



SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS INTELIGENTES

Águas • Efluentes • Biogás

INFORME TÉCNICO

Estações Tratamento Efluentes Industriais

Tratamentos Avançados

Processo Cavitação Hidrodinâmica (Nanobolhas)

REMOÇÃO SURFACTANTES

2.025

TRATAMENTO E REMOÇÃO SURFACTANTES
PROCESSO CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA

EFICAZ TRATAMENTO SURFACTANTES – CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA

Por: Salerno, A. Gilberto Eng^o
BIOTECS – Soluções Tecnológicas Inteligentes
Diretor Técnico

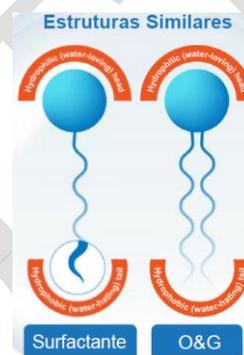
Tratamento Águas Residuais Poluentes

O tratamento de águas residuais tem uma responsabilidade importante de reagir às mudanças nos resíduos produzidos pelo consumidor e pela indústria, que representam desafios ambientais.

Os surfactantes são um desses contaminantes emergentes e de interesse devido ao seu uso doméstico e industrial cada vez mais onipresente e à dificuldade que sua presença causa no tratamento tradicional e impactos ambientais.

Estruturas Similares

As estruturas dos surfactantes e óleos e graxas (O&G) são muito similares e ambas substâncias podem provocar sérios descontroles nas estações de tratamento de esgotos municipais e efluentes industriais, cada uma à sua maneira.



Surfactantes (tensoativos – redutores de tensão superficial)

- Compostos de amônio quaternário (QACs)
- Cloretos de benzalcônio (BACs)
- Outros

Limpadores de Superfícies

- Desengordurantes

Sabões e Detergentes

- Laurilsulfato de sódio (SLS)
- Outros

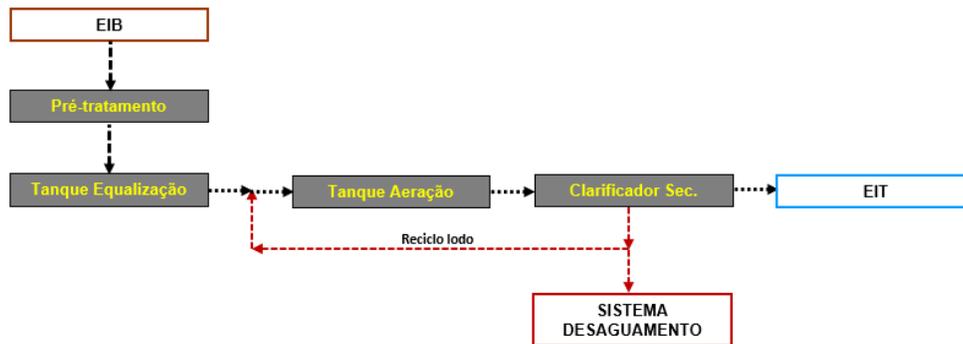
Gorduras, Óleos e Graxa (O&G)

- Fosfolipídeos

Espumas

Origens e Tipos Principais

As espumas formadas no pré-tratamento e processos biológicos de estações de tratamento de esgotos municipais e efluentes industriais podem ser o resultado das suas condições biológicas operacionais temporárias e/ou, principalmente, das elevadas concentrações de surfactantes de uso doméstico e industriais, que são enviadas, por exemplo, para o tanque de aeração de um processo biológico de lodos ativados.



Dessa forma, podemos mencionar basicamente 2 (dois) tipos de espumas que podem se formar nesse processo: i) biológicas e ii) químicas:

- As biológicas, de cor mais amarronzada, podem ocorrer, por exemplo, durante a fase de posta em marcha da estação de tratamento, quando o processo biológico aeróbio ainda está se ajustando às condições que lhe estão sendo impostas durante esta fase inicial de tratamento.

À medida que o processo vai evoluindo e tendendo para a sua estabilidade e normalidade operacionais, as espumas vão diminuindo até praticamente desaparecer.

Entretanto, no tanque de aeração pode também se formar uma variante de cor preta, normalmente presente na sua superfície, que denuncia uma operação inadequada e com baixas eficiências do processo. Estas espumas podem ser formadas principalmente por bactérias (lodo) mortas, finos de carvão, óleos e gorduras, etc.

A formação de espumas (biológicas), durante a fase de posta em marcha, pode também ocorrer devido a um subitido desbalanceamento entre a relação “alimento x microrganismos” (A/M ou F/M em inglês), isto é, aumento descontrolado da carga de alimentação do sistema ou aumento descontrolado da carga de lodo (caso de uma inoculação) em um curto espaço de tempo,

independentemente se o processo estiver reagindo favoravelmente (ótimas eficiências e demais parâmetros dentro da normalidade)

- As espumas químicas, de cor esbranquiçada, são fruto de elevadas concentrações de surfactantes presentes nos esgotos municipais e efluentes industriais, que podem se formar em grandes volumes nos tanques de aeração, com o auxílio do oxigênio/ar que lhe está sendo fornecido.

Dessa forma, quanto maior for o volume de O₂/ar e concentração de surfactantes presentes no tanque de aeração maior será a formação de espumas (bolhas de ar).

Consequências Diretas Para o Processo Biológico

A formação de espumas, frequentemente desencadeada pela contaminação por surfactantes, interrompe as operações dentro dos tanques/reatores utilizados nos sistemas de tratamento biológicos, com especial atenção para os aeróbios, levando a desafios operacionais dispendiosos, como, por exemplo, a utilização de soluções antiespumante, à base de água ou silicone, que em determinadas concentrações podem também trazer prejuízos aos mesmos processos biológicos.

Além das espumas, surgem ainda preocupações com a geração de odores nas estações de tratamento, afetadas igualmente pelos surfactantes.

A eficácia do sistema de tratamento diminui à medida que os seus efluentes residuais carregados com surfactantes e desinfetantes se mostram resistentes aos métodos convencionais, levando à busca por soluções inovadoras para lidar com esses desafios.

Os surfactantes e desinfetantes, devido às suas **propriedades anfílicas** interferem negativamente e interrompem os processos de tratamento de águas residuais contaminantes.

Tecnologias Tradicionalmente Utilizadas

A maioria dos processos biológicos aeróbios (LAC - Lodo Ativado Convencional, SBR - "Sequencing Batch Reactor", MBR – "Membrane Bioreactor", MBBR – "Moving Bed Biofilm Reactor, etc.) , utilizados no tratamento de efluentes industriais, pode gerenciar baixos níveis de surfactantes e desinfetantes, e ser suficiente e eficaz na sua remoção.

Entretanto, concentrações mais elevadas destes surfactantes podem ser tóxicos para a biomassa aeróbia, presente, por exemplo, em um processo de lodo ativado.

Além disso, essas substâncias podem:

- Inibir a atividade microbiana e a degradação de contaminantes no processo de lodos ativados (redução da cinética da biomassa), afetando a qualidade da água residual tratada;

- Reduzir a eficiência de transferência de oxigênio/ar no meio líquido, vital para manter as condições aeróbias no tanque de aeração, pois os surfactantes impedem a difusão das moléculas de oxigênio, afetando as funções respiratórias das bactérias aeróbias (biomassa);
- Interferir na separação de sólidos e na desidratabilidade do lodo no clarificador secundário.

Perturbações de processo, baixa eficiência de tratamento e capacidade reduzida são frequentemente causadas por substâncias tóxicas e inibidoras, tais como os surfactantes.

Esses problemas se tornaram mais recorrentes nos últimos anos devido ao aumento das concentrações de surfactantes e desinfetantes nos esgotos e efluentes industriais, tornando a sua remoção mais importante do que nunca.

Isso resulta em restrições de capacidade de tratamento e estações de tratamento de águas residuais sobrecarregadas.

Durante e Pós Pandemia (COVID-19)

Durante o auge da pandemia da COVID-19, a população foi incentivada a lavar e desinfetar as suas casas, locais de trabalho, escolas, hospitais, lojas, etc. e, a si mesmas, com mais frequência e mais cuidado, levando à geração de maiores concentrações de surfactantes e desinfetantes nas águas residuais, descarregadas no sistema de coleta e nas plantas de tratamento.

A mesma filosofia e procedimento foi utilizada nas indústrias, com maior destaque para as de alimentos e bebidas, onde foram adotadas medidas mais severas na assepsia e limpezas (CIP) de todas as instalações hidráulicas, equipamentos, pisos, etc., levando aos mesmos resultados mencionados no parágrafo anterior.

As mudanças de hábito, levando à troca de sabonetes em barra e detergentes em pó, tendência que precedeu a COVID-19, pelos líquidos e concentrados, também exacerbaram o problema, porque os produtos líquidos contêm mais surfactantes do que os sólidos.

Paradoxalmente, o sucesso dos esforços de conservação (redução) de água levou a maiores concentrações de surfactantes nas águas residuais.

Redução do consumo de água
+
Produtos de Limpeza Mais Fortes
=
Maior Concentração de Compostos Inibitórios

A severidade e a duração crescentes das secas, levaram igualmente a uma maior concentração de surfactantes e desinfetantes nas águas servidas e residuais.

Tratamentos Convencionais

Apesar de melhorias encontradas em métodos biológicos tradicionais usando pré-tratamentos químicos, sempre houve uma clara falta de consenso sobre a estratégia ideal a ser adotada no tratamento dos esgotos municipais e efluentes industriais, pós-pandemia.

Convencionalmente, várias técnicas foram implantadas para descontaminar surfactantes de águas residuais.

Algumas dessas tecnologias de remediação incluem processos físico-químicos, filtração por membrana e floculação-adsorção, ultrafiltração, eletrocoagulação e química e eletro-oxidação (Rodriguez Boluarte et al. [2016](#) ; Gönder et al. [2017](#) ; Mohammadi et al. [2017](#) ; Pinto et al. [2017](#)).

No entanto, quando as concentrações de surfactantes em águas residuais são elevadas, quase todas as técnicas tradicionais falharam em remover de forma abrangente a contaminação por surfactantes (Sirés e Brillas [2012](#) ; Palmer e Hatley [2018](#)).

Em geral, a seleção de tecnologias de tratamentos eficientes depende em grande parte da qualidade do influente (o que entra) e do efluente (o que sai)

A presença de 15 mg/l de SLS nos efluentes industriais pode reduzir a transferência de oxigênio em até 50% (Rosso, D. Aeration Mixing and Energy; Bubbles and Sparks – IWA Publishing, 2018).

Esta situação colocou uma pressão imensa no desempenho e nas operações das instalações de recuperação de recursos de águas residuais e estações de tratamento, pois estão ocorrendo com maior frequência perturbações nos processos biológicos.

Trabalhos intensos e neste sentido foram e estão sendo realizados em estações de tratamento de esgotos, que sofrem com o impacto das concentrações crescentes de surfactantes e desinfetantes, levando a problemas operacionais, eficiências reduzidas, maior consumo de produtos químicos e elevação dos custos operacionais.

A BIOTECS encontrou sérios problemas com a incontrolável formação de espumas durante o “start-up” de uma estação de tratamento de efluentes industriais, que utiliza um processo de lodos ativados com MBR, fornecida para uma engarrafadora de refrigerantes, tendo que lançar mão, entre outros procedimentos, da aplicação de aditivo antiespumante, que contribuiu, de uma certa forma, para a geração de novos problemas operacionais.

Diagnósticos Errôneos

Muitos dos sintomas de surfactantes são frequentemente diagnosticados erroneamente como capacidade insuficiente de tratamento, exigindo melhorias de infraestrutura dispendiosas para serem implantadas, que poderiam ser evitadas.

Alternativamente, alguns operadores de estações de tratamento “resolveram” o problema com soluções e correções temporárias, como a aplicação de produtos químicos quaternários, sem mitigação a longo prazo.

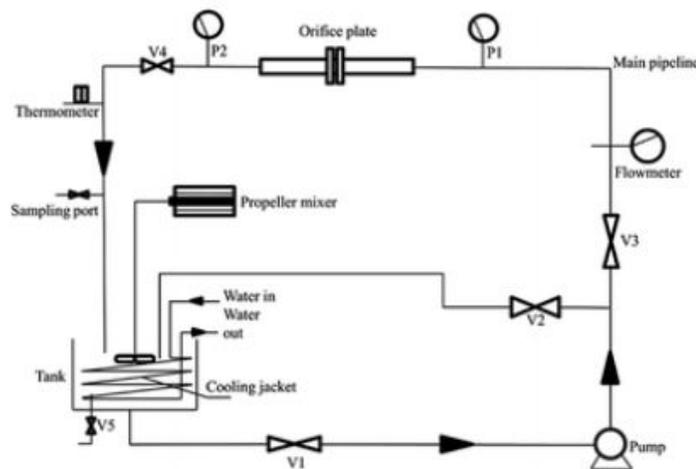
Cavitação Hidrodinâmica

Durante muitos anos, a cavitação hidrodinâmica foi estudada de forma mais profunda e prática e, após os bons resultados alcançados, vem sendo utilizada com sucesso em estações de tratamento de esgotos municipais e efluentes industriais, entre outras coisas, para a eficaz remoção de surfactantes.

De forma simplificada, o sistema de cavitação hidrodinâmica (HC) é formado por:

- Gerador de HC (normalmente, cavitação de orifício)
- Motobomba autoescorvante de alta pressão
- Tanque de recirculação
- Filtros de linha (caso requerido)
- Materiais hidráulicos em geral (tubulação, válvulas de controle, acessórios, etc.)
- Instrumentação de controle
- Outros de menor importância

Ilustração Esquemática do processo



Teoria Básica - Princípios

Cavitação é um processo relacionado à pressão e ocorre quando a pressão local cai abaixo da pressão de vapor correspondente à temperatura do líquido.

A cavitação hidrodinâmica ocorre quando o líquido passa por um dispositivo divergente de restrição, como válvula de estrangulamento, placa de orifício e venturi, etc., tendo como resultado a formação de bolhas ultrafinas.

Na região de restrição, a velocidade do fluido aumenta às custas da queda de pressão e bolhas de cavitação são formadas.

Subsequentemente, na região à jusante da constricção, a pressão é submetida à recuperação devido à expansão seccional e ao colapso das bolhas de cavitação.

Devido a esse colapso, um ambiente extremo pode ser formado, com altas temperaturas (1.000 - 10.000°K), altas pressões (100 - 500 bar) e microjatos de alta velocidade (magnitude de 10^2 m/s)

Como consequência, alguns radicais livres altamente reativos, como HO^* , H^* , HOO^* , HO_2^* e H_2O_2 , são gerados. Todos os fatores acima mencionados favorecem as reações de degradação.

Esta degradação pode ser interpretada como sendo o resultado de efeitos físicos/mecânicos (tensão cisalhamento) e químicos (p.e., radicais livres) e, ainda, térmicos (pontos quentes), induzidos pelo colapso de bolhas formadas na cavitação hidrodinâmica.

A grande tensão de cisalhamento, gerada durante o colapso das bolhas, pode quebrar a ligação “carbono-carbono” e assim permitir a decomposição direta e transformação de macromoléculas orgânicas em compostos orgânicos de baixo peso molecular.

Além disso, pontos quentes localizados são gerados à medida que o raio da bolha se contrai violentamente. Sob condições de alta temperatura do gás dentro da bolha ou na interface “gás-líquido”, as moléculas orgânicas podem ser diretamente decompostas em compostos inorgânicos ou orgânicos de baixo peso molecular durante o período de colapso das bolhas.

Portanto, a cavitação hidrodinâmica tem sido considerada um meio eficaz para destruir contaminantes presentes em águas residuais e efluentes industriais.

Principais Parâmetros e Cálculos Básicos - Teoria

Deve-se notar que a quantidade total de degradação depende da intensidade da cavitação e do número de eventos de cavitação.

Dois parâmetros importantes conhecidos como número de cavitação e taxa de eventos de cavitação devem ser introduzidos para caracterizar esses dois aspectos:

$$C_v = (P_2 - P_v) / (1/2 \rho v_o^2) \text{ e } J = J_o \exp (-G)$$

Onde:

- P_2 = pressão total recuperada a jusante
- P_v = pressão de vapor saturado do líquido
- v_o = velocidade do líquido na posição de constricção
- J_o = fator pré-exponencial normalizado
- G = denota a energia de ativação de Gibbs normalizada

A quantificação adequada da distribuição de pressão e velocidade em um reator de cavitação é crítica para analisar quantitativamente a dinâmica das bolhas e a química relacionada.

Através da conversão de tempo e espaço, a pressão local em qualquer posição a jusante é expressa como:

$$P = (P_v) + [(P_2 - P_v)/T]$$

P = pressão axial

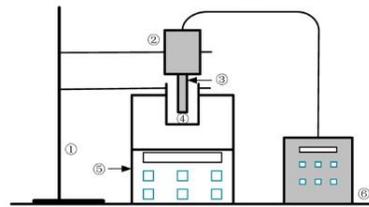
t = momento específico correspondente à posição geométrica

T = tempo total para a recuperação da pressão

Bolhas Ultrafinas ou Nanobolhas

A geração de micro/nanobolhas na água pode ser principalmente realizada por 3 (três) métodos:

- Cavitação acústica (ondas ultrassônicas)

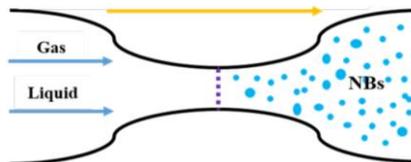


- Expansão - compressão (Lei Henry: "A quantidade de gás dissolvido em um líquido é proporcional à sua pressão parcial acima do líquido").
- Cavitação Hidrodinâmica: Descompressão e recirculação de "água - gás"

Cavitação Hidrodinâmica

Apoiadas no princípio da cavitação hidrodinâmica (HC), foram desenvolvidas outras tecnologias, objetivando tratar e transformar substância inorgânicas em outras mais simples e, menos ou não prejudiciais aos processos biológicos.

Dessa forma, através da cavitação hidrodinâmica foram geradas as chamadas nanobolhas, microbolhas, bolhas ultrafinas, bolhas nanodimensionadas, entre outras denominações encontradas no mercado.

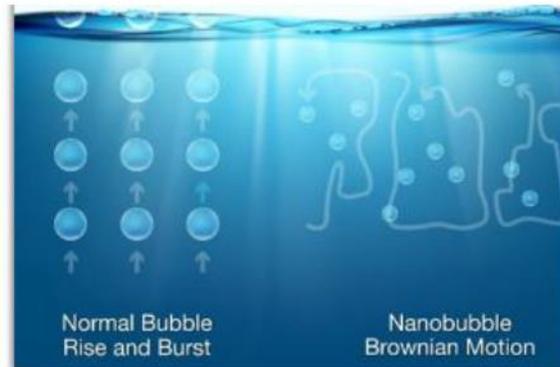


Visão geral esquemática da geração de nanobolhas pela cavitação hidrodinâmica

Ao contrário de bolhas maiores, as nanobolhas são bolhas de gás extremamente pequenas (de tamanho nano) que têm uma série de propriedades químicas e físicas únicas, conforme segue:

- Uma superfície fortemente carregada negativamente que permite estabilidade em líquido;
- Capacidade de separar fisicamente pequenas partículas e gotículas;
- Flutuabilidade neutra, permitindo que permaneçam suspensas por semanas no líquido, sem emergir e se mover aleatoriamente através de líquidos na forma de movimento browniano.

A tecnologia de nanobolhas oferece às estações de tratamento de esgotos municipais ou efluentes industriais um método de pré-tratamento não tóxico que remove surfactantes (e/ou outras substâncias) das águas residuais e melhora a eficiência dos tratamentos posteriores, incluindo tratamento primário, secundário e desinfecção.



A tecnologia de nanobolhas pode ainda ser associada a outros processos de oxidação avançada, a montante e/ou a jusante, para aumentar a eficácia do processo de oxidação, por exemplo, de substâncias recalcitrantes (refratárias aos processos biológicos), de elevado peso molecular e longas cadeias hidrocarbônicas, objetivando transformá-las em substâncias mais simples, de baixo peso molecular e biodegradáveis na sua maioria.

No tratamento de efluentes industriais, as nanobolhas funcionam como uma química limpa, mudando a natureza fundamental dos compostos inibitórios ou não tratáveis biologicamente, fornecendo resultados significativos.

Algumas propriedades específicas das nanobolhas que são benéficas aos sistemas de tratamento que utilizam processos biológicos e/ou físico-químicos são mencionadas na sequência:

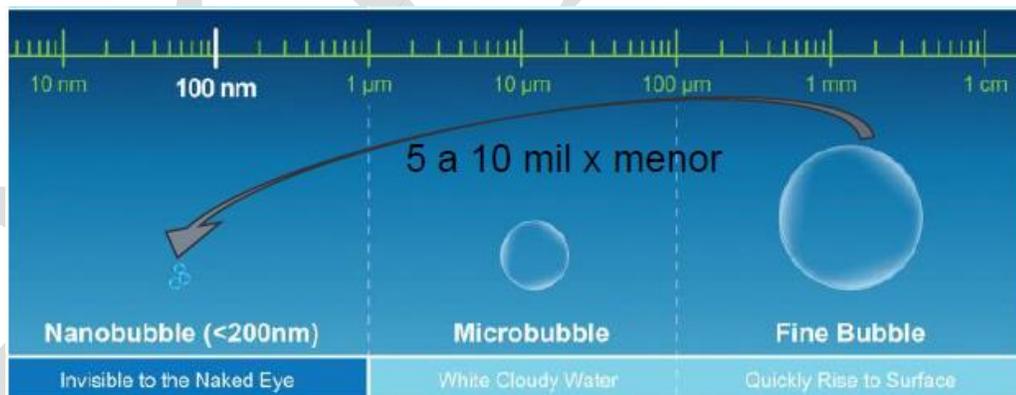
- **Tamanho**
A nanobolha tem um diâmetro de < 200 nm (nanômetros). Comparadas a uma bolha fina típica de 1 mm, essas bolhas fornecem 10.000 vezes mais área de superfície para adsorver compostos inibitórios;
- **Carregamento**
As nanobolhas têm uma forte carga negativa na superfície, o que as impede de se coalescer e se espalham por todo o meio líquido;

- **Estabilidade**
 As nanobolhas são flutuantes neutras – elas permanecem suspensas na água, dando tempo para que a reação aconteça;
- **Hidrofobia**
 As nanobolhas são hidrofóbicas – e, como tal, atrairão as caudas hidrofóbicas dos compostos anfífilicos;
- **Pressurização Interna**
 As nanobolhas têm um diâmetro de 100 nm. Conforme determinado pela equação de Young Laplace, elas têm uma alta pressão interna de 400 psi (27,5 bar). Portanto, elas podem liberar enormes quantidades de pressão e energia térmica quando desestabilizadas.

Em resumo, as nanobolhas apresentam as seguintes propriedades principais, quando aplicadas a diferentes plataformas:

- Flutuação Neutra;
- Alta Carga e Área de Superfície;
- Oxidação;
- Tensão Superficial;
- Hidrofobicidade;
- Carga Superficial
- Tensão Interfacial

Ilustração dos Tamanhos de Bolhas



Aplicação: Antes dos Processos Biológicos

Aplicadas a montante dos processos biológicos de uma estação de tratamento de esgotos municipais ou efluentes industriais, as propriedades únicas descritas anteriormente ajudam as bolhas a atrair e sequestrar os compostos inibitórios.

Quando desestabilizadas, as bolhas liberam a energia a elas aprisionadas, fazendo com que as moléculas dos surfactantes e/ou outras substâncias sejam quebradas, tornando-as fáceis de serem tratadas.

As propriedades do composto inibitório/refratário são fundamentalmente alteradas, tornando-as mais fáceis de serem tratadas.

Ao alterar sua capacidade de revestir outros compostos orgânicos, o restante das águas residuais se torna mais fácil de ser tratado.

Aplicação Típica em Estações de Tratamento



O sistema de geração de nanobolhas é basicamente formado por:

- Gerador de nanobolhas
- Motobomba autoescorvante (recirculação)
- Compressor de gases (ar)
- Sistemas hidráulicos e elétricos
- Tanque de recirculação de água (efluentes)

Economias e Benefícios Medidos

- Melhor qualidade da água residual tratada;
- Redução no consumo de energia na aeração;
- Maior remoção sólidos na decantação;
- Aumento na produção de biogás (processo anaeróbio);
- Menor consumo químico na desinfecção

Conclusões Finais

A utilização do sistema de cavitação hidrodinâmica, capaz de produzir bolhas ultrafinas (nanobolhas), para a remoção de surfactantes, poderá trazer inúmeros benefícios à estação de tratamento de esgotos municipais ou de efluentes industriais, conforme segue:

- Redução da carga biológica do tratamento;
- Maior eficiência do sistema de transferência de oxigênio no tanque de aeração;
- Obtenção de maiores e mais estáveis eficiências de remoção do processo biológico aeróbio;
- Drástica redução ou completa eliminação das espumas (principalmente no tanque de aeração, clarificador, etc.);

- Redução ou eliminação da necessidade de utilização de soluções antiespumantes;
- Acentuada melhoria na performance do sistema de decantação;
- Redução do consumo energético e custos operacionais;
- Eliminação dos impactos ambientais causados pelas espumas (principalmente, visuais);
- Outros.

Sistema Cavitação Hidrodinâmica



(imagem ilustrativa)

(Agradecimentos à Moleaer – “Advancing Nanobubble Technology” e parceiros tecnológicos, e, ainda, pesquisadores e cientistas que desenvolveram exaustivos estudos e publicaram trabalhos – “papers” consistentes e confiáveis, relacionados com esta inovadora e revolucionária tecnologia)