

AVALIAR EXPERIMENTALMENTE OS NÍVEIS DE REDUÇÃO NOS INDICADORES FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS, DE ÁGUAS DESTINADAS AO CONSUMO HUMANO, ALCANÇADOS COM O USO DO REATOR DE CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICO

Eliezer Fares Abdala Neto¹; Marisete Dantas de Aquino² & Soraia Tavares de Souza Gradvohl³

RESUMO --- Relata a aplicação da cavitação hidrodinâmica como alternativa para a desinfecção de água para o abastecimento humano, ampliando a oferta de água que atenda aos padrões de potabilidade. O cloro tem se destacado como o desinfetante mais difundido, porém estudos recentemente publicados trazem a tona que, muitos desses químicos, podem ser danosos aos usuários de águas tratadas e ao ambiente. Além de que, alguns patógenos, em especial vírus e protozoários, são mais resistentes ao tradicional cloro do que as bactérias do grupo coliformes. Com isso, existe a necessidade de se desenvolver processos de desinfecção adicionais que poderiam eliminar ou reduzir o uso dessas desinfecções químicas. Operou-se um protótipo de um reator de cavitação hidrodinâmica com água contendo concentrações elevadas de indicadores patogênicos, avaliou-se então, o potencial de desinfecção. Os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas do afluente e efluente mostraram que o mecanismo foi capaz de reduzir a menos de um os microrganismos patogênicos estudados. Acredita-se que a cavitação detenha um grande potencial de desinfecção, devido ao stress mecânico, alta temperatura e pressão gerada localmente e formação de átomos reativos (oxidação). Sendo uma alternativa de desinfecção caracterizada pela possibilidade de adoção em sistemas de abastecimento de água individual ou multifamiliares.

ABSTRACT --- The application of hydrodynamic cavitation as an alternative disinfection method of wake for human consumption is related. Chlorine is the most widely used disinfection; however recent studies reveal chemical products may cause harm in users and the environment. In addition, some pathogenic species, especially viruses and protozoan, have higher resistance to traditional chlorine treatment than coliform bacteria. Therefore, it is necessary to develop alternative process for disinfection that can substitute or reduce the use of chemicals. These processes should be accessible low income populations, be more efficient in the elimination of a wide range of pathogenic germs and should not produce harmful by-products. We made experiments with one prototype and sewer inoculated water for the evaluation of their potential of elimination of germs. Physic-chemical and bacteriological analyses shower that the method eliminates totals of the pathogenic micro-organisms observed. That way, this method of disinfection proved that its use in family or small community water supply systems is feasible.

Palavras-chave: Desinfecção de água, tratamento de água, alternativa de desinfecção.

-
- 1) Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Civil, com área de concentração em Saneamento Ambiental, Doutorando em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. Rua Almeida Prado, 610/1203, Fortaleza, CE, 60176-080. e-mail: superagua@superig.com.br.
2) Professor Doutor Associado I da Universidade Federal do Ceará. E-mail: marisete@UFC.br.
3) Engenheira Civil, Mestre em Engenharia Civil, com área de concentração em Saneamento Ambiental, Doutorando em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. e-mail: soraiatsg@yahoo.com.br

1 - INTRODUÇÃO

Ultimamente é crescente a busca por fontes de abastecimentos alternativos, objetivando a obtenção de maior oferta de água, com isso, impactos sobre a saúde das populações são observados. Devido à falta de alternativas viáveis, sob o ponto de vista financeiro, estes usuários acabam por negligenciar qualquer opção de desinfecção destas águas, ficando susceptíveis aos perigos das doenças de veiculação hídrica.

Segundo Biasoli (2000), especificamente nas grandes metrópoles e pequenas cidades do Brasil, as populações são acometidas por uma diversidade de doenças infecciosas, principalmente, pela falta de coleta, tratamento e disposição final dos esgotos.

Conforme Von Sperling (1996), a qualidade de uma determinada água é função do uso e da ocupação na bacia hidrográfica.

É notório que países em desenvolvimento enfrentam sérios problemas com a alta incidência de doenças hídricas pela falta de saneamento básico, sendo mais afetadas as populações que vivem em regiões pobres, e mesmo periféricas, e rurais. Por serem localidades desprovidas de sistemas de esgotamento e ou drenagem, despejam uma elevada carga de poluição em corpos d'água, onde estes mesmos mananciais servem como única fonte de uso para abastecimento de água sem nenhum tratamento.

De acordo com a legislação a água que é fornecida a população deve estar isenta da presença de microrganismos causadores de doenças. Diante disso, é imprescindível a busca de medidas mitigadoras ou indicações para possíveis soluções, de modo a evitar conseqüências negativas para o meio ambiente, para a saúde das populações e a economia produtiva, bem como, apontar alternativas para o uso de processos de desinfecção que não gerem subprodutos, podendo inativar uma ampla faixa de patógenos e ser acessível às populações carentes.

Muitos pesquisadores e estudiosos sugerem que, para prover água para essas comunidades, é essencial que se reduzam os custos dos sistemas de abastecimento de água através do uso de tecnologias apropriadas e de baixo custo, e também se instalem sistemas cuja operação e manutenção possa ser gerenciada e sustentada com recursos locais.

Nesta pesquisa foi avaliado o potencial de desinfecção de água para consumo humano, a partir de uma água contaminada, com o uso de um reator de cavitação hidrodinâmica.

2 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Na realização do ciclo hidrológico, principalmente ao atravessar a atmosfera e correr pela superfície da terra, a água incorpora as mais diversas substâncias. Segundo Von Sperling (1996), o grau de pureza conferido a água é função dos diversos componentes presentes na água,

podendo ser identificados, de uma maneira ampla e simplificada, em termos das suas características físicas, químicas e biológicas. Essas características podem ser traduzidas na forma de parâmetros de qualidade de água.

A prevalência das doenças de veiculação hídrica, notadamente na América Latina, África e Ásia, constitui um forte indicativo da fragilidade dos sistemas públicos de saneamento. Tal fragilidade materializa-se na ausência de redes coletoras de esgotos e, principalmente, na qualidade da água distribuída à população, quando os sistemas de abastecimentos se fazem presentes. A conjunção desses fatos concorre, embora não isoladamente, para a manutenção dos índices de mortalidade infantil do Brasil entre os mais elevados do continente (DANIEL, 2001).

Segundo Pelczar; Chan; Krieg (1996), risco à saúde e a vida podem ser causados pela água que apresenta microrganismos patogênicos. Os patógenos mais frequentemente transmitidos pela água são aqueles que causam infecções do trato intestinal. Como exemplos, podem ser citados os agentes etiológicos de febre tifóide e paratifóides, shigelose, cólera, campilobacteriose, enterites virais e amebíase. Esses microrganismos estão presentes nas fezes ou na urina de uma pessoa infectada e, quando descartados, podem entrar em um corpo de água que pode servir como fonte de água potável.

2.1 Parâmetros de qualidade microbiológica

A qualidade microbiológica de uma água destinada ao consumo humano deverá seguir os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 518 (BRASIL, 2004). Conforme o Art.11 do Ministério da Saúde, que determina para a água ausência total de *Escherichia coli* e coliformes totais por 100mL.

2.2 Agentes de desinfecção

Existem basicamente dois tipos de agentes de inativação de patógenos utilizados nos processos de desinfecção: o físico e o químico. Conforme Jyoti; Pandit (2003), a variedade de técnicas físicas e químicas que são rotineiramente usadas para a desinfecção de água incluem cloração, ozonização e luz ultravioleta. Outras técnicas incluem a combinação de dois ou mais métodos de desinfecção como o avançado processo de oxidação. Outras tecnologias emergentes incluem a filtração por membrana, desinfecção por íons de cobre e prata, processo fotocatalítico e radiação gama.

Destacam-se, como largamente utilizados no tratamento de água, o cloro e seus derivados, o ozônio e a radiação ultravioleta. Contudo, ainda encontra-se em muitos domicílios da periferia e áreas rurais, a fervura da água como único meio de desinfecção de água para consumo, mesmo acarretando um dispendioso consumo de energia.

A cavitação hidrodinâmica pode ser inserida no rol das técnicas físicas de desinfecção, pois, seu principal mecanismo de inativação pode ser atribuído às altas pressões e temperaturas

geradas localmente no ambiente líquido a ser tratado. Sem geração de subprodutos e atingindo uma ampla faixa de inativação patogênica.

2.3 O fenômeno da cavitação hidrodinâmica

2.3.1 Histórico

Segundo Gonçalves (1997), a partir de 1873, após investigações experimentais realizadas por Reynolds, o fenômeno de cavitação tem sido objeto de pesquisa. Executando experimentos com um modelo de barco com 76 cm de comprimento, com uma hélice de 5,08 cm de diâmetro, foi mostrado que a medida que a hélice era afundada na água as bolhas começavam a desaparecer e a propulsão aumentava. Reynolds concluiu, após os resultados deste experimento, que a admissão de ar atrás das pás da hélice reduzia a sua propulsão. Porém, o grande avanço nas pesquisas de cavitação ocorreu mesmo nas últimas 3 décadas, onde foi possível obter uma grande quantidade de informações empíricas sobre o início da cavitação e a formulação de várias regras empíricas, baseadas nas correlações entre medidas sobre modelos em escalas reduzidas, observações nos protótipos e ensaios de laboratórios em túneis de cavitação.

2.3.2 Definição

De acordo com Jyoti; Pandit (2001), a cavitação é um fenômeno de formação, crescimento e colapso de micro borbulhas dentro de um líquido. Se este fenômeno ocorrer devido a passagem de ondas de alta frequência é chamado então cavitação acústica (ultrasonication), e se ocorrer devido às variações de pressão no fluxo do líquido, devido à mudança na geometria de fluidez do sistema, é chamado cavitação hidrodinâmica.

Segundo Rachid (2003), Cavitação é normalmente definido como a formação de estados de vapor em um líquido. É distinguido da fervura, pelo fato de que sua formação é gerada pela redução de pressão, considerando que este último se refere à formação de vapor como resultado da adição de calor. Tanto internamente como externamente o fluxo dos líquidos pode ser submetido à cavitação debaixo de regimes constantes ou inconstantes. A região de “cavitação” do fluxo do fluido é em geral restrita a determinados locais pelos diferentes aspectos relacionados ao fluxo dos fluidos.

2.3.3 Descrição do fenômeno

Conforme Gonçalves (1997), o início do fenômeno da cavitação acontece quando se obtém um novo estado físico, ou seja, a massa de líquido pode alterar de fase, por aumento de temperatura a pressão constante (ebulição), ou por redução de pressão a temperatura constante, o que dá origem ao fenômeno de cavitação. Ao iniciar o fenômeno da cavitação, presume-se que exista no fluido minúsculos espaços contendo gás ou vapor, e pequenas impurezas a níveis microscópicos, que são denominados núcleos de cavitação.

Segundo Gogate *et al.*, (2001), as transformações físicas e químicas que usam o fenômeno da cavitação são de conceito bem estabelecido. A vantagem óbvia destes processos é baseada no

fato de que as reações podem ser realizadas sob as circunstâncias globais ambientais, que requereriam de outra maneira a aplicação de condições rigorosas, tais como, a alta temperatura e a pressão. O mecanismo subjacente para estes efeitos espetaculares da cavitação está no colapso violento das microbolhas ou cavidades, tendo por resultado a geração de temperaturas e de pressões extremamente elevadas localmente, entretanto, isto ocorre em milhões de posições no ambiente interno do líquido. O colapso violento das cavidades resulta também na formação de átomos reativos de hidrogênio e os radicais de hidroxila, que combinam para dar forma ao peróxido de hidrogênio, que são responsáveis por promover reações da oxidação.

Geralmente, a cavitação é classificada em quatro tipos: cavitação acústica, cavitação hidrodinâmica, cavitação ótica, e cavitação da partícula dependendo da modalidade da geração. Entretanto, somente cavitação acústica e a hidrodinâmica tem sido de interesse acadêmico e industrial, devido à facilidade de condições requeridas para a montagem dos estudos.

2.3.4 Mecanismos de desinfecção proporcionados pela cavitação

Abaixo estão enunciados três fatores que colocam a cavitação numa posição extremamente promissora como alternativa na desinfecção de água:

1- DESINTEGRAÇÃO CELULAR – STRESS MECÂNICO: Conforme Jyoti; Pandit (2004), a ruptura das células dos microrganismos depende do efeito da cavitação no líquido, ocorrendo devido o stress mecânico das ondas de choque do colapso das cavidades. Este ambiente gera a desintegração dos microrganismos que habitam a periferia da cavidade;

2- TEMPERATURAS E PRESSÕES ELEVADAS: Alta temperatura na periferia das implosões provoca a morte do microrganismo. Segundo Gogate et al., (2001), o colapso violento das cavidades resulta na geração de temperaturas e de pressões elevadas localmente, entretanto, isso ocorre em milhões de posições no ambiente interno do líquido;

3- FORMAÇÃO DE ÁTOMOS REATIVOS – REAÇÃO DE OXIDAÇÃO: o mesmo colapso provoca a formação de átomos reativos de hidrogênio, responsáveis por promover reações de oxidação (GOGATE et al., 2001).

A cavitação hidrodinâmica ocorre quando um líquido se submete a uma redução dinâmica da pressão devida a restrição de dispositivos tais como: venturi, placas de orifício, etc., ao operar-se sob temperatura constante. Resulta do fenômeno da cavitação hidrodinâmica a formação das cavidades preenchidas com uma mistura do vapor-gás dentro do fluxo do líquido ou nos limites do dispositivo de restrição devido a uma queda de pressão causada pelo movimento do líquido (SIVA KUMAR; PANDIT, 2001).

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Embora nosso objetivo principal fosse de experimentar o potencial de desinfecção com o uso da cavitação hidrodinâmica, foi necessário a construção de um protótipo para uso específico neste experimento. Envolvendo a manufaturas de componentes metálicos do tipo rotores, com diferentes geometrias e diâmetros. Contudo este estudo está mais direcionado a enfatizar os resultados alcançados com o uso do fenômeno da cavitação, do que os detalhes de dimensionamento, propriamente dito, do reator de cavitação hidrodinâmico.

3.1. Localização do experimento

O experimento desta pesquisa foi montado e instalado no Campus do Pici em área anexa à Fundação Núcleo de Tecnologia - NUTEC, destinada ao Parque Tecnológico PAR-TEC, na Universidade Federal do Ceará. A área escolhida justifica-se pela proximidade a setores de apoio do próprio NUTEC e o ambiente de incubadora de empresas de base tecnológica do PAR-TEC.

3.2. Levantamento bibliográfico para o projeto do equipamento de cavitação hidrodinâmica

A tecnologia de ondas cavitantes se traduz em uma forma de geração de calor que detém uma particularidade de suma importância, o calor gerado ocorre no interior do próprio fluido presente no ambiente interno do reator, de maneira uniforme, não aquecendo, instantaneamente, partes que não sejam o próprio fluido.

Para a concepção deste sistema proposto o estudo envolveu consulta a diversos documentos de patente, tais como: US3791349, US4480592, US 4779575, US 3242908, US 3933007, US 3937034, US 4277020, US 4325354, US 4381762, US 4381762, US4388915, US2003139041 e US200310225. Observando principalmente a engenharia construtiva aplicada aos equipamentos. Após estas investigações os componentes principais do reator de cavitação hidrodinâmica, a ser utilizado na pesquisa, foram definidos como sendo: rotor; eixo; mancais laterais; tampas laterais; e câmara. Representados na figura 1.

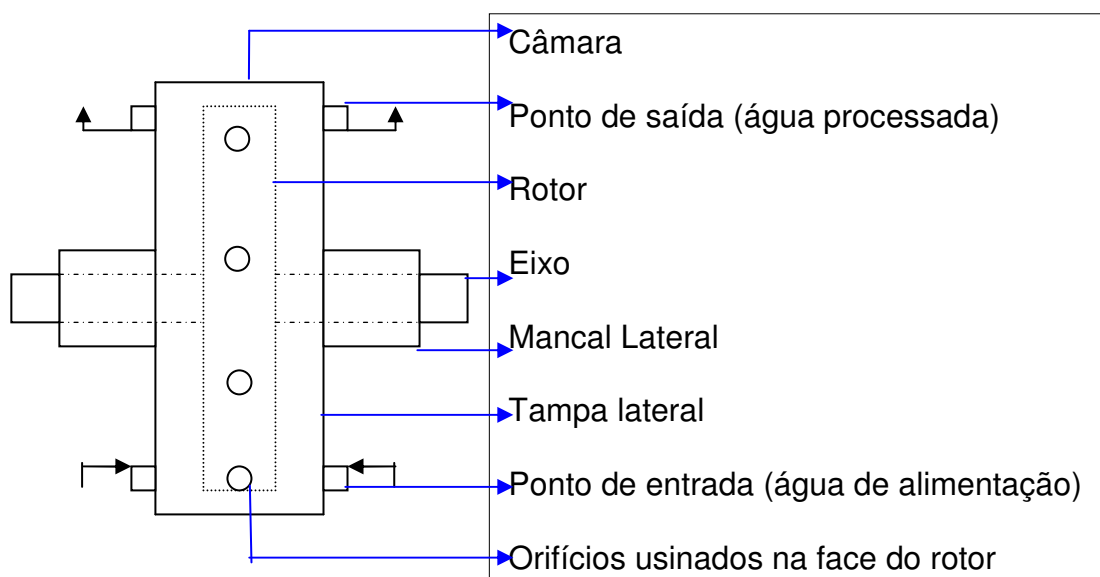


Figura 1 – Desenho esquemático do reator de cavitação hidrodinâmico.

3.2.1. Ocorrência de cavitação no ambiente interno do reator utilizado na pesquisa

O rotor do reator foi construído com orifícios de passagem que induzem o fluido a entrar e sair, repetidamente, das suas covas. Este movimento aplicado à parcela de água de alimentação, origina ondas vibratórias que são transmitidas, inicialmente, às moléculas de água (meio de propagação) que encontram-se adjacentes a face do rotor. A transmissão desta energia vibratória continua para as outras moléculas que estão ao redor das moléculas adjacentes. As moléculas adjacentes após repassarem a vibração, tendem a retornar ao estado de equilíbrio, criando, então, uma cavidade entre estas e as moléculas ao redor. Estas cavidades crescem entram em colapsos e implodem, liberando grande quantidade de energia térmica na água. A figura 2 mostra uma simulação do início da seqüência vibratória sofrida pelo meio de propagação.

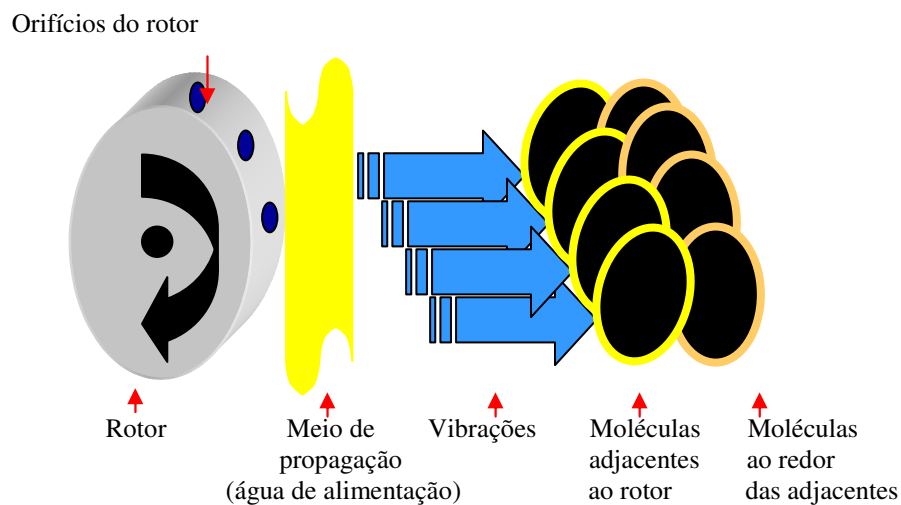


Figura 2 – Representação do início da seqüência vibratória sofrida com a rotação do rotor pelas moléculas do meio de propagação.

Durante o processo de formação das cavidades, existe a etapa de compressão, quando a pressão é positiva e a etapa de expansão, quando se tem uma pressão negativa. Conforme mostrado na figura 3.

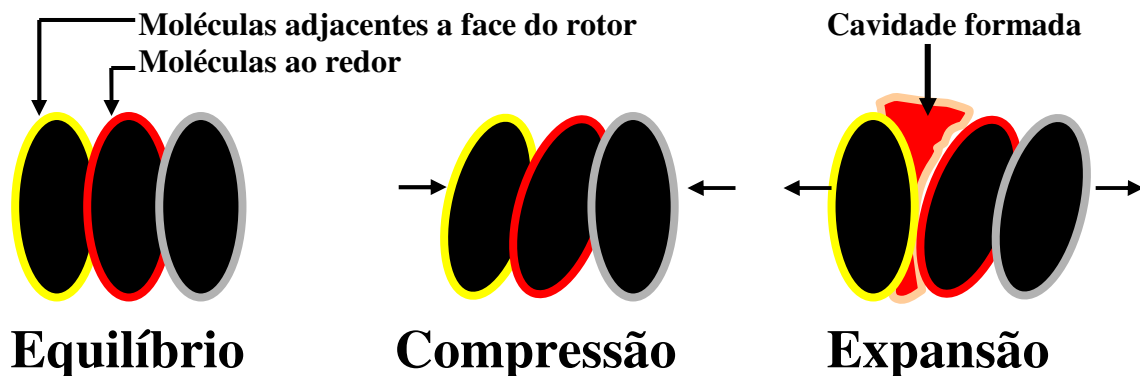


Figura 3 – Representação do comportamento das moléculas do meio de propagação, sob ação das ondas vibratórias, criando etapas de pressão positiva e negativa, até originar a cavidade.

Na prototipagem foram empregados os seguintes parâmetros construtivos: rotor de alumínio com 20 polegadas de diâmetro, eixo em aço inox com 1. ½ polegadas de diâmetro, câmara de aço inox com diâmetro de 22 polegadas, tampas laterais de alumínio com 24 polegadas de diâmetro e os mancais laterais em alumínio com 4 polegada de diâmetro. No rotor foram usinados 52 orifícios de 100 mm de profundidade..

3.2.2 Desenho esquemático do sistema completo utilizado na pesquisa

Para atingir os objetivos, o sistema foi concebido de acordo como está mostrado na figura 4. Vale ressaltar que, como não havia similares deste sistema, foi dada uma concepção original, tanto para o reator de cavitação como para os aparatos periféricos que completam o sistema.

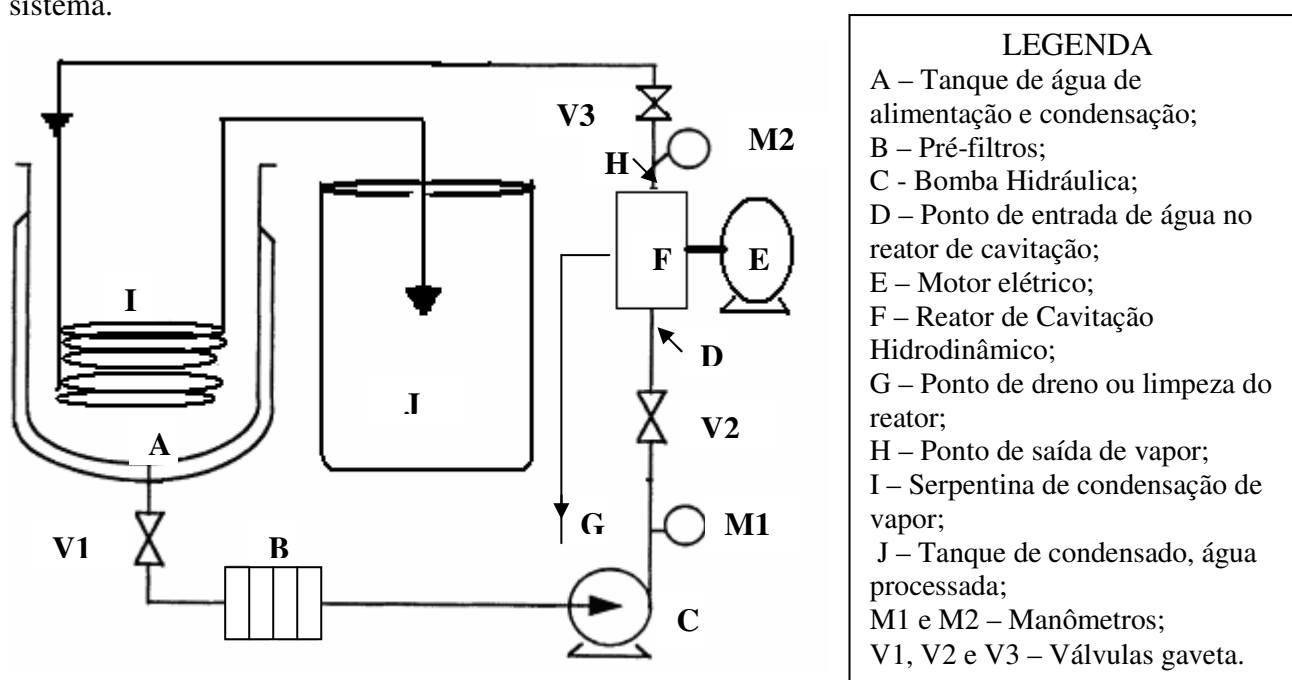


Figura 4 – Desenho esquemático do sistema completo de desinfecção por cavitação hidrodinâmica, aplicado na pesquisa.

O percurso da água a ser tratada, foi definido conforme está representado na figura 4, onde: o tanque “A” era preenchido com água de alimentação inoculada com parcelas de água residuária. Ligava-se então a bomba centrífuga “C” succionando esta água e dirigindo-a aos filtros de cartucho “B” e recalcada ao ponto “D”, porto de entrada do reator de cavitação “F”. O motor elétrico “E”, com potência de 20CV, de 2 polos marca WEG, também era ligado juntamente com a bomba hidráulica “C”. No reator de cavitação “F” a velocidade de rotação do reator de cavitação “F” atingia 3520 rpm, provocando então, a criação de ondas cavitantes na parcela de água contida dentro do ambiente interno do reator. Em alguns segundos a água, era aquecida e dirigida a porta de saída “H” (como vapor ou água quente) e seguia pela serpentina “I”, estando mergulhada na água de alimentação contida no tanque “A”. Esta condição incrementava um pré-aquecimento da água de

alimentação, elevando a eficiência térmica do processo. A água processada, era finalmente estocada no tanque “J”, de onde foram coletadas as amostras para análises. O ponto “G”, servia como um dreno nas operações de limpeza interna do reator de cavitação.

3.3. Métodos analíticos e análises

Foi estabelecido que a temperatura seria monitorada a diferentes valores de vazão, onde o potencial de desinfecção seria aferido através dos resultados das análises realizadas para cada vazão experimentada. Buscando alcançar, no protótipo, a vazão que indicasse o a obtenção da temperatura de ebulição da água a ser tratada, num menor tempo possível.

3.3.1 Aferição do desempenho a diferentes vazões

A vazão foi medida pela verificação da quantidade de água extraída do reator durante um minuto. Utilizando-se um recipiente de vidro com graduação para 1000mL. Este procedimento foi repetido por 3 vezes e observada a média de ocorrência de volume extraído de água processada.

3.3.2 Aferição do comportamento da temperatura

Para aferir a temperatura foram usados dois termômetros digitais, marca MINIPA. Seus termopares, do tipo K, foram distribuídos pelo reator. Foram realizadas séries de 10 tomadas de temperatura, cada tomada era composta de 13 leituras de temperatura, realizadas a cada 3 minutos, com informações coletadas dos três termopares posicionados. Foram observadas as temperaturas da água de alimentação, câmara externa do reator e água processada.

A cada dia eram realizadas 3 séries com intervalos de tempo, entre uma e outra, suficiente para que o protótipo retornasse à temperatura ambiente, evitando o risco de interferência na leitura posterior por calor gerado na leitura anterior. Portanto, ao final de cada avaliação de eficiência térmica realizado para o protótipo em teste, eram obtidas 130 leituras de temperaturas. Foram efetuadas 4 séries para este protótipo, denominado de protótipo “3”. O quadro 1 apresenta a disposição das séries realizadas no protótipo.

Quadro 1 – Disposição das bateladas realizadas nos protótipos construídos, do reator de cavitação.

Protótipo	Alterações avaliadas	Qtde. de séries	Qtde. tomadas de Temperatura por série	Qtde. de leituras de temperatura por tomada	Total de leituras de temperatura
3	Diferentes vazões	4	10	13	520

3.3.3. Análise físico-química e microbiológica das águas

Foi avaliada a qualidade das águas estudadas, tanto para as águas de alimentação, quanto para as águas processadas pelo protótipo, seguindo os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº. 518 (BRASIL, 2004) e de acordo com a metodologia recomendada por Eaton *et al* (1999), com exceção das análises da matéria orgânica.

As investigações laboratoriais trouxeram subsídios e contribuições para questões como o comportamento dos microrganismos e compostos físico-químicos presentes na água de alimentação e sua relação vital com o processo de cavitação experimentados no protótipo. Sendo assim, as análises físico-químicas e microbiológicas foram distribuídas, conforme o quadro 2.

Quadro 2 – Distribuição das análises físico-químicas e microbiológicas realizadas nos protótipos construídos do reator de cavitação.

Protótipo	Qtde. de análises Físico Químicas	Qtde. de análises Microbiológicas	Água analisada
3	9	48	Água de alimentação Água de inoculada Água processada

O quadro 3 apresenta o resumo dos métodos analíticos utilizados nas análises físico-química e bacteriológica. A matéria orgânica foi determinada segundo Rodier (1990).

Quadro 3 – Métodos analíticos utilizados durante os experimentos.

Análise físico-química		
Parâmetros	Métodos analíticos	Referência*
Alcalinidade total (mg CaCO ₃ /L)	Titulométrico	2320 B
Alcalinidade parcial (mg CaCO ₃ /L)		
Bicarbonato (mg HCO ₃ ⁻ /L)		
Hidróxido (mg OH ⁻ /L)		
Carbonato (mg/L CO ₃ ²⁻)		
Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	Titulométrico	2340 C
Cálcio (mg Ca ²⁺ /L)		
Magnésio (mg Mg ²⁺ /L)		
Cloreto (mg Cl ⁻ /L)	Titulométrico	4500-Cl ⁻ B
Sódio (mg Na ⁺ /L)	Absorção atômica	3111-B
Potássio (mg K ⁺ /L)		
Manganês (mg Mn ²⁺ /L)		
Ferro (mg Fe ²⁺ /L)	Absorção atômica/ Espectrofotométrico	3111-B/ 3500 Fe B
Matéria orgânica (mg O ₂ cons./L)	Perganométrico	-
Nitratos (mg N-NO ₃ ⁻ /L)	Espectrofotométrico	4500-NO ₃ ⁻ B
Nitritos (mg N-NO ₂ ⁻ /L)		4500-NO ₂ ⁻ B
Ph	Eletrométrico	4500-H ⁺ B
Sólidos totais dissolvidos (mg STD/L)	Gravimétrico	2540 C
Sólidos totais (mg STD/L)		2540 B
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	Espectrofotométrico	4500- SO ₄ ⁻ G
Condutividade elétrica (µS/cm)	Eletrométrico	2510 B
Análise bacteriológica		
Parâmetros	Métodos analíticos	
Coliformes totais e fecais	Fermentação dos tubos múltiplos	-
Bactérias heterotróficas	Contagem padrão em placa	-

*Valores de referência de Eaton *et al* (1999).

As amostras destinadas às análises físico-químicas foram coletadas em frascos de plásticos com capacidade de 1.500 mL, e as amostras para os testes bacteriológicos, em frascos esterilizados com capacidade de 100 mL. Após as coletas, as amostras eram identificadas, refrigeradas em caixa de isopor e conduzidas para os laboratórios de química e microbiologia do Nutec, e também do Labosan - Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Ceará.

3.4. Construção do protótipo

O protótipo foi construído tomando como base o princípio de formação de ondas cavitantes (vibratórias) aplicadas no meio de propagação (água de alimentação).

3.4.1. Seleção de material para usinagem do protótipo 3.

A opção de um material metálico mostrou-se como fator importante, pois, o processo envolveria altas temperaturas e pressões, além do que, teria que operar com água destinada ao consumo humano. Logo, vislumbrou-se a possibilidade da manufatura ser realizada com o aço inoxidável, mas, pelo alto custo deste material a idéia foi descartada. Optamos, porém, por um metal menos nobre, o alumínio extrusado, mas que reunia algumas características importantes: boa resistência à corrosão; boa usinabilidade; facilidade de aquisição no mercado local; e custo razoável de aquisição.

3.4.2. Produção da água inoculada

A proposta foi de experimentar uma água de alimentação que apresente elevado índice de contaminação microbiológica. Decidiu-se, então, por fazer uma inoculação de esgoto bruto nesta água de alimentação. Calculando-se a quantidade de esgoto bruto necessário para deixar a água com contaminação de coliformes, fecal e total, com média em torno de 10^4 NPM/100mL.

3.4.2.1 Preparação da água de alimentação inoculada

No dia anterior a inoculação da água de alimentação foram coletas parcelas de 500 mL de esgotos bruto, respeitando os seguintes horários: 8h, 11h, 14h e 17h. Isto para se conseguir uma homogeneização das características daquele esgoto.

Estas parcelas de esgoto urbano foram provenientes de um coletor de 700 mm da rede concessionária local, da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), que passa nas dependências do campus do Pici – UFC.

As quatro coletas intercaladas de esgoto bruto foram misturadas em um único recipiente, de modo a unificar as coletas e obter 2000mL de esgoto bruto daquele dia de coleta. Depois da última coleta, às 17h, o recipiente contendo 2000mL de esgoto bruto era acondicionado em ambiente refrigerado, no Laboratório de Saneamento Ambiental – LABOSAN, no Departamento de Engenharia Hidráulica da Universidade Federal do Ceará, para que no outro dia se fizesse a inoculação na água de alimentação a ser utilizada no protótipo 3.

De acordo com os cálculos, foram necessários 222 mL, de esgoto bruto coletados e homogêneos no dia anterior, para se obter uma água de alimentação com média de 10^4 (NPM/100 mL) de coliformes fecais e 10^5 (NPM/100 mL) de coliformes totais.

No dia seguinte foi realizada a inoculação com a adição do esgoto coletado e unificado, inseridos em 60 litros de água de alimentação, proveniente de um poço profundo, sem contaminação microbiológica.

3.4.3 Análise físico-química e microbiológica das águas experimentadas

Os ensaios realizados prosseguiram de forma contínua. Para cada ciclo de desinfecção enchia-se o tanque de água de alimentação com 60 litros de água inoculada.

A metodologia do ensaio foi a seguinte:

- Total de água de alimentação inoculada com esgoto bruto: 60 Litros;
- 1ª Coleta de água processada pelo protótipo 3, realizada após 10 minutos de funcionamento do protótipo;
- A água processada pelo protótipo, nestes 10 minutos iniciais, era descartada;
- Para a análise microbiológica da água de alimentação, inoculada com esgoto bruto, foram realizadas duas diluições.
- Após os 10 minutos iniciais de funcionamento do sistema, eram realizadas 08 coletas de água processada em intervalos de 10 minutos cada; sendo assim distribuída: uma amostra da água bruta inoculada com uma parcela de esgoto e sete amostras de água processada pelo reator.

3.4.4 Montagem do experimento para o protótipo 3

A injeção de água de alimentação no reator foi feita por uma bomba centrífuga marca Danfoss, com potência de 1/3 CV, 220V. Sua capacidade de vazão máxima era de 4000 L/h, a regulagem da vazão foi realizada por uma válvula gaveta. A pressão de trabalho ficou em média em 3Kg/cm^2 .

Antes de chegar ao reator a água de alimentação passava em duas unidades filtrantes do tipo de cartucho, um com leito de celulose e outro com leito misto, de carvão ativado e celulose. Seu uso é justificado pela necessidade de se fazer a retenção de partículas grosseiras em suspensão, presentes na água de alimentação que poderiam dificultar o processo de desinfecção.

Foi usado neste protótipo um coletor de fluido de saída. Nesta peça o vapor que era expulso do reator, juntamente com uma pequena parcela de condensado eram misturados, imediatamente após a saída do reator, na tentativa de homogeneizar a temperatura da água com o vapor. Foi preciso dotar o sistema de alguns itens usados em caldeiras, preparando-o para trabalhar com vapor. Para a extração da parcela de fluido do coletor, composta por água quente, foi utilizado um purgador de bóia. Esta peça foi essencial na remoção do condensado e frequentemente do ar e

de outros gases incondensáveis que poderiam estar presentes no sistema, sem que houvesse perdas de vapor vivo. O modelo utilizado foi de fabricação da Spirax Sarco, equipado com um sistema integral de desaeração standart, e um sistema de proteção contra vapor preso. Com esta peça foi possível deixar o vapor livre de condensados.

Para a extração da parcela de fluido processado presente no coletor, composta por vapor, foi utilizado um separador de umidade Spirax Sarco, sua função foi de drenar gotículas que poderiam vir a ser arrastadas pelo vapor. Assegurando a obtenção de um vapor seco.

Após a passagem do vapor, pelo separador de umidade, este era conduzido a uma serpentina de condensação submersa no tanque de água de alimentação. A idéia era de aproveitar o calor do vapor que percorria a serpentina e deixa-lo absorver pela água de alimentação, com isso, a água de alimentação era pré-aquecida para entrar no reator de cavitação, ao passo que, o vapor que saía do reator era condensado e retornava ao estado líquido, agora como água processada.

3.4.5 Teste de diferentes vazões

Foram testados valores de vazões de: 40 L/h, 60 L/h, 80 L/h e 100 L/h.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos durante o experimento estão mostrados a seguir.

4.1 Avaliação de desempenho do protótipo 3

4.1.1 Avaliação do desempenho térmico a partir de uma vazão de 40L/h

De acordo com os resultados apresentados pela figura 5, foi evidente a presença de vapor na saída do reator. Diferente de resultados obtidos em protótipos anteriores, quando se verificou, apenas, água aquecida a 56°C e uma tímida presença de vapor. Portanto, esse resultado já nos indicava um desempenho superior, com a nova formatação dada ao rotor deste protótipo 3, embora a obtenção da temperatura de ebulição ainda fosse atingida com mais de 20 minutos de funcionamento do equipamento.

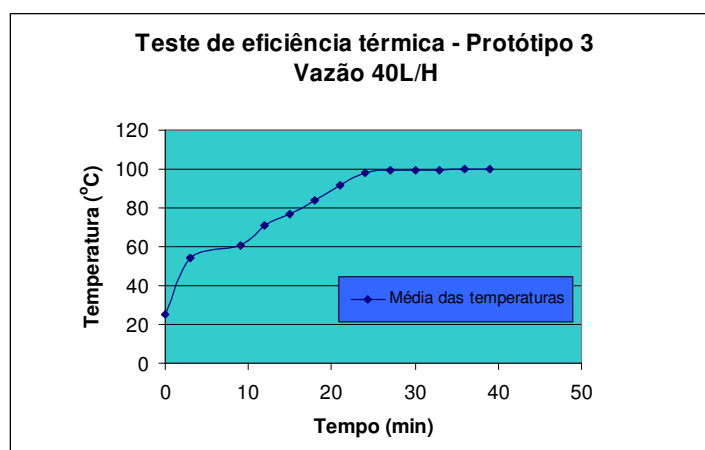


Figura 5 – Gráfico da média de resultados para tomadas de temperatura observados no protótipo 3.

4.1.2 Avaliação do desempenho térmico a partir de uma vazão de 60L/h, 80L/h e 100L/h

A vazão logo se caracterizou como um parâmetro decisivo no desempenho térmico do equipamento. Conforme mostrado na figura 6, melhores resultados térmicos foram alcançados operando-se com uma vazão de 60L/h, se comparado com os resultados da vazão de 40L/h. Ou seja, não houve queda nos valores de temperatura obtidos na saída do reator, indicando que esta vazão ainda proporcionava uma maior geração de borbulhos advindos da cavitação gerada no ambiente interno do reator. Além de atingir a temperatura de ebulição em menor tempo.

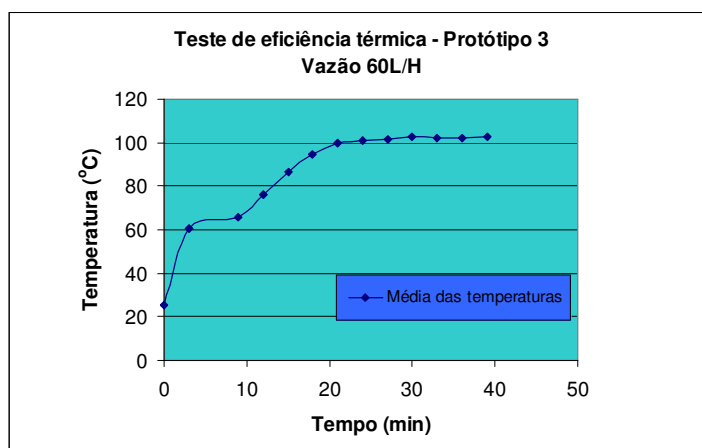


Figura 6 – Gráfico da média dos resultados das tomadas de temperatura observados no protótipo 3, para uma vazão de 60L/h.

A avaliação seguiu para outros valores de vazões: 80 L/h e 100L/h, conforme esta apresentado nas figuras 7 e 8.

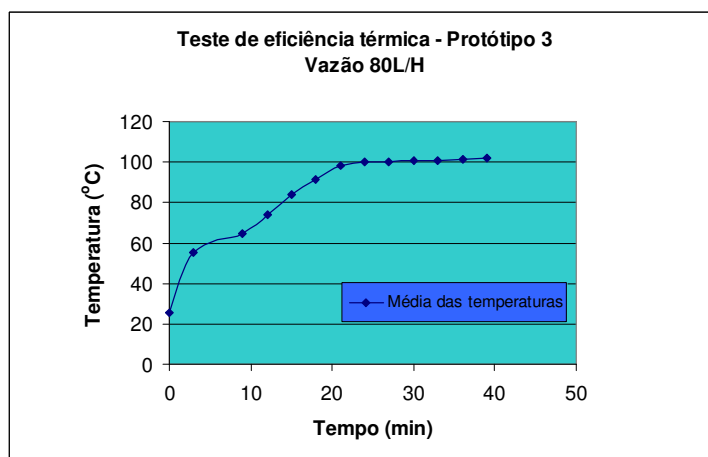


Figura 7 – Gráfico da média de resultados das tomadas de temperatura observados no protótipo 3, com vazão de 80L/h.

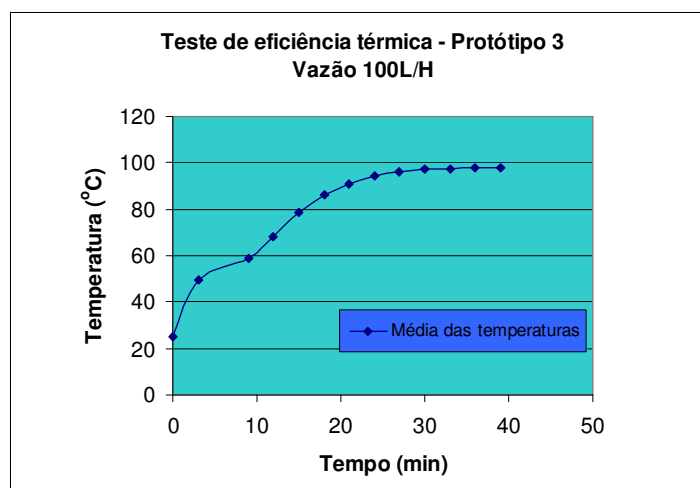


Figura 8– Gráfico da média de resultados das tomadas de temperatura observados no protótipo 3, com vazão de 100L/h.

Esta apresentada na figura 9 a plotagem dos valores de todas as vazões experimentadas no protótipo 3. É notório concluir que a vazão de 60L/h provoca uma velocidade de aquecimento bem superior ao observado nas outras vazões. A temperatura de 60° C é alcançada em menos de 3 minutos de funcionamento do equipamento. Esse fato é relevante, pois, no tempo de detenção em que a água permanece no reator, estaria esta parcela de água submetida a um ambiente desfavorável a manutenção da vida microbiana. Condição não verificada nas outras vazões testadas para o mesmo protótipo 3.

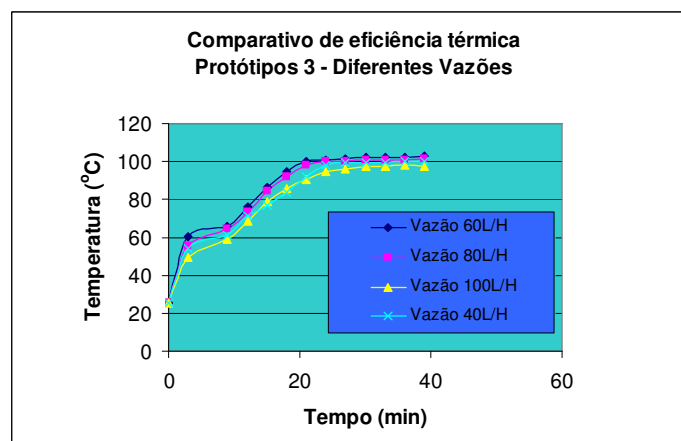


Figura 9 – Comparativo de resultados apresentados pelo protótipo 3, com diferentes vazões de alimentação.

Com este resultado foi possível imprimir aos microrganismos presentes na água uma temperatura na faixa de ebulição (100°C), logo, impondo-as uma maior condição de desnaturação de suas proteínas, inativando-as.

O protótipo 3 foi selecionado para trabalhar com vazão de 60 L/h, para dar continuidade ao atendimento do objetivo desta pesquisa. Seguindo com as avaliações das análises físico-química e microbiológica da água de alimentação e da água processada.

4.1.3. Avaliação da qualidade físico-química e microbiológica da água de alimentação e processada

Os resultados das análises físico-químicas utilizando o protótipo 3, com vazão de 60L/h, demonstraram reduções em todos os itens analisados. Ressaltando-se reduções consideráveis nos níveis de condutividade, alcalinidade parcial e total, dureza total, magnésio, carbonatos, bicarbonatos e nitratos. No quadro 4 estão dispostos os últimos resultados, ressaltando que entre os resultados anteriores a este, não houve mudanças significativas dos valores obtidos para a água de alimentação inoculada.

QUADRO 4 – Características físico-químicas da água de alimentação e água processada pelo protótipo 3.

CARACTERÍSTICAS	Água alimentação	Água alimentação Inoculada	Água Processada	Comparativo
pH à 25° C	7,91	8,07	7,15	Redução
Condutividade (micromhos / cm)	1012,0	964	860,0	Redução
Alcalinidade parcial (mgCaCO ₃ /L)	2,0	10,9	ñ detectado	-----
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ /L)	254,4	248,5	163,4	Redução
Dureza total (mgCaCO₃/L)	156,0	145,1	62,6	Redução
Matéria Orgânica (mgO ₂ cons/L)	ñ detectado	0,6	ñ detectado	-----
Nitritos (mgN-NO ₂ ⁻ /L)	0,01	0,3	0,04	Redução
Sólidos dissolvidos (mg/L)	758,0	721,0	602,0	Redução
Sólidos totais (mg/L)	842,0	834,0	796,0	Redução
Cálcio(mgCa ⁺⁺ /L)	11,4	8,4	8,4	Redução
Magnésio (mgMg ⁺⁺ /L)	31,0	30,2	10,1	Redução
Sódio (mgNa ⁺ /L)	160,0	158,0	154,0	Redução
Potássio (mgK ⁺ /L)	30,7	28,0	27,3	Redução
Ferro total (mgFe/L)	0,2	0,9	0,2	Redução
Cloretos (mgCl ⁻ /L)	157,4	157,9	153,2	Redução
Carbonatos(mgCO ₃ ⁻ /L)	2,4	13,1	ñ detectado	-----
Bicarbonatos(mgHCO ₃ ⁻ /L)	305,6	276,6	199,3	Redução
Hidróxidos(mgOH ⁻ /L)	ñ detectado	ñ detectado	ñ detectado	-----
Sulfatos(mgSO ₄ ⁻ /L)	54,2	43,9	46,5	Redução
Nitratos(mgN-NO ₃ ⁻ /L)	3,1	9,6	1,1	Redução

Análises microbiológicas também foram realizadas com o protótipo 3, operando com vazão de 60 L/h. Estão apresentados nos quadros 5, 6, 7, 8, 9 e 10 os resultados das últimas 6 análises.

Quadro 5- Resultado da 1ª análise microbiológica, realizada utilizando-se o protótipo 3.

RESUMO DE RESULTADO - Exame No.1 – 02/02/06		
Análise Microbiológica – Protótipo 3		
Parâmetros	Água Alimentação inoculada	Água Processada
Coliformes totais (NPM/100mL)	2,41x10 ⁶	<1
Coliformes fecais(NPM/100mL)	36,4x10 ⁴	<1

Quadro 6 - Resultado da 2ª análise microbiológica, realizada utilizando-se o protótipo 3.

RESUMO DE RESULTADO – Exame No.2 – 09/02/06		
Análise Microbiológica - Protótipo 3		
Parâmetros	Água Alimentação inoculada	Água Processada
Coliformes totais (NPM/100mL)	2,905x10 ⁶	<1
Coliformes fecais(NPM/100mL)	1,425x10 ⁶	<1

Quadro 7 - Resultado da 3ª análise microbiológica, realizada utilizando-se o protótipo 3.

RESUMO DE RESULTADO – Exame No.3 – 14/02/06		
Análise Microbiológica - Protótipo 3		
Parâmetros	Água Alimentação inoculada	Água Processada
Coliformes totais (NPM/100mL)	5,475x10 ⁶	<1
Coliformes fecais(NPM/100mL)	3,37x10 ⁵	<1

Quadro 8 – Resultado da 4ª análise microbiológica, realizada utilizando-se o protótipo 3.

RESUMO DE RESULTADO – Exame No.4 – 17/02/06		
Análise Microbiológica - Protótipo 3		
Parâmetros	Água Alimentação inoculada	Água Processada
Coliformes totais (NPM/100mL)	1,852x10 ⁶	<1
Coliformes fecais(NPM/100mL)	1,214x10 ⁶	<1

Quadro 9 - Resultado da 5ª análise microbiológica, realizada utilizando-se o protótipo 3.

RESUMO DE RESULTADO – Exame No.5 – 21/02/06		
Análise Microbiológica – Protótipo 3		
Parâmetros	Água Alimentação inoculada	Água Processada
Coliformes totais (NPM/100mL)	3,524x10 ⁶	<1
Coliformes fecais(NPM/100mL)	23,3x10 ⁴	<1

Quadro 10 – Resultado da 6ª análise microbiológica, realizada utilizando-se o protótipo 3.

RESUMO DE RESULTADO – Exame No.6 – 07/03/06		
Análise Microbiológica - Protótipo 3		
Parâmetros	Água Alimentação inoculada	Água Processada
Coliformes totais (NPM/100mL)	9,59x10 ⁵	<1
Coliformes fecais(NPM/100mL)	1,87x10 ⁵	<1

Observa-se nos quadros apresentados de 5 à 10 que, para os parâmetros bacteriológicos analisados, coliformes totais e coliformes fecais, as águas inoculadas se apresentavam com teores de contaminação variando de 10⁴ a 10⁶, após passarem no reator seus valores foram para <1.

Com base nos resultados obtidos para as águas estudadas, observou-se que no tratamento através da cavitação hidrodinâmica, com o uso do protótipo 3 (vazão de alimentação 60L/h), os

parâmetros microbiológicos analisados ficaram de acordo com os padrões de potabilidade exigidos na portaria 518, de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde. Comprovando o potencial de desinfecção com o uso de um reator de cavitação hidrodinâmica.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Ernst. *Friction Furnace*. Patente US 4381762, de 03 de maio de 1983.

Disponível

em:

<http://v3.espacenet.com/results?sf=n&FIRST=1&F=0&CY=ep&LG=en&DB=EPODOC&PN=US4381762&Submit=SEARCH&=&=&=&=&=>>. Acesso em: 25 de mar. 2006.

BOWMAN, Dwight D.; FOGARTY, Elizabeth A. *Pathogen Inactivation in Biosolids with cavitation*. Patente US 2002158010, de 31 de outubro de 2002. Disponível em: <http://v3.espacenet.com/textdes?DB=EPODOC&IDX=US2002158010&F=0&QPN=US2002158010>>. Acesso em: 25 de mar. 2006.

BIASOLI, Wander Mendes. *Água e saúde: o que você gostaria de saber e não teve a quem perguntar*. Fortaleza: [s.n.], 2000. 224 p., il.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 26 mar. 2004. Disponível em: <http://www.anvisa.gov.br/legis/portarias>>. Acesso em: 20 mar. 2004.

DANIEL, Luiz Antônio (Coord.). *Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável*. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 155 p.

DIMITRY, Shafran. *Heat generator for a circulating heating system*. Patente US4388915, de 21 de Junho de 1983. Disponível em: <http://v3.espacenet.com/results?sf=n&FIRST=1&F=0&CY=ep&LG=en&DB=EPODOC&PN=US4388915&Submit=SEARCH&=&=&=&=&=>>. Acesso em: 25 de mar. 2006.

DRAEMEL DEAN C (US); NAHAS NICHOLAS C (US); HO TEH C. *Cavitation enhanced liquid atomization* Patente US2003102251, de 06 de maio de 2003. Disponível em: <http://v3.espacenet.com/textdes?DB=EPODOC&IDX=US2003102251&F=0&QPN=US2003102251>>. Acesso em: 25 de mar. 2006.

EATON, A. D.; CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E. (Ed.). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20. ed. Washington: A. P. H. A.; A. W. W.A.; W. E. F., 1999. 1 CD-ROM.

F., Kopezynski John. *Vaporizers*. Patente US3242908, de 29 de março de 1966. Disponível em: <<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=US3242908&F=0>>. Acesso em: 25 de mar. 2006.

FRANCIS J., Fuchs. *Energy conversion apparatus*. Patente US4325354, de 20 Abril de 1982. Disponível em: <<http://v3.espacenet.com/results?sf=n&FIRST=1&F=0&CY=ep&LG=en&DB=EPODOC&PN=US4325354&Submit=SEARCH&=&=&=&=&=&=>>>. Acesso em: 25 de mar. 2006.

GOGATE, Parag R. et al. *Cavitation Reactors: efficiency assessment using a model reaction*. AICHE Journal, Mumbai, v. 47, no. 11, p. 2526-2538, 2001.

GONÇALVES, C. *Mecanismos de instabilidade de fluxos cavitantes*. 1997. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF., 1997.

GÖKÇEN, Mehmet R. *Device for converting energy*. Patente US4480592, de 06 de novembro de 1984, depositado dia 24 de março de 2006. Disponível em: <<http://v3.espacenet.com/textdes?DB=EPODOC&IDX=US4480592&F=0&QPN=US4480592>>. Acesso em: 30 de março de 2006.

JYOTI, K. K.; PANDIT, Aniruddha B. *Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation*. Biochemical Engineering Journal, Mumbai, v. 7, p. 201-212. 2001.

_____. *Hybrid cavitation methods for water disinfection*. Biochemical Engineering Journal, Mumbai, v. 14, p. 9-17, 2003.

_____. *Ozone and cavitation for water disinfection*. Biochemical Engineering Journal, Mumbai, v. 18, p. 9-19, 2004.

MARK L., Leclair. *Method and Apparatus for the controlled formation of cavitation bubbles*. Patente US 2003139041, de 24 de julho de 2003. Disponível em: <<http://v3.espacenet.com/textdes?DB=EPODOC&IDX=US2003139041&F=0&QPN=US2003139041>>. Acesso em: 25 de mar. 2006.

MICHAEL, Eskeli. *Compressing centrifuge*. Patente US3933007, de 20 de janeiro de 1976. Disponível em: <<http://v3.espacenet.com/results?sf=n&FIRST=1&F=0&CY=ep&LG=en&DB=EPODOC&PN=US3933007&Submit=SEARCH&=&=&=&=&=&=>>>. Acesso em: 25 de mar. 2006.

_____. *Gas compressor-expander*. Patente US3937034, de 10 de fevereiro de 1976. Disponível em: <<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=US3937034&F=0>>. Acesso em: 25 de mar. 2006.

PERKINS, Eugene W. *Liquid friction heating apparatus*. Patente US4779575, de 25 de outubro de 1988. Disponível em:

[http://v3.espacenet.com/results?sf=n&FIRST=1&F=0&CY=ep&LG=en&DB=EPODOC&PN=US4779575&Submit=SEARCH&=&=&=&="](http://v3.espacenet.com/results?sf=n&FIRST=1&F=0&CY=ep&LG=en&DB=EPODOC&PN=US4779575&Submit=SEARCH&=&=&=&=). Acesso em: 24 de mar. 2006.

PELCZAR Jr. et al. *Microbiologia: conceitos e aplicações*. 2. ed. Tradução Sueli Fumie, Tânia Ueda Nakamura, Benedito Prado Dias Filho; revisão técnica Celsu Vataru Nakamura. São Paulo: MAKRON Books, 1996. v. 1, 524 p.

RACHID, Felipe B. Freitas. *A thermodynamically consistent model for cavitating flows of compressible fluids*, International Journal of Non-Linear Mechanics, v. 38, p. 1007-1018, 2003.

RODIER, J. *Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar*. Barcelona: Omega, 1990. 1059 p.

SIVA KUMAR, Manickam; PANDIT, Aniruddha B.. *Wastewater Treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique*, Ultrasonics Sonochemistry, Chemical Engineering Section, University Department of Chemical Technology, Matunga, Mumbai 400019, India. Received 9 January 2001; received in revised form 10 September 2001; accepted 3 October 2001

SCHAEFER, Carl D. *Steam Generator*. Patente US3791349, de 29 de julho de 1973. Disponível em: <http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=US3791349&F=0>. Acesso em 24 mar. 2006.

VON SPERLING, Marcos. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto*. 2. ed. revisada. Belo Horizonte: Depto. de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG; 1996. 234 p.

WILFRED J., Grenier. *Fluid friction heater* , Patente US4277020, de 07 de Julho de 1981. Disponível em:

[http://v3.espacenet.com/results?sf=n&FIRST=1&F=0&CY=ep&LG=en&DB=EPODOC&PN=US4277020&Submit=SEARCH&=&=&=&="](http://v3.espacenet.com/results?sf=n&FIRST=1&F=0&CY=ep&LG=en&DB=EPODOC&PN=US4277020&Submit=SEARCH&=&=&=&=). Acesso em: 25 de mar. 2006.