

1209 - FATORES DE DESIGN QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE PARTÍCULAS EM FLOCULADORES TUBULARES HELICOIDAIS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Beatriz Tiradentes Pani⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental (IFES). Mestranda em Tecnologias Sustentáveis (IFES).

Luis Felipe Nunes Coutinho⁽¹⁾

Tecnólogo em Saneamento Ambiental (IFES). Geógrafo (UFES). Mestrando em Tecnologias Sustentáveis (IFES).

Danieli Soares Oliveira⁽¹⁾

Engenheira Civil (UFES). Mestre em Engenharia Ambiental (UFES). Doutora em Engenharia Ambiental (Ufes).

Endereço⁽¹⁾: Av. Vitória, 1729 - Jucutuquara - Vitória - Espírito Santo - CEP: 29040-780 - Brasil - Tel: (27) 3331-2237 - e-mail: danieli@ifes.edu.br

RESUMO

Unidades alternativas de tratamento de água, como os Floculadores Tubulares Helicoidais (FTH), têm sido objeto de estudo e desenvolvimento devido aos seus benefícios em termos de custo, acessibilidade e eficiência. Comparados aos métodos convencionais, os FTHs destacam-se pelo design simplificado e baixo consumo energético. A compreensão dos fatores de design é crucial para otimizar a remoção de partículas, etapa fundamental no tratamento de águas. Este artigo objetiva analisar os principais fatores de design que afetam a eficiência de remoção de partículas nos floculadores tubulares helicoidais. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, com a seleção de artigos conforme critérios pré definidos. Os resultados evidenciaram que há um consenso nos estudos analisados de que os aspectos hidrodinâmicos e geométricos desempenham papéis importantes na eficiência de remoção de partículas em FTHs, contribuindo para a otimização do processo de floculação.

PALAVRAS-CHAVE: *Floculador Tubular Helicoidal; Eficiência; Floculação*

INTRODUÇÃO

A Lei Federal nº 14.026 de 2020 representa um marco ao definir diretrizes para a universalização do saneamento básico. No entanto, a meta de cobertura de 100% de atendimento ainda não foi atingida, com aproximadamente 15% da população brasileira desprovida de acesso ao abastecimento público de água (SNIS, 2023). Esse panorama demonstra a necessidade de tecnologias de tratamento de água que ofereçam acesso seguro e em quantidade adequada.

Atualmente, a tecnologia de tratamento de água mais comum é o sistema convencional. Nesta tecnologia, a remoção de sólidos em suspensão no tratamento de água potável é usualmente realizada em três etapas principais: coagulação, floculação e sedimentação. Na primeira, é realizada adição e agitação de um coagulante ao fluxo de água para desestabilizar as partículas em suspensão. Na sequência, na etapa de floculação, as partículas desestabilizadas formam flocos que serão removidos na sedimentação (OLIVEIRA e TEIXEIRA, 2017).

Por outro lado, sistemas alternativos de clarificação de água que possam aliar eficiência facilidade de operação vem sendo investigados como alternativas capazes de serem aplicadas em regiões com dificuldade de acesso a água em qualidade e quantidade.

Neste cenário, os Floculadores Tubulares Helicoidais - FTH (em inglês, Helically Coiled Tube Flocculator – HCTF), também conhecidos como Reatores Geradores de Flocos - RGF (em inglês, Flocs Generator Reactor – FGR) ou Tubos Enrolados Helicoidalmente (em inglês, Helically Coiled Pipes), consistem em uma unidade compacta formada por um reator enrolado helicoidalmente, conforme Figura 1.

As principais vantagens dos tubos curvos em relação aos tubos retos incluem compactade, regime de fluxo laminar mais prolongado, simplicidade de design e operação e redução do custo de investimento quando comparados ao processo convencional de floculação. A maioria desses benefícios estão relacionados a geração de fluxo secundário no floculador, influenciado pela características geométricas da unidade (CARISSIMI *et al.*,

2018).



Figura 1: Esquema de Floculador Tubular Helicoidal.

Os parâmetros geométricos e hidrodinâmicos desempenham um papel fundamental no comportamento hidrodinâmico dos FTHs, uma vez que impactam nas interações sólido-líquido (OLIVEIRA e TEIXEIRA, 2017). Dessa forma, é essencial explorar o design dessas unidades, a fim de otimizar interações e melhorar a eficiência do processo de floculação.

OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo analisar os principais fatores de design que influenciam a eficiência na remoção de partículas nos FTHs no tratamento de água. A pesquisa busca identificar e discutir as variáveis geométricas e hidrodinâmicas que afetam o desempenho desta unidade. Ao final, o estudo pretende fornecer dados que possam contribuir para a otimização desses sistemas e a melhoria dos processos de tratamento de água.

METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia adotada nesta pesquisa é a revisão sistemática, que permite reunir e analisar evidências científicas de forma planejada e criteriosa, com o objetivo de sumarizar os estudos mais relevantes sobre o tema. A revisão sistemática é uma ferramenta importante para trazer evidências científicas para a prática. Durante o processo de revisão, uma das etapas é unir os dados de cada estudo trazido durante a revisão (GALVÃO et al., 2003). De acordo com Mariano e Rocha (2017) a revisão sistemática é a pesquisa planejada cujos objetivos permitem reduzir o viés da pesquisa, ao se reunir os estudos mais relevantes, por meio de critérios de seleção rigorosos. Desta forma, esse tipo de revisão assume o propósito de sumarizar evidências sobre um tema específico, utilizando-se de amostras selecionadas a partir de pesquisas quantitativas de metodologias similares, dentro de um escopo limitado.

Revisões de literatura eficazes podem ser estruturadas por meio do domínio dos descritores, da definição clara das fontes de consulta e da análise crítica das referências empregadas em estudos previamente revisados (DORSA, 2020). Sendo assim, a metodologia adotada para a revisão sistemática da literatura envolveu a utilização das bases de dados científicos *ScienceDirect* (Elsevier), *Scopus* (Elsevier) e *Compendex* (Engineering Village), acessadas por meio do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Quanto ao intervalo temporal das publicações, a pesquisa não limitou o período de busca.

Os critérios de seleção da literatura científica foram baseados na análise do título, palavras-chave, resumo e tipo de documento (artigos científicos). Após a seleção inicial, os artigos escolhidos foram lidos integralmente e gerenciados utilizando o software Mendeley. As buscas bibliográficas foram conduzidas em inglês utilizando os descritores interligados pelos operadores lógicos booleanos "AND" e "OR": ("*Helically Coiled Tube Flocculator*" OR "*Flocs Generator Reactor*" OR "*Helically Coiled Pipes*") AND ("*Design*" OR "*Geometry*" OR "*Operational Parameters*") AND ("*Flocculation*").

De acordo com Cordeiro (2007), a revisão sistemática é baseada a partir da formulação adequada de uma pergunta. Para o autor, a pergunta tem grande importância na revisão sistemática, pois a partir dela define-se a estratégia para identificar os estudos que serão incluídos, e quais serão os dados que necessitam ser coletados de cada estudo. Dessa forma, a escolha dos descritores supracitados foi definida a fim de responder a pergunta de pesquisa: "Como os parâmetros de design dos floculadores tubulares helicoidais influenciam a eficiência do processo de floculação no tratamento de água?".



O fluxograma de etapas do desenvolvimento do método está apresentado na Figura 2. No processo, a busca inicial foi realizada em bases de dados reconhecidas, utilizando um operador de busca com combinações específicas de palavras-chave relacionadas ao tema. Após a coleta dos artigos, os duplicados foram removidos, e em seguida, os critérios de exclusão foram aplicados. Apenas os artigos que atenderam a todos os critérios estabelecidos foram incluídos na base de dados final.

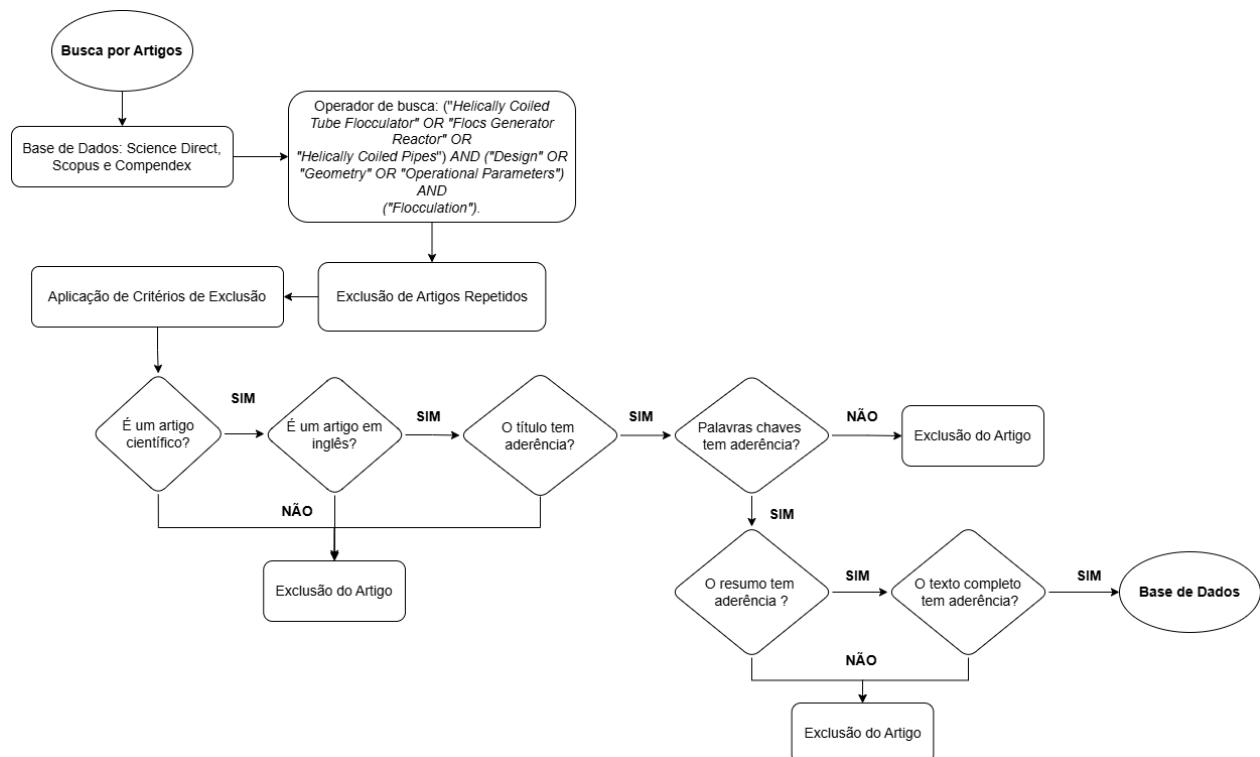


Figura 2: Etapas da Revisão Sistemática.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a metodologia apresentada na Figura 2, a seleção inicial dos artigos resultou em um banco de dados contendo 36 referências. A partir deste conjunto, foram removidos os artigos duplicados identificados nas bases de dados exploradas, o que reduziu o total para 28 artigos. Em seguida, foi realizada uma análise de critérios resultando em 16 artigos com aderência ao tema da pesquisa, conforme ilustrado na Figura 3.

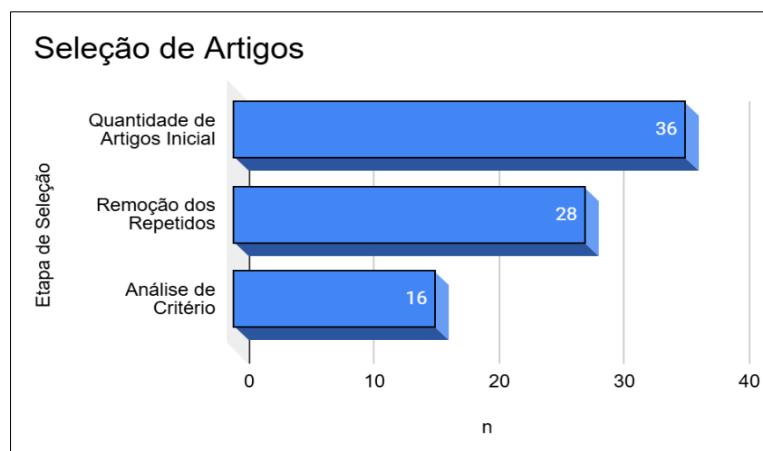


Figura 3. Artigos Selecionados.



A análise dos artigos selecionados revela que as publicações não estão concentradas em um período específico, abrangendo uma faixa temporal de 1995 a 2024. No entanto, observa-se uma tendência crescente de publicações a partir de 2014, que corresponde a 75% dos artigos selecionados. Vale destacar ainda que, há uma lacuna significativa de publicações entre 1995 e 2005, bem como entre 2007 e 2014. Um dado relevante é o pico de publicações no ano de 2019, que representou 18,75% do total, conforme ilustrado na Figura 4. Dessa forma, a análise temporal sugere uma crescente valorização e interesse acerca do tema, especialmente nos últimos 10 anos.

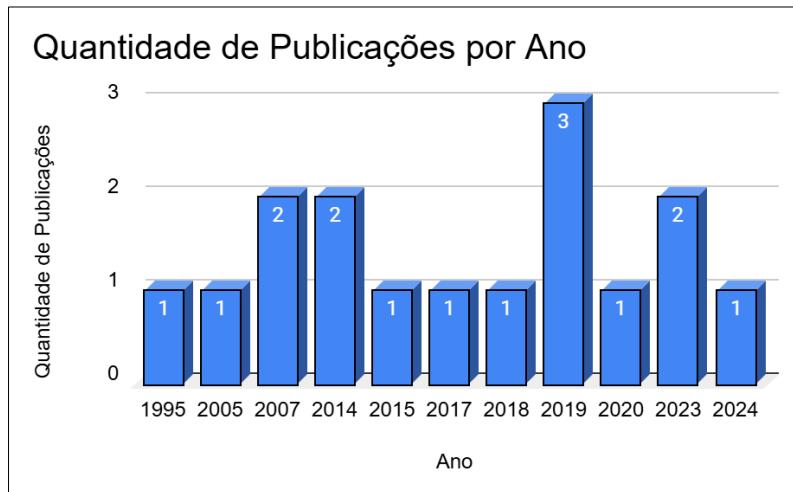


Figura 4. Relação de publicações por ano.

Em relação à origem dos estudos, observa-se um predomínio significativo do Brasil, responsável por 75% das publicações selecionadas. No Brasil, nota-se que o Estado do Espírito Santo contribuiu com 6 publicações, enquanto o Rio Grande do Sul foi responsável por 7, conforme ilustrado na Figura 5. Essa concentração geográfica sugere um foco regional nas pesquisas. A predominância desses dois estados pode refletir a presença de centros de pesquisa ou projetos regionais que investigam tecnologias alternativas para o tratamento de água. Esse cenário também aponta para a necessidade de ampliar e diversificar as contribuições de outras regiões do país.

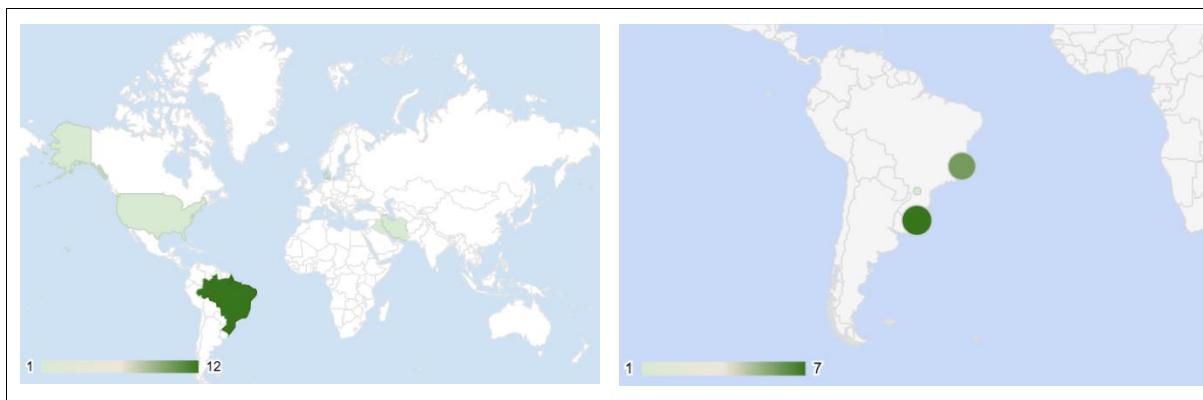


Figura 5. Relação de publicações por localização.
Nota: Mapa da esquerda: Nível mundial; Mapa da direta: Nível Brasil

No que se refere às palavras-chave mais recorrentes nos artigos selecionados, observa-se que "Flocculation" foi a mais mencionada, com 10 ocorrências. Em seguida, as expressões "Helically Coiled Tube Flocculators" (HCTFs) e "Helically Coiled Tubes" somaram 5 menções, incluindo variações como "Helical tube" e "Helical flocculator". Além disso, CFD (em inglês, Computational Fluid Dynamics) foi citada 4 vezes, indicando a crescente utilização de simulações numéricas para o estudo de desempenho dos FTHs. Termos como "Coiled

"Reactor" e "Hydraulic Flocculation" também surgiram com 4 e 3 menções, respectivamente.

Em relação os parâmetros de influência no designer de FTHs, os artigos selecionados revelam que diversos fatores são determinantes para a definição de parâmetros que melhoram a eficiência da floculação em FTHs. Entre os principais aspectos discutidos estão as características geométricas, como o diâmetro e o passo de enrolamento, o número de voltas e o comprimento do tubo (RAMESH e JALALI, 2023; OLIVEIRA e DONADEL, 2019a; CARISSIMI e RUBIO, 2005; CARISSIMI, MILLER e RUBIO, 2007; HAMEED, MUHAMMED e SAPRE, 1995; MARASCHIN *et al.*, 2020; OLIVEIRA e DONADEL, 2019b; CARISSIMI *et al.*, 2018; OLIVEIRA e TEIXEIRA, 2017; SARTORI *et al.*, 2015).

Os parâmetros hidrodinâmicos, como número de Reynolds, *Dean Number* e gradiente de velocidade também foram investigados uma vez que influenciam diretamente no regime de escoamento (CARISSIMI, MILLER e RUBIO, 2007). Além disso, os parâmetros operacionais, como taxa de aeração, taxa de alimentação e taxa de fluxo, desempenham papéis importantes na escolha do design, pois determinam como os gradientes de velocidade interagem com os materiais em suspensão (OLIVEIRA, RODRIGUES e RUBIO, 2014; RUBIO; CARISSIMI e ROSA, 2007; RAMESH e JALALIY, 2023; SARTORI *et al.*, 2015). Algumas pesquisas também destacam a relevância da concentração e tipo de coagulantes ou floculantes, pois afetam o tamanho e a estabilidade dos flocos formados (CARISSIMI e RUBIO, 2015).

Os métodos utilizados para investigar e validar os parâmetros de design incluem principalmente simulação computacional e testes experimentais em bancada. Embora a simulação computacional forneça detalhes e facilite a otimização do design, os testes de bancada permanecem essenciais para validar as condições reais de operação e ajustar modelos teóricos. A Tabela 1 apresenta as referências mencionadas, destacando os principais fatores que influenciam a definição do design dos FTHs para otimizar sua eficiência, bem como os métodos empregados em cada estudo.

Tabela 1: Fatores que influenciam no Design de FTH e métodos de análises.

REFERÊNCIA	FATORES DE INFLUÊNCIA	MÉTODO
HAMEED, MUHAMMED e SAPRE (1995)	Diâmetro de enrolamento, passo de enrolamento, diâmetro do tubo	Teste de Bancada
CARISSIMI e RUBIO (2005)	Número de voltas, comprimento do tubo de enrolamento, diâmetro do tubo, diâmetro de enrolamento	Teste de Bancada
RUBIO, CARISSIMI e ROSA (2007)	Taxa de fluxo (m ³ /h), Taxa de Alimentação, diâmetro	Escala piloto
CARISSIMI, MILLER e RUBIO (2007)	Número de Reynolds (Re), gradiente de velocidade (G), número de Dean (De) e número de Germano (Gn).	Teste de Bancada
OLIVEIRA, RODRIGUES e RUBIO (2014)	Taxa de alimentação, taxa de aeração	Análise Laboratorial
SARTORI <i>et al.</i> , (2015)	Diâmetro de enrolamento, passo de enrolamento e taxa de fluxo operacional	Modelagem computacional
CARISSIMI e RUBIO (2015)	Tipo e a concentração das partículas e tipo e dosagem do polímero	Teste de Bancada
OLIVEIRA e TEIXEIRA (2017)	Comprimento da mangueira do floculador	Teste de bancada e análise estatística
CARISSIMI <i>et al.</i> , (2018)	Curvatura e torção	Teste de bancada
OLIVEIRA e DONADEL (2019a)	Diâmetro de enrolamento, passo de enrolamento, diâmetro do tubo, comprimento da mangueira do floculador	Teste de bancadas e análise estatística
OLIVEIRA e DONADEL (2019b)	Diâmetro de enrolamento, passo de enrolamento, diâmetro do tubo	Simulação computacional
OLIVEIRA, TEIXEIRA e DONADEL (2020)	Diâmetro de enrolamento, passo de enrolamento, diâmetro do tubo, comprimento da mangueira do floculador	Teste de bancadas e análise estatística
MARASCHIN <i>et al.</i> , (2020)	Diâmetro de enrolamento, passo de enrolamento	Teste de Bancada
BILDE, HÆRVIG e SØRENSEN (2023)	Passo de enrolamento, Diâmetro de enrolamento, comprimento do tubo de enrolamento	Simulação Computacional
RAMESH e JALALI (2023)	Diâmetro de enrolamento, passo de enrolamento, diâmetro do tubo, Gradiente de Velocidade e vazão	Simulação Computacional
OLIVEIRA e DONADEL (2024)	Diâmetro de enrolamento, passo de enrolamento, diâmetro do tubo, comprimento da mangueira do floculador	Teste de bancadas e análise estatística



33º CONGRESSO DA ABES

Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

FITABES 2025

Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental



Em relação aos parâmetros hidrodinâmicos, os principais parâmetros em FTHs incluem o número de Reynolds (Re), a velocidade de sedimentação, o gradiente de velocidade (G), a dissipação de energia, o número de Germano (Gn) e o número de Dean (Dn) (CARISSIMI; MILLER e RUBIO, 2007). Em floculadores tubulares helicoidais, o fluxo em tubos curvilíneos difere do fluxo em tubos retos devido ao movimento secundário, gerado pelo desequilíbrio entre o gradiente de pressão transversal e as forças centrífugas, fenômeno descrito pelo número de Dean (De). A energia mecânica introduzida na mistura é dissipada por meio dos gradientes de velocidade (G), utilizados para medir a intensidade da mistura. O Quadro 1 apresenta os principais parâmetros hidrodinâmicos em FTHs e suas representações matemáticas.

Quadro 1: Principais parâmetros hidrodinâmicos em FTH e suas representações matemáticas.

Número de Reynolds (Re)	Gradiente de Velocidade
$Re = \frac{\rho V D}{\mu}.$	$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu V}}$
Onde: ρ : Densidade do líquido; V: Velocidade do fluxo; D: Diâmetro do tubo; μ : Viscosidade absoluta	Onde: G: Gradiente de Velocidade; ε : Taxa média de dissipação de energia por unidade de volume; μ : Viscosidade absoluta; V: Volume da célula (m^3)
Dissipação de Energia	Número Germano (Gn)
$\varepsilon = Q \cdot \gamma \cdot Hf$	$Gn = \tau \cdot Re$
Onde: Q: Taxa de alimentação; γ = Gravidade específica da massa líquida; Hf = Perda de carga	Onde: τ : Torção; Re: Número de Reynolds
Velocidade de Sedimentação	Dean Número (De)
$v_i = \frac{g \cdot d_i^2 (\rho_i - \rho)}{18 \cdot \mu}.$	$De = Re \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0.5}$
Onde: v_i : velocidade de sedimentação; d_i : Diâmetros da partícula; ρ_i : Densidade da partícula; ρ : Densidade do meio; μ : viscosidade	Onde: De: Número de Dean; Re: Número de Reynolds; d: Diâmetro interno do tubo; D é o diâmetro da espiral.
Dean Número Modificado (De')	
<p>No caso de um tubo enrolado com passo, é utilizado um número de Dean modificado (De') em função do Diâmetro efetivo do anel enrolado</p> $De' = Re \cdot \left(\frac{d}{D'}\right)^{0.5}$ <p style="text-align: center;">sendo,</p> $D' = D \left[1 + \left(\frac{p}{\pi \cdot D} \right)^2 \right].$ <p>Onde: p: Passo da bobina; D': Diâmetro efetivo do anel enrolado</p>	

Fonte. Adaptado de Carissimi, Miller e Rubio (2007).

Carissimi, Miller e Rubio (2007) demonstraram que o formato helicoidal dos FTHs fornece alta dissipação de energia na massa líquida, fato que favorece o contato entre as partículas e o agente coagulante, devido ao seu tipo de escoamento turbulento. O estudo apresentou comparação entre parâmetros hidrodinâmicos de flokuladores helicoidais e lineares. A caracterização hidrodinâmica foi realizada com base na determinação de Número de Reynolds, gradiente de velocidade, número de Dean e número de Germano dos referidos tipos de flokulador. O estudo conclui a partir dos parâmetros hidrodinâmicos identificados no FTH, que este proporciona a geração de flocos grandes e mais densos, e com maiores velocidades de sedimentação. Além disso, evidencia-se que no sistema em espiral as forças centrífugas geram hidrodinâmicas locais que têm grande influência nos fenômenos de agregação, como o fluxo secundário, devido à curvatura e a torção no fluxo.

Rubio, Carissimi e Rosa (2007) também desenvolveram estudos envolvendo taxa de fluxo. Os autores realizaram testes com três FGRs com diâmetros e taxas de fluxo diferentes em escala semi-piloto, associados a uma unidade de flotação de alta taxa. Os FTH foram projetados para alterar a taxa de alimentação e a capacidade de carga na célula de separação, mantendo o gradiente de velocidade e o número de Reynolds praticamente constantes. Como resultado, a melhor redução de turbidez foi obtida pelo flokulador de menor diâmetro, o que mostra que as eficiências do processo diminuem com o aumento da taxa de carga.

Outros parâmetros hidrodinâmicos foram reportados por Oliveira, Rodrigues e Rubio (2014), que constataram que a eficiência dos HTHs é influenciada por parâmetros como a taxa de alimentação, a taxa de aeração e o método de flocação utilizado. Os autores elaboraram um sistema composto por um FGR com a técnica DAF (*dissolved air flotation*) para realizar os estudos de flocação-flotação em escala laboratorial. Como resultado, foi concluído que a interação entre macromoléculas poliméricas, partículas e bolhas de ar é crucial para o processo. Observou-se ainda que, as taxas de fluxo de suspensão muito baixas resultam em misturas insuficientes para a flocação, enquanto taxas elevadas reduzem o tempo de residência, promovendo flocação rápida, o que pode levar à quebra dos flocos.

Quanto ao estudo do fluxos secundários na unidade, de acordo com Sartori *et al.* (2015), variações no padrão de fluxo secundário podem impactar significativamente os perfis da seção transversal da velocidade axial. Isso inclui o perfil perpendicular à orientação do FTH e o perfil paralelo à sua orientação. Essas mudanças nos perfis de velocidade axial podem influenciar a eficiência do processo de flocação, já que afetam a taxa de fluxo operacional nas distribuições do gradiente G.

Com foco no tempo de detenção, Oliveira e Donadel (2019a) identificaram que os modelos matemáticos para interações ortocinéticas desconsideram a influência do tempo de detenção, que no caso dos FTHs, por apresentarem tempos de retenção relativamente baixos, esse parâmetro torna-se importante de ser considerado. Assim, os autores utilizaram esse parâmetro para propor um novo modelo de flocação. Essa metodologia utilizou-se de dados de remoção de turbidez obtidas a partir de 24 configurações distintas de FTHs. Os autores concluem que o modelo proposto apresentou comportamento decrescente-crescente, conforme os dados experimentais, sendo portanto, mais próximo do processo físico de flocação.

Oliveira e Donadel (2019b) também utilizaram modelagem computacional de dinâmica de fluidos (CFD) para determinação do gradiente de velocidade global considerando as características hidráulicas e geométricas de protótipos distintos de flokuladores tubulares helicoidais. Os valores de gradiente de velocidade global podem ser obtidos, segundo os autores, por meio de equações empíricas, porém estas desconsideram a geometria das unidades de tratamento, e por isso resultam em erro. O estudo considerou no cálculo do gradiente de velocidade global os parâmetros de diâmetro de enrolamento, passo de enrolamento e diâmetro do tubo. Dentre os resultados obtidos, verificou-se que os resultados de gradiente de velocidade usando a modelagem CFD foram mais adequados ao processo físico dos que aqueles obtidos a partir das equações empíricas consideradas no estudo.

Em sequência, Oliveira, Teixeira e Donadel (2019) apresentaram um modelo de previsão de eficiência de remoção de turbidez baseado nos resultados de flokuladores com características geométricas (diâmetro de enrolamento, passo de enrolamento, diâmetro do tubo, comprimento da mangueira do flokulador) e hidrodinâmicas distintas. O sistema foi composto por FTH acoplado sempre a um mesmo decantador. Os cálculos de previsão de remoção de turbidez foram feitos a partir de regressão linear e não linear, e de análises de rede neural artificial. Os resultados de previsão mostraram-se aderentes à realidade e podem auxiliar na melhor compressão dos parâmetros envolvidos no processo de flocação, assim como auxiliar a melhorar a eficiência de projetos de novos flokuladores.

Em estudo mais recente, Ramesh e Jalaliy (2023) posicionam a distribuição do gradiente de velocidade como parâmetro de desempenho mais importante na formação e quebra de flocos dentro do FTH, assim, a uniformidade do gradiente de velocidade ao longo do FTH preserva a configuração dos flocos formados durante o processo de floculação. O segundo parâmetro de importância no floculador é o tempo de detenção. Nesse sentido, quanto mais tempo os flocos formados permanecem no floculador, maiores serão as chances deles se quebrarem ou encolhem, ao passo que os FTHs com menores tempos de detenção oferecem menos chances de colisão entre as partículas, e de formação de flocos. Os autores trabalharam com modelagem computacional a fim de generalizar as variáveis de design ótimo dos floculadores em diferentes escalas construtivas.

Por outro lado, com foco no estudo da influência dos parâmetros geométricos em FTHs, em 1995, Hammeed, Muhammad e Sapre associaram que a variação dos diâmetros dos tubos dos FTHs alteraram o número de Camp, parâmetro adimensional que relaciona o gradiente médio de velocidade e tempo de floculação, sendo estes dois últimos parâmetros, fatores significativos para os FTHs, segundo os autores. A pesquisa concluiu que o FTH com tubo de maior diâmetro alcançou o maior percentual de remoção de sólidos suspensos e o menor tempo de detenção dentre os diâmetros estudados.

Carissimi e Rubio (2005) avaliam que o design espiralado dos FTHs proporciona uma taxa de cisalhamento razoavelmente boa para agregação, um fluxo secundário e forças operacionais de colisão centrífuga. Tais propriedades permitem um contato eficiente entre as macromoléculas de polímeros e os coloides formando estruturas fortes, grandes e compactas. Em um tubo curvo, de acordo com os autores, o fluxo está sujeito à forças centrífugas, fazendo com que as partículas permaneçam mais tempo no tubo em comparação aos tubos retos. O fluxo espiralado dos FTHs apresenta uma distribuição de gradiente de velocidade mais uniforme do que em um tubo reto. A pesquisa considerou os parâmetros de número de voltas, comprimento do tubo de enrolamento, diâmetro do tubo e diâmetro de enrolamento. Entre as condições apresentadas na pesquisa, o FTH de menor comprimento de mangueira não permitiu tempo de detenção suficiente para a formação de flocos.

Para Sartori *et al.*, (2015) os principais parâmetros geométricos para um passe de um FTH incluem o diâmetro do tubo e da curvatura. Por meio de Modelagem Fluidodinâmica Computacional, Sartori *et al.*, (2015) estudou diferentes configurações de FTHs para avaliar os efeitos da variação do diâmetro do FTH e da taxa de fluxo sobre seu desempenho, considerando os níveis de dissipaçao de energia associados aos padrões de fluxo secundário. Com os resultados da simulação, os autores obtiveram uma equação de regressão com lei de potência para descrever a variação do gradiente de velocidade média a partir da relação do número de Reynolds e o raio entre a curvatura e torção do FTH (λ/Re), combinando os principais parâmetros geométricos e de dinâmica de fluxo.

Oliveira e Teixeira (2017) também avaliaram arranjos de FTHs com variações no comprimento, e, consequentemente, no tempo de processo. Os estudos de bancada revelaram a existência de intervalos de tempo de processo que oferecem máxima eficiência na remoção de turbidez, os quais dependem de parâmetros hidrodinâmicos e geométricos específicos. Além disso, foram observados tempos de processamento reduzidos associados a altos níveis de eficiência. Os melhores resultados de remoção foram obtidos para FTHs com gradientes médios de velocidade mais baixos, sugerindo que aumentos nos gradientes de velocidade levam à diminuição da eficiência do processo.

Em relação ao impacto da curvatura e torção na formação dos flocos, Carissimi *et al.* (2018) avaliaram que o passo do floculador e o comportamento hidrodinâmico resultante têm influência direta na eficiência da formação dos flocos. A eficiência de geração dos flocos foi fortemente afetada pela curvatura: quando o passo é zero, a curvatura é maior, o que resulta em maior eficiência na formação dos flocos. No entanto, à medida que o passo aumenta, ocorre um aumento na torção, o que leva a uma redução na eficiência de geração dos flocos.

Maraschin et.al. (2020) avaliaram a aplicação de FTH no espessamento de lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA). Neste estudo, os autores apontam que o diâmetro e passo de enrolamento do FTH potencializam a eficiência de remoção de turbidez, devido ao maior desempenho das forças centrífugas atuando para melhorar a mistura. Para os autores, o diâmetro de enrolamento é mais importante na eficiência de remoção de turbidez que o passo de enrolamento.

Os parâmetros de projeto avaliados no trabalho de Ramesh e Jalaliy (2023) foram diâmetro do tubo, diâmetro de enrolamento e passo de enrolamento. No estudo os autores observaram que, o passo de enrolamento quando aumentado, em qualquer condição, reduz a distribuição do gradiente de velocidade, e aumenta o comprimento da zona de desenvolvimento de flocos. Além disso, observou-se que o aumento do passo de enrolamento provoca, até certo comprimento limite, o aumento do tempo de residência das partículas dentro do floculador.

Ramesh e Jalaliy (2023) constataram que o aumento do diâmetro do tubo configura uma mudança desfavorável para o floculador, pois tem como consequências aumento das variações do gradiente de velocidade em até 35%, o aumento do comprimento da zona de desenvolvimento de flocos, e a redução das variações do tempo de residência das partículas, até certo limite de diâmetro. De acordo com os autores, o aumento do diâmetro de enrolamento, reduz as variações do gradiente de velocidade do floculador, e aumenta a variação do tempo de residência.

Neste sentido, Bilde, Hærvig e Sørensen (2023), também reforçam a conclusão que associa o aumento do diâmetro de enrolamento com a redução de turbulência associada a redução de variação do gradiente de velocidade. Para os autores, o diâmetro de enrolamento (raio de curvatura) é o parâmetro mais importante ao agregar partículas em um FTH. Afirma-se, desta forma, que o diâmetro médio das partículas aumenta à medida em que o raio de curvatura aumenta, considerando-se as simulações realizadas no estudo. A menor turbulência, relacionada aos FTHs com raio de curvatura maiores, reduz, também, a quebra dos flocos agregados.

Em estudo mais recente, Oliveira e Donadel (2024) propuseram um modelo determinístico e probabilístico para prever o comprimento ótimo de um FTH com base em resultados de remoção de turbidez de diversas configurações diferentes de floculadores previamente estudados. O trabalho indicou que, uma vez determinado o comprimento ideal de um floculador a eficiência do processo se mantém em uma faixa de valores aceitáveis, mesmo diante de variações de gradiente de velocidade e vazão.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base na análise dos 16 artigos selecionados, observa-se que a análise temporal evidencia uma tendência à valorização do tema nos últimos 10 anos, refletindo a maior investigação de tecnologias alternativas para o tratamento de água no Brasil. Foi possível observar também que há uma necessidade de diversificação regional de produção de conteúdo científico sobre o tema para ampliar a representatividade das pesquisas.

Em relação aos parâmetros abordados, há um consenso nos estudos analisados de que os aspectos hidrodinâmicos e geométricos desempenham papéis importantes na eficiência dos FTHs. Dessa forma, modelos preditivos de eficiência de remoção de turbidez, baseados em características geométricas e hidrodinâmicas, podem ser usados para ajustar os parâmetros de design e operação do FTH.

Vale destacar também que a modelagem computacional (CFD) vem se tornando cada vez mais uma ferramenta utilizada para otimizar o design de FTHs, o que mostra que os estudos vem sendo aprimorados por meio de técnicas mais refinadas.

Em suma, para o aprimoramento do desempenho dos FTHs, é necessário considerar a interação entre os parâmetros, o que aponta para uma tendência promissora de desenvolvimento de floculadores mais eficientes por meio de abordagens que integram estudos de bancada e modelagens computacionais.

Dante dos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se realização de estudos em diferentes regiões do Brasil, especialmente em áreas menos representadas. Isso contribuiria para uma maior diversidade de contextos ambientais e operacionais, favorecendo a generalização dos resultados e o desenvolvimento de soluções mais adaptadas às realidades locais.

Por fim, embora muitos estudos se concentrem em condições controladas de laboratório, recomenda-se a realização da investigações em escala real, considerando os parâmetros geométricos e hidrodinâmicos, o que pode gerar dados consolidados para avaliação da aplicabilidade dos FTHs em contextos práticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa (FAPES) pelo apoio financeiro e ao Programa de Pós Graduação em Tecnologias Sustentáveis (PPGTECS) do Instituto Federal do Espírito Santo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PBE. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 194, p. 151–162, 2023.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 08 de julho de 2020. Altera a Lei nº 13.979, de 6 de fevereiro de 2020, para determinar a adoção de medidas imediatas que preservem a saúde e a vida de todos os profissionais considerados essenciais ao controle de doenças e à manutenção da ordem pública, durante a emergência de saúde pública decorrente do coronavírus responsável pelo surto de 2019. Diário Oficial da União. Brasília, 2020.

CARISSIMI, E. *et al. Revisiting Coiled Flocculator Performance for Particle Aggregation*. *Water Environment Research*, v. 90, n. 4, p. 322–328, abr. 2018.

CARISSIMI, E.; MILLER, J. D.; RUBIO, J. *Characterization of the high kinetic energy dissipation of the Flocs Generator Reactor (FGR)*. *International Journal of Mineral Processing*, v. 85, n. 1–3, p. 41–49, 2007.

CARISSIMI, E.; RUBIO, J. *The flocs generator reactor-FGR: A new basis for flocculation and solid-liquid separation*. *International Journal of Mineral Processing*, v. 75, n. 3–4, p. 237–247, 2005.

CARISSIMI, E.; RUBIO, J. *Polymer-bridging flocculation performance using turbulent pipe flow*. *Minerals Engineering*, v. 70, p. 20–25, 2015.

CORDEIRO *et al.* Revisão sistemática: uma revisão narrativa. *Revista do colégio brasileiro de cirurgiões*, v. 34, p. 428–431, 2007

DORSA, A. C. D. O papel da revisão da literatura na escrita de artigos científicos. *Interações* (Campo Grande), p. 681–684, 30 out. 2020.

GALVÃO, C. M. *et al.* A busca das melhores evidências. *Revista Escola de Enfermagem da USP*. 2003.

HAMEED, M. S.; MUHAMMED, T. J.; SAPRE, A. *Improved Technique for River Water Flocculation*. Baghdad. 1995.

MARASCHIN, M. *et al. Aluminium sludge thickening: Novel helical pipes for aggregation by dual flocculation and thickening by filtration applied to water treatment plants*. *Separation and Purification Technology*, v. 241, 15 jun. 2020.

MARIANO *et al.* Revisão da literatura: apresentação de uma abordagem integradora. In: AEDEM *International Conference*. 2017. p. 427–442.

OLIVEIRA, D. S.; DONADEL, C. B. *Mathematical modelling and analysis of the flocculation process in low retention time hydraulic flocculators*. *Water SA*, v. 45, n. 1, p. 1–11, 2019 b.

OLIVEIRA, D. S.; TEIXEIRA, E. C. *Experimental evaluation of helically coiled tube flocculators for turbidity removal in drinking water treatment units*. *Water SA*, v. 43, n. 3, p. 378–386, 2017.

OLIVEIRA, C.; RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. *Operating parameters affecting the formation of kaolin aerated flocs in water and wastewater treatment*. *Clean - Soil, Air, Water*, v. 42, n. 7, p. 909–916, 2014.

OLIVEIRA, D. S.; DONADEL, C. B. *Helically Coiled Tube Flocculators in Water Clarification Systems: Optimal Length Evaluation and Process Efficiency Probabilistic Analysis*. *Sustainability* (Switzerland) , v. 16, n. 5, 2024.

OLIVEIRA, D. S.; DONADEL, C. B. *Global velocity gradient evaluation: An innovative approach using CFD modeling applied to water and wastewater treatment plants*. *Journal of Water Process Engineering*, v. 28, p. 21–27, 2019 a.

OLIVEIRA, D. S.; TEIXEIRA, E. C.; DONADEL, C. B. *Novel approaches for predicting efficiency in helically coiled tube flocculators using regression models and artificial neural networks*. *Water and Environment Journal*, v. 34, n. 4, p. 550–562, 2019.

RAMESH, E.; JALALI, A. *Machine-learning based multi-objective optimization of helically coiled tube flocculators for water treatment*. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 197, p. 931–944, 1 set. 2023.

RUBIO, J.; CARISSIMI, E.; ROSA, J. *Flotation in water and wastewater treatment and reuse: recent trends in Brazil*. *Int. J. Environment and Pollution*. 2007.

SARTORI. *et al.* *CFD modelling of helically coiled tube flocculators for velocity gradient assessment*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 37, n. 1, p. 187–198, 2015.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto. Visão Geral: Ano de referência 2022. Ministério das Cidades. Brasília. 2023.