Telefone: (34)9-9909-7880
 Email: pauloh@facthus.edu.br

DADOS DA AMOSTRA

Material amostrado: AGUA RESIDUARIA Código da amostra: 90004857
 Identificação da amostra: PO / P6 - 12^1
 Data de entrada no laboratório: 20/12/2017 Data de emissão do relatório: 28/12/2017

INFORMAÇÕES DA AMOSTRAGEM

Registro:

Nota: A descrição da amostra coletada é de inteira responsabilidade do cliente.

RESULTADO DOS ENSAIOS

| Parâmetros | Resultados | Unidade | L.Q. | VR | Método | Data ensaio |
|-----------------------------|------------|---------|------|-----|-------------|-------------|
| Demanda Química de Oxigenio | 218,9 | mg/L | 5 | --- | SMWW 5220 D | 20/12/2017 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

LEGENDA

*LQ: Limite de Quantificação. *VR: Valor de referência conforme legislação adequada.
 (t): Indicam ensaios realizados por laboratório subcontratado.
 (ic): Indicam ensaios realizados na instalação do cliente.
 N/D: Não Detectado

REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Amostragem: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23^a Edição.
 Ensaio: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23^a Edição.

OBSERVAÇÕES

Os resultados deste laudo se restringem as amostras ensaiadas. A reprodução do mesmo poderá ser realizada apenas em sua totalidade. As contra-amostras serão arquivadas até 7 dias após a emissão do relatório, exceto amostras perecíveis.

VINÍCIOS MARGATO
Gerente de Laboratório CRQ: 02406025

11 / 18

Antonio Padua de Lima
Responsável Técnico CRQ: 04412410

Versão 4.q

RUA JOSE BONIFACIO 1067 - CIDADE JARDIM - 38030-140 - UBERABA/MG - 03433143980 - labfert@labfer.agr.br



RELATÓRIO DE ENSAIOS

RELATÓRIO DE ENSAIO No: 90003703

REVISÃO: 0.0

Cliente: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
Endereço: AV LEOPOLDINO DE OLIVEIRA, 579 AP 303
Município: UBERABA

Solicitante: PAULO HENRIQUE LOPES ALVES
Telefone: (34)9-9909-7880
Email: pauloh@facthus.edu.br

DADOS DA AMOSTRA

Material amostrado: AGUA RESIDUARIA
Identificação da amostra: PO / P7.3 - 0*1
Data de entrada no laboratório: 20/12/2017

Código da amostra: 90004859
Data de emissão do relatório: 28/12/2017

INFORMAÇÕES DA AMOSTRAGEM

Registro:

Nota: A descrição da amostra coletada é de inteira responsabilidade do cliente.

RESULTADO DOS ENSAIOS

| Parâmetros | Resultados | Unidade | L.Q. | | VR | Método | Data ensaio |
|-----------------------------|------------|---------|------|-----|-----|-------------|-------------|
| Demanda Química de Oxigenio | 973,0 | mg/L | 5 | --- | X | SMWW 5220 D | 20/12/2017 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

LEGENDA

*LQ: Limite de Quantificação. *VR: Valor de referência conforme legislação adequada.
(t): Indicam ensaios realizados por laboratório subcontratado.
(ic): Indicam ensaios realizados na instalação do cliente.
N/D: Não Detectado

REFERÊNCIAS METODOLÓGICAS

Amostragem: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23ª Edição.
Ensaio: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23ª Edição.

OBSERVAÇÕES

Os resultados deste laudo se restringem as amostras ensaiadas. A reprodução do mesmo poderá ser realizada apenas em sua totalidade. As contra-amostras serão arquivadas até 7 dias após a emissão do relatório, exceto amostras perecíveis.

VINÍCIOS MARGATO
Gerente de Laboratório_CRQ: 02406025

13 / 18

Antonio Padua de Lima
Responsável Técnico CRQ: 04412410

Versão 4.q

RUA JOSE BONIFACIO 1067 - CIDADE JARDIM - 38030-140 - UBERABA/MG - 03433143980 - labfert@labfer.agr.br

