UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ROBERTO NEWTON MOSCOSO JÚNIOR

HIDROCICLONE: UM PROCESSO UNITÁRIO PARA SEPARAÇÃO DE MICROPLÁSTICOS EM MEIOS AQUOSOS.

CAMPINA GRANDE
2023

ROBERTO NEWTON MOSCOSO JÚNIOR

HIDROCICLONE: UM PROCESSO UNITÁRIO PARA SEPARAÇÃO DE MICROPLÁSTICOS / ÁGUA EM MEIOS AQUOSOS.

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Kepler Borges França

CAMPINA GRANDE – PB

2023

M896h Moscoso Júnior, Roberto Newton.
Hidrociclone: um processo unitário para separação de microplásticos/ água em meios aquosos / Roberto Newton Moscoso Júnior. – Campina Grande, 2023.
32 f. : il. color.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2023.
"Orientação: Prof. Dr. Kepler Borges França".
Referências.

1. Hidrociclone – Eficiência. 2. Microplásticos. 3. Tratamento de Água em Meios Aquosos. I. França, Kepler Borges. II. Título.

CDU 628.16(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225

ROBERTO NEWTON MOSCOSO JÚNIOR

HIDROCICLONE: UM PROCESSO UNITÁRIO PARA SEPARAÇÃO DE MICROPLÁSTICOS / ÁGUA EM MEIOS AQUOSOS.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. Kepler Borges França
(UAEQ/CCT/UFCG) – Orientador

Professor Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
(UAEQ/CCT/UFCG) – Examinador Interno

Professor Dr. Sidinei Kleber da Silva
(UAEQ/CCT/UFCG) – Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter guiado meus passos, me dado sabedoria, força e perseverança durante toda a minha trajetória, até aqui. Sua presença me deu ânimo e fez superar meus desafios no decorrer da vida acadêmica. A Deus toda honra, toda glória.

Aos meus pais, Roberto Moscoso e Ana Cantalice Moscoso, que sempre foram presentes dando todo apoio amor e carinho, também me proporcionando uma boa educação, sempre acreditando em mim, me fazendo persistir nos meus sonhos.

Aos meus professores, especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Kepler Borges França, pela orientação, paciência, dedicação e acolhimento no LABDES (Laboratório de Referência em Dessalinização), apontando clareza para minhas dúvidas, o que foi fundamental para o desenvolvimento desse trabalho, além de me proporcionar conhecimentos sobre tratamentos de efluentes e meio ambiente.

Aos meus amigos da faculdade, Amisia, Ana Gisele, Anna, Gabriela, Gisele, Heloisa, João, Mayara, Marcos, Mikael, Nydia, Wellington, Yara, com quem sempre formei grupos de estudo, compartilhando conhecimentos e experiências enriquecedoras, meu muito obrigado pela colaboração de todos. Juntos, superamos diversos desafios, com a dedicação e excelência de todos, para o nosso crescimento. Brindaremos.

As colegas e amigos do Laboratório de Referência em Dessalinização, Kelly, Maiza, Bruna, Carolina, Edileuza, Osmar, Wellerson, Welber. Companheiros de experimentos, discussões e consertos. O trabalho em equipe, com excelência, colaboração e troca de conhecimentos também foram muito importantes para a realização desse projeto. Sou grato a todos.

Por fim, a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) por todo acolhimento, como também ao curso de Engenharia Química e seu corpo docente, pelos ensinamentos que foram transmitidos no decorrer do curso.

RESUMO

Desde o início da produção de plásticos, em meados do século XX, a contaminação ambiental por esse material é cada vez mais aparente e vem se agravando de forma crescente. O termo microplásticos é usado para agrupar uma gama de materiais sintéticos e poliméricos de tamanho < 5mm. Esses materiais são relatados por diversos estudos no quesito global e ambiental e apresentam riscos físicos e químicos para os organismos na base da cadeia alimentar. O objetivo desse trabalho foi a construção e caracterização de um hidrociclone feito com PVC, como uma tecnologia alternativa viável para que se possa fazer o tratamento de meios aquosos compostos por microplásticos. Neste sentido, foi avaliado o desempenho e observadas as correntes (*underflow* e *overflow*) avaliando-se a eficiência do sistema. A remoção de microplásticos do tipo polietileno (PE) em uma concentração mínima de 0,83g/L usando um hidrociclone construído com material de baixo custo e manutenção. Os resultados indicam que o hidrociclone foi capaz de remover entre 70% e 96% dos microplásticos de polietileno presentes no afluente alimentado ao sistema. Essa é uma informação significativa, pois destaca a eficácia do hidrociclone na remoção de microplásticos, particularmente na configuração denominada "hidrociclone convencional" com uma capacidade de processamento de 48L/min. Nesta configuração, a remoção de microplásticos de polietileno foi mais eficiente, atingindo uma taxa de remoção mais alta. A pesquisa provavelmente incluiu testes em diferentes condições de alimentação para avaliar a influência de variáveis como a vazão do afluente, a concentração inicial de microplásticos e outros parâmetros operacionais no desempenho do hidrociclone. Esses resultados podem ser valiosos para o desenvolvimento de métodos de remoção de microplásticos em sistemas de tratamento de água e efluentes, especialmente em cenários onde a concentração de microplásticos de polietileno é relevante. É importante destacar que a pesquisa pode ter implicações significativas para a proteção do meio ambiente e da qualidade da água, pois os microplásticos representam uma ameaça crescente para os ecossistemas aquáticos e a saúde humana. Portanto, a capacidade de remover eficazmente esses poluentes, especialmente com equipamentos de baixo custo e manutenção, é um avanço importante.

Palavras-Chave: hidrociclone, microplásticos, eficiência.

ABSTRACT

Since the beginning of plastic production in the middle of the 20th century, environmental contamination by this material has become increasingly apparent and has become increasingly worse. The term microplastics is used to group a range of synthetic and polymeric materials < 5mm in size. These materials are reported by several studies on global and environmental issues and present physical and chemical risks to organisms at the base of the food chain. The objective of this work was the construction and characterization of a hydrocyclone made with PVC, as a viable alternative technology for treating aqueous media composed of microplastics. In this sense, performance was evaluated, and currents (underflow and overflow) were observed, evaluating the efficiency of the system. the removal of polyethylene (PE) type microplastics at a minimum concentration of 0.83g/L using a hydrocyclone built with low-cost and low-maintenance material. The results indicate that the hydrocyclone was able to remove between 70% and 96% of the polyethylene microplastics present in the influent fed to the system. This is significant information as it highlights the effectiveness of the hydrocyclone in removing microplastics, particularly in the indicated "conventional hydrocyclone" configuration with a processing capacity of 48L/min. In this configuration, the removal of polyethylene microplastics was more efficient, achieving a higher removal rate. Research has already included tests under different feeding conditions to evaluate the influence of variables such as influent flow rate, initial concentration of microplastics and other operational settings on hydrocyclone performance. These results can be useful for developing methods for removing microplastics in water and wastewater treatment systems, especially in scenarios where the concentration of polyethylene microplastics is relevant. Importantly, the research could have significant implications for environmental protection and water quality, as microplastics pose a growing threat to aquatic ecosystems and human health. Therefore, the ability to effectively remove these pollutants, especially with low-cost and low-maintenance equipment, is an important advance.

Keywords: hydrocyclone, microplastics, efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação geométrica do hidrociclone. 15
Figura 2. Princípio de funcionamento de um hidrociclone. 16
Figura 3. Cortes realizados no projeto do hidrociclone em torno CNC. 18
Figura 4. Dimensões do hidrociclone convencional. 21
Figura 5. Peças feitas para a montagem do hidrociclone 21
Figura 6. Esquematização do sistema. 23
Figura 7. Fração de massa recuperada nas duas correntes de saída com alimentação de 150g de MP. 24
Figura 8. Cálculo de eficiência de separação de microplásticos no sistema com hidrociclone. 24
Figura 9. Cálculo de eficiência total versus Vazão de alimentação. 25
Figura 10. Gráfico que relaciona a Vazão de Alimentação versus Fração de Massa Recuperada 27
Figura 11. Eficiência em função a variação de concentração do sistema. 27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Água no Sistema Hidrociclone. 22
Tabela 2. Dados de fração de massa de microplásticos filtradas e recuperadas. 23
Tabela 3. Dados da eficiência com relação as concentrações de MP no sistema com vazão de (48 L/min). 26

ÍNDICE DE ABREVIATURA E SIGLAS

ET	Eficiência do sistema
ETARs	Estações de Tratamento de Águas Residuais
FMR	Fração de massa recuperada
LABDES	Laboratório de Dessalinização
MP	Microplásticos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 10
1.1. Problemática 10
1.2. Justificativa 10
1.3. **Delimitação** 11
2. OBJETIVOS 13
2.1. Objetivos Gerais 13
2.2. Objetivos Específicos 13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
3.1. Microplásticos e Desafios 14
3.2. Hidrociclones: Descrição e Funcionamento 15
4. METODOLOGIA 18
4.1. Construção do Equipamento 18
4.2. Operação e Separação no Sistema 19
4.3. Análises Realizadas 20
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 21
5.1. Construção do Hidrociclone 21
5.2. Sistema Hidrociclone com Água 22
5.3. Sistema Hidrociclone com Água – Microplásticos 22
5.3.1. Fração de massa recuperada 22
5.3.2. Eficiência do Hidrociclone com MP 23
5.3.3. FRM e Eficiência do Hidrociclone: Segunda Análise 24
5.3.4. Efeito da Concentração de MP no Desempenho do Hidrociclone 25
6. CONCLUSÃO 28

1. INTRODUÇÃO

1.1. Problemática

A escassez dos recursos hídricos, seja por fenômenos naturais (condições climáticas) ou ações antrópicas (uso desenfreado e aumento da contaminação deste recurso), é uma importante pauta no cenário socioambiental atual (Henz et al., 2016). A água é o bem mais precioso que temos no mundo, sendo um recurso finito e nem sempre disponível seu reuso se tornou uma alternativa cada vez mais recorrente no Brasil. Água de reuso é o reaproveitamento de águas anteriormente utilizadas no comércio, residências e indústria por meio de processos de tratamento. Embora essa água seja de qualidade inferior, ela é muito utilizada em vários setores, incluindo o meio agrícola para irrigação (Pessoa, 2019).

Nos processos de tratamento de águas residuais, os hidrociclones são usados principalmente para a separação de areia ou cascalho. Nas situações em que a água apresenta alta quantidade de sólidos, pode ser necessária a instalação de equipamentos como pré-filtro instalados antes do sistema de filtragem (Jank et al., 2016). Há alguns anos, componentes sólidos que vêm se destacando por apresentarem problemáticas quando incorporados em meios aquosos e/ou descartados em corpos d'água naturais, são os microplásticos (MPs), sendo estes pequenos fragmentos de plástico, menores do que 5µm. A poluição causada por este componente é preocupante, configurando-se como um desafio em âmbito global. Desta forma, o hidrociclone surge como uma tecnologia viável e interessante no tratamento dos meios aquosos contendo microplásticos, de maneira que os produtos oriundos do processo de separação atendam a normas e legislações vigentes.

1.2. Justificativa

Hidrociclones são equipamentos de separação que apresentam diferentes capacidades. São indicados para o tratamento de efluentes, considerados como alternativa viável e atraente do ponto de vista econômico devido ao seu baixo custo de aquisição instalação e manutenção. Estudos mostram que o hidrociclone é uma tecnologia adequada para determinados tipos de tratamentos de águas residuais. Tais equipamentos são agrupados em famílias de acordo com suas dimensões e entre essas famílias as mais estudadas são Rietema e de Bradley, cada uma com suas respectivas características (Arruda, 2008).

Este trabalho visa avaliar a eficiência do processo de separação água/microplásticos de um sistema de tratamento de efluentes com hidrociclone. O descarte incorreto, as ilhas de acumulação de lixo e os tamanhos variados de plásticos fazem com que a poluição plástica

chegue a cadeias tróficas por ingestão errônea feita pelos animais marinhos (Foekema et al., 2013). Posteriormente, esses animais podem estar em nossas refeições.

1.3. Delimitação

O hidrociclone é uma tecnologia viável para processos de separação de Sólido/Líquido, Líquido/Líquido, Gás/líquido e Sólido/Sólido, e por sua vez são indicados para os tratamentos de efluentes. É possível se fazer alterações geométricas nesse equipamento, para atender a determinados tipos de separação, de acordo com a necessidade. As delimitações ou limitações do hidrociclone incluem:

- Tamanho das partículas: Hidrociclones são mais eficazes na separação de partículas com tamanhos na faixa de 5 a 250 micrômetros. Partículas muito pequenas ou muito grandes podem não ser separadas de forma eficaz;
- Densidade das partículas: Hidrociclones funcionam melhor quando há uma diferença significativa na densidade entre as partículas a serem separadas e o fluido transportador. Partículas com densidades muito semelhantes podem ser difíceis de separar;
- Concentração de partículas: A eficiência de separação do hidrociclone é afetada pela concentração de partículas no fluxo de entrada. Concentrações extremamente baixas ou extremamente altas podem reduzir a eficácia da separação;
- Viscosidade do fluido: Hidrociclones são projetados principalmente para líquidos, e a viscosidade do fluido influencia seu desempenho. Fluidos muito viscosos podem afetar a eficiência da separação;
- Projeto e geometria: O design e as dimensões do hidrociclone podem afetar sua eficiência. A geometria do cone, o ângulo de inclinação, o diâmetro do cilindro de entrada e outras características do projeto são importantes para garantir um desempenho adequado;
- Pressão e vazão: As condições de operação, incluindo a pressão e a vazão do fluido, afetam o funcionamento do hidrociclone. A otimização das condições operacionais é necessária para obter os melhores resultados de separação;
- Desgaste: Como as partículas sólidas em suspensão podem causar desgaste nas superfícies internas do hidrociclone, a manutenção regular é necessária para garantir um desempenho constante ao longo do tempo;
- Aplicação específica: Hidrociclones são mais adequados para algumas aplicações do que para outras. Eles são frequentemente utilizados na indústria de mineração,

processamento de minerais, petróleo, água, tratamento de efluentes e outras áreas onde a separação de partículas é necessária.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Avaliar um sistema composto por hidrociclone, para fins de separação de microplásticos (MPs) em meios aquosos.

2.2. Objetivos Específicos

- Construir em escala de bancada um hidrociclone de PVC para fins de separação líquido/líquido e líquido/sólidos;
- Montar um sistema composto por motor bomba, tanque de alimentação, hidrociclone e acessórios, visando caracterizá-lo com os sistemas: (1) água/água e (2) água /meio particulado, sob diferentes pressões de alimentação;
- Avaliar os parâmetros operacionais no hidrociclone sobre as vazões no *underflow* e *overflow*, concentração e eficiência de separação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Microplásticos e Desafios

Nos dias atuais, tem-se percebido que a concentração de microplásticos em meios aquosos como o oceano, rios e lagos vem aumentando de uma forma muito rápida devido o manejo e o uso para diversas aplicações como industriais, têxtil e de alimentos.

O microplástico (MP) é um componente imperceptível ao olho humano que tem um potencial integrado de desequilibrar o meio aquoso, a fauna e a flora. Um exemplo típico da presença de microplásticos no meio aquoso atualmente, vem das águas usadas em lavagens de roupas sintéticas, que desprendem 6 microplásticos (citar quais) e de forma direta afetam a natureza. Existem vários meios de lançamentos de microplásticos no oceano e em outros corpos d'água, observados pelos estudiosos do meio ambiente.

O desafio de separar microplásticos do meio aquoso por meio de um sistema composto com hidrociclone vem a ser interessante, uma vez que não há uso de produtos químicos. Na literatura, é possível encontrarmos uma revisão sobre métodos de separação desses microplásticos para posterior descarte ou reuso da água, entretanto por se tratar de compostos na escala micro, alguns métodos estudados não conseguem prever tais características, nem a devida separação e tratamento dos microplásticos.

Apesar das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs) municipais serem indicadas como principais receptores de microplásticos (advindos de produtos de uso pessoal como cosméticos, lavagens ou ainda produtos têxteis, entre outros) antes de encaminhá-los para corpos d'água, encontram desafios ao realizar a retiradas destes microplásticos, devido à baixa densidade e tamanho pequeno desses compostos, não promovendo desta forma a eficiência necessária no tratamento dessas águas.

Um dos recentes trabalhos que aborda de maneira mais minuciosa a questão dos microplásticos em corpos d'água é o de Ngo et. al (2019), no qual é realizada uma revisão acerca do tema e eficiência nas ETARs, bem como a abordagem de tecnologias até então aplicadas ao tratamento e remoção destes contaminantes. Ngo et al. (2019) apresentam que uma solução completa de tratamento para remoção de MP não é fornecida dentre os métodos utilizados atualmente, mas somente uma retenção desses microplásticos em lodo e resíduos sólidos, outro ponto desafiador quando estes são colocados como fertilizantes ou despejados como aterro visto o grau de poluição que podem vir a causar nos corpos d'água naturais.

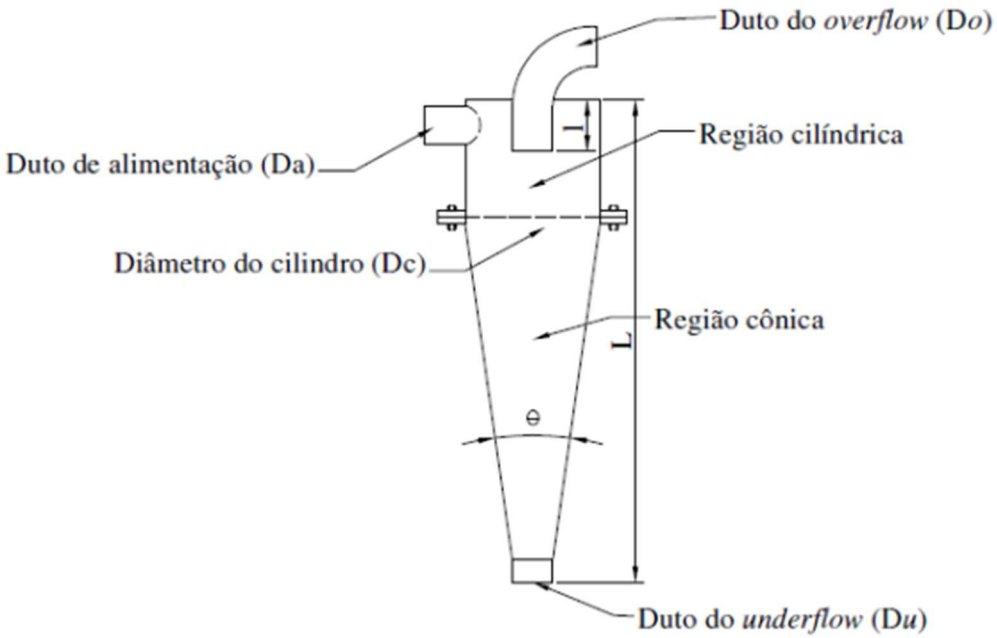
No contexto do estudo e busca de um método ou aplicação de tecnologia que venha a proporcionar quebra e captura dos MPs (eficiente separação destes, das águas que os contém), o hidrociclone e seu funcionamento apresentam-se com grande potencial de eficiência para remoção desse desafiador componente, de corpos d'água.

3.2. Hidrociclones: Descrição e Funcionamento

Os hidrociclones, também conhecidos como ciclones hidráulicos, são dispositivos cônicos, cilíndricos, utilizados na separação de sólidos/líquido, líquido/líquido, gás/líquido, sólido/sólido. O hidrociclone vem sendo utilizado de maneira diversificada na indústria química, de alimentos, petroquímica, entre outros (Arruda, 2008).

Tratando-se de sua estrutura, um hidrociclone convencional apresenta um corpo cônico conectado a um corpo cilíndrico, um duto de alimentação tangencialmente conectado na parte cilíndrica. A região cônica termina no orifício *underflow*, que é o diâmetro interno do ponto de descarga, conforme observado na Figura 1. As dimensões desse orifício são determinadas pelas aplicações envolvidas do equipamento. A outra saída é localizada no topo do equipamento, ligada à parte cilíndrica denominada de *overflow* (Luna, 2014).

Figura 1. Representação geométrica do hidrociclone.

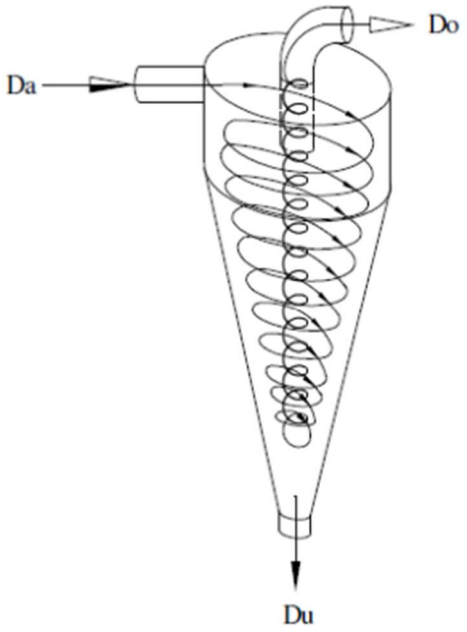


Fonte: Adaptado de Luna, 2014.

O princípio de separação desse equipamento é a sedimentação centrífuga, isto é, as partículas suspensas são submetidas à aceleração centrífuga que as separa do fluido. O líquido,

contendo a suspensão de partículas, é injetado tangencialmente através da entrada situada no topo da parte cilíndrica do hidrociclone. Como resultado da entrada tangencial, um intenso movimento rotacional é gerado dentro do equipamento. Este movimento rotacional do fluido, ao longo de sua trajetória, gera acelerações centrífugas diretamente atuantes nas partículas, forçando-as a se moverem em direção à parede do equipamento (Svarovsky, 2000). A Figura 2 apresenta os vórtices promovidos a partir do funcionamento do equipamento, responsáveis pelo processo de separação.

Figura 2. Princípio de funcionamento de um hidrociclone.



Fonte: SOCCOL, 2003.

A coleta de partículas em um hidrociclone é determinada pelo balanço de forças que atuam nestas. Podem ser citadas as forças de empuxo (pela diferença de densidade da partícula e do líquido) e de arraste, e o balanço dessas fornece a velocidade terminal da partícula que depende de seu tamanho e de sua forma, além das propriedades do fluido. Dessa maneira, uma partícula é dita coletada quando consegue atingir a parede do equipamento, sendo direcionadas para o *underflow* enquanto aquelas que permaneceram no vórtice interno são descarregadas pelo *overflow* (Schapel; Chase, 1998; Façanha, 2012).

Hidrociclones são objetos de pesquisa há muito tempo. Entretanto, somente alguns anos atrás, o equipamento começou a ser utilizado industrialmente (Coelho, 2011). A empregabilidade desses equipamentos em vários ramos dar-se-á pela facilidade de manutenção

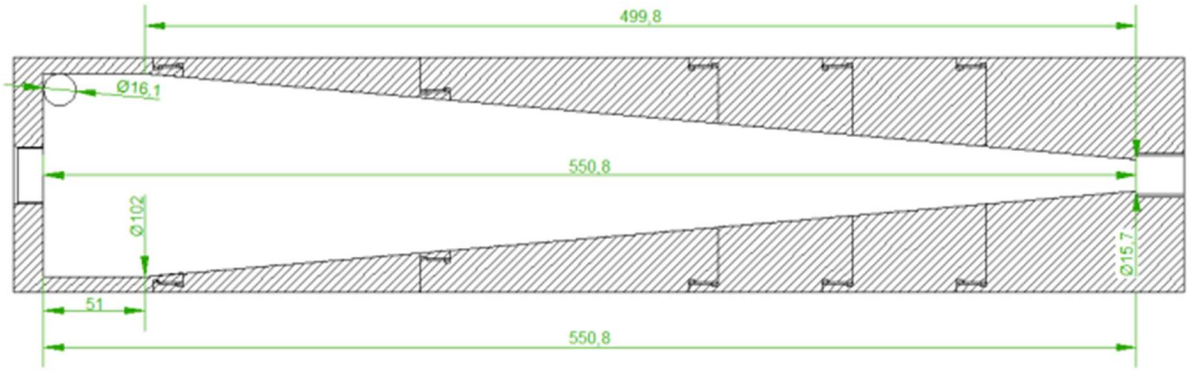
e operação, ocupação de menor espaço quando comparado a outros equipamentos que promovem separação, dentre outros quesitos.

4. METODOLOGIA

4.1. Construção do Equipamento

O hidrociclone foi construído a partir de um tarugo de PVC, manuseado em torno CNC pertencente ao laboratório – LABDES. O projeto visou a construção de seções constituintes do corpo do hidrociclone, as quais tiveram o encaixe realizado por meio de roscas finas, produzidas para tal fim conforme desenho indicativo na Figura 3.

Figura 3. Cortes realizados no projeto do hidrociclone em torno CNC.

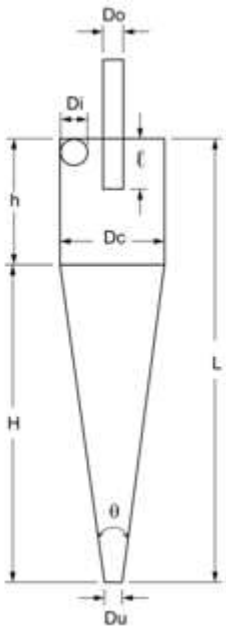


Fonte: Autor, 2023.

O hidrociclone convencional (HC) adota dimensões ajustadas com base no projeto proposto por Souza (2009) para o processo de separação entre óleo e água, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4. Dimensões do hidrociclone convencional**.**

Dimensões (mm)	
Di	16.1
Do	20.4
Du	15.7
Dc	102
h	51
H	499.8
l	34
L	550.8



4.2. Operação e Separação no Sistema

Após construção do equipamento, foi possível o projeto do sistema de bancada. Nesta etapa, foram realizados o estudo e a verificação dos acessórios necessários ao sistema. Para realização dos ensaios, em escala de laboratório, foi proposto inicialmente a utilização de uma alimentação água como meio de obtenção de uma faixa adequada de pressão de operação para o sistema. Foi avaliada a eficiência da separação de microplásticos do meio aquoso, com uso do hidrociclone proposto, variando-se a concentração destes contaminantes, em um sistema composto por um hidrociclone, bomba, válvulas, coletores, rotâmetros e manômetros. Inicialmente, foram utilizados papéis de filtro juntamente com vidros de relógio que foram colocados em uma estufa por 20 minutos para evitar qualquer tipo de impureza, para uma posterior coleta, filtração e pesagem das amostras.

Para realização do experimento com hidrociclone, preencheu-se um tanque com 180L de água e misturou-se com 220 g de microplásticos, obtendo-se uma certa concentração. Com isso, o tanque ficou sob agitação durante 2 minutos. Passado esse tempo, ligou-se o sistema somente com o by-pass aberto, por 1 minuto, promovendo uma primeira circulação do sistema. Em seguida, foi aberta a válvula de alimentação do sistema, para a qual foram definidas diferentes vazões manualmente, por mais 2 minutos.

Na segunda etapa foram tiradas amostras da alimentação, *underflow* (saída do concentrado do hidrociclone*) e overflow* (saída do permeado do hidrociclone) nos pontos de coleta referente a alimentação por 5 segundos, em seguida coletou-se a amostra por 3 segundos e fechou-se este ponto. Após isso, repetiu-se o mesmo procedimento, simultaneamente, no *underflow* e no *overflow.*

Na terceira etapa, foram realizadas filtrações das amostras coletadas, em um sistema a vácuo, para otimizar o tempo de experimento. Usou-se filtros de papel e vidros de relógios para cada amostra coletada. O material particulado e retido nos filtros de papel foi colocado nos vidros de relógio para uma posterior secagem. Essas amostras foram colocadas durante aproximadamente 2 horas em uma estufa a uma temperatura de 110°C, para remover a umidade e também não danifique a estrutura dos microplásticos. Retirou-se todas as amostras secas da estufa, e após esfriar, pesou-se em uma balança de precisão. A quantidade de microplásticos de cada amostra foi calculada pela diferença de peso dos vidros de relógio e filtros de papel, com e sem o material particulado. Analisando os dados coletados no sistema construído, parâmetros devem ser avaliados, como: a eficiência do sistema, a massa recuperada de microplásticos na corrente concentrada e o custo energético do sistema.

4.3. Análises Realizadas

Em alguns estágios de tempo, durante operação do sistema, em determinada pressão foram realizadas coletas de amostras nos trechos a jusante da bomba e a montante da entrada do hidrociclone (alimentação), saídas do concentrado (*underflow*) e diluída (*overflow*). Após a operação e coletas nas correntes do sistema. Em seguida, foram realizadas a filtração das amostras em sistema de bomba à vácuo e quantificação (peso), após secagem em estufa. Com relação a separação promovida pelo sistema construído, dois parâmetros foram avaliados, sendo eles: fração de massa recuperada e/ou coletada na corrente concentração (Eq. 1) e eficiência do sistema no processo de separação (Eq. 2).

$$FRM = 1 - \left(\frac{C_o Q_o}{C_a Q_a}\right) \tag{1}$$

Onde:

C_o e C_a são as concentrações de sólidos (MP), na unidade de kg/m^3 ou g/L da mistura no *overflow* e na alimentação, respectivamente.

$$ET = \frac{W_{su}}{W_{sa}} \Rightarrow ET = \frac{X_{su}\, W_u}{X_{sa}\, W_a} \tag{2}$$

Em que,

W_{su} - vazão mássica de sólidos recuperados no "*underflow*", g/s;

W_{sa} - vazão mássica de sólidos na alimentação, g/s;

X_{su} - fração mássica do sólido no "*underflow*", adimensional;

X_{sa} - fração mássica do sólido na alimentação, adimensional;

W_u - vazão mássica da suspensão no "*underflow*", g/L; e

W_a - vazão mássica da suspensão na alimentação, g/L.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Construção do Hidrociclone

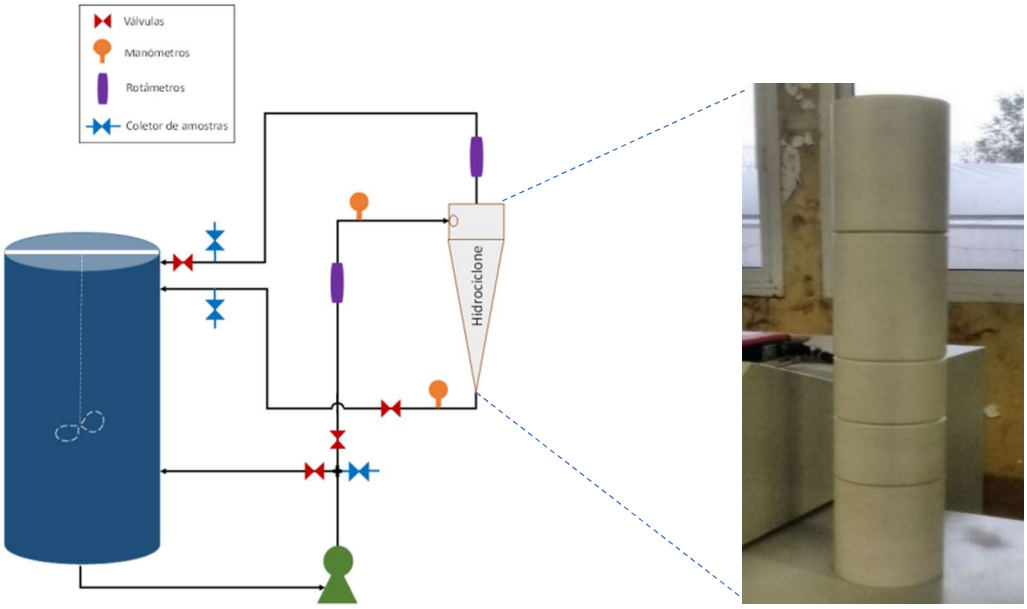
O material utilizado para a construção do hidrociclone foi PVC, que é um material de maior resistência a agentes biológicos ou reagentes químicos e com maior custo/benefício, manuseado em um torno CNC. Todas suas seções foram conectadas por um sistema de rosca. No interior do equipamento as paredes são lisas, cônicas e cilíndricas Figura 5.

Figura 5. Peças feitas para a montagem do hidrociclone.

Fonte: Autor, 2023.

A montagem do sistema contendo o hidrociclone posicionado na vertical foi realizada segundo o projeto apresentado na Figura 6.

Figura 6. Esquematização do sistema.



Fonte: Autor, 2023.

5.2. Sistema Hidrociclone com Água

Inicialmente, para a realização dos experimentos, empregou-se uma alimentação água como medida para a obtenção de faixas de referência pré-determinadas de acordo com as pressões de operação para o sistema dadas na Tabela 1.

Tabela 1. Água no Sistema Hidrociclone.

Pin (bar)	Punder (bar)	Qin (LPM)	Qover (LPM)
0,5	0,23	44	30
1	0,25	58	35
1,5	0,31	70	39

Fonte: Autor, 2023.

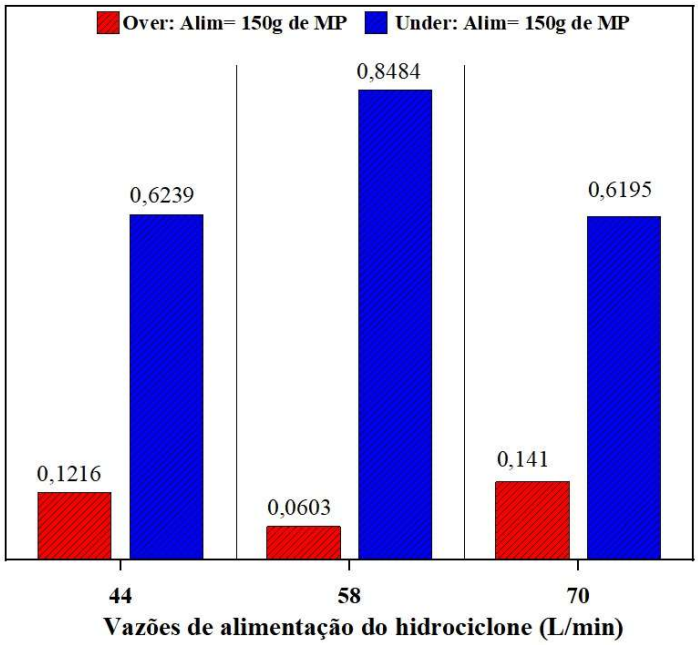
Após a montagem e construção do sistema foi feito um experimento teste, somente com água, para avaliar a vazão produzida em litros por minuto (L/min). O aumento da pressão de alimentação e da corrente de saída concentrada (*underflow*) provocou uma maior vazão. De forma análoga aconteceu ao se aumentar a pressão na corrente permeada (*overflow).*

5.3. Sistema Hidrociclone com Água – Microplásticos

5.3.1. Fração de massa recuperada

Na Figura 7 está representado o histograma da fração de recuperação de microplastico nas saídas superior (*overflow*) e inferior (*underflow*) para uma alimentação no hidrociclone de 150 g de microplastico (MP) com diâmetro de 0,6mm. A partir destes resultados nota-se uma maior recuperação de massa como o esperado na corrente concentrada (*underflow)*, para todas as pressões de operação do sistema. Dessa forma, para a vazão de alimentação de 58 L/min o sistema com hidrociclone proporcionou a maior fração de massa recuperada concordante ao que está na literatura.

Figura 7. Fração de massa recuperada nas duas correntes de saída com alimentação de 150g de MP.



Fonte: Autor, 2023.

Após experimento realizado com água e microplásticos, calculou-se a fração de massa recuperada (FRM), cujos resultados são observados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados de fração de massa de microplásticos filtradas e recuperadas.

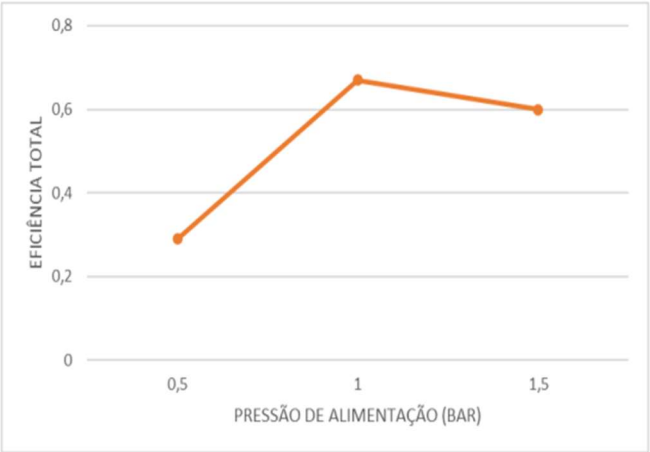
Sistema com 150g de MP	P1	P2	P3
FRM no Sistema Hidrociclone	0,888	0,927	0,841

Fonte: Autor, 2023.

5.3.2. Eficiência do Hidrociclone com MP

Diante do modo de operação inicial feito no sistema com o hidrociclone, para melhor avaliação do seu desempenho, foi feito em termos de sua eficiência total de separação para as três pré-determinadas condições de pressão de operação, como representado na Figura 8.

Figura 8. Eficiência de separação de microplásticos usando hidrociclone em função da pressão de alimentação.



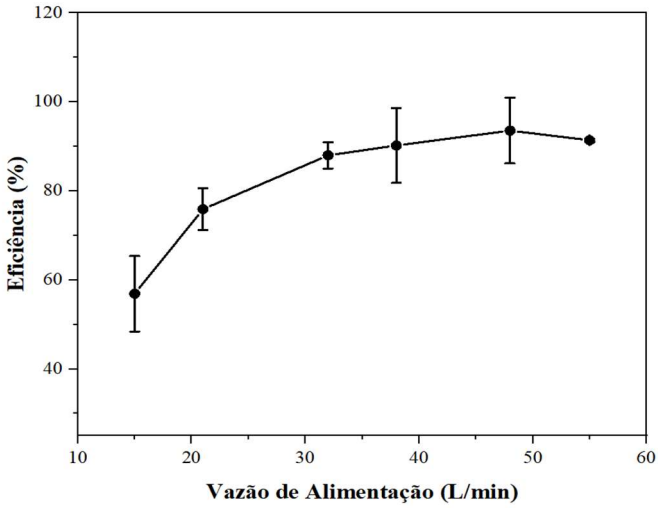
Fonte: Autor, 2023.

De acordo com Vieira et al. (2001), quanto maior as pressões de operação maiores são as eficiências de separação. Diante o exposto, com intuito de avaliar o desempenho do hidrociclone em um maior número de condições de operação, foram então pré-determinadas seis vazões de alimentação (15, 25, 35, 45, 55 e 65 L/min).

5.3.3. FRM e Eficiência do Hidrociclone: Segunda Análise

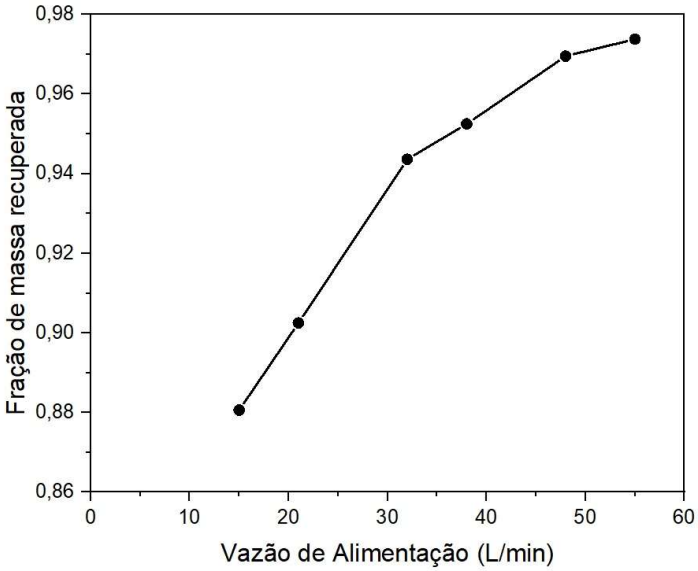
Os resultados obtidos para fração de massa recuperada de MP e eficiência de separação para as seis condições de vazão de alimentação supracitadas, estão apresentadas nas Figuras 9 e 10, em que se observou que procedimento de abertura dos pontos de coletas das amostras água-microplásticos provocou queda nas vazões de alimentação do sistema.

Figura 9. Eficiência total em função da vazão de alimentação.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 10. Vazão de Alimentação em função da Fração de Massa Recuperada.



Fonte: Autor, 2023.

Pode-se afirmar que, na Figura 9, para maiores vazões proporcionam um aumento nas forças de arraste ou centrífuga que estão atuando de forma mais significativa sob o meio particulado, sabendo que essas partículas possuem densidades menores ou parecidas com a densidade da água tratada (910 g/L). Diante do que foi afirmado, o comportamento dessas partículas em meio aquoso comprova maiores valores, no que diz respeito as coletas de MP na corrente 17 do concentrado (*underflow*), o que é previsto para maiores vazões ou pressões de alimentação que atuam em separadores ciclônicos.

Sobre a eficiência total do hidrociclone convencional, variando-se a vazão de alimentação para uma concentração constante de microplásticos, independente das forças que atuavam no processo de separação, o qual provoca uma maior o menor dispersão do que está na mistura alimentada, mostrou-se um sistema com alta eficiência até mesmo para as menores e intermediárias pressões do sistema, onde podemos observar um comportamento crescente a partir da vazão de 32 LPM, variando em torno de 55% a 90% na remoção do material particulado em suspensão da alimentação, ou seja, para maiores vazões melhores resultados com relação a eficiência do sistema

5.3.4. Efeito da Concentração de MP no Desempenho do Hidrociclone

Colocadas as condições já determinadas anteriormente com relação a vazões de alimentação do sistema (15, 25, 35, 45, 55 e 65 L/min), esses dados nos permitiram observar a maior eficiência do sistema do hidrociclone que foi na vazão de (48 LPM) de acordo com a

figura 9, ao partir desse conceito pode-se suputar outras análises sob diferentes concentrações de MP para dada essa mesma vazão de alimentação.

A Tabela 3 mostra a quantidade de material particulado em meio aquoso colocado no sistema do hidrociclone convencional, variando consequentemente suas respectivas concentrações e como variável de efeito os valores referentes as suas eficiências.

Tabela 3. Dados da eficiência com relação as concentrações de MP no sistema com vazão de (48 L/min).

Massa de MP (g)	Concentração de MP (g/L)	Eficiência (%)
150	0,83	93,54
225	1,25	96,40
300	1,67	91,53
360	2	97,19
440	2,44	95,48

Fonte: Autor, 2023.

A partir da Figura 11 é possível inferir que o sistema do hidrociclone está operando com uma vazão constante. Nesse contexto, observa-se claramente a ocorrência de oscilações ora maior ora menor em relação à recuperação do material particulado na corrente mais concentrada, também conhecida como *underflow*. Essa parte do sistema é responsável pela quantidade de massa que deve ser considerada.

O presente comportamento mostrado na figura 11 vai de encontro com o que é dito na literatura por Svarovsky (2000), que sugere suspensões diluídas preferivelmente para obter maiores e melhores eficiências. Segundo PEREIRA (2022), é preciso fazer uma investigação minuciosa a respeito do comportamento do sistema com hidrociclone, sendo possível listar algumas particularidades:

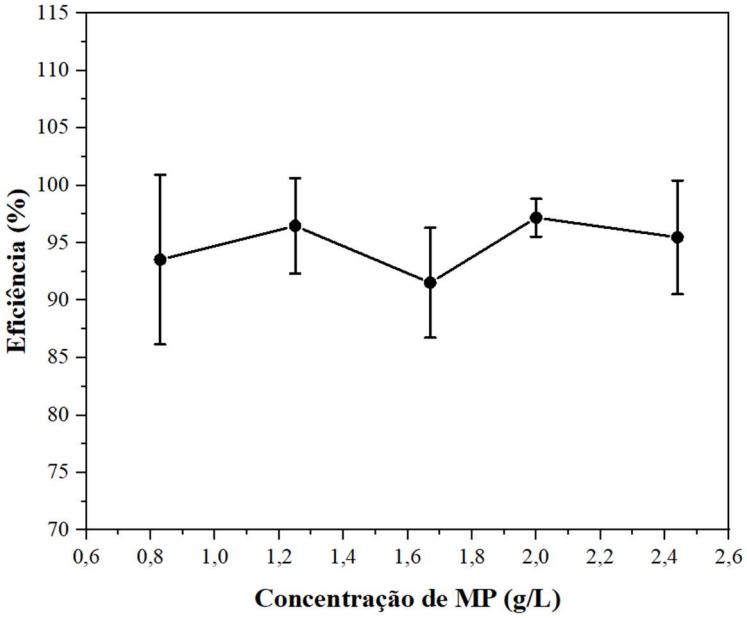
- As suspensões com concentrações 0,83; 1,25; 1,67; 2 e 2,44 g/L constituíram-se de polietileno, para o qual partículas de menor diâmetro mantiveram-se dispersas em água sem a necessidade de fatores externos em contrapartida à de maiores diâmetros (0,6mm), sendo a agitação constante fator determinante para sua dispersão;

- Pode haver algum tipo de força entre as partículas que quando colocadas em meio aquoso apresentaram esse comportamento oscilante

. Nesse contexto, as eficiências de separação no HC à vazão constante podem estar relacionadas a um possível “empacotamento” de partículas PE que acarretaram um instável comportamento no que diz respeito ao direcionamento destas às paredes e saída concentrada.

Para as séries de experimentos realizadas, efeitos divisores de correntes de saída em relação eficiência total obtida estiveram presentes no sistema HC, durante processo de separação para as várias concentrações de microplásticos alimentados em suspensão no sistema.

Figura 11. Eficiência em função a variação da concentração do sistema.



Fonte: Autor, 2023.

6. CONCLUSÃO

Diante do exposto, é evidente que o hidrociclone desempenha um papel indispensável no campo da separação, seja entre líquidos ou entre sólidos e líquidos. Sua versatilidade o torna uma tecnologia de destaque, capaz de atingir uma variedade de objetivos. Notavelmente, os hidrociclones desenvolvidos pelo LABDES são confeccionados em PVC, um material acessível que facilita sua manutenção, viabilizando a separação eficiente dos principais contaminantes.

O sistema criado demonstra sua eficácia ao separar material particulado em seis níveis de pressão operacional, mantendo um elevado fluxo de produção na corrente de saída. Os resultados obtidos são particularmente notáveis nas pressões elevadas, ainda que o hidrociclone apresente uma notável capacidade de separação entre água e partículas mesmo sob pressões reduzidas. O sistema desenvolvido promoveu a separação de MP até em baixas vazões de operação removendo no mínimo 88% dos microplásticos, eficiências acima de 90% para capacidades de processamentos intermediárias e variando-se a concentração a uma vazão constante de 48 LPM temos uma média de 95% de eficiência, com altas vazões de produção nas correntes de saída.

No tocante às propriedades dos microplásticos, podemos afirmar sua consistência no sistema, especialmente em relação à quantidade de massa recuperada na corrente de concentrado (*underflow*). Por conseguinte, a eficiência oscilante do hidrociclone em relação à concentração de microplásticos é também reflexo dessa certeza. É importante ressaltar que a eficácia do sistema é bastante precisa em termos de separação, contudo, a variabilidade na concentração de microplásticos introduz uma dimensão de complexidade, resultando no comportamento oscilatório observado. Portanto, a constante busca por aprimoramento e a compreensão desses padrões oscilatórios são cruciais para maximizar a eficiência do processo de separação.

REFERÊNCIAS

PEREIRA, Adriana Barbosa da Costa. **Estudo comparativo do desempenho de hidrociclones, convencional, e modificado, na remoção de microplásticos em meio aquoso**. 2022. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina grande, 2022. p. 97.

ANDRADE, V. T de. **Construção e Avaliação de Modelos de Hidrociclone para Tratamento de Água Residuária**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas – SP, 2007.

ARRUDA, A. A. **Otimização de um hidrociclone utilizado na separação de uma mistura líquido-líquido**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação e Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco, 2008.

BACCI, D. C.; PATACA, E. M**. Educação para a água.** Estudos Avançados [online], São Paulo, v. 22, n. 63, p. 211-226, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142008000200014&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 15 out. 2022.

COELHO, D. B**. Desempenho de um hidrociclone para separação de águas oleosas**. Monografia de graduação, UFRN, 2011.

FAÇANHA, J. M. F. I**ncorporação de um cilindro filtrante na separação sólido – líquido em hidrociclones**. Dissertação, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

FOEKEMA, Edwin M et al. Foekema EM. Plastic in North Sea Fish. ES&T 2013. Environmenrtal **Science & Technology**, v. 47, p. 8818–8824, 2013.LUYBEN, W. L. Importance of pressure-selection in pressure-swing distillation. Computers & Chemical Engineering, v. 149, p. 107279, 2021.

HENZ, F. M.; PAULA, L. R.; NEVES, M. I. R.; RIBEIRO, N. T.; BORTOLINI, J. Reuso da Água Para Fins Agrícolas. **Anais da X Semana - Agronomia - FAG. Cascavel** - PR. 13 e 14 de junho de 2016.

HOWELL, J.A. **Future of membranes and membrane reactor in green technologies and for water reuse**, Desalination 162, p.1. ISSN 0011-9164 CODEN DSLNAH, 2004.

JANK, A., MÜLLER, W., WALDHUBER, S., GERKE, F., EBNER, C., BOCKREIS, A., **Impurities in pretreated biowaste for co-digestion**: A determination approach, Waste Management, 52, 96-103, 2016.

LUNA, F. D. T. **Estudo Numérico do processo de separação de um sistema bifásico em separador Ciclônico**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2014.

NGO, P. L.; PRAMANIK, B. K.; SHAH, K.; ROYCHAND, R. Pathway, **classification and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment plants***. Environmental Pollution 255 (2019) 113326 – Elsevier.

PESSOA, J. D**. Desenvolvimento de um Sistema de Hidrociclone/ Membranas Cerâmicas para Tratamento de Águas Residuárias para Fins de Reuso.** Programa de Pós-Graduação (Qualificação - Doutorado) em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina – PB, 2019.

SCHAPEL, S. C.; CHASE, G. G. **Modeling of hydrocyclone flow with permeable walls. Advances in Filtration and Separation Technology**, v. 11, p. 33–36, 1998.

SOCOOL, O. J. **Construção e Avaliação de Hidrociclone para Pré-Filtrangem da Água de Irrigação.** 109p. Tese – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba – Estado de São Paulo, 2003.

SOUZA, J. S. **Estudo Numérico da Termo fluidodinâmica da Separação de Óleos Pesados de uma Corrente de Águas Oleosas Via Hidrociclone**, Dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2009

SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**, Chemical Engineering Series, 4º ed.,Butterworths, London, 2000.

THE OCEAN CLEANUP. **The Great Pacific Garbage Patch**. Disponível em: . Acesso em: 15 ago. 2023.