

Salpa: Desenvolvimento de uma boia controlada remotamente para captura de microplásticos

Rodrigo Penno Dini
Escola de Ensino Médio e Técnico
SENAC Santa Cruz do Sul
Santa Cruz do Sul, Brasil,
rodrigo.dini@escoteiros.org.br

Vitor Kniphoff
Escola de Ensino Médio e Técnico
SENAC Santa Cruz do Sul
Santa Cruz do Sul, Brasil,
vitorkniphoff1@gmail.com

João Vitor Kuhn Rangel
Escola de Ensino Médio e Técnico
SENAC Santa Cruz do Sul
Santa Cruz do Sul, Brasil,
joavitorkrangel@gmail.com

Abstract—This project presents the development of 'Salpa', a low-cost filtering buoy designed for microplastic remediation in water bodies. The solution integrates a capture system using magnetorheological fluid (MRF) with an electronic flow control system and remote monitoring, aiming to offer accessible and effective technology to mitigate environmental and health impacts associated with these pollutants

Keywords—Microplastics; Filtration; Sustainability.

Resumo— Este projeto apresenta o desenvolvimento da 'Salpa', uma boia filtrante de baixo custo projetada para a remediação de microplásticos em corpos d'água. A solução integra um sistema de captura por meio de um fluido magneto reológico (MRF) com um sistema de controle de vazão eletrônico e monitoramento remoto, visando oferecer uma tecnologia acessível e eficaz para mitigar os impactos ambientais e de saúde associados a estes poluentes.

Palavras-chave—Microplásticos; Filtragem; Sustentabilidade.

I. INTRODUÇÃO

A crescente prevalência de microplásticos (MPs) em nosso ecossistema tem desencadeado alarmantes preocupações devido aos perigos associados a essas partículas. Além dos efeitos nocivos já conhecidos, como a contaminação dos oceanos e ecossistemas terrestres, estudos recentes destacam os perigos adicionais que os microplásticos representam para a saúde humana. A acumulação destas partículas no sistema cardiovascular e cerebral pode resultar em complicações graves, incluindo intoxicações e outros impactos adversos à saúde [1; 2].

Diante desse desafio multidimensional, é crucial ir além da conscientização e implementar medidas de mitigação eficazes e acessíveis. É neste ponto que este projeto se justifica: em vez de apenas discutir o problema, ele se propõe a construir uma solução. Esta pesquisa apresenta o desenvolvimento e a validação da "Salpa", uma boia filtrante de baixo custo que emprega uma abordagem tecnológica inovadora para a remoção ativa de microplásticos. Ao integrar um sistema de captura por fluido magnetoreológico com um controle de vazão eletrônico e monitorado, o projeto aborda diretamente os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3 (Saúde e Bem-Estar), 12 (Consumo e Produção Sustentáveis) e 14 (Vida na Água). Dessa forma, buscamos não apenas ampliar a conscientização, mas também contribuir com uma ferramenta tangível para a preservação ambiental e proteção da saúde.

Nosso objetivo é conduzir pesquisas exploratórias para desenvolver uma boia com capacidade de limpeza

eficiente de resíduos plásticos em corpos d'água, com o intuito de proteger a saúde dos ecossistemas aquáticos e das comunidades humanas.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Formas de degradação de microplásticos:

A degradação dos microplásticos no ambiente ocorre através de processos abióticos e bióticos, sendo a fotodegradação o mecanismo inicial mais significativo desencadeado pela radiação solar ultravioleta, seguida por degradação térmica, mecânica e química catalisada por poluentes atmosféricos [10].

B. Formas atuais de filtragem:

Diversas técnicas de filtragem são empregadas para remoção de microplásticos, destacando-se os Membrane Bioreactors, que apresentam alta eficiência removendo até 99,9% dos MPs [7]. Os filtros por MRF representam alternativa promissora utilizando suspensão de nanopartículas magnéticas para capturar contaminantes através de campo magnético externo [4;5]. É importante distinguir tecnicamente MRFs (fluidos magnetoreológicos compostos por suspensão de partículas micrométricas de ferro em óleo) de ferrofluidos (suspensão coloidal estável de nanopartículas magnéticas dispersas em líquido portador), sendo que com base nos testes práticos utilizando pó de ferro em óleo, a solução desenvolvida classifica-se como fluido magnetoreológico, termo utilizado para descrever o agente magnético do projeto 'Salpa'.

III. METODOLOGIA

A. Detalhes do projeto Salpa Alfa 0.1.2:

O desenvolvimento da boia Salpa representa um processo iterativo de engenharia biomimética e otimização hidráulica que culminou em uma solução tecnológica altamente especializada para a remoção de microplásticos em ambientes aquáticos. A trajetória evolutiva deste dispositivo evidencia uma abordagem metodológica rigorosa, onde múltiplas configurações conceituais foram avaliadas através de análises computacionais e validações experimentais antes da consolidação do design definitivo.

A arquitetura final da boia incorpora princípios fundamentais da dinâmica de fluidos e magnetohidrodinâmica para assegurar a contenção absoluta do MRF dentro da estrutura operacional. Esta contenção é alcançada através de um sistema de confinamento magnético que utiliza campos de alta intensidade para criar barreiras invisíveis que impedem a dispersão das partículas ferrosas no ambiente aquático

circundante. O design estrutural foi concebido para maximizar a interface de contato entre a água contaminada e o fluido magnetoreológico, otimizando assim a probabilidade de interação entre os microplásticos suspensos e o meio de captura.

A geometria hidrodinâmica da boia foi especificamente projetada para promover padrões de fluxo que favorecem a mistura homogênea entre a água de entrada e o fluido magnetoreológico interno. Esta configuração assegura que cada volume de água processado tenha exposição máxima ao meio de captura, aumentando significativamente a eficiência de remoção de microplásticos por unidade de tempo operacional. O sistema incorpora câmaras de mistura otimizadas onde ocorrem fenômenos de turbulência controlada, permitindo que as forças de arraste e as interações hidrofóbicas entre o óleo e os microplásticos sejam maximizadas.

O sistema de controle de vazão implementado constitui um elemento crítico de segurança operacional que regula precisamente o volume de água admitido na boia durante cada ciclo de processamento. Este mecanismo utiliza sensores de fluxo de alta precisão e válvulas de controle automatizadas para manter condições hidráulicas ótimas dentro da câmara de processamento. A regulação da vazão de entrada é essencial para prevenir sobrecarga do sistema, garantir tempo de residência adequado para as reações de captura e manter a estabilidade do fluido magnetoreológico em sua configuração operacional ideal.

Como medida adicional de segurança ambiental, o design incorpora um sistema de filtração secundária composto por filtros de cabelo humano estrategicamente posicionados em pontos críticos da estrutura. Estes filtros biológicos aproveitam as propriedades naturais de adsorção oleosa do cabelo para capturar qualquer quantidade residual de óleo que possa escapar do sistema de contenção primário. Esta abordagem representa uma solução engenhosa que combina materiais naturais abundantes com princípios de filtração por adsorção, criando uma barreira de segurança eficaz e ambientalmente compatível.

A integração destes múltiplos sistemas de segurança e controle resulta em uma plataforma tecnológica robusta que demonstra confiabilidade operacional mesmo em condições ambientais adversas. Como mostrado na figura 1.

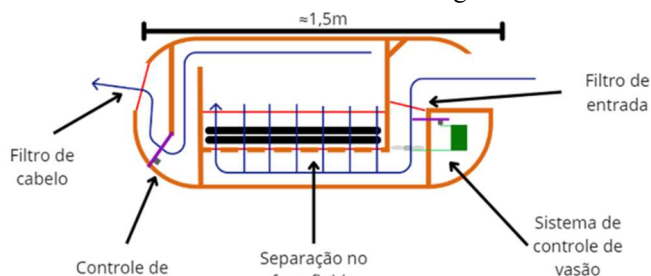


Fig. 1. Salpa Pré-Alfa 0.1.2 com informações de funcionamento

B. Testes em Laboratório:

1) Teste de Produção de MRF 1: Realizado em

02/09/2024

Teste 1: Síntese com amônia, ácido clorídrico, pó de ferro e ácido oleico através de mistura de 10ml água destilada, 10ml ácido clorídrico e 2g pó de ferro, seguida de filtração, adição de solução de amônia (1:10), aquecimento a 80°C, incorporação de 5ml ácido oleico e fervura por 1 hora.

Resultado: Falha devido ao uso incorreto de cloreto férrico (FeCl_3) em vez de cloreto ferroso (FeCl_2).

Teste 2: Avaliação de proporções ferro/óleo de soja para viscosidade adequada e captura eficiente com 15g de MPs testando quatro composições: 5g ferro/10ml óleo (11s captura, 13g retidas, baixa viscosidade), 10g ferro/10ml óleo (10s captura, 13g retidas, separação inconsistente), 15g ferro/10ml óleo (11s captura, 12g retidas, consistência homogênea) e 20g ferro/10ml óleo (14s captura, 10g retidas, densidade excessiva).

Resultado: Proporção ótima de 15g ferro/10ml óleo apresentou melhor equilíbrio entre viscosidade e capacidade de captura com mínima separação de componentes.

2) Teste de Produção de MRF 2: Realizado em 03/09/2024

Teste 1: Avaliação de óleo de canola como substituto ao óleo de soja testando quatro proporções ferro/óleo: 5g ferro/10ml óleo (14s captura, 9g retidas, dificuldade de manipulação), 10g ferro/10ml óleo (13s captura, 8g retidas, menor eficiência), 15g ferro/10ml óleo (12s captura, 9g retidas, melhor homogeneidade) e 20g ferro/10ml óleo (11s captura, 7g retidas, densidade excessiva).

Resultado: Proporção ótima de 15g ferro/10ml óleo manteve-se ideal, porém óleo de canola demonstrou desempenho inferior ao óleo de soja em velocidade e eficiência de captura.

Teste 2: Avaliação de óleo de motor comparando desempenho com óleos de soja e canola através de duas proporções: 10g ferro/10ml óleo (20s captura, 10g retidas, alta viscosidade) e 15g ferro/10ml óleo (18s captura, 11g retidas, ligeira melhora).

Resultado: Óleo de motor demonstrou captura mais lenta e menor eficiência comparado aos óleos de soja e canola, sendo inadequado para produção de MRF com rápida captura devido à alta viscosidade.

3) Teste de produção de MRF 3: Realizado em 05/09/2024:

Teste 1: O teste com cloreto de ferro foi concluído, mas a substância final não alcançou a consistência desejada nem apresentou atração pelo ímã. Ação: Pretendemos refazer o teste com maior tempo de fervura e com uma solução de cloreto férrico mais concentrada.

4) Teste de Produção de MRF 4: Realizado em 28/02/2025:

Teste: No quinto teste utilizamos de diferencial ácido oleico como surfactante responsável por estabilizar a dispersão das nanopartículas de ferro no óleo. Os passos foram: Aquecimento de 100ml de óleo de soja a 80°C para facilitar a dispersão, adição de 0,5ml de ácido oleico e então adição de 3g de pó de ferro agitando até obter uma substância homogênea.

Resultado: Após testarmos com os MPs obtivemos resultados promissores para o projeto. Vimos uma suspensão

muito melhor e com capacidade de captura melhor como podemos ver na figura 2.

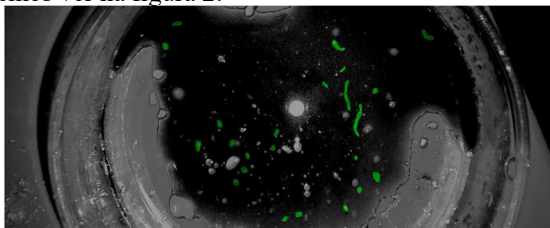


Fig. 2. Microplásticos capturados no fluido megneto reológico produzido

C. Protótipos:

1) Protótipo Salpa 1: Realizado em 03/03/2025

O primeiro protótipo da boia Salpa foi concebido com o objetivo principal de testar a eficácia do sistema de filtragem, projetado para reter o ferrofluido no interior da estrutura, evitando vazamentos e perdas do material. Para sua montagem, foram empregados materiais de baixo custo e fácil acesso, visando demonstrar a viabilidade técnica e econômica da proposta.

A estrutura principal da boia foi confeccionada utilizando um molde de papelão, sobre o qual foi aplicada fibra de vidro, conferindo rigidez e leveza ao conjunto. O suporte interno foi constituído por arames, que proporcionaram estabilidade estrutural e permitiram o correto posicionamento dos demais componentes, demonstrado na figura 3. Como elemento de flutuabilidade, garrafas PET recicladas foram acopladas à estrutura principal.

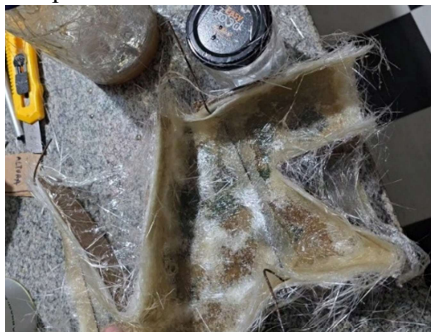


Fig. 3. Foto da construção do protótipo – aplicação da fibra de vidro

O sistema de filtragem foi elaborado a partir de máscaras descartáveis, escolhidas por sua disponibilidade e propriedades de retenção de partículas. Com o propósito de aumentar a repelência à fase oleosa do ferrofluido, as máscaras foram imersas em uma suspensão de óxido de zinco, conferindo ao filtro propriedades hidrofóbicas. Essa abordagem visa melhorar a eficiência de retenção do material, minimizando a contaminação externa e a perda do ferrofluido durante o funcionamento.

2) Teste protótipo Salpa 1: Realizado em 10/03/2025

Após a conclusão da fase laboratorial inicial, o protótipo Salpa 1 foi submetido a testes em ambiente seminatural controlado em Sinimbu, município que enfrentou eventos de inundação significativos, com objetivo de avaliar a capacidade de contenção do fluido magneto reológico em condições que simulassem os desafios operacionais de corpos d'água reais, sendo essencial validar a eficiência do sistema de confinamento magnético para garantir operação sem riscos de contaminação secundária em ambientes aquáticos naturais,

como podemos ver na figura 4. O experimento foi conduzido utilizando caixa d'água com água coletada diretamente do rio local de Sinimbu, permitindo replicar condições ambientais autênticas incluindo sedimentos naturais, variações de pH e temperatura típicas do ambiente aquático regional, além de microrganismos e partículas em suspensão características dos corpos d'água afetados pelas enchentes, proporcionando cenário de teste representativo das condições operacionais reais. Os resultados obtidos demonstraram avanços significativos na performance do sistema, confirmando a viabilidade técnica da abordagem magneto reológica para remoção de microplásticos em ambientes aquáticos naturais, contudo os testes revelaram limitações operacionais específicas que requerem aperfeiçoamentos no design para otimização da eficiência de contenção do MRF e melhoramento da interação fluido-água, fornecendo dados valiosos para a próxima iteração do protótipo e identificando pontos críticos para garantir confiabilidade e segurança ambiental do sistema em aplicações de campo.



Fig. 4. Foto do protótipo em teste na cidade de Sinimbu

D. Sistema de Controle de Vazão (SCV)

O sistema de controle de vazão da boia Salpa constitui componente fundamental para operação segura e eficiente do dispositivo de remoção de microplásticos, desenvolvido para regular precisamente a quantidade de água que adentra a câmara de processamento e assegurar que as condições hidráulicas internas permaneçam dentro dos parâmetros operacionais ideais para contenção do fluido magneto reológico e maximização da eficiência de captura. A arquitetura baseia-se em tecnologia de sensoriamento eletrônico integrado utilizando sensor de fluxo composto por motor DC acoplado a hélice para monitoramento contínuo da vazão de entrada, convertendo o movimento rotacional proporcional à velocidade do fluxo em sinais elétricos processados por unidade de controle baseada em microcontrolador Arduino Uno que calcula em tempo real o volume admitido e fornece dados para o algoritmo de controle da comporta de entrada. O mecanismo de controle físico é executado através de servo motor de alta precisão que aciona comporta regulável posicionada na entrada da boia, respondendo aos comandos do sistema eletrônico e ajustando automaticamente a abertura conforme condições operacionais detectadas, criando sistema de retroalimentação que mantém a vazão dentro dos limites pré-estabelecidos e previne sobrecarga hidráulica que comprometeria a estabilidade do fluido magneto reológico interno. A interface de monitoramento é proporcionada por aplicação desenvolvida em Next.js, permitindo supervisão remota em tempo real das condições operacionais, exibindo dados de vazão instantânea, histórico de operação e status dos componentes, além de

permitir ajustes dos parâmetros conforme necessário. O sistema desempenha função crítica na prevenção de perturbações hidrodinâmicas excessivas que poderiam causar mistura inadequada ou escape do fluido magnético, garantindo tempo de residência adequado para captura de microplásticos, mantendo estabilidade da suspensão magneto reológica e assegurando efetividade das forças magnéticas de contenção durante todo o ciclo operacional, representando avanço significativo em relação aos sistemas passivos com maior confiabilidade e redução de riscos de contaminação ambiental secundária.

E. Proximos Passos:

O próximo estágio do projeto Salpa consiste no desenvolvimento de um segundo protótipo com evolução substancial na tecnologia de filtração de microplásticos para aplicações aquáticas, apresentando design alongado otimizado para acomodar múltiplos sistemas de filtração integrados que combinam tecnologias magnéticas avançadas, sistemas coalescentes e mecanismos de flotação natural visando maximizar a eficiência de captura e assegurar contenção rigorosa do fluido magnetoreológico. A configuração apresentará corpo alongado dimensionado para otimizar características do fluxo hidráulico interno e ampliar significativamente a área de filtração operacional, possibilitando implementação sequencial de diferentes elementos filtrantes em série e estabelecendo sistema de purificação em múltiplos estágios que utilizará o fluido magnetoreológico sem comprometer a segurança ambiental. A versão incorporará ímãs de neodímio de alta performance para captura eficiente de partículas ferrosas, funcionando como barreira primária de proteção que mantém o MRF confinado e previne dispersão no ambiente, integrando princípios de flotação natural que exploram diferenças de densidade entre o óleo componente e a água para criar múltiplos pontos de separação auxiliares. Como medida de segurança final, serão implementadas duas alternativas de filtros para interceptar eventuais vazamentos: filtros compostos por cabelo humano aproveitando propriedades naturais de retenção oleosa, e filtros coalescentes de tecnologia industrial para separação óleo-água, garantindo proteção ambiental redundante mesmo em cenários de falha dos sistemas primários e assegurando que o projeto mantenha princípios de sustentabilidade e responsabilidade ecológica durante todas as fases operacionais.

IV. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se desenvolver um método eficaz para aumentar o controle sobre a dispersão de MPs, contribuindo para a redução significativa da poluição por MPs nos ecossistemas aquáticos. Com o desenvolvimento de estratégias inovadoras e a implementação de medidas preventivas e de remediação, visamos não apenas minimizar a propagação desses poluentes, mas também promover a saúde dos ecossistemas e proteger a biodiversidade marinha. Esses resultados refletem nosso compromisso com a sustentabilidade ambiental e a conservação dos recursos naturais para as gerações futuras.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao **SENAC Santa Cruz** e aos professores **João**

Francisco de Castro Silveira, Luis Henrique Rauber Rodrigues, Poliana Antunes da Rosa e Nêmore Francine Backes pelo apoio fundamental no desenvolvimento do projeto Boia Salpa. Sua orientação e dedicação foram essenciais para o progresso desta iniciativa de sustentabilidade ambiental. Além da empresa **ECOLOG serviços ambientais** pelo auxílio monetário para o projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] BHUYAN, M. S. Effects of Microplastics on Fish and in Human Health. *Frontiers in Environmental Science*, Frontiers Media S.A., 16 mar. 2022.
- [2] GASPAR, L. et al. Acute Exposure to Microplastics Induced Changes in Behavior and Inflammation in Young and Old Mice. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 24, n. 15, 1 ago. 2023.
- [3] GKANASOS, A. et al. Stopping Macroplastic and Microplastic Pollution at Source by Installing Novel Technologies in River Estuaries and Waste Water Treatment Plants: The CLAIM Project. *Frontiers in Marine Science*, v. 8, 24 dez. 2021.
- [4] HAMZAH, S. et al. Synthesis, characterisation and evaluation on the performance of ferrofluid for microplastic removal from synthetic and actual wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 5, 1 out. 2021.
- [5] HENRIQUES, K. Analysis of the Microplastic Removal Efficiency of Synthesized Ferrofluids and the Development of an Automated Prototype for Aquatic Environments. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/376079966>.
- [6] PIZZICHETTI, A. R. P. et al. Evaluation of membranes performance for microplastic removal in a simple and low-cost filtration system. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 3, 1 jun. 2021.
- [7] POERIO, T.; PIACENTINI, E.; MAZZEI, R. Membrane processes for microplastic removal. *Molecules*, MDPI AG, 2019.
- [8] SMITH, M. et al. Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. *Current environmental health reports*, Springer, 1 set. 2018.
- [9] WEINSTEIN, J. E. et al. Degradation of bio-based and biodegradable plastics in a salt marsh habitat: Another potential source of microplastics in coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, v. 160, 1 nov. 2020.
- [10] ZHANG, K. et al. Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, Elsevier Ltd, 1 abr. 2021.