MARCELO DEL GIUDICE ROCHA SANTOS

AVALIAÇÃO DE UM NOVO MODELO DE REATOR DE CAVITAÇÃO
HIDRODINÂMICA PARA O AQUECIMENTO CONTROLADO DE LÍQUIDOS E
PRODUÇÃO DE EMULSÕES EM ESCALA SUB-MICROMÉTRICA

São Paulo

– 2014 –

MARCELO DEL GIUDICE ROCHA SANTOS

AVALIAÇÃO DE UM NOVO MODELO DE REATOR DE CAVITAÇÃO
HIDRODINÂMICA PARA O AQUECIMENTO CONTROLADO DE LÍQUIDOS E
PRODUÇÃO DE EMULSÕES EM ESCALA SUB-MICROMÉTRICA

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para Obtenção
do Título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Engenharia Química
Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Giudici

São Paulo

– 2014 –

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 30 de Outubro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Santos, Marcelo del Giudice Rocha

Avaliação de um novo modelo de reator de cavitação hidrodinâmica para o aquecimento controlado de líquidos e produção de emulsões em escala sub-micrométrica / M.G.R. Santos. -- versão corr. -- São Paulo, 2014.

100 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Cavitação 2.Hidrodinâmica 3.Emulsificação 4.Aquecimento de líquidos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo incentivo e apoio. Especialmente aos meus pais, Milton e Heloisa, por me ensinarem o principal da vida.

Ao meu irmão André, minha cunhada, Masha, e meu sobrinho, Yan, agradeço pelos bons momentos e por terem feito parte desta trajetória.

À Cynthia pelo incentivo e carinho sempre presentes.

Aos meus avós pelo exemplo que são.

Ao meu orientador Prof. Dr. Reinaldo Giudici pelos ensinamentos e amizade.

Aos funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Química da USP pelo suporte, sem o qual não teria sido possível a conclusão deste trabalho.

Por último, à todos aqueles que direta ou indiretamente fizeram parte desta trajetória.

A mente é um fogo a ser aceso, não um vaso a preencher.

Plutarco.

RESUMO

O presente trabalho consiste na avaliação de um novo modelo de reator de cavitação hidrodinâmica pertencente à classe dos homogeneizadores de alta velocidade, comercialmente conhecidos por *High Speed Homogenizers*. É sabido que esse tipo de equipamento possui um amplo leque de aplicações industriais, sendo muitas vezes constituintes de operações unitárias para emulsificação, homogeneização, síntese química, dentre outras. Neste trabalho fez-se um estudo da eficiência deste novo modelo para duas aplicações, o aquecimento controlado de líquidos e a produção de emulsões de óleo em água com diâmetros de partículas em escala sub-micrométricas. As duas aplicações foram estudadas em uma planta piloto, de onde foi possível constatar o potencial de aplicação desse novo modelo de reator, especialmente devido ao baixo custo operacional e praticidade de operação.

Palavras-chave: Cavitação, Homogeneizador de Alta Velocidade, Aquecimento de Líquidos, Emulsificação.

ABSTRACT

This work evaluates a new model of hydrodynamic cavitation reactor, which belongs to the class of high-speed homogenizers. This type of equipment has a wide range of industrial applications and it is often constituent of unit operations for emulsification, homogenization, chemical synthesis, among others. In this master thesis a study regarding the efficiency of this new model for two applications was made: the controlled heating of fluid and the production of oil in water emulsions with particle diameters in the sub-micrometer scale. The two applications were studied in a pilot plant, where it was possible to see the potential of applying this new model of reactor, especially due to the low operating costs and practicality of operation.

Key-Words: Cavitation, High Speed Homogeneizer, Liquid Heat, Emulsification.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Diagrama de fases da água (Castellan,1986).....	12
Gráfico 2	Solução numérica da equação de Rayleigh-Plesset para raio inicial de 1mm.....	21
Gráfico 3	Solução de Rayleigh para diferentes tipos de raio.....	30
Gráfico 4	Solução de Rayleigh para diferentes pressões P_o	31
Gráfico 5	Soluções para diferentes velocidades iniciais.....	31
Gráfico 6	Exemplo de medições em tempo real da potência e corrente elétrica na operação do motor.....	42
Gráfico 7	$(\Delta T \times v)$ a 3000 RPM.....	48
Gráfico 8	$(P_u \times v)$ a 3000 RPM.....	48
Gráfico 9	$(\Delta T \times v)$ a 3100 RPM.....	49
Gráfico 10	$(P_u \times v)$ a 3100 RPM.....	49
Gráfico 11	$(\Delta T \times v)$ a 3200 RPM.....	50
Gráfico 12	$(P_u \times v)$ a 3200 RPM.....	50
Gráfico 13	$(\Delta T \times v)$ a 3250 RPM.....	51
Gráfico 14	$(P_u \times v)$ a 3250 RPM.....	51
Gráfico 15	$(\Delta T \times v)$ a 3300 RPM.....	52
Gráfico 16	$(P_u \times v)$ a 3300 RPM.....	52
Gráfico 17	$(\Delta T \times v)$ a 3400 RPM.....	53
Gráfico 18	$(P_u \times v)$ a 3400 RPM.....	53
Gráfico 19	$(\Delta T \times v)$ a 3500 RPM.....	54
Gráfico 20	$(P_u \times v)$ a 3500 RPM.....	54
Gráfico 21	Polinômio interpolador : $\Delta T = f(R, v)$	56
Gráfico 22	Plano interpolador : $P_u = g(R, v)$	57
Gráfico 23	Curva rendimento em função da rotação e da vazão.....	59
Gráfico 24	Vazão ótima em função da rotação.....	60
Gráfico 25	Regiões de Operação.....	61
Gráfico 26	Comparação entre ensaios a 2500 RPM e quantidade de surfactante	72
Gráfico 27	Efeito da rotação no tamanho médio de partícula.....	76
Gráfico 28	Parâmetro A em função da rotação.....	77
Gráfico 29	Parâmetro b em função da rotação.....	78

Gráfico 30	Transmission e Backscattering da emulsão produzida no Teste 3 (2000 RPM).....	79
Gráfico 31	Transmission e Backscattering da emulsão produzida no Teste 4 (2500 RPM)	79
Gráfico 32	Transmission e Backscattering da emulsão produzida no Teste 5 (3000 RPM)	80
Gráfico 33	Temperatura da emulsão em função do tempo (testes a 2500 e 3000 RPM).....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sistema Bifásico Bolha-Líquido.....	20
Figura 2	Cavitação formada por movimento de hélice (IPT, 2010).....	24
Figura 3	Hélice desgastada por cavitação (Brennen, 1994).....	24
Figura 4	Efeito de queda de pressão em um Venturi (Moholkar et al., 1999)....	35
Figura 5	Reator de cavitação hidrodinâmica da empresa Hydrodynamics® (hydrodynamics.com).....	36
Figura 6	Vista em corte lateral do HSH utilizado.....	37
Figura 7	HSH montado.....	38
Figura 8	Visão explodida do HSH utilizado.....	38
Figura 9	Esquema da planta de testes (V – válvulas , T – termopares, P – manômetros, LT – Displays para leitura da temperatura, HSH – reator de cavitação hidrodinâmica do tipo rotor-estator comandado pelo inversor de frequência).....	40
Figura 10	Vista lateral da planta de testes.....	41
Figura 11	Vista do reator, medidor de vazão utilizado e válvula de entrada (Ve)	41
Figura 12	Sistema e Volume de Controle Adotados.....	44
Figura 13	Fluxograma Energético.....	58
Figura 14	Esquema de processamento em reciclo.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Exemplo de organização dos dados coletados (parte do teste a 3000 RPM).....	47
Tabela 2	Balanço energético (medido e calculado) a 3500 RPM e em vazão ótima.....	60
Tabela 3	Condições operacionais ótimas.....	65
Tabela 4	Composição da emulsão estudada.....	68
Tabela 5	Características da vaselina líquida utilizada.....	68
Tabela 6	Efeito da quantidade de surfactante conforme a 2500 RPM.....	70
Tabela 7	Diâmetros médios de partículas para os testes 1 e 2.....	71
Tabela 8	Características da emulsão do teste 3 (2000 RPM).....	74
Tabela 9	Resultados do teste 3.....	74
Tabela 10	Características da emulsão do teste 4 (2500 RPM).....	74
Tabela 11	Resultados do teste 4.....	75
Tabela 12	Características da emulsão do teste 5 (3000 RPM).....	75
Tabela 13	Resultados do teste 5.....	80
Tabela 14	Estabilidade das emulsões após 48 horas do ensaio.....	80
Tabela 15	Coeficientes angulares das retas que descrevem a temperatura do tanque em função do tempo.....	83
Tabela 16	Resumo da operação de aquecimento controlado.....	87
Tabela 17	Resumo da operação de emulsificação.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Raio da cavidade
$\dot{R}$	Velocidade radial da cavidade
$\ddot{R}$	Aceleração radial da cavidade
ρ_l	Massa específica do líquido
μ_l	Viscosidade do líquido
σ_s	Tensão superficial na cavidade
P_B	Pressão interna da cavidade
P_∞	Pressão do líquido
U_{VC}	Energia interna do volume de controle
$E_{p,VC}$	Energia potencial do volume de controle
$E_{c,VC}$	Energia cinética do volume de controle
$\dot{m}_e$	Vazão mássica de entrada
H_e	Entalpia específica na entrada
$e_{p,e}$	Energia potencial específica na entrada
$e_{c,e}$	Energia cinética específica na entrada
$\dot{m}_s$	Vazão mássica na saída
H_s	Entalpia específica na saída
$e_{p,s}$	Energia potencial específica na saída
$e_{c,s}$	Energia cinética específica na saída
$\dot{Q}$	Taxa de troca de calor nas vizinhanças
$\dot{W}_s$	Taxa de trabalho
$\dot{m}$	Vazão mássica
H	Entalpia
C_p	Calor Específico a pressão constante
ΔT	Diferença de temperatura
P_u	Potência útil
P_a	Potência de aquecimento
η	Rendimento do motor
I	Amperagem
V	Voltagem
$\cos \phi$	Fator de potência

V_R	Volume do reator
B_v	Taxa de geração de energia térmica
rot	Rotação
σ	Adimensional número de cavitação
V	Velocidade do escoamento
ρ	Massa específica
p	Pressão do escoamento
p_v	Pressão de vapor
t_r	Tempo de residência
φ	Potência dissipada
τ	Tempo espacial
τ_t	Tempo espacial no tanque de processo
DP	Diâmetro de partícula
V_t	Volume do tanque
T_0	Temperatura inicial
$\dot{n}$	Fluxo molar
U	Energia interna
C_V	Calor Específico a volume constante
n	Número de mols
T_e	Temperatura de entrada
T_s	Temperatura de saída
T	Temperatura
T_{amb}	Temperatura ambiente
U	Coeficiente global de transferência de calor
A	Área de troca de calor
t_c	Tempo para colapso da cavidade

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO.....	15
1	OBJETIVOS.....	18
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	CAVITAÇÃO.....	19
2.2	EFEITOS MACROSCÓPICOS.....	23
2.3	EFEITOS QUÍMICOS.....	25
2.4	DINÂMICA DE BOLHAS.....	27
2.5	A CAVITAÇÃO COMO OPERAÇÃO UNITÁRIA.....	32
2.6	REATORES DE CAVITAÇÃO.....	34
3.	EQUIPAMENTO.....	37
3.1	NOVO MODELO DE HSH.....	37
3.2	PLANTA DE TESTES.....	39
4.	ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO REATOR DE CAVITAÇÃO...43	
4.1	RESULTADOS.....	47
4.2	DISCUSSÃO E UTILIZAÇÃO DE RESULTADOS.....	58
<u>4.2.1</u>	<u>Otimização da Operação de Aquecimento Controlado.....</u>	<u>59</u>
<u>4.2.2</u>	<u>Fenômeno da Cavitação e Variáveis Operacionais.....</u>	<u>64</u>
<u>4.2.3</u>	<u>Capacidade e Custo Operacional.....</u>	<u>65</u>
5.	ESTUDO DE EMULSIFICAÇÃO USANDO O REATOR DE CAVITAÇÃO....66	
5.1	MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
<u>5.2.1</u>	<u>Efeito da Quantidade de Surfactante.....</u>	<u>73</u>
<u>5.2.2</u>	<u>Efeito da Rotação.....</u>	<u>79</u>
<u>5.2.3</u>	<u>Estudo da Estabilidade das Emulsões.....</u>	<u>79</u>
<u>5.2.4</u>	<u>Comportamento da Temperatura.....</u>	<u>81</u>
<u>5.2.5</u>	<u>Capacidade Produtiva e Custo Operacional.....</u>	<u>84</u>
6.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	85
	REFERÊNCIAS.....	88
	APÊNDICE I - Balanço Energético de Operação em Reciclo.....	95
	APÊNDICE II - Algoritmo para Simulação das Operações no Reator.....	99

INTRODUÇÃO

A cavitação consiste em um fenômeno fluidodinâmico há muito observado e refere-se à presença e atividade de bolhas (cavidades) gasosas em um meio líquido, compreendendo as etapas de nucleação, oscilação e colapso (Young, 1999). A primeira observação documentada da cavitação foi feita por Newton em 1704 em seu tratado *Optiks* (Newton, 1704). Posteriormente, Reynolds, em 1894, postulou a primeira análise fenomenológica (Rayleigh, 1917). Apesar de ter sido observada e documentada há mais de três séculos, a cavitação ainda é alvo de muitas discussões e estudos, especialmente no que diz respeito a seu potencial de aplicações à indústria química.

Durante anos o interesse da engenharia acerca do tema esteve intimamente ligado ao dano causado a equipamentos e partes hidráulicas que, quando submetidos continuamente ao fenômeno, acabavam por sofrer intenso desgaste – erosão por cavitação (Franc e Michel, 2004). Desta forma, consolidou-se um entendimento voltado a eliminar sua ocorrência. Diversos trabalhos no campo da Engenharia dos Materiais também foram e vem sendo conduzidos com vistas a desenvolver compostos, especialmente ligas metálicas, que apresentem maior resistência à ação da cavitação. Um exemplo onde a cavitação representa uma preocupação contínua é nas turbinas das usinas hidroelétricas (Escaler *et al.*, 2002).

Com a necessidade de se reproduzir os efeitos da cavitação hidrodinâmica em laboratórios, a comunidade acadêmica passou a tratar com o devido rigor científico os efeitos físico-químicos que precediam o indesejável desgaste de componentes metálicos. A partir de então, a cavitação emerge como um campo rico para pesquisadores, notadamente àqueles envolvidos no campo dos fenômenos de transporte, termodinâmica e demais áreas das engenharias, especialmente na Engenharia Química.

Com essa nova abordagem, a cavitação começa, também, a ser estudada como um fenômeno de interesse industrial, dado que, devido às condições físico-químicas extremas relacionadas a ela, diversos processos podem ser beneficiados e (ou) incitados (Moholkar *et al.*, 1999). Vale mencionar especialmente processos ligados à emulsificação, aeração, síntese, mistura e, ainda, no tratamento de

efluentes, onde a cavitação pode ser categorizada como um Processo Oxidativo Avançado – POA (Pandoley *et al.*, 2012; Suri *et al.*, 1999).

É interessante constar o fato de que as pesquisas acerca do tema têm se intensificado nos últimos dez anos, sendo conduzidas especialmente por pesquisadores americanos, indianos e do Leste-Europeu. Sabe-se, inclusive, do interesse militar na cavitação, especialmente no desenvolvimento de torpedos. Um número de trabalhos também pode ser encontrado tratando a cavitação como método para a produção de biodiesel e beneficiamento de óleos combustíveis. Apesar do grande leque de aplicações que a comunidade científica vem apontando, até o momento, poucos são os trabalhos brasileiros acerca da aplicabilidade desse fenômeno (Santos *et al.*, 2009).

No que se refere à geração da cavitação, tanto em escala laboratorial como industrial, existe uma diversidade considerável de equipamentos dedicados a esta função. Entretanto, os desafios encontrados são grandes, especialmente no que diz respeito à eficiência energética de tais equipamentos. Tendo como elemento central desta dissertação o estudo da cavitação como fenômeno de interesse industrial, este trabalho trata exclusivamente da chamada cavitação hidrodinâmica, por ser este o tipo de cavitação que indica possuir maiores chances para aplicações industriais de larga escala (Gogate *et al.*, 2001).

O estudo da cavitação hidrodinâmica e suas aplicações foi feito em um novo modelo de reator especialmente desenvolvido para incitar o fenômeno, do tipo conhecido no meio industrial pelo termo *High Speed Homogeneizer* (Gogate e Aniruddha, 2011). O trabalho foi estruturado de modo a avaliar duas aplicações diretas do equipamento, sendo estas; o aquecimento controlado de líquidos e a produção de emulsões de óleo em água com tamanho de gotas em escala sub-micrométrica.

Para o aquecimento controlado de líquidos foi realizado um balanço energético de uma operação em batelada, medindo-se as potências envolvidas e o aquecimento observado, de onde foi possível a criação de um modelo matemático do processo de aquecimento e, também, a definição das condições operacionais ótimas para essa aplicação.

Quanto à produção de emulsões foram realizados testes em batelada com a coleta de amostras ao longo do tempo de processo para análise de tamanho de gotas e estabilidade das emulsões produzidas. Os efeitos das variáveis operacionais

na qualidade da emulsão, como rotação e quantidade de tensoativo, também foram avaliados. Ao término foi possível definir a capacidade do equipamento, o custo operacional associado e a compreensão da qualidade das emulsões produzidas em função das variáveis de operação do processo.

Durante o estudo das duas aplicações optou-se por manter um enfoque de modelagem para uma melhor compreensão dos processos. Os resultados dos testes foram, sempre que possível, correlacionados com as variáveis operacionais, notadamente vazão e rotação para o estudo do aquecimento de líquidos e rotação e quantidade de tensoativo para o processo de emulsificação. Essas correlações permitiram estabelecer equações características do equipamento que são úteis para a previsão dos resultados em função dessas variáveis operacionais e com um adequado grau de assertividade.

Importante constar o caráter prático e investigativo ao longo deste trabalho, onde o reator foi avaliado pela primeira vez quanto ao seu potencial de aplicações. Esse foi o enfoque durante a escolha, preparação e execução dos ensaios, permitindo concluir acerca da eficiência do mesmo enquanto equipamento industrial.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo estudar um novo modelo de reator de cavitação hidrodinâmica, do tipo *High Speed Homogeneizer*, avaliando a sua eficiência para o aquecimento controlado de líquidos e para a produção de emulsões.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Constituem objetivos específicos deste trabalho:

- Realização de um balanço energético no equipamento com o intuito quantificar o seu rendimento para o aquecimento controlado de líquidos. Avaliação do custo operacional para o aquecimento de água.
- Avaliar a eficácia do reator para a produção de emulsões de óleo (vaselina líquida) em água na proporção de 12 % O/A. Quantificação do custo operacional do processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CAVITAÇÃO

A literatura apresenta diferentes formas de relatar o fenômeno mas, em geral, todas coincidem em explicá-lo como sendo a nucleação de bolhas em um líquido quando a pressão estática local é reduzida a valores abaixo da pressão de vapor (Brennen, 1995). Aqui cabe uma distinção importante da cavitação e da ebulição, desenvolvida a partir de um diagrama de fases da água, ilustrado no Gráfico 1.

Gráfico 1. Diagrama de fases da água (Castellan, 1986)

No diagrama da Figura 1 constam dois caminhos termodinâmicos distintos $A \rightarrow B$, e $A \rightarrow C$, cavitação e ebulição, respectivamente. O caminho ($A \rightarrow C$) é isobárico, onde a água passa ao estado vapor somente por elevação da temperatura. Diferentemente, no caminho ($A \rightarrow B$), isotérmico, a formação da fase vapor ocorre devido a uma redução da pressão para níveis abaixo da linha de saturação. Naturalmente, a bolha formada deverá conter o vapor gerado e, também, certa quantidade do gás que anteriormente encontrava-se dissolvido no meio líquido.

Essa distinção representa a noção primordial acerca do fenômeno. Diversas técnicas e equipamentos foram desenvolvidos nos últimos anos para a produção deste efeito de redução da pressão do líquido abaixo da curva de saturação, variando desde o uso de dispositivos restritivos que reduzam a pressão do escoamento (p. ex. injetores tipo Venturi), até ao uso de sofisticados indutores de ultrassom (Suslick, 1989). Uma vez formadas as bolhas, estas e o líquido envolvente constituem assim um sistema bifásico, onde a pressão interna contrapõe-se à pressão externa e à atuação da tensão superficial na interface, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1. Sistema bifásico bolha-líquido

A modelagem desse sistema ainda representa um desafio a pesquisadores, tornando-se um segmento específico dos fenômenos de transportes conhecido por dinâmica de bolhas. Atualmente, o modelo mais aceito para a previsão do comportamento desse sistema é aquele conhecido por modelo de Rayleigh-Plesset (Plesset e Prosperetti, 1977) o qual, em sua forma mais genérica, é expresso pela seguinte equação diferencial de segunda ordem (Equação 1).

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{4\mu_l}{\rho_l R}\dot{R} + \frac{2\sigma_s}{\rho_l R} = \frac{[P_B(t) - P_\infty(t)]}{\rho_l} \quad (1)$$

Adotando-se algumas hipóteses e condições iniciais, essa equação diferencial pode ser resolvida através de métodos numéricos implícitos. A observação mais

direta da solução é o comportamento oscilatório da bolha ao longo do tempo, conforme apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2. Solução numérica da equação de Rayleigh-Plesset para raio inicial de 1mm

Ou seja, durante a existência da bolha, tipicamente ocorre uma sequência alternada de etapas de compressão e expansão, as quais são características de cada sistema, dependendo de fatores como viscosidade, pressão, temperatura, tensão superficial, dentre outros. Esse comportamento oscilatório tem caráter tipicamente adiabático durante a compressão e isotérmico durante a expansão, de modo que o trabalho líquido gerado pelas bolhas pode ser expresso pela quantificação do trabalho referente a cada uma dessas fases (Flynn, 1964). Esses modelos são importantes uma vez que justificam os efeitos macroscópicos observados e auxiliam no desenvolvimento de aplicações baseadas na cavitação.

Em linhas gerais, tanto a previsão do fenômeno através desses modelos, como a observação prática do mesmo, revelam sua intensidade. Estudos e experimentos indicam a ocorrência de temperaturas da ordem de milhares de Kelvins e pressões da ordem de centenas de atmosferas quando do colapso dessas bolhas (Flannigan *et al.*, 2006). Sob determinadas condições o colapso da bolha pode resultar na emissão de um "flash" de luz (Gaitan *et al.*, 1992). Tal observação resultou em um número de teorias, tendo sido, inclusive, cunhado o termo sonoluminescência para referenciar tal fenômeno. Algumas teorias buscam

relacionar o "flash" observado à formação de plasma (Moss et al. 1997). Outras, relacionam a luz à termólise de moléculas de água aprisionadas na bolha.

Quanto à incitação do fenômeno, existem quatro formas definidas pela literatura (Young, 1999). São elas:

- **Cavitação Hidrodinâmica:** Nesta forma, a cavitação ocorre por redução da pressão estática em decorrência das condições do escoamento ou por interferências externas. É comumente observada em constrições ao longo do escoamento e em corpos imersos no líquido que se movimentam rapidamente, como é o caso das hélices de barcos e turbinas.
- **Cavitação Acústica:** A cavitação acústica é produzida mediante a propagação no líquido de ondas de som de determinadas frequências e amplitudes. Ao se dispersarem, ocorrerá uma variação da pressão do meio em função das características da onda, podendo resultar na nucleação, oscilação e colapso de bolhas.
- **Cavitação Ótica:** Aqui, fótons de elevadas intensidades rompem a continuidade do meio líquido resultando na formação de microbolhas.
- **Cavitação de Partícula:** Produzida por partículas elementares de elevada intensidade capazes de desencadear a formação da fase vapor no líquido.

Das formas de cavitação apresentadas, a cavitação hidrodinâmica e acústica são as mais bem documentadas e estudadas. Também, esses métodos de cavitação são os que encontram um maior número de aplicações industriais, tanto pela escala da cavitação produzida, quanto pela viabilidade energética e econômica dos mesmos.

2.2 EFEITOS MACROSCÓPICOS

A cavitação, quando tratada macroscopicamente, apresenta um conjunto de efeitos de fácil constatação. Talvez o mais direto deles seja o intenso ruído resultante da implosão das cavidades, o qual tipicamente é produzido em uma faixa de frequências entre 100 Hz e 100 kHz. Também, em função da implosão das bolhas, ocorre a propagação de ondas de choque de elevadas pressões, a formação de micro jatos e a dissipação de energia térmica, consequentemente resultando em alterações locais de pressão e temperatura (Ozonek, 2012).

Outra característica relevante é a geração de turbulência, campos de tensões e forças de cisalhamento, as quais acabam por interferir no escoamento. Como importante exemplo macroscópico tem-se a intensificação do contato entre eventuais fases imiscíveis presentes no líquido, o que pode ser interessante à processos de emulsificação (Tang e Sivakumar, 2013).

Uma vez que a cavitação consiste na formação da fase vapor por súbito abaixamento da pressão, essa nova fase pode também ser observada escoando juntamente com a fase líquida.

Conforme mencionado na introdução deste trabalho, a cavitação foi originalmente estudada em razão dos danos causados à equipamentos e tubulações. Desta forma, o desgaste metálico consiste, também, uma observação macroscópica e, apesar de indesejável, serve para ilustrar a intensidade do fenômeno. A imagem na Figura 2 mostra a cavitação sendo gerada pela movimentação de uma hélice.

Figura 2. Cavitação formada por movimento de hélice (IPT, 2014)

Como resultado da exposição da peça à cavitação ocorre o desgaste da mesma, conforme visto na Figura 3.

Figura 3. Hélice desgastada por cavitação (Brennen, 1994)

Os efeitos macroscópicos da cavitação, quando devidamente controlados, podem ser úteis a um número de aplicações importantes conforme será apresentado posteriormente em maiores detalhes. Fundamentalmente, a sua utilização pode ser tratada como uma operação unitária, sendo um exemplo de aplicação direta à emulsificação e à mistura de componentes (Promtov, 2009).

A quantificação desses efeitos macroscópicos é objeto de diferentes estudos, encontrando especial destaque na avaliação e projeto de reatores baseados na cavitação. Um exemplo clássico consiste na mensuração da intensidade da cavitação via balanço térmico (calorimetria), os quais permitem, também, quantificar a eficiência energética do equipamento (Gogate *et al.*, 2006).

2.3 EFEITOS QUÍMICOS

Em razão das condições extremas da cavitação, esta pode dar origem a relevantes efeitos químicos. Esses são bem documentados na literatura, principalmente no que diz respeito à cavitação acústica. Apesar de terem a mesma origem física, os efeitos químicos observados durante a cavitação hidrodinâmica não são tão bem conhecidos e explicados, sendo a bibliografia de referência ainda muito recente e investigativa.

Conforme indicam os modelos físicos propostos para o fenômeno da cavitação, a origem desses efeitos advém das condições extremas de temperatura e pressão presentes no interior da bolha (Suslick *et al.*, 1997), principalmente durante a etapa de colapso da mesma. Em resumo, esses modelos propõem que as bolhas, uma vez nucleadas, deverão oscilar de acordo com a variação da pressão do meio líquido envolvente e do comportamento termodinâmico do gás aprisionado. Dentre os efeitos dessa oscilação, vale observar que, durante a fase de expansão da bolha, quando a pressão na interface gás-líquido cai abaixo da linha de saturação, certa quantidade de vapor será formada e deverá se difundir para o interior da bolha. Diferentemente, durante a fase de compressão, o vapor aprisionado irá tender a se condensar na interface gás-líquido. A situação muda, porém, no momento de colapso da cavidade, onde as elevadas velocidades radiais (próximas às da velocidade do som no meio), não possibilitam tempo suficiente para que o vapor aprisionado condense e passe à fase líquida. Esse vapor aprisionado é então submetido às condições extremas da bolha durante a implosão, onde temperatura e pressão podem atingir valores muito elevados. Sob tais condições, essa quantidade de vapor deverá se decompor via termólise, dando origem a radicais e íons importantes, notadamente $\text{OH}^\bullet$, $\text{H}^\bullet$, $\text{HOO}^\bullet$ (Suslick *et al.*, 1997). A seguir tem-se um

exemplo de um mecanismo de reação conhecido no estudo da cavitação (Masson, et al., 1998).

Em razão do exposto, as bolhas produzidas pela cavitação podem ser tratadas como micro-reatores químicos (Lohse, 2002). Nessa abordagem, cada bolha ao sofrer o processo de oscilação e colapso, possibilita a ativação de um mecanismo de reações, o qual depende do tipo de gás presente no interior da bolha e, também, das condições termodinâmicas possíveis de serem atingidas. Ao término do processo, os produtos dessas reações são dissolvidos no meio líquido, dando origem a mecanismos secundários, desta vez com as moléculas do líquido envolvente (Ozonek, 2012).

Uma informação importante é que as reações previstas pelos modelos e os produtos obtidos em experimentos são normalmente coincidentes, indicando a validade dos mesmos. As aplicações dos efeitos químicos da cavitação são inúmeras, existindo uma literatura razoável acerca do tema, principalmente enfatizando o fenômeno como rota para a produção do radical hidroxila e, também, peróxido de hidrogênio (Suslick, 1997), conforme pode ser constatado no mecanismo anteriormente apresentado. A produção destes radicais justifica, inclusive, a categorização da cavitação como uma maneira de promover um processo oxidativo avançado-POA (Anand *et al.*, 2008).

Uma vez que os mecanismos propostos baseiam-se na termólise da água, é de se esperar que as temperaturas atingidas no interior da bolha sejam suficientes para tanto, o que é constatado tanto via modelos de dinâmica de bolhas quanto através de medições laboratoriais. A determinação dessas temperaturas representa até hoje um desafio considerável. Em termos experimentais, vale ressaltar o trabalho de Suslick e Flannigan (2008), o qual realizou medições do "flash" de luz observado

ao término das implosões, registrando, assim, temperaturas da ordem de 20.000K (Yasui, 1997). Essas medições são importantes, pois não só justificam os efeitos físicos e os agentes químicos que aparecem ao término de um processo de cavitação como, também, mostram o potencial de aplicação do fenômeno em larga escala.

2.4 DINÂMICA DE BOLHAS

Dada a importância e a magnitude dos efeitos macroscópicos e químicos relacionados à cavitação, diversos modelos matemáticos foram e vem sendo propostos com o intuito de mensurar o comportamento dinâmico das cavidades e, conseqüentemente, os valores de temperatura e pressão que podem ser alcançados. Esse campo de estudos pertence à esfera dos fenômenos de transportes e é usualmente conhecido pelo termo Dinâmica de Bolhas.

Em função da complexidade de uma análise envolvendo múltiplas bolhas cavitantes, a maior parte dos modelos procura tratar o problema de uma única cavidade oscilando sob determinadas condições (Neppiras, 1979). Em linhas gerais, esses modelos partem das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, além das condições iniciais e de contorno pertinentes ao problema. As equações fundamentais, em coordenadas esféricas, são apresentadas a seguir.

$$\text{Continuidade: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho u_r) + \frac{2\rho u_r}{r} = 0 \quad (2)$$

$$\text{Quantidade de Movimento: } \rho_l \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} \right] = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r^2 u) \right] \quad (3)$$

$$\text{Energia: } \rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial r} \right) = -P \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2u}{r} \right) + \frac{4\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right)^2 + K_L \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho q \quad (4)$$

A resolução dessas equações mostra claramente que, uma vez nucleadas, as cavidades em um meio líquido deverão oscilar em função das condições externas do meio e do comportamento termodinâmico do gás aprisionado, podendo manter essa

oscilação por um longo período de tempo ou colapsar após alguns poucos ciclos. O modelo mais comumente utilizado é o de Rayleigh-Plesset (Leighton, 1994), o qual serve também de base à outros mais sofisticados. Tipicamente, esses descrevem o raio da bolha em função do tempo através de uma equação diferencial de segunda ordem não homogênea, conforme anteriormente apresentado na Equação 1.

Analisando os modelos mais reconhecidos, percebe-se que é na escolha do comportamento termodinâmico do gás e no rigor adotado acerca do transporte de massa e energia na interface da bolha que os modelos diferem mais significativamente. Alguns tratam a bolha como sendo um sistema isolado, desconsiderando qualquer tipo de transporte de massa ou calor entre o gás e o meio (Theofanous, 1969). Essa suposição, apesar de forte, simplifica muito a resolução do problema e pode fornecer resultados consistentes para determinados casos, principalmente para aqueles onde o espaço de tempo analisado é suficientemente pequeno. São úteis, por exemplo, para a avaliação dos efeitos durante um ciclo acústico na cavitação gerada por ultrassom. Modelos mais complexos acoplam à equação da quantidade de movimento supramencionada as equações de transporte de massa e energia, resultando em complexos sistemas de equações diferenciais (Sochard et al, 1996). Paralelamente ao tratamento numérico necessário à resolução das equações de conservação, deve-se considerar a produção e o consumo de espécies químicas no interior da bolha de acordo com o mecanismo de reações adotado, o que representa outro complicador ao problema. As moléculas e íons produzidos passam então a influenciar na difusão mássica e, também, na temperatura do gás aprisionado, uma vez que cada reação prevista pelo mecanismo possui um caráter termodinâmico próprio (Krishnan et al., 2006).

Outra característica que merece destaque acerca desses modelos é a rigidez dos sistemas de equações diferenciais utilizados, o que é de se esperar uma vez que as bolhas muitas vezes sofrem bruscas variações de tamanho, pressão e temperatura em curtos espaços de tempo. Desta forma, faz-se necessária a utilização de métodos numéricos mais robustos para a resolução desse tipo de problema.

Para ilustrar a resolução de um problema de dinâmica de bolhas será apresentado a seguir o mais simples desses sistemas, aquele que simula o comportamento de uma cavidade vazia presente em um meio líquido

suficientemente grande, de pressão constante e com a desconsideração dos efeitos de viscosidade e tensão superficial no movimento da bolha. Essa situação é descrita pela Equação 5, conhecida por Equação de Rayleigh (Leighton,1994)

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = -\frac{P_0}{\rho_l} \quad (5)$$

Onde R , $\dot{R}$ e $\ddot{R}$ representam o raio da bolha, a velocidade radial e a aceleração radial, respectivamente. P_0 é a pressão externa exercida pelo líquido envolvente e ρ_l é a massa específica do líquido.

Para a resolução deste e de muitos outros problemas de dinâmica de bolhas é comum a adoção de variáveis de estado para a posterior obtenção de um sistema de equações diferenciais que será resolvido.

Escolhendo as variáveis de estado como na Equação 6.

$$x_1 = R, x_2 = \dot{R} \quad (6)$$

Sendo o sistema de equações diferenciais associado.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{-1}{x_1} \left[\frac{P_0}{\rho_l} + \frac{3}{2}(x_2)^2 \right] \end{cases} \quad (7)$$

Faz-se também necessária a colocação das condições iniciais do problema, respectivamente raio e velocidade iniciais, Equações 8 e 9.

$$x_1(0) = R_0 \quad (8)$$

$$x_2(0) = \dot{R}_0 \quad (9)$$

Uma vez que o sistema encontra-se plenamente descrito, sua resolução pode ser obtida mediante o uso de técnicas numéricas de integração. Os exemplos a seguir foram obtidos utilizando-se métodos do tipo Runge-Kutta implícitos de 4º ordem. É importante mencionar que essas simulações possuem uma finalidade mais

didática, uma vez que parâmetros importantes como a esfericidade imperfeita da cavidade e os efeitos decorrentes de elevadas velocidades não foram considerados.

Os diferentes resultados que podem ser obtidos a partir da resolução do sistema de equações diferenciais decorrem unicamente dos valores adotados de pressão, P_0 , massa específica, ρ_l , que são variáveis características do meio líquido, e das condições iniciais do problema, as quais são características da cavidade em estudo. Equações 8 e 9.

Tratando inicialmente as características do meio líquido, tem-se o exemplo a seguir, referente ao comportamento de uma cavidade de raio de 2mm sob diferentes pressões. Considerando água pura, $\rho_l = 997 \text{ Kg/m}^3$.

De modo a ilustrar o efeito do tamanho inicial da bolha, as seguintes simulações foram feitas, admitindo-se $P_0 = 1 \text{ atm}$ e $\rho_l = 997 \text{ Kg/m}^3$.

Gráfico 3. Solução de Rayleigh para diferentes tipos de raio

A observação direta do gráfico na Gráfico 3 mostra como o tempo para colapso da cavidade (t_c) aumenta com o tamanho da cavidade.

Outra simulação importante da equação de Rayleigh, Equação 5, consiste em estudar o comportamento da cavidade sob o efeito de diferentes pressões P_0 . Neste exemplo utilizou-se uma cavidade de raio inicial igual a 1 mm e $\rho_l = 997 \text{ Kg/m}^3$ e variou-se a pressão P_0 entre 0,5 e 2 atm, obtendo-se os resultados mostrados no Gráfico 4

Gráfico 4. Solução de Rayleigh para diferentes pressões P_0

Como esperado, pressões maiores reduzem o tempo para colapso da cavidade. Analisando o Gráfico 4 acima constatamos que quanto maior é a pressão do líquido, P_0 , mais rígido o sistema se torna, necessitando de adaptações nas técnicas de resolução.

Outra simulação importante é supor que a bolha possui uma velocidade inicial não nula, ou seja, está expandindo em $t=0$. O Gráfico 5 ilustra os resultados.

Gráfico 5. Soluções para diferentes velocidades iniciais

Os modelos de dinâmica de bolhas são úteis não só na previsão dos efeitos químicos da cavitação como, também, no projeto de reatores baseados no fenômeno (Sharma *et al.*, 2008). Mediante a resolução desses modelos torna-se possível quantificar a variação do campo de pressões do líquido ao longo do percurso dentro do reator, permitindo com que o comportamento das cavidades e os efeitos termodinâmicos e químicos associados sejam mensurados.

2.5 A CAVITAÇÃO COMO OPERAÇÃO UNITÁRIA

Uma vez que o fenômeno da cavitação implica em efeitos importantes no meio líquido este pode ser colocado como elemento de operações unitárias, encontrando assim diversas aplicações à indústria.

A primeira e talvez mais importante aplicação da cavitação consiste na emulsificação de dois líquidos imiscíveis, como óleo e água. Com a formação e a implosão de cavidades no líquido que constitui a fase dispersa tem-se a fragmentação deste em pequenas gotas que são forçadas à fase contínua, criando assim uma emulsão fina e estável. Comercialmente é possível encontrar um número de aparelhos de cavitação ultrassônica específicos para a formação dessas emulsões (Crawford,1955). Esse tipo de operação é empregada em indústrias alimentícias, de tintas, de cosméticos e de fármacos. Uma desvantagem da utilização da cavitação ultrassônica para a produção de emulsões em escala industrial refere-se ao custo operacional, já que há um consumo relativo alto de energia elétrica no processo. Como será apresentado ao longo deste trabalho, uma alternativa é a utilização de reatores de cavitação hidrodinâmica, os quais permitem a produção de emulsões com um menor consumo energético.

Uma segunda aplicação da cavitação, principalmente da ultrassônica, é em sistemas de limpeza. Nesse tipo de operação, as peças a serem limpas são imersas em tanques contendo solventes como tricloroetileno ou ciclohexano cuja escolha deve-se pela intensidade do fenômeno da cavitação e pela ação de limpeza desses compostos orgânicos. Quando o tanque é submetido à ação de ultrassom, tipicamente na faixa de 40 Hz, diminutas bolhas são formadas, principalmente nas entranhas e ranhuras das peças. A vibração e colapso dessas bolhas permite uma limpeza eficiente das peças (Carlin,1964).

Processos de desgaseificação de líquidos podem ser acelerados mediante a utilização controlada da cavitação devido à combinação dos efeitos de difusão retificada, campos de pressão oscilantes e coalescência de bolhas (Kapustina,1973).

Na indústria alimentícia diversas são as aplicações, como na formação de espuma para bebidas, homogeneização e pasteurização (Brown e Goodman,1965). Especificamente tratando-se da homogeneização e pasteurização do leite, estudos

indicam que a cavitação hidrodinâmica permite a fragmentação da fase dispersa (moléculas de gordura) abaixo de 1 μm , permitindo obter um produto final com a consistência apropriada e em um custo operacional competitivo com os métodos tradicionais. Estudos também comprovaram a eficácia do método para a esterilização de bebidas e alimentos líquidos, onde as intensas forças destrutivas da cavitação permitiram a inativação de células de bactérias (Milly et al., 2007).

Na indústria química cabe mencionar a utilização do fenômeno da cavitação para a hidrólise de óleos vegetais onde reatores em "loop" podem ser utilizados, permitindo um controle preciso do processo e dos produtos (Pandit et al., 1993). Outra aplicação notável é na produção de biodiesel, onde estudos indicam que a cavitação permite operar de forma mais simples, eficiente, econômica e ambientalmente correta (Pal et al., 2010).

A cavitação tem ganhado espaço como processo para o tratamento de efluentes (Dalfré et al., 2010) e, muitas vezes, tendo sido classificada como um processo oxidativo avançado. Poluentes orgânicos persistentes como naftaleno, acenaftileno e fenantreno foram satisfatoriamente degradados com o uso da cavitação (Psillakis et al., 2004). Outra aplicação ambiental da cavitação é para o tratamento da água de lastro de navios onde se deseja eliminar microrganismos marítimos que são bombeados para os compartimentos (Kato, 2003).

2.6 REATORES DE CAVITAÇÃO

Existe na literatura uma ampla referência a diferentes projetos de equipamentos dedicados para a geração da cavitação. Tais equipamentos diferem principalmente pela forma como a cavitação é incitada no líquido sendo que, majoritariamente, podem ser distinguidos entre reatores de cavitação acústica e reatores de cavitação hidrodinâmica (Gogate, 2008).

Reatores de cavitação acústica trabalham mediante a utilização de indutores de ultrassom inseridos no interior do líquido que se pretende cavitatar. Esse tipo de equipamento, ao propagar ondas de som de frequências características, permite com que ocorra a nucleação de bolhas e, também, a oscilação e colapso das mesmas (Gogate e Aniruddha, 2011).

A utilização de reatores de cavitação acústica é interessante quando se deseja um controle preciso do campo de pressões ao qual as bolhas serão submetidas, encontrando, portanto, aplicação no estudo de dinâmica de bolhas e na modelagem dos efeitos químicos da cavitação. Em termos práticos pode-se dizer que processos oxidativos avançados, emulsificação e sonoquímica são algumas das aplicações desses equipamentos. Dentre as desvantagens, cabe mencionar o alto custo operacional, uma vez que apresentam alto consumo de energia elétrica, e a baixa escala, dada a limitação de indutores de ultrassom para tratar grandes volumes de líquido. Essas desvantagens acabam por dificultar a inserção da cavitação acústica em operações industriais de larga escala (Gogate *et al.*, 2001).

A outra classe de reatores são os reatores de cavitação hidrodinâmica. O funcionamento desses dispositivos baseia-se em restrições geométricas e interferências no escoamento do líquido projetadas para causar a redução da pressão. Os abaixamentos de pressão propiciam, então, a nucleação das bolhas e a subsequente oscilação e colapso, dando origem ao fenômeno da cavitação.

Talvez o exemplo mais simples desse tipo de reator sejam os injetores do tipo Venturi. Nesses dispositivos, o fluido ao acelerar na restrição tem sua pressão reduzida. Dependendo das condições do escoamento, a pressão pode cair abaixo da linha de saturação (Moholkar *et al.*, 1999), desencadeando a nucleação de bolhas de vapor. A Figura 4 mostra esse efeito.

Figura 4. Efeito de queda de pressão em um Venturi (Moholkar *et al.*, 1999)

Tendo como inspiração o funcionamento dos Venturis, diferentes dispositivos foram desenvolvidos com o objetivo de causar esse efeito de redução da pressão do escoamento, porém em maior escala e intensidades. Um exemplo são os reatores de placas de orifício, onde o fluido é bombeado continuamente através de placas colocadas na tubulação, as quais permitem a passagem do fluido somente através de pequenos orifícios estrategicamente colocados ao longo de sua face. Essa configuração resulta em efeitos do tipo Venturi em diferentes localidades (Gogate e Aniruddha, 2011).

A outra classe de reatores de cavitação hidrodinâmica utiliza-se da energia mecânica de rotação, usualmente provida por um motor elétrico, para a nucleação das bolhas. Esses equipamentos são comumente conhecidos na indústria pelo termo *High Speed Homogenizers (HSH)*, ou *rotary-pulsation apparatus (RPA)* (Fedorov *et al.*, 2008). É fácil perceber que tais equipamentos são inspirados na cavitação observada em hélices e pás, conforme visto na Figura 2. Tais equipamentos são constituídos de uma parte móvel e outra estática, designados rotor e estator, respectivamente. Ambas as partes possuem rebaixos e (ou) ressaltos estrategicamente colocados, os quais irão resultar em um efeito oscilatório na pressão do líquido conforme a velocidade empregada ao rotor. Esse efeito de variação da pressão acaba por emular a cavitação acústica, dado que a amplitude e frequência da mesma são determinadas pela velocidade empregada e pelo projeto do rotor e estator utilizados.

A Figura 5 é um exemplo desse tipo de equipamento, onde o rotor consiste em um tambor com cavidades esféricas distribuídas ao longo de sua superfície externa.

Figura 5. Reator de cavitação hidrodinâmica da empresa Hydrodynamics® (hydrodynamics.com)

Nesse tipo de reator ocorre a chamada nuvem cavitante (Brennen, 1995), o que consiste em um aglomerado de diversas bolhas sendo geradas e extintas de forma contínua em determinada região. Dentre os principais efeitos decorrentes da operação com esses dispositivos, cabe mencionar o aquecimento do líquido, emulsificação, mistura, aeração e quebra de ligações químicas (Ozonek, 2012).

Conforme mencionado, os equipamentos do tipo High Speed Homogenizers (HSH) assemelham-se em suas operações pela presença de um conjunto rotor-estator através do qual o líquido é submetido a intensas rotações, vórtices, forças cisalhantes, turbulência e abruptas reduções de pressão, desencadeando a nucleação e implosão de bolhas (Gogate et al., 2001).

3. EQUIPAMENTO

3.1 NOVO MODELO DE HSH

Neste trabalho, utilizou-se um reator do tipo High Speed Homogeneizer, HSH (sob processo de patente), que opera acoplado a um motor elétrico trifásico, 220 V, de 18,5 kW de potência, comandado por um inversor de frequência para o controle da rotação imposta ao rotor. Ambos, rotor e estator, possuem rebaixos idênticos uniformemente espaçados e distribuídos ao longo dos perímetros. Essa configuração, juntamente com a rotação, cria um efeito de ruptura do meio e redução da pressão, desencadeando a nucleação de bolhas.

O equipamento opera em uma faixa de vazão de 0,3 a 1,0 m³ / h e a rotação imposta entre 3000 e 3500 RPM. Todas as suas partes constituintes são feitas em aço inox com alto teor de cromo para aumento de sua resistência ao desgaste causado pela cavitação.

As Figuras 6 e 7 ilustram, respectivamente, um corte lateral do equipamento e este montado.

Figura 6. Vista em corte lateral do HSH utilizado

Figura 7. HSH montado

Na Figura 8 apresenta-se uma vista explodida do reator e suas partes. Nesta ilustração cabe destacar os rebaiços presentes no rotor (peça 4) e no estator (peças 3 e 2). A quantidade de rebaiços presentes em cada parte estática é a metade da presente no rotor.

Figura 8. Visão explodida do HSH utilizado

Sua operação é relativamente simples e descrita a seguir.

- a)** O eixo do motor elétrico é acoplado ao eixo (E2), o qual por sua vez é acoplado ao disco (4), fazendo este revolucionar de acordo com a rotação imposta pelo motor;
- b)** O líquido adentra o reator através de uma tubulação de 1" de diâmetro rosqueada à parte cônica (2c);
- c)** O líquido, então, percorre o interior do equipamento sofrendo intensa rotação e cisalhamento por entre os rebaixos presentes no disco (4) e nas peças estáticas frontal (2), e traseira (3);
- d)** O líquido é expelido por uma abertura de 1" de diâmetro presente na peça estática traseira (3).

Uma observação pertinente do seu funcionamento é a noção de que quanto maior for a rotação aplicada, maior será a potência requerida. Da mesma forma, para vazões maiores, a potência é automaticamente aumentada de modo a suportar a carga passante. A quantificação desses efeitos constitui parte desse estudo.

O dispositivo, por gerar uma diferença de pressão em seu interior, também proporciona o bombeamento do fluido, sendo capaz de vencer pressões à jusante de até 2 atmosferas.

3.2 PLANTA DE TESTES

Para a realização dos ensaios utilizou-se um circuito fechado contendo o reator (HSH), medidores em linha (vazão, temperatura e pressão) e tanques distintos para alimentação e retorno do líquido processado no reator, conforme ilustra a Figura 9. Foram utilizados três tanques iguais de polipropileno e capacidade para 200 litros cada. Os tanques foram dispostos paralelamente e interligados ao reator através de uma tubulação de 1" de diâmetro (Tigre, Aquaterm®). Cada tanque possui entrada e saída individuais, as quais podem ser abertas ou fechadas mediante a operação de válvulas esféricas. Possuem, também, um sistema independentes de dreno, utilizado para esvaziamento e limpeza.

Durante a operação, as duas propriedades do líquido que devem ser continuamente monitoradas são a temperatura e a pressão. O esquema utilizado possibilita a leitura dessas em tempo real antes e após o reator de cavitação. Para a temperatura utilizou-se termopares (tipo K) inseridos na tubulação e conectados à displays eletrônicos (Contemp, CPM-45). Para a medição da pressão do escoamento foram utilizados manômetros analógicos (Famabrás, 5 atm). Os termopares e manômetros foram instalados na entrada e saída do reator, de modo a medir as condições do escoamento antes e após o reator, e estão indicados na Figura 9, respectivamente pelas legendas T1 e P1, e T2 e P2. A medição da vazão no sistema foi feita por um medidor de precisão (Hidrometer, PN16) acoplado na tubulação antes do reator de cavitação.

Figura 9. Esquema da planta de testes

(V – válvulas , T – termopares, P – manômetros, LT – Displays para leitura da temperatura, HSH – reator de cavitação hidrodinâmica do tipo rotor-estator comandado pelo inversor de frequência)

Nas figuras 10 e 11 apresentam-se duas fotografias da planta de testes montada nas dependências do Prédio Semi-Industrial, Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Figura 10. Vista lateral da planta de testes.

Figura 11. Vista do reator, medidor de vazão utilizado e válvula de entrada (Ve).

Conforme explicado, o reator opera a partir da energia mecânica fornecida por um motor elétrico acoplado. Na planta de testes construída, utilizou-se um motor elétrico trifásico de 18,5 kW de potência (WEG, W22 Plus). Para o controle da velocidade desse motor e monitoramento da amperagem e potência utilizou-se um inversor de frequência com interface homem-máquina digital (WEG, Modelo CFW-11). O inversor foi conectado a um computador para a realização da coleta, em tempo real, das informações referentes à operação do

motor. Essa aquisição de dados foi feita por um software específico fornecido pelo fabricante (WEG, Software SuperDrive G2 v 9.5).

O Gráfico 6 é um exemplo de como esse monitoramento é disponibilizado pelo software.

Gráfico 6. Medições em tempo real da potência e corrente elétrica na operação do motor.

Uma vez que diferentes ensaios podem ser realizados no reator, cada qual possui uma própria sequência de procedimentos a serem adotados. Apesar das diferenças, existe um roteiro básico a todos eles para iniciação dos testes, conforme disposto a seguir.

1. Garantir a limpeza dos tanques. Devem estar livres de impurezas e particulados.
2. Fechar todas as válvulas do sistema.
3. Completar o tanque com o volume do líquido desejado.
4. Ligar o inversor de frequência.
5. Ligar os leitores de temperatura.
6. Conectar o inversor no computador, abrir o programa SuperDrive G2 e criar novo projeto no software.

Essa sequência de passos demonstrou ser importante para garantir com que o líquido possa fluir corretamente através dos tanques escolhidos para alimentação e coleta. Após a realização dessas etapas, escolhem-se quais válvulas permanecerão abertas e quais fechadas em função do tipo de teste a ser realizado.

4. ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO REATOR DE CAVITAÇÃO

A realização de um balanço energético é motivada pela ocorrência de elevação substancial da temperatura do líquido que é observada quando este é processado pelo reator de cavitação. De fato, algumas empresas, comercializam esse tipo de reator como sendo um equipamento de interesse industrial para o aquecimento controlado de líquidos (p. ex. *Hydrodynamics®*, www.hydrodynamics.com). Essa aplicação, apesar de intensiva em energia elétrica, pode realmente ser de interesse industrial dado que alguns processos precisam aquecer homogeneamente o líquido e devem evitar a utilização de superfícies de aquecimento (exemplo: resistências elétricas). Também, uma vez compreendido como o equipamento aquece o fluido em função das condições operacionais, pode-se montar estações de bombeamento que aqueçam e transportem o líquido simultaneamente. Por último, como o reator de cavitação é capaz de desencadear efeitos físicos e químicos de importância industrial, por exemplo, emulsificação e oxidação, então torna-se importante também compreender como a temperatura será alterada. Por exemplo, em processos de emulsificação, a temperatura tem um papel fundamental na estabilidade das gotas. Como será apresentado no Capítulo 6, o equipamento possui potencial para ser utilizado em processos de polimerização em miniemulsão onde, também, o controle de temperatura é de suma importância ao processo e qualidade do produto final (Yamak, 2013).

Com base nessas considerações, foi feito um balanço energético do equipamento considerando a potência útil entregue pelo eixo do motor e as diferenças de temperatura observadas. Uma vez que esse tipo de equipamento pode ser utilizado para o aquecimento controlado de líquidos, então foi adotado o termo rendimento para quantificar como o reator transforma a potência mecânica útil em elevação de temperatura do líquido processado. Além desta quantificação do rendimento, o aquecimento do líquido processado pelo equipamento foi estudado em função das variáveis operacionais adotadas, de modo que um modelo de operação pôde ser elaborado.

Esse modelo permite prever, com bom grau de confiabilidade, o aquecimento e as potências envolvidas para uma dada faixa de condições operacionais.

Conforme descrito, o reator de cavitação estudado neste trabalho funciona com base na energia mecânica fornecida por um motor elétrico trifásico de 18,5 kW de potência nominal. Para uma análise energética, admitiu-se como volume de controle o volume interno do reator, tendo sido consideradas as temperaturas na entrada e saída deste volume como sendo aquelas medidas pelos termopares localizados na entrada e saída, T1 e T2, posicionados conforme ilustra a Figura 9. Essa consideração é válida dado que a distância entre os termopares e o reator é pequena e as perdas durante o percurso, conseqüentemente, podem ser desconsideradas.

Desta forma, o sistema adotado e o respectivo volume de controle (V.C) utilizados para a realização do balanço energético estão representados na Figura 12. Ou seja, o volume consiste em todo o volume interno do reator, que é de 0,77 litros. Esse volume interno abrange a câmara onde o disco contendo ranhuras revoluciona a velocidades radiais não superiores a 3500 RPM.

Figura 12. Sistema e Volume de Controle Adotados.

Nesse tipo de equipamento o que se observa é a conversão de energia elétrica em mecânica, a qual se manifesta no sistema como sendo o trabalho realizado pelo eixo do motor. Esse trabalho, por sua vez, é convertido em energia térmica caracterizada por um aumento da temperatura do líquido processado.

Considerando o sistema estacionário, o balanço global macroscópico de energia pode ser escrito na forma:

$$\frac{d(U_{VC} + E_{p,VC} + E_{c,VC})}{dt} = \dot{m}_e \cdot (H_e + e_{p,e} + e_{c,e}) - \dot{m}_s \cdot (H_s + e_{p,s} + e_{c,s}) + \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (10)$$

onde U_{VC} , $E_{p,VC}$ e $E_{c,VC}$ são, respectivamente, a energia interna, energia potencial e energia cinética do volume de controle, $\dot{m}_e$ e $\dot{m}_s$ são as vazões mássicas de entrada e saída do líquido, respectivamente, H_e , $e_{p,e}$, $e_{c,e}$, H_s , $e_{p,s}$, $e_{c,s}$ são a entalpia específica, a energia potencial específica e a energia interna específica do líquido na entrada (índice e) e na saída (índice s), $\dot{Q}$ é a taxa de troca de calor das vizinhanças para o volume de controle e $\dot{W}_s$ é a taxa de trabalho não associado à entrada e saída do fluido realizada pelo volume de controle sobre as vizinhanças.

Admitindo que as parcelas referentes às energias potencial e cinética são iguais na entrada e saída do reator, que não há adição de calor e, também, que o sistema está em regime permanente e que a vazão é constante ao longo de todo o volume de controle, então a Equação 10 pode ser reescrita como.

$$\dot{W}_s = \dot{m} \cdot (H_e - H_s) \quad (11)$$

Uma observação importante acerca da entalpia é que esta inclui, por definição, o trabalho de deslocamento do fluido no interior do reator, conforme a Equação 12 (Castellan,1986).

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp \quad (12)$$

Ou seja, em condições ideais, a potência de trabalho líquido fornecido pelo eixo do motor $\dot{W}_s$ é igual ao produto da vazão mássica pela diferença de entalpia específica entre a entrada e a saída. Admitindo que não há variação da entalpia com a pressão (sistema líquido), então tem-se que.

$$\dot{W}_s = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (13)$$

Outra suposição importante que foi adotada é quanto a nucleação das bolhas. Admitiu-se, para todos os efeitos, que as bolhas são formadas e aniquiladas no interior do reator. Desta forma, a entalpia de vaporização associada retorna ao meio ainda dentro do volume de controle não havendo, portanto, contribuição ao balanço energético. Da mesma forma, como estes ensaios foram feitos usando apenas água como fluido, e supondo o total aniquilamento das bolhas antes da saída do reator de cavitação, não é necessário incluir, no balanço de energia, termos referentes à energia para criação de superfície das bolhas.

Para quantificar a taxa de trabalho útil realizado pelo eixo, $\dot{W}_s$, também definido como potência útil, P_u , utilizou-se a seguinte equação aplicável à motores elétricos trifásicos.

$$P_u = \eta \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot V \cdot \cos \phi \quad (14)$$

Na Equação 14 vê-se que a potência útil é uma função da tensão (diferença de potencial elétrico aplicada ao motor), V , e da amperagem (corrente elétrica no motor), I , aplicadas. A potência também depende de parâmetros característicos do motor, $\cos \phi$ e η , respectivamente conhecidos como fator de potência e rendimento do motor. Para o motor utilizado, WEG 22,5, os valores desses parâmetros conforme informado pelo fabricante são (WEG,2012)

$$\eta = 91,5 \% \text{ (rendimento do motor)} \quad (15)$$

$$\cos \phi = 0,87 \text{ (fator de potência)} \quad (16)$$

Uma observação direta da potência útil é a de que esta aumenta com o aumento da vazão e da rotação empregadas. No que se refere à variação da temperatura entre a entrada e saída do reator, ΔT , foi possível constatar um incremento com o aumento da velocidade de rotação (R) e uma redução com o aumento da vazão. De modo a explicitar essas relações entre as variáveis operacionais, rotação e vazão, e as quantias de potência útil e variação da temperatura pode-se escrever as seguintes relações.

$$\frac{\partial P_u}{\partial \dot{m}} > 0 \quad ; \quad \frac{\partial P_u}{\partial R} > 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial \dot{m}} < 0 \quad ; \quad \frac{\partial \Delta T}{\partial R} > 0 \quad (18)$$

A partir deste balanço global de energia, dos dados experimentais coletados e das informações fornecidas pelo fabricante do motor elétrico foi possível quantificar a eficiência energética do aparato e os respectivos efeitos das variáveis operacionais, notadamente rotação e vazão.

4.1 RESULTADOS

Para a realização do balanço energético foram realizados testes em batelada onde, em cada um, manteve-se fixa a rotação e a temperatura de entrada (T1), estabelecida em cerca de 20 °C, variando somente a vazão no reator (controlada pela válvula Ve da Figura 9). Após um período de tempo, necessário para estabilização da vazão e da temperatura, os valores da temperatura de saída (T2), amperagem e voltagem para aquela vazão foram coletados.

Foram conduzidos testes com as seguintes rotações 3000, 3100, 3200, 3250, 3300, 3400 e 3500 RPM, para cada qual foram coletados um número suficiente de leituras de vazão, temperatura, amperagem e voltagem, e organizados conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 2. Exemplo de organização dos dados coletados (parte do teste a 3000 RPM)

Vazão (m ³ /h)	T1 (°C)	T2 (°C)	Δ T (°C)	I (Amperes)	V (Volts)
0,466	20,3	41,3	21,0	49,9	182
0,550	19,9	38,0	18,1	51,2	181
0,536	19,9	38,3	18,4	51,6	181
0,690	19,9	36,0	16,1	55,7	181
0,692	19,9	35,7	15,8	55,4	181
0,773	20,1	34,5	14,4	57,1	183

A seguir são apresentados os resultados dos testes. Para cada rotação foram feitos dois gráficos, um evidenciando a diferença de temperatura em função da vazão, $\Delta T \times v$, e outro da Potência Útil em função da vazão, $P_u \times v$. Para o gráfico da diferença de temperatura foi feita uma interpolação dos dados utilizando um polinômio de segundo grau e, para a Potência Útil, utilizou-se função linear. Estes resultados estão mostrados nos Gráficos 7 a 20, sendo que em cada um é apresentado o ajuste aos dados medidos e também um gráfico dos resíduos (diferenças entre a curva ajustada e o valor medido experimentalmente).

Gráfico 7. ($\Delta T \times v$) a 3000 RPM

Gráfico 8. ($P_u \times v$) a 3000 RPM

Gráfico 9. ($\Delta T \times v$) a 3100 RPM Gráfico 10. ($P_u \times v$) a 3100 RPM

Gráfico 11. ($\Delta T \times v$) a 3200 RPM Gráfico 12. ($P_u \times v$) a 3200 RPM

Gráfico 13. ($\Delta T \times v$) a 3250 RPM Gráfico 14. ($P_u \times v$) a 3250 RPM

Gráfico 15. ($\Delta T \times v$) a 3300 RPM Gráfico 16. ($P_u \times v$) a 3300 RPM

Gráfico 17. ($\Delta T \times v$) a 3400 RPM Gráfico 18. ($P_u \times v$) a 3400 RPM

Gráfico 19. ($\Delta T \times v$) a 3500 RPM Gráfico 20. ($P_u \times v$) a 3500 RPM

Conforme definido pela Equação 13, o trabalho útil realizado pelo eixo do motor deveria ser igual ao produto $\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$. Ocorre, porém, que esse trabalho não é integralmente convertido em energia térmica, havendo a transformação da energia em outras formas e perdas de diferentes naturezas (p.ex., perda de calor para o ambiente externo). Com base nisto é correto reescrever a Equação 13 considerando um termo para agrupar as perdas do processo, ou potência dissipada, φ . Também, uma vez que a medição de vazão na planta de testes foi feita em termos de vazão volumétrica, é conveniente realizar o devido ajuste, de modo que a equação da potência útil do eixo do motor pode ser reescrita como na Equação 19.

$$P_u = \dot{W}_s = (\rho v) \cdot C_p \cdot \Delta T + \varphi \quad , \quad [W] \quad (19)$$

Ou seja, dada a vazão volumétrica (v) e a diferença de temperatura entre a entrada e saída do reator (ΔT) é possível calcular a potência de aquecimento, $P_a = \rho v C_p \Delta T$. Os valores de potência de aquecimento foram então comparados com os valores de potência mecânica útil do motor, calculados a partir da Equação 14, sendo a diferença entre as duas quantias igual à potência dissipada em outras formas de energia, φ . Desta forma, o rendimento do reator de cavitação, em termos de potência de aquecimento, pode ser expresso pela Equação 20.

$$Rend = \frac{P_a}{P_u} = \frac{(\rho v) \cdot C_p \cdot \Delta T}{\eta \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot V \cdot \cos \phi} \quad (20)$$

Consequentemente, a potência dissipada, pode ser escrita como.

$$\varphi = P_u \cdot (1 - Rend) \quad (21)$$

Outra informação importante é a densidade de energia térmica no reator (B_v) que pode ser calculada pela divisão do termo P_a pelo volume do equipamento V_R . Esse termo corresponde à taxa de geração de energia térmica no equipamento, avaliado em W/m^3 .

$$B_v = \frac{P_a}{V_R} \quad [W/m^3] \quad (22)$$

Conforme mencionado, foi possível constatar a existência de correlações entre as variáveis operacionais com a potência útil e a diferença de temperatura. Com base nessa observação os dados coletados foram trabalhados e feitas regressões múltiplas apropriadas para uma melhor compreensão do processo. Essas regressões permitiram a identificação do comportamento de aumento da temperatura e da potência útil em função das variáveis operacionais, velocidade de rotação (Rot) e vazão volumétrica de líquido (v), descritas aqui simbolicamente pelas Equações 23 e 24, respectivamente.

$$\Delta T = f(Rot, v) \quad (23)$$

$$P_u = g(Rot, v) \quad (24)$$

O ajuste dos dados de diferença de temperatura em função da rotação e vazão foi feito utilizando um polinômio interpolador de primeiro grau em relação à rotação e, de segundo grau, em relação à vazão, conforme a Equação 25.

$$\Delta T(Rot, v) = -60,08 + 0,03186 \cdot Rot + 32,62 \cdot v - 0,02493 \cdot Rot \cdot v + 19,79 \cdot v^2 \quad (25)$$

O polinômio representa acuradamente os dados observados ($R^2 = 0,9921$). O Gráfico 21 mostra esse polinômio e os dados obtidos com os testes.

Gráfico 21. Polinômio interpolador : $\Delta T = f(R, v)$

O mesmo tratamento de dados foi feito para a potência útil, calculada aplicando a Equação 14 com os dados coletados de amperagem e voltagem. Desta vez obteve-se um plano interpolador, ou seja, a potência útil comporta-se linearmente em relação a variações na rotação e na vazão.

O resultado da interpolação é descrito pela Equação 26.

$$P_u (Rot, v) = -24,63 + 0,01125 \cdot Rot + 9,52 \cdot v \quad (26)$$

Essa regressão também apresenta excelente ajuste com os dados observados, conforme mostrado no Gráfico 22, com $R^2 = 0,9942$.

Gráfico 22. Plano interpolador : $P_u = g(R, v)$

Utilizando a Equação 25, a potência de aquecimento pode ser reescrita em função da rotação e vazão, da seguinte forma.

$$P_a = (\rho v) \cdot C_p \cdot f(R, v) \quad (27)$$

Por último, o rendimento do equipamento também pode ser expresso como uma função da rotação e da vazão, permitindo avaliar a existência de condições operacionais ótimas e o efeito dessas variáveis no rendimento.

$$Rend(R, v) = \frac{P_a}{P_u} = \frac{(\rho v) \cdot C_p \cdot f(R, v)}{g(R, v)} \quad (28)$$

4.2 DISCUSSÃO E UTILIZAÇÃO DOS RESULTADOS

O fluxograma mostrado na Figura 13 ilustra as conversões de energia no sistema estudado, considerando que o motor converta energia elétrica em energia mecânica com uma dada eficiência e que a potência mecânica entregue ao eixo é convertida em potência de aquecimento, P_a , e potência dissipada, φ .

Figura 13. Fluxograma Energético

As equações ajustadas no item anterior permitem analisar o efeito das variáveis sobre o rendimento do reator de cavitação no aquecimento de líquido, dentro das faixas de variáveis estudadas, e determinar as condições operacionais mais favoráveis, que maximizem o rendimento energético.

Utilizando os polinômios interpoladores, o rendimento para o aquecimento da água no reator pode ser escrito, conforme a Equação 29, em função da rotação e da vazão, na forma.

$$Rend(Rot, v) = \frac{0,03691 \cdot Rot \cdot v + 37,7967 \cdot v^2 - 0,0288 \cdot Rot \cdot v^2 + 22,9306 \cdot v^3 - 69,6146 \cdot v}{0,01125 \cdot Rot + 9,52 \cdot v - 24,63} \quad (29)$$

O Gráfico 23 ilustra o comportamento, descrito pela Equação 29, do rendimento em função da rotação e da vazão. Observa-se, nesta Figura que, dentro das faixas de vazão e rotação estudadas, os rendimentos mais elevados são previstos para rotações mais elevadas e que, para cada nível de rotação, existe um valor de vazão na qual o rendimento é máximo, bem como faixas de vazão com rendimentos similares ao rendimento máximo. Quanto ao efeito da rotação sobre o rendimento, para uma vazão fixada, este mostrou ser menos intenso e é

praticamente linear. Para as menores vazões (p.ex., $v=0,2$) o aumento da rotação tem um pequeno efeito negativo sobre o rendimento, enquanto que na região de maiores vazões, o aumento da velocidade de rotação promove um pequeno aumento do rendimento.

Gráfico 23. Curva rendimento em função da rotação e da vazão

4.2.1 Otimização da Operação de Aquecimento Controlado

Analizando a curva de rendimento do Gráfico 23 é possível constatar a existência de uma região de máximo que evolui em função da rotação. Desta forma, os valores de vazões ótimas podem ser determinados, para cada nível de rotação fixado, diferenciando a Equação 29 em relação à vazão:

$$\frac{\partial}{\partial v} \left[\frac{0,03691 \cdot \text{Rot} \cdot v + 37,7967 \cdot v^2 - 0,0288 \cdot \text{Rot} \cdot v^2 + 22,9306 \cdot v^3 - 69,6146 \cdot v}{0,01125 \cdot \text{Rot} + 9,52 \cdot v - 24,63} \right] = 0 \quad (30)$$

A partir da solução da Equação 30 tem-se uma curva que representa essas vazões ótimas (v^*) em função de diferentes rotações. Esta equação foi resolvida numericamente e os resultados obtidos estão mostrados no Gráfico 24.

Gráfico 24. Vazão ótima em função da rotação

Essa função é bem representada pelo seguinte polinômio de terceiro grau descrito pela Equação 31.

$$v^* = 1,046 \cdot 10^{-10} \cdot \text{Rot}^3 - 1,096 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Rot}^2 + 0,003862 \cdot \text{Rot} - 3,97 \quad (31)$$

O Gráfico 24 indica que, dentro da faixa estudada, o máximo rendimento é obtido para a maior rotação usada, 3500 rpm. A Equação 31 permite obter o valor de vazão que corresponde ao máximo rendimento para esta rotação, obtendo-se neste caso o valor de $v^*(\text{Rot}=3500\text{rpm}) = 0,6011 \text{ m}^3/\text{h}$. A substituição destes valores na Equação 29 fornece o valor máximo do rendimento, 87,58%. A comparação dos resultados deste modelo com os valores experimentalmente medidos nas mesmas condições é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Balanço energético (medido e calculado) a 3500 RPM e em vazão ótima

	Rot (RPM)	$v^* \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$	$P_u \text{ (kW)}$	$P_a \text{ (kW)}$	$\varphi \text{ (kW)}$	Rendimento (P_a/P_u)
Medido	3500	0,6011	20,5	17,95	2,55	87,5%
Calculado			20,47	17,93	2,54	87,58%

Uma observação importante de caráter prático e operacional a respeito dos dados da Tabela 2 deve ser feita quanto à potência útil. Para as condições apresentadas e, também, em outras situações, onde se operou com elevadas rotações e vazões, a potência útil foi maior que a potência nominal. Esse tipo de situação, apesar de permitida pelo equipamento, pode prejudicar e, eventualmente,

queimar os enrolamentos do motor elétrico caso permaneça por tempo demasiadamente longo, conforme orientação do fabricante do motor (WEG,2012).

Desta forma, em algumas situações, ocorre de a vazão ótima implicar em uma sobrecarga do motor caso o processo permaneça nessas condições por um longo período de tempo. Com base nessa constatação, para aplicações onde o motor irá operar em sobrecarga, é aconselhável a utilização um motor elétrico de maior potência nominal. O Gráfico 25 serve para a definição do motor a ser utilizado. Os pontos contidos na reta (em azul) referem-se ao motor operando com uma potência útil igual à de 18,5 kW. Desta forma, pontos acima da reta indicam sobrecarga do motor (denominada região superior), enquanto que a área abaixo da reta (região inferior) indica uma operação dentro das condições normais. A curva (em vermelho) é a curva de vazão ótima descrita pela Equação 31.

Gráfico 25. Regiões de Operação

Para operações na Região Superior é aconselhável a utilização de um motor de 25 kW de potência útil. Para operações na Região Inferior é aconselhável a utilização de um motor de 18,5 kW de potência útil.

Com base na análise do gráfico é possível constatar que existe uma rotação máxima permitida ao motor de 18,5 kW, para a qual a vazão ótima é possível sem que haja sobrecarga. A definição dessa rotação pode ser obtida substituindo a definição de vazão ótima (Equação 31) na equação da potência útil (Equação 26) para uma potência útil igual a 18,5 kW. Isto é expresso pela Equação 32 mostrada a seguir.

$$1,046 \cdot 10^{-10} \cdot \text{Rot}^3 - 1,096 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Rot}^2 + 0,003862 \cdot \text{Rot} - 3,97 = \frac{(43,13 - 0,01125 \cdot \text{Rot})}{9,52} \quad (32)$$

Resolvendo numericamente a Equação 32 obtém-se uma rotação de 3326 RPM. Ou seja, acima de 3326 RPM é preciso saber que a operação à vazão ótima, por um longo período de tempo, somente poderia ser feita de forma segura utilizando um motor de potência nominal maior que 18,5 kW. Aconselha-se para essa faixa utilizar um motor de maior potência nominal, de 25 kW.

Retomando a análise para os dados apresentados na Tabela 2, esses mostram a acurácia das funções interpoladoras, Equações 26 e 27, para a previsão de potência útil e potência de aquecimento em função das variáveis operacionais.

Para o caso específico da operação à 3500 RPM e considerando o volume útil do reator de 0,77 litros, então a densidade de energia disponível para aquecimento no interior do reator é de

$$B_v = 23,3 \quad \left[\frac{MW}{m^3} \right] \quad (33)$$

Levando em consideração a eficiência do motor elétrico utilizado (da ordem de 79,6%), então a eficiência do reator para o aquecimento de água é de cerca de 70%. Esse valor é consideravelmente maior em comparação com outros reatores de cavitação do tipo *High Speed Homogeneizer*, para os quais a literatura apresenta rendimentos da ordem de 25% (Gogate et al., 2001).

A partir dos resultados apresentados observa-se que, para cada nível de rotação empregado, existe uma vazão ótima capaz de maximizar o rendimento do reator em termos de aquecimento do líquido processado. A razão da existência desses pontos ótimos deve-se ao fato de que quanto maior for a vazão maior será o aproveitamento do trabalho líquido disponibilizado pelo eixo do motor. Matematicamente, essa relação pode ser vista na Equação 28, onde a contribuição de um aumento da vazão mássica (ρv) é mais significativa do que o efeito de redução da função $f(R, v)$ e aumento da função $g(R, v)$, causados pelo aumento da vazão. No entanto, para vazões demasiadamente elevadas (maiores que v^*), o efeito dessas funções no rendimento do reator passa a ser mais significativo do que o termo de vazão mássica, criando, portanto, uma região de máximo conforme visto

no Gráfico 23. Fisicamente, essa queda no rendimento pode ser explicada em razão de um menor tempo de residência por conta das elevadas vazões, o que implicaria em um desperdício da potência útil do motor. Quanto ao efeito da rotação, vê-se que um aumento desta variável operacional implica em um aumento da potência de aquecimento proporcionalmente maior que o aumento na potência útil. Matematicamente, isto é representado pelas Equações 34 e 35.

$$\frac{\partial}{\partial R} f(R, v) > \frac{\partial}{\partial R} g(R, v) \quad (34)$$

$$0,03186 - 0,02493 * v > 0,01125 \quad (35)$$

Ou seja, a Equação 35 é sempre válida para vazões menores que 0,82 m³/h, sendo esta uma vazão alta e que, inclusive, para a maior parte das rotações permitidas, resultaria em uma operação em sobrecarga (Região Superior), conforme indica o Gráfico 25.

Da mesma forma, um aumento da rotação implica em mais trabalho sendo entregue pelo motor, aumentando o rendimento do equipamento. Esse fato deve também ocorrer em demais reatores do tipo HSH que trabalham acoplados a motores elétricos, sendo que a metodologia aqui descrita pode ser facilmente aplicada para a determinação das condições operacionais ótimas desses equipamentos.

4.2.2 Fenômeno da Cavitação e Variáveis Operacionais

Por ser um reator de cavitação hidrodinâmica é importante estabelecer uma correlação, mesmo que qualitativa, entre as variáveis operacionais e o efeito da cavitação. A partir de observações indiretas, como intensidade do ruído provocado pela cavitação, é fácil perceber que o fenômeno é intensificado com o aumento da rotação e da vazão empregadas. É notável que um aumento dessas variáveis implica em um aumento da velocidade de escoamento do líquido no interior do reator. Essa relação entre velocidade do escoamento e intensificação da cavitação é mensurada a partir do uso de um adimensional conhecido por Número de Cavitação, σ , definido pela Equação 36 (Brennen, 1995).

$$\sigma = \frac{p-p_v}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (36)$$

onde p é pressão de operação, p_v é a pressão de vapor do líquido, ρ é a massa específica do líquido e V é a velocidade de escoamento.

Segundo esta definição, a nucleação e implosão de bolhas será mais intensa quanto menor for o valor do número de cavitação, sendo este proporcional ao inverso do quadrado da velocidade do escoamento (V). Ou seja, é de se esperar que quanto maior for a velocidade e a rotação utilizadas, mais intensa será a cavitação no interior do reator. Dada a complexidade do escoamento no interior do reator de cavitação, não foi objetivo deste trabalho a quantificação desse adimensional, mas somente a sua análise qualitativa.

Finalmente, pode-se estabelecer a seguinte relação entre as principais variáveis operacionais do reator para uma dada rotação:

$$\uparrow v : \downarrow \Delta T : \uparrow P_a : \uparrow P_u : \downarrow t_r : \downarrow Ca \quad (37)$$

ou seja, elevações na vazão implicam em menores diferenças de temperatura, maiores potências de aquecimento, maiores potências úteis, menores tempos de residência e menores Números de Cavitação.

Com este trabalho foi possível demonstrar que a relação entre as variáveis resulta em pontos ótimos de operação, onde o rendimento do reator para o aquecimento do líquido, definido pela razão $\frac{P_a}{P_u}$, é maximizado.

A Tabela 3 sumariza, para diferentes rotações, as respectivas vazões ótimas, diferenças de temperatura, potências e rendimentos envolvidos. A coluna (t_r) refere-se ao tempo de residência no interior do reator. Acerca desta variável foi possível constatar que os valores de vazão ótima implicam em tempos de residência da ordem de 4,6 a 4,8 segundos, dependendo da rotação. Esse tempo ótimo pode ser entendido como sendo aquele que permite maximizar o aquecimento do fluido carregando o motor elétrico o menos possível. Nesta tabela também estão colocados os Números de Cavitação calculados para cada uma dessas condições e tendo como referência a entrada do reator de cavitação. Essa informação é importante para futuros trabalhos envolvendo o equipamento como, por exemplo, o seu redimensionamento.

Tabela 3. Condições operacionais ótimas

Rot (RPM)	v^* (m ³ /h)	ΔT (°C)	Pa (kW)	Pu (kW)	Rend (%)	t_r (s)	σ
3000	0,576	17,77	11,86	14,60	81,24	4,8	995
3100	0,586	19,31	13,10	15,82	82,86	4,7	963
3200	0,593	20,87	14,33	17,01	84,27	4,6	940
3300	0,598	22,44	15,55	18,18	85,51	4,6	923
3400	0,602	24,01	16,76	19,35	86,60	4,6	911
3500	0,605	25,62	17,96	20,51	87,60	4,5	900

4.2.3 Capacidade e Custo Operacional

Devido as características industriais do equipamento é importante avaliar a sua capacidade produtiva. Admitindo uma operação em condições de vazão ótima a 3200 RPM (0,593 m³/h) e considerando que o reator opere a uma marcha diária de 20 horas operacionais e quatro horas de parada, então o equipamento é capaz de processar 11,86 m³/dia, ou 11.860 L / dia.

Em termos de consumo energético, a potência nominal para essa condição pode estimada em 21,37 kW, enquanto que a potência de aquecimento em cerca de 14,33 kW. Desta forma o consumo energético para o processamento de 11,86 m³/dia seria de 427,4 kWh. Admitindo o custo do kWh como sendo de 0,3 R\$/kWh (valor da época da elaboração deste trabalho), então o custo operacional específico de processamento é da ordem de 10 R\$ / m³.

O custo específico da energia de aquecimento, medido em R\$ / MMBtu, para o reator é de cerca de R\$ 131,00 / MMBtu.

Uma observação pertinente é que os resultados aqui apresentados são válidos para um processo em batelada, com temperatura de entrada no reator da ordem de 20°C e utilizando somente água.

5. ESTUDO DE EMULSIFICAÇÃO USANDO O REATOR DE CAVITAÇÃO

Diversos autores definem os reatores de cavitação hidrodinâmica como sendo equipamentos úteis para a emulsificação e mistura (Kozyuk, 1999; Gogate e Aniruddha, 2011). Conforme explicado, esses efeitos devem-se às condições termodinâmicas e de escoamento extremas decorrentes da oscilação e colapso das cavidades e, também, do cisalhamento causado no interior do dispositivo (Suslick *et al.*, 1997).

Com base nesse potencial, optou-se por avaliar, neste trabalho, a eficiência do reator para a produção de emulsões. Experimentos até então realizados confirmaram esse potencial, especialmente para a produção de emulsões O/A com tamanho de partículas em escala sub-micrométrica.

Os métodos para a produção dessas emulsões são usualmente classificados como sendo de alta energia, baixa energia ou uma combinação de ambos. Tratando exclusivamente dos métodos de alta energia, esses são divididos em classes de acordo com o princípio utilizado, a saber: HSH (*High Speed Homogenizers*), HPH (*High Pressure Homogenizers*), *Microfluidizer* e Ultrassom . Por serem intensivos em energia, a utilização em escala industrial ainda representa um desafio aos engenheiros e pesquisadores (Koroleva e Yurtov, 2012).

Dentre os métodos de alta energia, aqueles que encontram maior potencial de serem aplicados em escala industrial são os do tipo HSH (*High Speed Homogenizers*), *Microfluidizer* e HPH (*High Pressure Homogenizers*) (Schutz *et al.*, 2004). Nesse tipo de equipamento, a mistura óleo/água é submetida às condições extremas de escoamento, permitindo a ocorrência de forças de cisalhamento, turbulência e cavitação. Acerca do fenômeno da cavitação é interessante constar a sua importância dentre os processos de emulsificação de alta energia (Gogate e Pandit, 2001).

Equipamentos do tipo HSH tem como princípio de funcionamento a presença de uma parte estacionária e outra móvel, respectivamente estator e rotor. Quando o rotor atinge velocidades críticas, a pressão local periférica cai abaixo da pressão de vapor, desencadeando a nucleação e implosão de bolhas de vapor – fenômeno da cavitação. Outros efeitos importantes nesse tipo de equipamento e que contribuem

para o processo de emulsificação são: turbulência, forças de cisalhamento e a criação de campos de pressão oscilantes (Senthilkumar e Pandit, 1999).

Emulsões estão presentes no dia a dia, em quase a maioria dos produtos consumidos, sejam alimentos, cosméticos produtos farmacêuticos, utilidades para a indústria de construção como tintas, vernizes e colas. As emulsões podem ser definidas como dispersões coloidais de dois líquidos imiscíveis, nas quais o tamanho das gotas da fase dispersa podem variar de milímetros a nanômetros. Para a obtenção de emulsões estáveis é necessária a utilização de um terceiro componente chamado de agente emulsificante, ou surfactante, (Morrison e Ross, 2002), que atua na interface entre os dois líquidos imiscíveis, criando uma barreira (de natureza eletrostática, ou estérica, ou ambas) que evita o contato entre as gotas dispersas. Para garantir a estabilidade da emulsão deve ser levada em consideração a natureza do surfactante, de ambas as fases e da relação da quantidade de cada um dos componentes (Leal-Calderon et al., 2007).

No presente trabalho foi avaliada a eficiência do reator de cavitação hidrodinâmica, do tipo HSH (*High Speed Homogenizers*), para a produção de emulsões O/A em escala sub-micrométrica. Foram estudadas as influências da rotação imposta ao rotor e da quantidade de surfactante utilizada no diâmetro médio de partículas e na estabilidade das emulsões produzidas.

O equipamento também foi avaliado quanto à sua aplicabilidade em escala industrial onde, com base na potência exigida pelo motor elétrico, foi possível calcular o custo operacional por litro de emulsão produzida.

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi estudada a produção de emulsões óleo/água (O/A) usando vaselina líquida como fase dispersa, com a composição apresentada na Tabela 4. O surfactante utilizado foi o Lauril Sulfato de Sódio (SLS) e a água MiliQ conformaram a fase contínua. A fase oleosa utilizada foi vaselina líquida, e com as características descritas na Tabela 5.

Tabela 4. Composição da emulsão estudada

	Substância	Volume (L)	Proporção Volumétrica (%)
Fase Contínua	Água Mili-Q	50	89,3%
	Surfactante - SLS	variável	variável
Fase Dispersa	Vaselina Líquida	6	10,7

Tabela 5. Características da vaselina líquida utilizada

	Valor	Unidade
Densidade	0,88	g/cm ³
Viscosidade	13	cst
Calor Específico	2	J / g °C

Foram adotadas as seguintes etapas para a realização dos ensaios:

Preparo da mistura: São adicionados a um dos tanques o volume de 50 litros de água Mili-Q e a quantidade de surfactante. O volume é homogeneizado por agitação manual. Após esse preparo o reator de cavitação, HSH, é ligado e mantido a uma rotação fixa de 850 RPM, o volume do tanque é, então, colocado em reciclo passando pelo HSH e retornando ao mesmo tanque. Após 6 minutos de processamento a fase oleosa é adicionada ao tanque. A mistura é então deixada em reciclo por mais 6 minutos. Essa etapa é importante para permitir uma mistura prévia e homogeneização do conteúdo.

Emulsificação em reciclo: Após a etapa de preparação faz-se a configuração da velocidade de rotação desejada através do inversor de frequência. Essa rotação é mantida fixa em cada um dos testes até o final. O volume do tanque é, então, continuamente processado a uma vazão constante, passando pelo reator de cavitação e retornando ao tanque. As amostras foram coletadas em intervalos fixos de tempo até terem transcorrido aproximadamente 30 minutos de teste. Este tempo de 30 minutos foi estipulado como limite máximo devido ao aumento da temperatura da emulsão durante a homogeneização, a qual foi continuamente monitorada ao longo do processo. O ponto de coleta dessas amostras é na saída do HSH.

Caracterização das emulsões: O tamanho médio das gotas foi determinado por meio do equipamento Beckman Coulter, Coulter N4 Plus (média e intensidade), o qual utiliza a técnica de espalhamento dinâmico de luz, também conhecido na literatura por espectroscopia de correlação de fótons. A preparação das amostras para análise do diâmetro de gotas envolve uma diluição com água destilada de acordo a concentração adequada à faixa de leitura do equipamento. Para a avaliação da estabilidade das emulsões produzidas optou-se por analisar a última amostra de cada teste em um equipamento do tipo Turbiscan por um período de 4 horas à temperatura ambiente. Além deste, a emulsão produzida após o ensaio foi deixada em repouso no tanque por 24 horas, após o qual uma nova amostra foi coletada para uma reavaliação do tamanho médio de gotas no equipamento Coulter N4 Plus.

Para cada ensaio realizado foi montada uma tabela contendo a vazão medida no momento da coleta (a qual se procurou manter a mais fixa e estável possível), o tempo transcorrido após o início da etapa de emulsificação, as temperaturas de entrada e saída do reator (T1 e T2, respectivamente), o diâmetro médio de partícula (DP) e o respectivo índice de polidispersividade (PDI).

Com o intuito de avaliar não somente a qualidade das emulsões produzidas, mas, também, o efeito das variáveis operacionais, foram realizados ensaios preliminares com diferentes rotações e vazões para uma melhor compreensão do processo de emulsificação. Após a realização desses ensaios foi convencionada a adoção de uma vazão fixa para todos os testes de 0,9 m³/h. Essa vazão permite a realização de um teste em reciclo de cerca de 30 minutos de modo a evitar o aumento da temperatura no meio que poderia comprometer a estrutura da planta de testes. Quanto à rotação, observou-se que os efeitos na qualidade final da emulsão pouco variam para rotações maiores que 3000 RPM, havendo somente um maior gasto energético. Desta forma, os testes foram concentrados na faixa de rotação entre 2000 e 3000 RPM. Importante notar que para esta vazão e para a rotação máxima dos testes, de 3000 RPM, o motor estará operando na Região Inferior, conforme o Gráfico 25 , não havendo portanto sobrecarga do motor.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme mencionado, a eficiência para a produção de emulsões através do novo modelo de *High Speed Homogeneizer* foi avaliada quanto à quantidade de surfactante utilizada e a rotação imposta ao elemento rotor do equipamento. Desta forma optou-se por analisar primeiramente o efeito da quantidade de surfactante, de modo a identificar a quantidade de tensoativo que permite a obtenção de uma emulsão estável e com menores diâmetros médios de partículas. A segunda etapa constitui a avaliação do efeito da rotação do rotor para a produção de emulsões de mesma composição.

5.2.1 Efeito da Quantidade de Surfactante

Um estudo do efeito da quantidade de surfactante sobre o diâmetro das gotas utilizando a mesma velocidade de rotação foi realizado. Para os testes apresentados utilizou-se 216,6 g para 6 litros de óleo e 135,47 gramas de SLS para 3 litros de óleo, respectivamente Teste 1 e Teste 2. A Tabela 6 apresenta as características das emulsões produzidas. Importante ressaltar que o Teste 2, com maior quantidade de surfactante, teve os volumes proporcionalmente reduzidos pela metade para evitar uma grande geração de resíduos. Comparativamente, para o Teste 1 foram utilizados 20% menos SLS do que a quantidade utilizada no Teste 2.

Tabela 6 – Efeito da quantidade de surfactante a 2500 RPM

Componentes	Teste 1	Teste 2
Volume de Água (m ³)	0,05	0,025
SLS (g)	216,58	135,47
Volume de Óleo (m ³)	0,006	0,003
Vazão Média (m ³ /h)	1,01	0,954
Relação volumétrica óleo/água	0,12	0,12
SLS/volume de água (g/L)	4,33	5,42

A Tabela 7 mostra o diâmetro médio de partículas medido em cada um dos testes ao longo do tempo. No Teste 1 utilizou-se o critério de coleta de amostras em intervalos fixos de 5 minutos. Para o Teste 2, devido ao menor volume, as alíquotas

foram coletadas em intervalos de 2,5 minutos, já que o processamento de um volume menor implica em um aquecimento mais rápido do sistema, o que poderia danificar a estrutura da planta de testes.

Tabela 7. Diâmetros médios de partículas para os testes 1 e 2

Velocidade de rotação 2500 rpm		
Tempo (minutos)	Diâmetro (nm)	
	Teste 1 - 216,6 g de SLS para 6 litros de óleo	Teste 2 - 135,5 g de SLS para 3 litros de óleo
2,5	----	931,6
5	1107,6	650,9
7,5	-----	643,8
10	914,4	619,2
12,5	-----	541,4
15	694,7	----
20	628,4	----
25	560,8	----

Uma vez que os testes foram realizados em volumes diferentes, apesar de ter se mantido a proporção entre as fases, é interessante utilizar o conceito de tempo espacial para melhor explorar o efeito da rotação na qualidade da emulsão. O tempo espacial é aquele tempo requerido para processar um volume correspondente a um volume do tanque (Levenspiel, 1999). Este é definido como sendo a razão entre o volume do tanque e a vazão de processamento, conforme mostra a Equação 37.

$$\tau_t = \frac{V_t}{v} \quad (37)$$

Desta forma é possível analisar os testes nas mesmas bases mediante um gráfico que mostre o diâmetro de partícula médio medido em função do tempo dividido pelo tempo espacial, conforme o Gráfico 26.

De modo a observar o efeito da quantidade de surfactante sob o diâmetro médio de partículas os Testes 1 e 2 foram comparados em um gráfico indicando o tamanho médio de partículas (DP) em função do tempo dividido pelo tempo espacial apresentado no Gráfico 26. Os dados foram interpolados por funções potência para uma melhor visualização da tendência.

Gráfico 26. Comparação entre ensaios a 2500 RPM e quantidade de surfactante.

Analisando o Gráfico 26 é possível constatar que o aumento na quantidade de surfactante desloca a curva $DP \times t/\tau_t$ para baixo, indicando que tamanhos médios de partículas são obtidos mais rapidamente no processo quanto maior for a quantidade de surfactante utilizada, devido a maior quantidade de surfactante livre para cobrir as gotas. Observou-se que foram obtidos diâmetros muito próximos reduzindo aproximadamente o tempo espacial pela metade para maior quantidade de surfactante.

De acordo com estes resultados, os demais ensaios para avaliação do efeito da rotação serão realizados utilizando o teor de surfactante do Teste 2.

5.2.2 Efeito da Rotação

Das variáveis operacionais do reator de cavitação em estudo pode-se dizer que a principal é a velocidade de rotação do rotor. É ela que permite modular a intensidade da cavitação gerada no interior do equipamento. Com base nisto, foram realizados testes para avaliar o efeito da rotação no diâmetro médio de partícula da emulsão produzida.

Conforme mencionado anteriormente, o teor de surfactante (SLS) utilizado foi o mesmo do Teste 2, ou seja, 270,95 gramas de SLS para 6 litros de óleo, ou 135,47 gramas de SLS para 3 litros de óleo. A razão da escolha para este teor deve-se ao fato de menores diâmetros médio de partículas terem sido obtidos com essa condição.

A seguir são apresentados os resultados dos Testes 3, 4, 5, onde a rotação utilizada foi, respectivamente, 2000, 2500 e 3000 RPM. No ensaio realizado a 2000 RPM utilizou-se exatamente os volumes apresentados na Tabela 5. Também, para este ensaio, foram realizadas coletas de alíquotas para análise em intervalos fixos de 5 minutos. Para os testes a 2500 e 3000 RPM, a proporção entre as fases foi mantida a mesma, conforme indicado na Tabela 5, porém os volumes foram reduzidos pela metade. O intuito desta redução de volume é a redução da geração de resíduos. As temperaturas foram continuamente monitoradas, sendo que este foi o fator limitante do tempo de duração dos testes. Como os ensaios a 2500 e 3000 RPM aqueceram a emulsão mais rapidamente, devido ao menor volume, a coleta de alíquotas para análise foi realizada em períodos mais curtos de tempo, de 2,5 minutos, ao invés de 5 minutos como no teste a 2000 RPM.

➤ **Teste 3 – 2000 RPM**

Tabela 8 – Características da Emulsão do Teste 3 (2000 RPM)

Volume de Água (m³)	SLS (g)	Volume de Óleo (m³)	Vazão Média (m³/h)
0,05	270,95	0,006	0,957

Tabela 9 – Resultados do Teste 3

Vazão (m³/h)	Tempo (min)	DP (nm)	PDI	T1 (°C)	T2 (°C)
0,975	5	1314,9	0,15	36,6	42,7
0,981	10	968,2	0,385	46,2	52,1
0,9696	15	853,9	0,46	53,2	59
0,9564	25	731,5	0,604	64,3	70,4
0,936	30	632,4	0,434	69,3	75,1
0,93	35	546,2	0,479	73,5	79,5

➤ **Teste 4 – 2500 RPM**

Tabela 10 – Características da Emulsão do Teste 4 (2500 RPM)

Volume de Água (m³)	SLS (g)	Volume de Óleo (m³)	Vazão Média (m³/h)
0,025	135,47	0,003	0,954

Tabela 11 - Resultados do Teste 4

Vazão (m³/h)	Tempo (min)	DP (nm)	PDI	T1 (°C)	T2 (°C)
0,966	2,5	931,6	N/A	33,5	42,8
0,948	5	650,9	0,6	42,7	48,7
0,966	7,5	643,8	0,626	53	61,8
0,942	10	619,2	0,291	61	69,5
0,948	12,5	541,4	0,462	66,6	75,9

➤ **Teste 5 – 3000 RPM**

Tabela 12 – Características da Emulsão do Teste 5 (3000 RPM)

Volume de Água (m³)	SLS (g)	Volume de Óleo (m³)	Vazão Média (m³/h)
0,025	135,47	0,003	0,914

Tabela 13 – Resultados do Teste 5

Vazão (m³/h)	Tempo (min)	DP (nm)	PDI	T1 (°C)	T2 (°C)
0,84	2,5	706,4	0,568	31	58,3
0,894	5	535,1	0,401	46,6	64,6
0,9384	7,5	517,9	0,271	59,2	73,6
0,9852	10	469,1	0,361	70,1	82,7

Avaliando os dados é possível perceber que à medida que o processamento em reciclo se desenvolve, o diâmetro médio de partícula é reduzido e as temperaturas se elevam. Também foi possível constatar que, com um aumento da rotação utilizada, tamanhos médios de partículas cada vez menores podem ser obtidos para um mesmo tempo de processamento.

Da mesma forma como para os Testes 1 e 2, os dados foram plotados em gráficos $DP \times t/\tau_t$. O gráfico a seguir mostra os resultados dos três testes a diferentes rotações.

Gráfico 27. Efeito da rotação no tamanho médio de partícula

A partir dos resultados apresentados no Gráfico 27 vê-se que um aumento na rotação permite com que emulsões mais finas sejam produzidas. Esse efeito é evidenciado pelo deslocamento para baixo da curva interpoladora à medida com que se aumenta a rotação imposta ao rotor do HSH .ou seja, partículas de menor tamanho são produzidas para o mesmo tempo espacial. A redução do tamanho médio de partícula deve-se à intensificação das condições de escoamento decorrente do aumento da rotação. É de se esperar que com a elevação da rotação haja um aumento das forças cisalhantes, turbulência, cavitação e pulsos de pressão e velocidade no líquido (Promtov, 2001), intensificando o processo de rompimento das gotas e criando emulsões mais finas, indicando que o aumento de energia no meio pode ser compensado por uma redução de tempo para atingir diâmetros menores.

Na literatura podem ser encontrados trabalhos utilizando dispositivos em escala laboratorial como Ultrassom e Ultra Turrax que coincidem com os resultados deste trabalho (Maali e Mosavia, 2014) e (Koroleva e Yurtov, 2012).

Outra conclusão dos ensaios é quanto à existência de um limite mínimo de tamanho de partícula, abaixo do qual o equipamento não conseguiu reduzir mais o diâmetro médio. Esse limite situa-se entre 460 e 540 nm. Conforme mencionado, mesmo para rotações acima de 3000 RPM não foi possível obter uma redução significativa no tamanho médio de partícula. Importante constar que o limite somente foi confirmado para a emulsão O/A com as características (proporcionais) de acordo

com a Tabela 5.

Os dados contidos no gráfico foram interpolados e ajustados por funções de potência, sinalizadas no gráfico como P1, P2 e P3 correspondendo, respectivamente, à 2000, 2500 e 3000 RPM. Essas funções são descritas pelas equações a seguir.

$$P1: \quad DP = 1517 \cdot (t/\tau_t)^{-0,408} \quad , \quad R^2 = 0,98 \quad (38)$$

$$P2: \quad DP = 1010 \cdot (t/\tau_t)^{-0,318} \quad , \quad R^2 = 0,91 \quad (39)$$

$$P3: \quad DP = 761,7 \cdot (t/\tau_t)^{-0,294} \quad , \quad R^2 = 0,95 \quad (40)$$

Essas funções de potência ajustaram-se com boa precisão aos dados, possibilitando a previsão do diâmetro médio de partícula em função do tempo espacial.

As funções potências utilizadas seguem a Equação 41.

$$DP(t/\tau_t) = A \cdot \left[\frac{t}{\tau_t} \right]^b \quad (41)$$

Como é de se esperar, os parâmetros A e b são funções da rotação e, também, foram analisados de modo a se obter uma função que os descreva. O Gráfico 28 mostra o parâmetro A em função da rotação e a interpolação dos dados por uma função de potência.

Gráfico 28. Parâmetro A em função da rotação

A função que ajustou aos dados do parâmetro A foi.

$$A(rot) = (2,17 \cdot 10^{11}) \cdot rot^{-2,503} + 332,4 \quad , R^2 = 1 \quad (42)$$

Já para o parâmetro b, tem-se a seguinte relação, conforme o Gráfico 29

Gráfico 29. Parâmetro b em função da rotação

$$b(rot) = (-3,98 \cdot 10^{13}) \cdot rot^{-4,38} - 0,268 \quad , \quad R^2 = 0,99 \quad (43)$$

Uma vez que os ajustes dos parâmetros foram bem feitos, torna-se possível estabelecer uma equação que descreva o tamanho médio das partículas na emulsão em função do tempo, sendo os parâmetros colocados em função da rotação utilizada, conforme visto na Equação 44.

$$DP(t) = [(2,17 \cdot 10^{11}) \cdot rot^{-2,503} + 332,4] \cdot (t/\tau_t)^{(-3,98 \cdot 10^{13}) \cdot rot^{-4,38} - 0,268} \quad (44)$$

Essa equação é útil, pois permite modelar o processo, ou seja, uma vez definida a rotação, torna-se possível avaliar o diâmetro médio em função do tempo de processamento. Além disto, valendo-se de métodos numéricos, pode-se determinar uma dada rotação que permite obter um diâmetro médio após um tempo espacial escolhido. Esse tipo de manipulação é especialmente interessante para futuras aplicações industriais da tecnologia.

5.2.3 Estudo da Estabilidade das Emulsões

Acerca da estabilidade das emulsões, estas foram avaliadas em um equipamento da marca Turbiscan Plus®, do fabricante Formulacion. Este tipo de equipamento analisa a transmissão e a reflexão da luz pela amostra (*transmission* e *backscattering*), permitindo quantificar o tamanho médio e a distribuição das partículas ao longo do tempo, avaliando, desta forma, a estabilidade da emulsão. Os resultados desses ensaios são apresentados em gráficos que mostram a transmissão e a reflexão em função da posição no tubo de ensaio. Nos gráficos, a posição 0 (zero) indica o fundo do tubo de ensaio. As amostras foram analisadas em testes de no mínimo duas horas, onde foi possível constatar que a emulsão manteve-se consideravelmente estável. A seguir são apresentados os gráficos das emulsões produzidas.

Gráfico 30. Transmission e Backscattering da emulsão produzida no Teste 3 (2000 RPM)

Gráfico 31. Transmission e Backscattering da emulsão produzida no Teste 4 (2500 RPM)

Gráfico 32. Transmission e Backscattering da emulsão produzida no Teste 5 (3000 RPM)

Por se tratar de uma solução opaca, a análise deve ser feita a partir da reflexão da luz na amostra (backscattering). Dos gráficos apresentados é possível constatar que após 4 horas de ensaio, a uma temperatura fixa de 24°C, há uma ligeira diminuição da luz que é refletida somente na altura entre zero e três milímetros do tubo de ensaio. Apesar dessa indicação de ligeira separação de fases, as amostras mantiveram-se estáveis ao longo do resto do tubo e após longo período de tempo.

Além do teste utilizando o equipamento Turbiscan®, o tamanho médio de partícula foi analisado após 48 horas do término do ensaio para cada emulsão deixada em repouso à temperatura ambiente. A Tabela 14 resume o resultado desses ensaios para as emulsões produzidas a 2000, 2500 e 3000 RPM.

Tabela 14. Estabilidade das emulsões após 48 horas do ensaio

RPM	Medição após o ensaio		Medição após 48 horas do ensaio	
	DP (nm)	PDI	DP (nm)	PDI
2000	546,2	0,479	592,1	0,369
2500	541,4	0,462	627,2	0,288
3000	469,1	0,361	491,1	0,312

Com base nas análises realizadas no equipamento Turbiscan® e na avaliação do tamanho médio de partículas após 48 horas da produção da emulsão, é possível constatar que essas permaneceram satisfatoriamente estáveis. As emulsões foram observadas por um período superior a 2 meses, sendo que não foi possível constatar nenhuma alteração visual que indicasse separação entre as fases.

5.2.4 Comportamento da Temperatura

Por último, é importante analisar esse processo de produção de emulsões sob um ponto de vista industrial, ou seja, avaliando a sua eficiência em termos de energia e custo de produção. Diferentemente do balanço energético realizado no Capítulo 4, o processo de emulsificação ocorre em reciclo, onde a mistura é continuamente retirada do tanque, processada pelo equipamento HSH para, então, retornar ao mesmo tanque.

Essa situação está ilustrada na Figura 14, onde as setas indicam o sentido do escoamento da emulsão ao longo do processo.

A operação resulta em uma elevação da temperatura do líquido, conforme pode ser visto nos resultados dos testes apresentados nas Tabelas 9, 11 e 13.

Figura 14. Esquema de processamento em reciclo

Adotando o tanque como volume de controle e realizando um balanço de massa e energia (Anexo I), é possível constatar que a temperatura do tanque deve

guardar uma relação linear com o tempo de processamento, de acordo com a Equação 45.

$$T(t) = \left(\frac{P}{\rho V_t \cdot C_p} - \varphi \right) \cdot t + T_0 \quad (45)$$

Ou seja, a temperatura do tanque depende dos parâmetros da emulsão, massa específica e calor específico, da potência de aquecimento (P), das perdas térmicas, φ , e da temperatura inicial do tanque, T_0 . Avaliando os resultados dos testes foi possível constatar essa relação. O Gráfico 33 mostra a temperatura em função do tempo para os Testes 4 e 5, onde foram utilizados 135 gramas de SLS para 3 litros de óleo.

Gráfico 33. Temperatura da emulsão em função do tempo (testes a 2500 e 3000 RPM)

As Equações 46 e 47 descrevem essas retas.

$$L1: \quad T(t) = 5,95 \cdot t/\tau_t + 26,08 \quad , \quad R^2 = 0,98 \quad (46)$$

$$L2: \quad T(t) = 9,54 \cdot t/\tau_t + 19,25 \quad , \quad R^2 = 0,99 \quad (47)$$

Ou seja, sabendo a temperatura inicial da emulsão (representada nas Equações 46 e 47 pelos coeficientes lineares), é possível prever a temperatura ao longo do tempo de processo.

A previsão da temperatura ao longo do processo é de suma importância para processos de emulsificação. Também, uma vez que esse comportamento da temperatura é bem conhecido torna-se possível projetar plantas eficientes para a produção de emulsões em escala industrial utilizando o reator de cavitação em questão.

A Tabela 15 mostra os coeficientes angulares dessas retas para diferentes rotações. Importante lembrar que esses coeficientes são válidos para o processamento de emulsões com as características descritas na Tabela 8 e a uma vazão constante de 1 m³/h.

Tabela 15. Coeficientes angulares das retas que descrevem a temperatura do tanque em função do tempo específico

Rotação	Coeficiente Angular (°C)
2000	4,211
2500	5,952
3000	9,546

Para essas condições os coeficientes angulares podem ser escritos em função da rotação mediante um polinômio interpolador de segundo grau, de modo que a temperatura do tanque pode ser escrita em função da rotação empregada e do tempo específico conforme a Equação 48.

$$T(t) = [(3,70 \cdot 10^{-6}) \cdot ROT^2 - 0,0132 \cdot ROT + 15,78] \cdot t/\tau_t + T_o \quad (48)$$

A Equação 48 é importante uma vez que permite controlar a temperatura de produção das emulsões em função da rotação e da temperatura, determinando o tempo máximo de processamento para que não haja um superaquecimento do sistema.

5.2.5 Capacidade Produtiva e Custo Operacional

O custo operacional do processo de emulsificação pode ser calculado a partir do consumo energético do motor elétrico utilizado. Os processos de emulsificação, ao menos para a emulsão estudada, não foram realizados na carga máxima do motor, e a potência útil média medida nos ensaios foi de 12 kW ao longo de todo o tempo de processamento. Tomando como exemplo o teste realizado a 3000 RPM (Tabela 13) vê-se que 25 litros de emulsão foram produzidos em 10 minutos de processo. Desta forma, o equipamento permite produzir 150 Litros em uma hora de processamento à custa de 12 kWh.

Nessas bases o reator de cavitação estudado neste trabalho consumiria cerca de 25% da energia consumida por um método baseado em ultrassom (Koroleva e Yurtov, 2012), o que justifica a escolha da cavitação hidrodinâmica em substituição à ultrassônica para a produção de emulsões.

Admitindo o custo do kWh como sendo aproximadamente de 0,3 R\$/kWh, então o custo por litro de emulsão produzida por esse processo é de aproximadamente 0,024 R\$/litro.

Em termos de capacidade produtiva, o equipamento pode funcionar 20 horas por dia, com quatro paradas estratégicas de uma hora para evitar o superaquecimento do motor. Neste ritmo, pode-se dizer que é possível uma escala produtiva de cerca de 3.000 litros de emulsão por dia.

Obviamente que para a correta quantificação do custo da emulsão produzida deve-se levar em conta a depreciação do equipamento, custos e frequência das manutenções, dentre outras. Quanto a esses fatores, o equipamento pode-se dizer que é de baixa manutenção e depreciação. Por ser constituído de aço inox Cr-Ni-Mo, as partes do reator possuem boa resistência ao desgaste por cavitação. No que diz respeito ao motor elétrico, manutenções devem ser executadas de acordo com a orientação do fabricante.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No que se refere à aplicação do reator de cavitação para o aquecimento controlado de líquidos, foi possível constatar a sua eficácia. O equipamento permite converter energia mecânica em térmica com um rendimento global (considerando a eficiência do motor elétrico utilizado), da ordem de 70%. Essa técnica de aquecimento encontra especial interesse na indústria uma vez que o líquido pode ser aquecido de forma homogênea, contínua e controlada através de um, ou mais reatores, facilmente instalados nas tubulações. Conforme apresentado, o aquecimento gerado depende da vazão imposta que, uma vez fixada, deverá repercutir em uma elevação controlada e previsível da temperatura do líquido na saída do equipamento. Esse fato é importante uma vez que montagens em série e em paralelo desses reatores podem ser construídas de modo a otimizar o aquecimento de líquidos, principalmente em linhas de bombeamento.

Outra contribuição importante deste trabalho é a descoberta de vazões ótimas no reator, vazões essas que produzem um maior aquecimento com um menor consumo energético. Foi demonstrado que a existência dessas vazões ótimas pode ser explicada com base no modelo matemático proposto, o qual também permitiu relacionar variáveis como tempo de residência, potência útil do motor e o adimensional Número de Cavitação. Por último, vale ressaltar o potencial existente para o desenvolvimento e aperfeiçoamento desse tipo de reator, capaz de aquecer líquidos homogeneamente, dispensando superfícies de aquecimento (as quais podem danificar o produto), facilmente instalados em linhas de bombeamento e que podem ser controlados precisamente a partir da vazão.

O reator de estudado, quando utilizado para o aquecimento de água, possui um custo operacional da ordem de 131 R\$/ MMBtu.

Acerca da aplicação para a produção de emulsões, foi possível constatar a eficiência desse novo modelo de reator de cavitação, do tipo HSH (High Speed Homogeneizer) para a produção de emulsões em escala submicrométrica, tendo sido formuladas emulsões estáveis de tamanho médio de partículas da ordem de 500 nm. O equipamento opera em escala industrial, com capacidade produtiva da ordem de 1,0 m³/h. O trabalho também foi conclusivo quanto ao efeito da rotação sobre o tamanho médio de partículas, onde foi possível constatar que um aumento

da rotação implica na obtenção de partículas menores em um espaço de tempo menor.

Apesar deste efeito, ficou claro que, após um tempo de processamento superior a 6 tempos espaciais do tanque, em reciclo, as operações a 2000, 2500 e 3000 RPM resultaram em emulsões estáveis e com tamanho médio de partículas similares e próximo a 500 nm. Quanto a esse limite, foi concluído se tratar de um limite do próprio equipamento, onde mesmo com um aumento da quantidade de tensoativo e, ou, da rotação utilizada, não é possível a obtenção de emulsões com diâmetro médio de partículas significativamente menores que 500 nm, para as condições ensaiadas.

O efeito da quantidade de tensoativo também foi estudado, concluindo que uma redução na quantidade de SLS adicionado resulta na geração de emulsões ligeiramente mais grosseiras.

As emulsões produzidas demonstram estabilidade satisfatória, permanecendo estáveis por períodos superiores a um mês. O equipamento possui potencial para futuras aplicações em escala industrial, permitindo a produção de 3000 m³/dia de emulsão às custas de 12 kWh de energia, o que é consideravelmente competitivo e de importância à indústria.

Além do efeito de emulsificação, dado que o processo resulta em uma elevação da temperatura, futuros trabalhos podem ser desenvolvidos visando calibrar o equipamento para atuar em processos específicos da indústria como os de polimerização em emulsão. Como visto, o controle da temperatura pode ser feito de forma precisa mediante a modulação das variáveis operacionais, rotação e vazão.

As Tabelas 16 e 17 apresentadas a seguir sintetizam os principais resultados das duas operações estudadas, aquecimento controlado e emulsificação.

No Anexo II encontra-se o algoritmo utilizado para a simulação dos resultados dessas operações.

Como recomendações e sugestões para trabalhos futuros que poderiam ser desenvolvidos usando o reator de cavitação hidrodinâmica, podemos citar:

- avaliar o uso do reator de cavitação para estudo de desinfecção de líquidos e avaliar sua eficiência no rompimento de células de microorganismos;
- avaliar o uso do reator de cavitação para estudo em tratamento de efluentes líquidos (processos oxidativos avançados);

- avaliar o uso do reator de cavitação para processos químicos com reações envolvendo duas ou mais fases líquidas não totalmente miscíveis, tais o processo de produção de biodiesel e o processo de epoxidação de óleos vegetais;

Tabela 16. Resumo da Operação de Aquecimento Controlado

	Valores	Unidades	Obs
Rotação máxima	3500	RPM	
Vazão ótima	0,593	m³/h	Vazão ótima a 3200 RPM (sem sobrecarga do motor)
Consumo específico de energia	21,37	kWh	Potência Nominal (à vazão ótima)
Capacidade diária de processamento	11,86	m³/dia	Considerando quatro paradas de uma hora por dia.
Custo específico da operação de aquecimento	131,00	R\$ / MMBtu	À vazão ótima e considerando 0,3 R\$/kWh

Tabela 17. Resumo da Operação de Emulsificação

	Valores	Unidades	Obs
Rotação máxima	3000	RPM	
Vazão ótima	1,0	m³/h	
Consumo de energia	18	kWh	Potência Nominal
Capacidade diária de processamento	3000	m³/dia	Considerando quatro paradas de uma hora por dia.
Custo específico da operação de emulsificação	24,00	R\$ / m³	Considerando 0,3 R\$/kWh

REFERÊNCIAS

- ABISMAIL, B.; CANSELIER, J.P.; WILHELM, A.M.; DELMAS, H.; GOURDON, C. Emulsification processes: on-line study by multiple light scattering measurements. **Ultrasonics sonochemistry** v.7, 2000. p. 187-192,
- ANAND, G.; CHAKINALA, P.; GOGATE, P. R.; BURGESS, A. E.; BREMMER, D. H. Treatment of industrial wastewater effluents using hydrodynamic cavitation and the advanced Fenton process. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 15, Issue 1, 2008. p. 49-54.
- BRENNEN, C.E. **Cavitation and Bubble Dynamics**. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- BROWN, B. GOODMAN, J. E., **High intensity ultrasonics**. London: Iliffe, 1965.
- CARLIN, B. **Physical Acoustics**, Vol. 1B, Mason: Academic Press, 1964.
- CASTELLAN, G. W. **Fundamentos de Físico Química**. São Paulo: LTC, 1986.
- CRAWFORD, A. E., **Ultrasonic engineering**, London: Butterworths Scientific Publications, 1955.
- CHIVATE, M.M.; PANDITIT, A.B. Effect of hydrodynamic and sonic cavitation on aqueous polymeric solutions, **Ind. Chem. Engr**, v. 35, 1993. p. 52.
- DALFRÉ FILHO, J. G. ; GENOVEZ, A. I. B. ; ASSIS, M.P. ; GALLO NETTO, C. Processo 'limpa' águas residuais. *Analytica*, São Paulo, p. 20 - 20, 2010.
- ESCALER, X.; EGUSQUIZA, E.; MEBARKI, T.; AVELLAN, F.; FARHAT, M. Field assesment of cavitation detection methods in hydropower plants, In: SIXTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CAVITATION, 2006, Wageningen.

FEDOROV, A.V.; KHMEL, T. A.; VASILISHIN, M. S. Analysis of characteristics of a rotary-pulsation apparatus equipped by an impeller and a consumption limiter system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METHODS OF AEROPHYSICAL RESEARCH, 5. , 2008, Novosibirsk.

FLANNIGAN, D.J.; HOPKINS, S.D.; CAMARA, C.G.; PUTTERMAN, S.J.; SUSLICK, K.S. Measurement of pressure and density inside a single sonoluminescing bubble. **The American Physical Society**. v.96, 2006.

FLYNN H. G. Physical acoustics IB. New York: Academic, 1964.

FRANC, J.P.; MICHEL, J.M. **Fundamentals of Cavitation**. London: *Kluwer Academic Publishers*, 2004.

GAITAN, F. D.; CRUM, L. A.; CHURCH, C. C.; Roy, R. A. Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble. **Journal. Acoust. Soc. Am.** v. 91, 1992. p. 3166-3183.

GOGATE, P. R.; PANDIT, A. B. Engineering Design Methods for Cavitation Reactors I: Sonochemical Reactors. **AIChE Journal**. v. 46, 2000a. p. 372.

GOGATE, P. R.; PANDIT, A. B. Engineering Design Methods for Cavitation Reactors II: Hydrodynamic Cavitation Reactors, **AIChE Journal**. v. 46, 2000b. p. 1641.

GOGATE, P. R.; SHIRGAONKAR, I. Z. ; SIVAKUMAR, M. ; SENTHILKUMAR, P. ; VICHARE, N. P. ; Pandit, A. B. Cavitation reactors: efficiency assessment using a model reaction. **AIChE Journal**. v. 47, 2001. p. 2526-2538.

GOGATE, P. R.; TAYAL, R. K.; PANDIT, A. B. Cavitation: A technology on the horizon. **CURRENT SCIENCE**. v. 91, 2006. p.1

GOGATE, P. R. Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: A critical review. **Chemical Engineering and Processing**. v. 47, 2008. p. 515-527.

GOGATE, P. R.; ANIRUDDHA, B. P. Hydrodynamic cavitation reactor: A state of the art review. **Reviews in Chemical Engineering**. v. 17, 2011. p. 1–85.

IPT. Disponível em < http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CNAVAL/noticias/147-navegacao_otimizada.htm > acesso em > Março.2014.

KALUMUCK, K. M.; CHAHINE, G. L. The use of cavitating jets to oxidize organic compounds in water. **Am. Soc. Mech. Eng.** v. 245, 1998. p. 3-45.

KAPUSTINA, O. A. **Physical principles of ultrasonic technology**, v. 1, 1937. p. 391 – 509.

KATO, H. Utilization of cavitation for environmental protection – Killing planktons and dispersing spilled oil. **Department of Mechanical Engineering**, Japan, 2005.

KOROLEVA, M.Y.; YURTOV, E. V. Nanoemulsions: the properties, methods of preparation and promising applications. **Russian Chemical Reviews**. v. 81, 2012. p. 21-43.

KOZYUK, O. V. Method and apparatus for producing ultra-thin emulsions and dispersions. *U.S. Patent, US 5931771 A*, Aug. (1999).

KRISHNAN, S. J.; DWIVEDI, P.; MOHOLKAR, V. S. Numerical investigation into the chemistry induced by hydrodynamic cavitation. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. v.45, 2006. p.1493-1504.

LASTMAN, G. J.; WENTZELL, R. A. Comparison of five models of spherical bubble response in an inviscid compressible liquid. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 69, 1981. p. 638-642.

LEAL-CALDERON, F.; SHMITT, V.; BIBETTE, J. **Emulsion Science. Basic Principles**. New York: Springer Science Bussines Media, 2007.

LEIGHTON, T.G. **The Acoustic Bubble**. London: Academic Press, 1994

LEVENSPIEL, O. Engenharia das Reações Química. Edgard Blucher, 2000.

LOHSE, D. Sonoluminescence: Inside a micro-reactor. **Nature**.v.418,2002. p. 381-383.

LORIMER, J. P.; MASON, T. J.; FIDDY, K. Enhancement of chemical reactivity by power ultrasound: an alternative interpretation of the hot spot. **Ultrasonics**. v. 29, 1991. p.338.

MAALI, A.; MOSAVIAN, H. M. T. Preparation and Application of Nanoemulsions in the Last Decade (2000–2010). **Journal of Dispersion Science and Technology**. v. 34, 2013. p. 92-105.

MCNAMARA, W. B.; DIDENKO, Y. T.; SUSLICK, K. S. Sonoluminescence temperatures during multibubble cavitation. **Nature**. v. 401,1999. p. 772–775.

MILLY, P. J. TOLEDO, R. T.; KERR, W. L.; ARMSTEAD, D. Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid food. **Journal of Food Science**. v. 72, 2007. p. 414-422.

MORRISON, I. D. ROSS, S. **Colloidal Dispersion**. New York: Jonh Wiley Inc., 2002.

MOHOLKAR, V. S.; PANDIT, A. B. Bubble Behavior in Hydrodynamic Cavitation: Effect of Turbulence. **AIChE Journal**. v.436,1997 .p. 1641.

MOHOLKAR, V.S.; SENTHIL, K. P.; PANDIT, A.B. Hydrodynamic cavitation for sonochemical effects. **Ultrasonics Sonochemistry**. v.6, 1999. p. 53-65.

NEPIRAS, E. A. **Acoustic Cavitation**. Bouernemouth: North-Holland Publishing Company, 1979.

NEWTON I. **Opticks**, London: *William Innys at the West-End of St. Paul's*, 1704.

OZONEK, J. **Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering**. London: Taylor & Francis Group, 2012.

PAL, A.; VERMA, A.; KACHHWAHA, S.S.; MAJI, S. Biodiesel production through hydrodynamic cavitation and performance testing. **Renewable Energy**. v. 35, 2010. p. 619-624.

PANDIT, A.B.; JOSHI, J.B. Hydrolysis of Fatty Oils:Effect of Cavitation. **Chem. Eng. Science**. v. 48, 1993. p. 3440.

PANDOLEY, K.V.; SAHARAN, V. K.; MUDLIAR, S.N.; PANDEY, R.A.; PANDIT, A. B.; ANIRUDDHA, B. Cavitationally induced biodegradability enhancement of a distillery wastewater. **Journal of Hazardous Materials**. v. 219 -220, 2012. p. 69-74.

PETRIER, C.; GEMAL, A. L; LUCHE, J.L. Ultrasound in organic synthesis 3: A simple high yield modification of the Bouveault reaction. **Tetrahedron Letters**. v. 23,1982. p. 3361.

PLESSET, S M.;PROSPERETTI, A. Bubble dynamics and cavitation. **Ann.R ev. Fluid. Mech**. v.1.977, 1977. p.145-185.

PROMTOV, M. A. Hydroacoustic Emulsification in a Rotary Pulsed Cavitation Apparatus. **Theoretical Foundations of Chemical Engineering** v. 35, 2001. p. 309–311.

PROMTOV, M. A. Analysis of basic parameters of radial types of pulsed rotary equipment. **Chemical and Petroleum Engineering**. v. 45,2009. p. 9–10.

PSILLAKIS, E.; GOULA, G.; KALOGENRAKIS, N.; MANTZAVINOS, D. Degradation of poly-cyclic aromatic hydrocarbons in aqueous solutions by ultrasonic irradiation. **Journal of Hazardous Materials**. v.108, 2005. p.95-102.

RAYLEIGH, L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of spherical cavity. **Philos. Mag**. v. 34, 1917. p. 94–98.

SANTOS, S. L. ; FERREIRA, M. S. ; MARIN, M. P. A. ; NOVAZZI, L. F. . Use of Hydrodynamic Cavitation as an Alternative for Biodiesel Production. In: 22nd International Conference On Efficiency, Cost, Optimisation, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2009, Foz do Iguaçu. Program And Abstract Book of the 22nd ECOS - CD Proceedings. São Paulo: ABCM - EVENTUS, 2009. v. I. p. 1497-1502.

SCHULTZ, S.; WAGNER, G.; URBAN, K.;ULRICH, J. High Pressure Homogenization as a Process for Emulsion Formation. **Chem. Eng. Technol.** v. 27, 2004. p.361-368.

SENTHILKUMAR, P.; PANDIT, A. B. Modelling Hydrodynamic Cavitation. **Chem. Eng. Tech.**v. 22,1999. p. 1017.

SHAH, Y.T.; PANDIT, A.B.; MOHOLKAR, V.S. **Cavitation Reaction Engineering**, U.S.A: Plenum Publishers, 1999.

SHARMA, A. PARAG, R. G.; MAHULKAR, A.; ANIRUDDHA, B.; PANDIT, A. B. Modeling of hydrodynamic cavitation reactors based on orifice plates considering hydrodynamics and chemical reactions occurring in bubble. **Chemical Engineering Journal.** v.43, 2008. p. 201-209.

SUSLICK, S.; PRICE, G. J. Applications of ultrasound to materials chemistry. **Annual Review of Material Science.** v. 29, 1999. p. 295-326.

SUSLICK, K. S. The chemical Effects of Ultrasound. **Scientific American**,1989. p. 80-85.

SUSLICK, S.; MILLAN, M.; MDLELENI. ; JEFFREY, T. R. Chemistry induced by hydrodynamic cavitation. **J. Am. Chem. Soc.** v.119, 1997. p. 9303-9304.

SUSLICK, S.; FLANNIGAN, D. J. Inside a Collapsing Bubble: Sonoluminescence and the Conditions During Cavitation. **Annu. Rev. Phys. Chem.** v.59, 2008. p. 659–683.

SUSLICK, S.; DIDENKO, Y.; MING, M.; FANG, H. T.; KENNETH, J. K.; MCNAMARA, W. B.; MILLAN, M.; WONG, M. Acoustic cavitation and its chemical consequences. **Phil. Trans. R. Soc. Lond.** v. 357, 1997. p. 335-353.

SURI, R. P. S.; MICHAEL, R.; PARASKEWICH, J.; QIBIN, Z. Effect of Process Variables on Sonochemical Destruction of Aqueous Trichloroethylene. **Environmental. Eng. Sci.** v. 16, 1999. p. 345-352.

SOCHARD, S.; WILHELM, A. M.; DELMAS, H. Modelling of free radicals production in a collapsing gas-vapour bubble. **Ultrasonics Sonochemistry** v. 4, 1997. p. 77-84.

TANG, Y. S.; SIVAKUMAR, M. A novel and facile liquid whistle hydrodynamic cavitation reactor to produce submicron multiple emulsions. **AIChE Journal.** v. 59, 2013. p. 155-167.

THEOFANOUS, T.; BIASI, L.; ISBIN, H. S.; FAUSKE, H. A theoretical study on bubble growth in constant and time-dependent pressure fields. **Chemical Engineering Science.** v. 24, 1969. p. 885-897.

VICHARE, N. P.; NILESH, P.; SENTHILKUMAR, P.; MOHOLKAR, V. S.; GOGATE, P.; PANDIT, A. B. Energy analysis in acoustic cavitation. **Industrial & Engineering Chemistry Research.** v. 39, 2000. p. 1480–1486.

YAMAK, H. B. Emulsion polymerization: Effects of polymerization variables on the properties of vinyl acetate based emulsion polymers. **Intech** (<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/42097.pdf>), (2013).

YASUI, K. Alternative model of single-bubble sonoluminescence. **Physical Review.** v. 56, 1997, n. 6

YOUNG, F. R. **Cavitation.** London: *Imperial College Press*, 1999.

WEG. **Motor Elétrico Trifásico W22.** Jaraguá do Sul; Grupo WEG – Unidade Motores, 2012.

APÊNDICE I – Balanço Energético de Operação em Reciclo

Admitindo uma operação em reciclo, conforme ilustra a Figura 45 e, tomando como volume de controle (V.C), o tanque de processo, então o balanço de massa do sistema fica.

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (49)$$

Dado que o processo é em reciclo, então não há alteração mássica no volume de controle, ou seja, as vazões mássicas de entrada e saída são iguais.

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s \quad (50)$$

O balanço energético para este volume de controle é dado pela Equação 51.

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{m}_e \cdot E_e - \dot{m}_s \cdot E_s + \dot{Q} - \dot{W} \quad (51)$$

Como não há qualquer tipo de trabalho no tanque, então $\dot{W} = 0$. Há perdas de calor do conteúdo do tanque para o ambiente, de modo que $\dot{Q} < 0$. Por convenção, esse calor que flui para o ambiente será considerado como uma perda térmica e será denotado por φ . Os termos de energia de entrada e saída contabilizam a os valores referentes de entalpia, energia potencial e energia cinética. Para esse caso é pertinente desconsiderar quaisquer diferenças entre as energias potencial e cinética de entrada e saída do volume de controle. Também, como não há variação das energias cinética e potencial, então o termo para a energia total do volume de controle é igual à energia interna, isto é $E_{VC} = U$. A partir destas considerações, a Equação 51 pode ser reescrita como:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{n} \cdot [H_e - H_s] - \varphi \quad (52)$$

Sendo as definições de energia interna , U , e entalpia, H , conforme as Equações 53 e 54.

$$dU = n \cdot C_V \cdot dT \quad (53)$$

$$dH = C_P \cdot dT \quad (54)$$

Com essas definições o balanço energético fica reescrito conforme a Equação 55.

$$\frac{d}{dt}(n \cdot C_V \cdot T) = \dot{n} \cdot [C_P T_e - C_P T_s] - \varphi \quad (55)$$

Considerando o tanque perfeitamente agitado e admitindo que, para a fase líquida, $C_P = C_V$, então.

$$n_T \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{n} \cdot [T_e - T_s] - \varphi \quad (56)$$

Do balanço de energia no reator de cavitação sabe-se que a potência útil entregue pelo motor na forma de trabalho eleva a temperatura do líquido em reciclo. Esse efeito pode ser escrito em função de uma potência de aquecimento, aqui denotada simplesmente por P , que pode ser escrita como.

$$P = \dot{m} \cdot C_p \cdot [T_e - T_s] \quad (57)$$

Substituindo a Equação 57 na 56, resulta:

$$m C_P \frac{dT}{dt} = P + \dot{Q} \quad (58)$$

ou ainda, escrevendo a massa como o produto da massa específica pelo volume de líquido no tanque:

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{P}{\rho V_t C_P} \right) - \varphi \quad (59)$$

$$\text{onde } \varphi = -\frac{\dot{Q}}{\rho V_t C_P}$$

A Equação 59 pode ser resolvida por separação de variáveis e integrada diretamente. Admitindo que a taxa de perdas térmicas φ seja constante:

$$\int_{T_o}^T dT = \int_0^t \left[\left(\frac{P}{\rho V_t C_P} \right) - \varphi \right] dt \quad (60)$$

Essa integração resulta na função que descreve a temperatura do líquido no tanque em função do tempo, dadas a potência de aquecimento disponível, P , e as perdas térmicas para o ambiente, φ .

$$T(t) = \left[\left(\frac{P}{\rho V_t C_P} \right) - \varphi \right] t + T_o \quad (61)$$

Alternativamente, as perdas de energia para as vizinhanças poderiam ser consideradas proporcionais à diferença de temperatura entre o líquido T e o ambiente externo T_{amb} na forma:

$$\dot{Q} = -UA (T - T_{amb}) \quad (62)$$

onde U é o coeficiente global de transferência de calor entre o líquido e o ambiente externo e A é a área de troca de calor. Neste caso, a integração fica na forma:

$$\int_{T_o}^T \frac{1}{[P - UA(T - T_{amb})]} dT = \frac{1}{\rho V_t C_P} \int_0^t dt \quad (63)$$

que resulta em:

$$\ln \left(\frac{P - UA(T - T_{amb})}{P - UA(T_o - T_{amb})} \right) = -\frac{UA}{\rho V_t C_P} t \quad (64)$$

ou

$$T(t) = T_{amb} + \frac{P}{UA} - \left[T_{amb} + \frac{P}{UA} - T_o \right] \exp\left(-\frac{UA}{\rho V_t C_P} t\right) \quad (65)$$

Como

$$\exp(-at) \sim (1 - at) \quad \text{quando} \quad a \ll 1 \quad (66)$$

resulta que a Equação 65 fornece resultados praticamente equivalentes aos da Equação 61 quando $\frac{UA}{\rho V_t C_P} \ll 1$, ou seja, quando as perdas de calor forem suficientemente pequenas. Por isso, embora a Equação 65 seja, em princípio, mais rigorosa que a 61, pode-se empregar a Equação 61 para interpretar o comportamento do sistema nas condições estudadas.

APÊNDICE II – Algoritmo para Simulação das Operações no Reator

O algoritmo apresentado a seguir permite ao usuário selecionar entre as operações de aquecimento e emulsificação e realizar as devidas simulações com base nos modelos definidos e apresentados ao longo deste trabalho. O script foi escrito utilizando a linguagem de programação do software Matlab®, do fabricante MathWorks.

Lembrando que o algoritmo funciona para a previsão dos resultados de operações conforme os parâmetros e condições apresentados neste trabalho.

```
Op=input('Informe o tipo de operação (1=aquecimento , 2=emulsificação): ');

if Op==1

    v=input('Informe a vazão (m³/h): ');
    ROT=input('Informe a rotação (RPM): ');
    T1=input('Informe a temperatura inicial da água (°C): ');

    fp=0.87; % Fator de potência do motor (cos phi)
    n=0.915; % Rendimento do motor
    Ce=0.3; % Custo da energia em R$ / kWh
    D= 1; %Kg/m³ massa específica da água [g/cm³]
    Cp= 4186; % Calor específico da água (J/KgK)
    t=1; % 1 hora: referência do tempo de processamento
    Vr=0.77*10^-3; % Volume do reator (m³)

    Pu=-24.63+0.01125*ROT+9.52*v; % Potência útil entregue pelo eixo do
motor (kW) - Equação 21

    Pn=Pu/(fp*n); % Potência nominal (Kw)

    deltaT=(-60.08+0.03186*ROT+32.62*v-0.02493*ROT*v+19.79*v^2); %
Diferença de temperatura entre os termopares (T2-T1) - Equação 20

    T2=deltaT+T1; % Temperatura no termopar de saída (°C)

    Pa=(D*v*Cp)*deltaT/3600; % Potência de aquecimento (W) - Equação 22

    Rend=Pa/Pu ; %Rendimento de aquecimento (%) - Equação 23

    Opex=(Pn/v)*Ce; % Custo operacional (R$/m³)

    P=v*20; % Capacidade de processamento diária (m³)

    tr=((0.77*10^-3)/v)*3600; % tempo de residência (s)
```

```

Bv=Pa/Vr; % Densidade de energia no reator (kW/m³) - Equação 28

if Pu>18.5
    display('Operação na Região Superior : Sobrecarga do Motor')
else
    display('Operação na Região Inferior')
end

fprintf('Potência de aquecimento (kW): %f\n', Pa)
fprintf('Custo operacional (R$/m³): %f\n', Opex)
fprintf('Rendimento : %f\n', Rend)
fprintf('Temperatura de saída (°C): %f\n', T2)

else

    V=input('Informe o volume de processamento (L): ');
    ROT=input('Informe a rotação (RPM): ');
    T1=input('Informe a temperatura inicial (°C): ');

    DP=@(t) ((2.17*10^11)*ROT^(-2.503)+332.4)*t^((-3.98*10^13)*ROT^(-4.38)-
    0.268); % Função Handle: diâmetro de partícula em função do tempo
    específico de processamento - Equação 39

    Tmax=(80-T1)/((3.70*10^-6)*ROT^2-0.0132*ROT+15.78); % Tempo específico
    máximo de operação (temperatura atinge 80°C) - Equação 47

    fplot(DP,[0 Tmax]); % Plota a curva DP vs T

    DPf=DP(Tmax); % Tamanho médio de partícula após tempo específico igual
    a Tmax (nm).

    tmax=Tmax*(V*10^-3)*60; % Tempo máximo de processamento (minutos)

    fprintf('O diâmetro de partícula ao final do processo é de: %f\n',
    DPf)
    fprintf('O tempo máximo do processo é : %f\n', tmax)

end

```