

WEBER BIZARRIAS DE MELO

**EFEITOS DA PRESSÃO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO E
DA CONCENTRAÇÃO DE ETILENOGLICOL SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS DE CAVITAÇÃO DE UMA BOMBA
D'ÁGUA AUTOMOTIVA**

Disertação de Mestrado apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica

Área de concentração:
Energia e Fluidos

Orientador:
Prof. Dr. Douglas Lauria

SÃO PAULO

2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

WEBER BIZARRIAS DE MELO

**EFEITOS DA PRESSÃO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO E
DA CONCENTRAÇÃO DE ETILENO GLICOL SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS DE CAVITAÇÃO DE UMA BOMBA
D'ÁGUA AUTOMOTIVA**

Disertação de Mestrado apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica

Área de concentração:
Energia e Fluidos

Orientador:
Prof. Dr. Douglas Lauria

SÃO PAULO

2008

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

São Paulo, de setembro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Melo, Weber Bizarrias de

Efeitos da pressão do sistema de arrefecimento e da concentração de etilenoglicol sobre as características de cavitação de uma bomba d'água automotiva / W.B. de Melo. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.

117 p.

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

1.Cavitação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer, chegando ao final de mais uma etapa dos meus estudos e da minha vida.

À minha família, pelo suporte e apoio incondicional. Ao meu pai, por acreditar tanto nas possibilidades de construção ao longo da vida, e por me fazer buscar sempre essas possibilidades. A minha mãe por participar sempre de cada passo meu, e pelo amor e orientação ao longo do meu caminho, a minha irmã, pelo amor, cumplicidade e amizade que temos.

Ao Professor Douglas Lauria, por ter aceitado partilhar esse trabalho, pela paciência e orientação.

À divisão de bombas da Dana Corporation por ter sido onde tudo começou, e em especial ao Ayres de Andrade Filho, pelo apoio e pelos recursos cedidos.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo onde concluo mais uma etapa, por todas as oportunidades oferecidas e por todo o conhecimento nela disponibilizado.

“No meio de qualquer dificuldade encontra-se a oportunidade”.

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise do efeito da concentração da mistura etilenoglicol / água, pressão do sistema, rotação da bomba e temperatura, sobre o fenômeno cavitação em sistemas de arrefecimento, tendo dois principais objetivos:

1 – Explorar as principais características do fenômeno cavitação, através da análise crítica e citação de publicações existentes;

2 – Mapear as condições de trabalho de um sistema de arrefecimento, para então simular em bancada as interações da variação dos fatores citados acima, comparando os resultados com publicações já existentes, contribuindo então com um banco de dados que possibilite a otimização do dimensionamento de novos sistemas de arrefecimento.

ABSTRACT

This work presents the effect analysis of the water / ethyleneglycol mixture, system pressure, pump speed and temperature upon the cavitation phenomenon in cooling systems. Moreover, it has two main targets which are:

1 – To explore the main features of the cavitation phenomenon through a critical analysis and citation of available publications;

2 – To monitor the cooling system work conditions in order to simulate in a test rig the variation of the parameters described above, comparing the obtained results with reference papers, understanding its interaction, for than to provide a database that make possible the design optimization of new cooling systems.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 O Fenômeno Cavitação, os seus Danos e o Desempenho da Bomba	3
2.2 Efeitos da Mistura Água e Etilenoglicol, Temperatura do Fluido e Pressão do Sistema	14
3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ETILENOGLICOL NA TEMPERATURA DE CAVITAÇÃO	22
3.1 Medição dos Parâmetros de Trabalho do Sistema de Arrefecimento	22
3.2 Bancada de Teste	28
3.3 Simulação em bancada da temperatura de cavitação do sistema de arrefecimento	34
3.3.1 Condições de Teste.....	34
3.3.2 Análise de incertezas	35
3.4.1 Incertezas Associadas ao Mapeamento dos Parâmetros de Funcionamento do Sistema de Arrefecimento.....	36
3.4.2 Incertezas Associadas a Simulação em Bancada.....	37
Incerteza Composta Associada à Medição do Diferencial de Pressão: ...	37
3.4 Resultados	38
4. CONCLUSÕES.....	53
5. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	56
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A	60
ANEXO B	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ressurgimento das Bolhas – Adaptação de ELLIS (1966).....	4
Figura 2- Colapso de uma bolha de cavitação, próxima a uma superfície sólida. Adaptação de Brennen (2007).....	5
Figura 3- Ilustração de um Micro-Jato. Adaptação de Brennen (2007).....	5
Figura 4 – Desenvolvimento de um micro-jato. Lauterborn (2001)	6
Figura 5 – Bomba de um sistema de arrefecimento, que sofreu danos por cavitação. Imagens gentilmente cedidas por Lauria, D.....	7
Figura 6 – Capa do rotor danificada por cavitação. Imagem gentilmente cedida por MARIANI, A. L. C.	8
Figura 7 – Condição de Montagem da Bomba Danificada.....	8
Figura 8 - Monitoramento de pressões ao longo do colapso de uma bolha de cavitação.....	9
Figura 9 – Taxa Teórica de Erosão x NPSH.....	11
Figura 10 – Taxa de Erosão x NPSH, Chan (1988).....	12
Figura 11 – Curva de Perda de Massa ($\sigma = 0.015$) - Hattori (2006).	15
Figura 12 – Curvas de MDER - Hattori (2006).....	16
Figura 13 – Relação entre Temperatura e MDER máximo - Hattori (2006). 17	
Figura 14 – Intensidade de Cavitação em Função da Temperatura - Hosny (2006).	18
Figura 15– Intensidade de Cavitação em Função da Concentração de Etilenoglicol - Hosny (2006).	19
Figura 16 - Efeito da Concentração de Glicol na Erosão por Cavitação - Hosny (2006).	19
Figura 17 – Instrumentação do Motor	22
Figura 18 – Termopar Montado no By-Pass da Válvula Termostática.....	23
Figura 19 – Termopar Montado na Saída do Radiador.....	23
Figura 20 – Transdutor de Pressão	24
Figura 21 – Módulos para Conversão dos Sinais	24
Figura 22 – Ponto de Tomada das Pressões do Sistema.....	25

Figura 23 – Monitoramento de Pressões e Temperaturas do Sistema de Arrefecimento	26
Figura 24 – Bancada de Teste.....	28
Figura 25 - Reservatório, Válvula Proporcional, Resistências, e Linhas de Ar Comprimido e Água de Refrigeração.....	29
Figura 26 - Medidor de Vazão Eletromagnético.....	30
Figura 27 - Termopares e Transdutores de Pressão	30
Figura 28 - Dispositivo de Interface	31
Figura 29 - Motor e Inversor de Frequência.....	32
Figura 30 - Célula de Torque	32
Figura 31- Controladores	33
Figura 32 – Mistura de 50% Etilenoglicol e 50% água, com pressão de sistema de 50 kPa	40
Figura 33 – Temperatura de cavitação para a mistura 50% etilenoglicol e 50% água, a 50 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas	40
Figura 34 – Mistura de 50% Etilenoglicol e 50% água, com pressão de sistema de 15 kPa	41
Figura 35 – Temperatura de cavitação para a mistura 50% etilenoglicol e 50% água, a 15 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas	42
Figura 36 – Mistura de 30% Etilenoglicol e 70% água, com pressão de sistema de 50 kPa	43
Figura 37 – Temperatura de cavitação para a mistura 30% etilenoglicol e 70% água, a 50 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas.	43
Figura 38– Mistura de 30% Etilenoglicol e 70% água, com pressão de sistema de 15 kPa	44
Figura 39 – Temperatura de cavitação para a mistura 30% etilenoglicol e 70% água, a 15 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas.	45

Figura 40– 100% água, com pressão de sistema de 50 kPa.....	46
Figura 41 – Temperatura de cavitação para 100% água, a 50 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas.....	47
Figura 42 – 100% água, com pressão de sistema de 15 kPa.....	47
Figura 43 – Temperatura de cavitação para 100% água, a 50 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas.....	48
Figura 44 – Bomba a 5000 rpm e sistema com 50 kPa	49
Figura 46 – Bomba a 4000 rpm e sistema com 50 kPa	50
Figura 47 – Bomba a 4000 rpm e sistema com 15 kPa	51
Figura 48 – Bomba a 3000 rpm e sistema com 50 kPa	51
Figura 49 – Bomba a 3000 rpm e sistema com 15 kPa	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Associações Testadas	34
Tabela 2 – Fator de Abrangência.....	36
Tabela A1 – Incerteza combinada para 1000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	60
Tabela A2 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	61
Tabela A3 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	61
Tabela A4 – Incerteza combinada para 2000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	62
Tabela A5 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	62
Tabela A6 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	63
Tabela A7 – Incerteza combinada para 3000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	63
Tabela A8 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	64
Tabela A9 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 3000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	65
Tabela A10 – Incerteza combinada para 4000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	65
Tabela A11 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	66
Tabela A12 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	66
Tabela A13 – Incerteza combinada para 5000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	67
Tabela A14 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	68

Tabela A15 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 5000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.....	68
Tabela A16 – Incerteza combinada para 1000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	69
Tabela A17 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	69
Tabela A18 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	70
Tabela 19 – Incerteza combinada para 2000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	70
Tabela A20 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	71
Tabela A21 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	71
Tabela A22 – Incerteza combinada para 3000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	72
Tabela A23 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	72
Tabela A24 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 3000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	73
Tabela A25 – Incerteza combinada para 4000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	73
Tabela A26 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	74
Tabela A27 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	74
Tabela A28 – Incerteza combinada para 5000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	75
Tabela A29 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	75

Tabela A30 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 5000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.....	76
Tabela A31 – Incerteza combinada para 1000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.....	76
Tabela A32 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.	77
Tabela A33 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.	78
Tabela A34 – Incerteza combinada para 2000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.....	79
Tabela A35 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.	80
Tabela A36 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.	80
Tabela A37– Incerteza combinada para 3000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.....	81
Tabela A38– Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.	82
Tabela A39 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 3000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.	82
Tabela A40 – Incerteza combinada para 4000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.....	83
Tabela A41 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.	84
Tabela A42 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.	84
Tabela A43 – Incerteza combinada para 5000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.....	85
Tabela A44 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.	86

Tabela A45 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 5000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.	86
Tabela A46 – Incerteza combinada para 1000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.....	87
Tabela A46 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.	87
Tabela A47 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.	88
Tabela A48 – Incerteza combinada para 2000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.....	88
Tabela A49 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.	89
Tabela A50 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.	89
Tabela A51 – Incerteza combinada para 3000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.....	90
Tabela A52 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.	90
Tabela A53 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 3000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.	91
Tabela A54 – Incerteza combinada para 4000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.....	91
Tabela A55 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.	92
Tabela A56 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.	93
Tabela A57 – Incerteza combinada para 5000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.....	93
Tabela A58 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.	94

Tabela A59 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 5000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.	95
Tabela A60 – Incerteza combinada para 1000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.....	95
Tabela A61 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.	96
Tabela A62 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.	96
Tabela A63 – Incerteza combinada para 2000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.....	97
Tabela A64 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.	98
Tabela A65 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.	98
Tabela A66 – Incerteza combinada para 3000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.....	99
Tabela A67 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.	99
Tabela A68 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 3000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.	100
Tabela A69 – Incerteza combinada para 4000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.....	100
Tabela A70 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.	101
Tabela A71 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.	101
Tabela A72 – Incerteza combinada para 5000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.....	102
Tabela A73 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.	102

Tabela A74 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 5000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.	103
Tabela A75 – Incerteza combinada para 1000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.....	103
Tabela A76 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.	104
Tabela A77 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.	104
Tabela A78 – Incerteza combinada para 2000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.....	105
Tabela A79 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.	105
Tabela A80 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.	106
Tabela A81 – Incerteza combinada para 3000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.....	106
Tabela A82 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.	107
Tabela A83 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.	107
Tabela A84 – Incerteza combinada para 4000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.....	108
Tabela A85 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.	108
Tabela A86 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.	109
Tabela A87 – Incerteza combinada para 5000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.....	109
Tabela A88 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.	110

Tabela A89 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a
5000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema. 110

LISTA DE SÍMBOLOS

R_m	resiliência máxima
σ	tensão de ruptura
E	módulo de elasticidade
ω	trabalho feito para causar a fratura
σ	tensão de ruptura
L	deformação
p	pressão estática
C_p	coeficiente de pressão
ρ	massa específica
p_1	pressão na entrada
U	velocidade na ponta da pá na aresta de sucção
Ω	velocidade angular
R_{T1}	raio da aresta de sucção
σ	número de cavitação
NPSP	net positive suction pressure
NPSE	net positive suction energy
p_v	pressão de vapor
p_1^T	pressão total na entrada
σ_i	ponto de início de cavitação
MDER	profundidade média da taxa de erosão
ΔP	diferença de pressão

DP5%	representa queda de 5% no diferencial de pressão
DP10% pressão	representa queda de 10% no diferencial de
α	exatidão do instrumento
k	fator de abrangência
u	incerteza
u_T	incerteza associada ao termopar
u_p	incerteza associada ao transdutor de pressão
u_c	incerteza combinada
Dp	diferencial de pressão
S	coeficiente de sensibilidade
Sp_1 entrada	coeficiente de sensibilidade para a pressão de
Sp_2 saída	coeficiente de sensibilidade para a pressão de

1. INTRODUÇÃO

Os avanços no projeto e manufatura dos motores de combustão interna têm aumentado gradualmente sua eficiência térmica e a temperatura de combustão nos cilindros. Tal fato exige uma maior atenção para o sistema de arrefecimento do motor.

Até a década de 70, os sistemas de arrefecimento eram abertos, com a água neles em circulação sendo reposta regularmente. Com a evolução dos motores passou-se a usar sistemas de arrefecimento fechados, com reservatórios intermediários de expansão e válvulas termostáticas visando permitir a operação dos motores nas temperaturas mais altas possíveis. Com o novo sistema, a retirada de calor do motor somente acontece se a temperatura ultrapassa um determinado valor limite, quando abre-se a válvula termostática e o fluido é circulado pelo sistema. Com isso, a água pura deixou de ser viável como fluido refrigerante para estes sistemas. O novo fluido aplicado nos sistemas de arrefecimento de motores de combustão interna é constituído por uma mistura de água e etilenoglicol, onde o último tem a função de aumentar a temperatura de ebulição e baixar a temperatura de congelamento da mistura. O sistema de arrefecimento é pressurizado pela expansão térmica do fluido de arrefecimento e o recipiente de expansão é equipado com válvula de alívio que limita a pressão interna do sistema em torno de 140 kPa (pressão efetiva).

Os maiores problemas para um sistema de arrefecimento estão relacionados com a vaporização do líquido no seu interior e a potencial ocorrência de cavitação. Esta será consequência de baixas pressões em regiões definidas do circuito de arrefecimento.

Esta dissertação objetiva estudar o fenômeno de cavitação em bombas aplicadas em sistemas de arrefecimento. Objetiva ainda analisar crítica e experimentalmente os parâmetros de funcionamento de sistemas de

arrefecimento, sob o aspecto da potencialidade de ocorrência de cavitação ao se associar diferentes pressões de sistema e temperaturas, utilizando-se diferentes misturas de água e etilenoglicol.

Tais fatos serão verificados através da revisão bibliográfica de publicações referentes ao estudo do fenômeno cavitação e a análise experimental das diferentes pressões do sistema encontradas nos variados regimes de utilização de um veículo, determinando-se então as temperaturas de cavitação para diferentes misturas de água e etilenoglicol.

A dissertação está dividida em quatro capítulos para apresentar de forma seqüencial o desenvolvimento do estudo.

O Capítulo 1 é a introdução do trabalho e apresenta o contexto na qual se insere o estudo.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, que em sua primeira parte aborda a fundamentação e as principais características do fenômeno cavitação e na segunda parte explora os efeitos da mistura etilenoglicol-água, da temperatura e da pressão do sistema de arrefecimento na ocorrência de cavitação.

O Capítulo 3 apresenta o mapeamento das condições de operação de um sistema de arrefecimento, a descrição da bancada de teste utilizada e os resultados das simulações experimentais propostas nesse estudo.

No capítulo seguinte, o Capítulo 4, é apresentada a conclusão do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos sobre cavitação e sua interação no funcionamento de bombas centrífugas estão disponíveis na literatura. Estes trabalhos levam em consideração aspectos como as circunstâncias de sua ocorrência, os possíveis danos resultantes e seu efeito sobre o comportamento da bomba. Tais publicações apresentam a caracterização do fenômeno e avaliações sobre seu efeito no sistema de arrefecimento de motores de combustão interna ao se adicionar etilenoglicol à água.

Alguns destes trabalhos serão apresentados a seguir, separados entre a caracterização do fenômeno de cavitação e a abordagem específica dos efeitos do etilenoglicol, da temperatura do fluido e da pressão do sistema sobre sua ocorrência.

2.1 O Fenômeno Cavitação, os seus Danos e o Desempenho da Bomba

Cavitação é o processo de vaporização de líquido em regiões de baixa pressão. Apesar de ser um fenômeno dinâmico, associado ao escoamento no circuito de arrefecimento, pode-se admitir que a cavitação ocorra quando a pressão no líquido de arrefecimento atinge a pressão de vapor para a temperatura local do sistema.

Entre 1930 e 1940, Robert Knapp, professor do Instituto de Tecnologia da Califórnia, construiu a primeira câmara de alta velocidade com condições para registrar o processo de cavitação e implosões das bolhas. Em um túnel de água, ele posicionou a câmara em frente a uma região de baixa pressão. As bolhas surgiam gradualmente ao entrar nessa região, e colapsavam violentamente ao sair dela.

A ação nefasta da cavitação ocorre quando a bolha, ao alcançar campos de maior pressão, colapsa próximo a uma superfície sólida levando à sua erosão.

Quando uma bolha colapsa, ela ressurge algumas vezes, como mostrado na figura 1. Uma bolha é constituída, em sua maior parte, por vapor de líquido que condensa quando ocorre o colapso, mas também existe na bolha uma pequena parcela de ar que pode ser comprimido, mas não pode ser eliminado. Ele eventualmente é comprimido até certo limite e então retorna a um volume prévio, fazendo com que a bolha ressurja e se divida formando uma nuvem de pequenas bolhas.

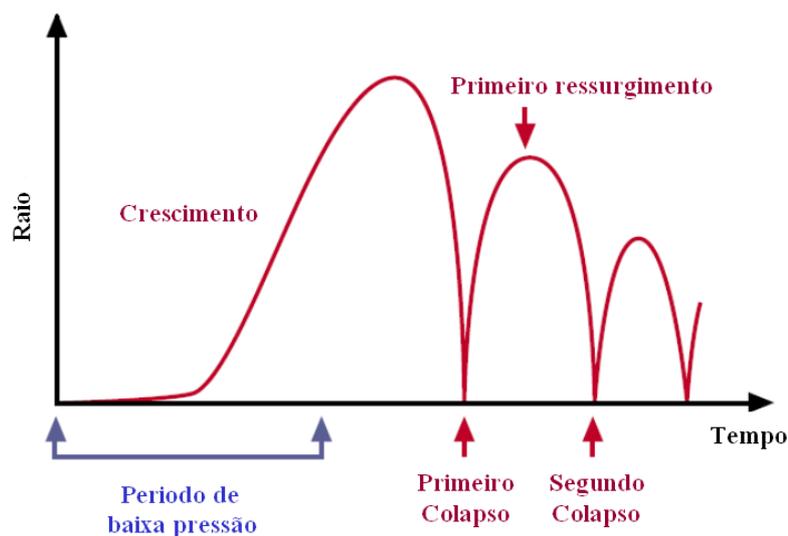


Figura 1 – Ressurgimento das Bolhas – Adaptação de ELLIS (1966)

Quando o colapso ocorre próximo a uma superfície sólida, BENJAMIN e ELLIS (1966) observaram o desenvolvimento e a formação de um micro-jato que invade a bolha a partir do ponto mais distante da superfície sólida, conforme mostra a figura 2. Esse micro-jato alcança altas velocidades, de forma que o impacto do outro lado da bolha gera ondas de choque e o carregamento localizado na superfície próxima. Brennen (2007) entende que o micro-jato se forma porque o lado da bolha próximo à superfície sólida colapsa de forma mais lenta que o restante da bolha, pois fluido tem que se

mover ao longo da superfície para ocupar o volume anteriormente tomado pela bolha, enquanto que de qualquer outra direção o fluido se move diretamente.

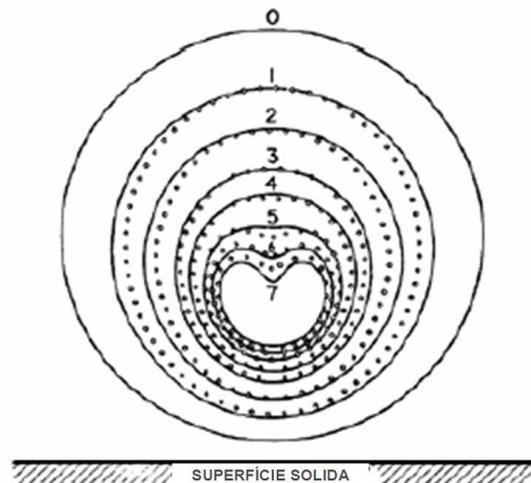


Figura 2- Colapso de uma bolha de cavitação, próxima a uma superfície sólida. Adaptação de Brennen (2007)

A Figura 3 ilustra a forma assimétrica do colapso de um micro-jato. O micro-jato é a coluna fina e escura indicada por uma seta no centro da bolha. A grande protuberância é o jato atravessando o fundo da bolha.

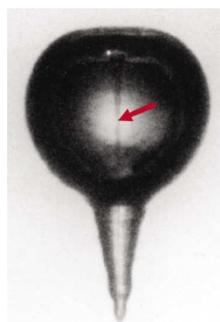


Figura 3- Ilustração de um Micro-Jato. Adaptação de Brennen (2007).

LAUTERBORN (2001) investiga a estrutura desses micro-jatos, através da observação do colapso de bolhas de cavitação com uma câmera de alta velocidade e avalia sua formação e consistência. Em seu artigo, Lauterborn

conclui que o micro-jato é formado por minúsculas bolhas de cavitação que emergem das ondas de choque do colapso.

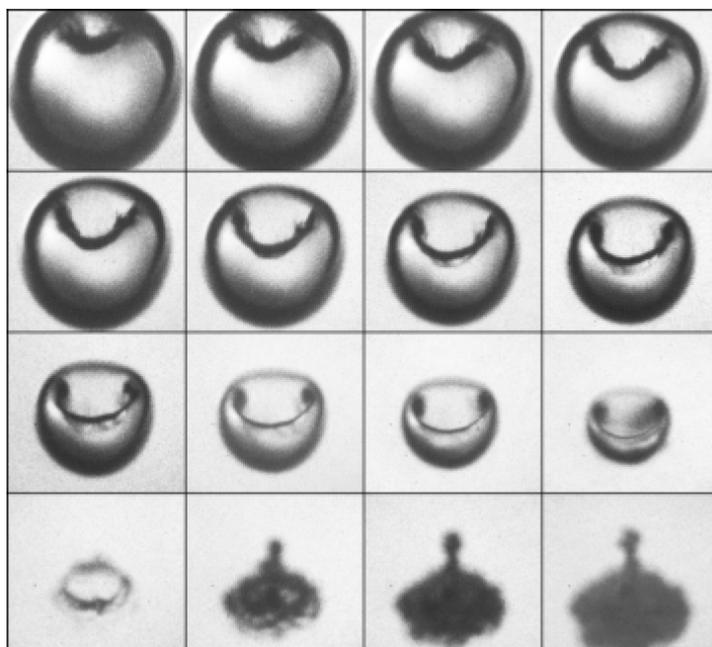


Figura 4 – Desenvolvimento de um micro-jato. Lauterborn (2001)

O desenvolvimento de um micro-jato durante o colapso de uma bolha de cavitação é visto na figura 4. Na primeira seqüência de fotos, a forma da bolha se aproxima de uma esfera. Ela tem uma superfície suave, com uma depressão no lado oposto à superfície sólida. Nessa seqüência de fotos, a bolha tem um raio de 0,6 mm e seu volume foi contraído a 6% da condição inicial. Nas seqüências seguintes, com a progressão do colapso, o volume da bolha diminui ainda mais. A depressão aumenta e forma o micro-jato que penetra na bolha em direção à superfície sólida. Instantes antes da primeira imagem da quarta linha, o jato rompe a parede inferior da bolha. A bolha então tem o formato de um fino anel. Na segunda imagem da quarta linha, a bolha está ressurgindo. O Micro-jato se desenvolveu e é visível no topo da bolha. Lauterborn não consegue discernir se o jato e a bolha são conectados ou não.

O resultado das ondas de choque e dos microjatos é um processo violento que gera tensões superficiais localizadas. A repetição desse processo pode causar falhas por fadiga em pontos da superfície sólida e o desprendimento de pedaços do material. Diferentemente da erosão causada por partículas sólidas presentes no escoamento, onde a superfície parece estar levemente desgastada e com riscos, os danos por cavitação têm a aparência cristalina e irregular de falhas por fadiga.

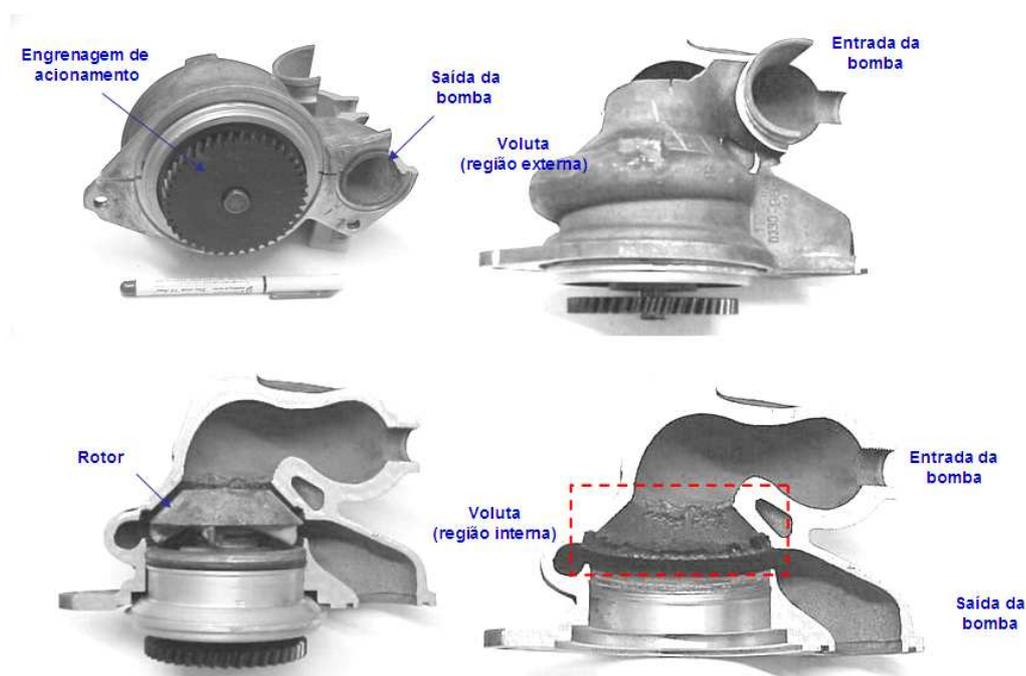


Figura 5 – Bomba de um sistema de arrefecimento, que sofreu danos por cavitação. Imagens gentilmente cedidas por Lauria, D.

A Figura 5 ilustra essa condição mostrando danos por cavitação localizada na carcaça de uma bomba d'água de um motor de combustão interna fabricada em alumínio. A engrenagem aciona o eixo do rotor, e a saliência ao lado direito da engrenagem é à saída da bomba. O canto superior direito apresenta a entrada da bomba e a área externa de sua voluta, compreendida entre a engrenagem de acionamento e a entrada da bomba. Uma vista da bomba em corte é apresentada no canto inferior direito, onde é

possível identificar o rotor, a secção transversal da voluta e das galerias de admissão e saída. No canto inferior direito, a região identificada em vermelho mostra o local onde os danos por cavitação ocorreram.

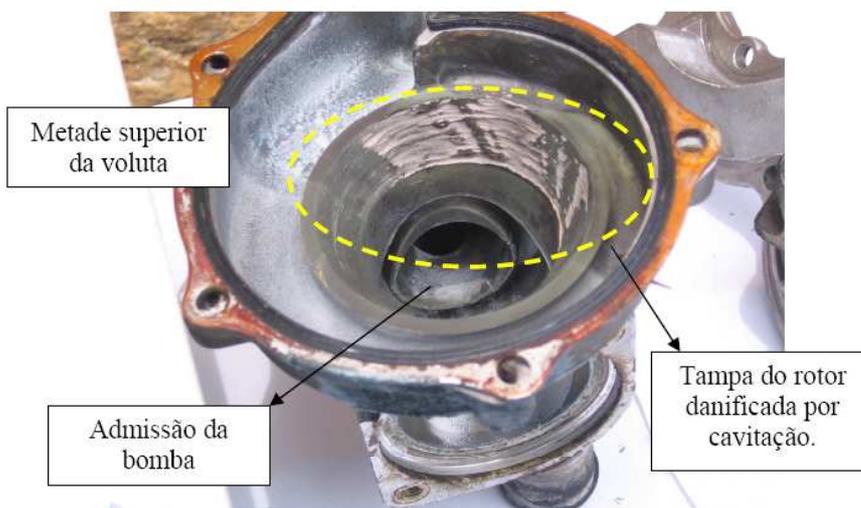


Figura 6 – Capa do rotor danificada por cavitação. Imagem gentilmente cedida por MARIANI, A. L. C.

A Figura 6 indica a parte superior da voluta de uma bomba de um motor de combustão interna, cuja tampa do rotor sofreu danos por cavitação. Logo acima encontra-se a admissão da bomba. A Figura 7 mostra as duas metades da bomba cavitada, de forma a propiciar um melhor entendimento da localização dos danos.

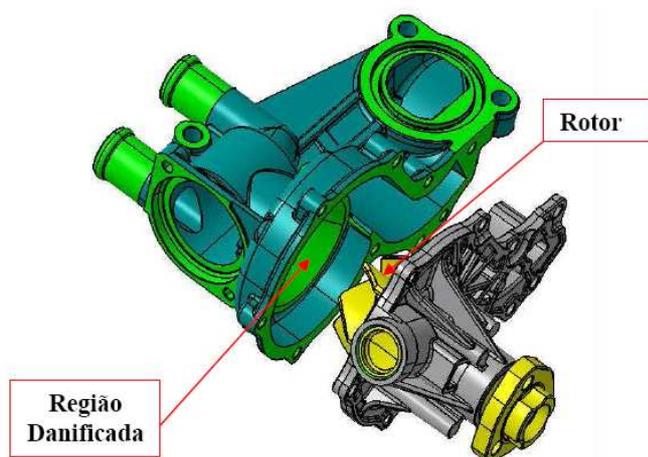


Figura 7 – Condição de Montagem da Bomba Danificada

A pressão de impacto gerada pelo colapso de bolhas de cavitação tem sido alvo de inúmeros estudos. A figura 8 apresenta o resultado do trabalho de TOMITA, SHIMA, TAKAYAMA E OHSAWA (1983), onde uma série de fotografias do colapsar de uma bolha de cavitação ao longo da correspondente pressão na superfície sólida próxima da bolha são correlacionados. As medições indicam que as maiores pressões se deram quando a bolha atingiu seu menor volume. Este instante ocorre entre as imagens 6 e 7.

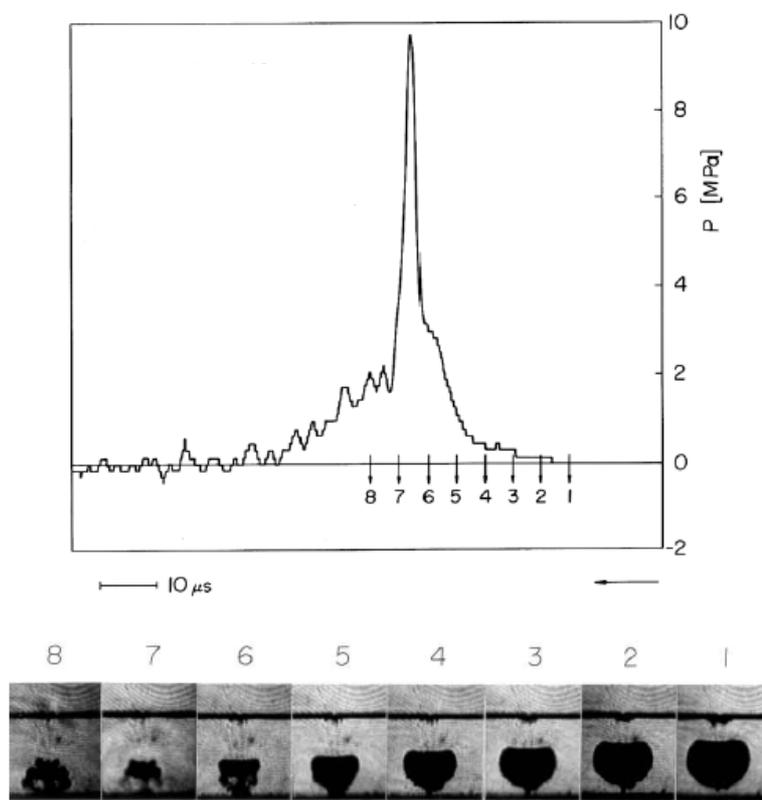


Figura 8 - Monitoramento de pressões ao longo do colapso de uma bolha de cavitação

Segundo IWAI (2000), a resistência à erosão por cavitação não apresenta uma boa correlação com uma única propriedade mecânica, tal como tensão de ruptura ou dureza. Entretanto, uma correlação muito melhor pode ser obtida com a resiliência máxima,

$$Rm = \frac{1}{2} \frac{\sigma_r^2}{E}, \quad (1)$$

ou pelo trabalho realizado para causar a fratura,

$$\omega r = \sigma \frac{2}{3} (\sigma_r - \sigma) L, \quad (2)$$

Porém, ainda segundo Iwai (2000), nenhum relacionamento unificado, que se repete sem exceções para uma vasta gama de materiais foi encontrado até agora. Presume o autor que isso se deve ao fato de que o colapso de uma bolha de cavitação age em uma área muito pequena, o que faz alguns materiais desviarem de correlações de propriedades mecânicas que são determinadas através de avaliações de corpos de prova que envolvem uma porção maior do material. Um exemplo disso seria o ferro fundido, que apresenta uma resistência micro-escalar menor do que a encontrada quando se avalia um corpo de prova. Em adição, materiais como os aços inoxidáveis desviam das correlações porque a micro-estrutura de sua superfície muda devido à ação repetida de pequenos impactos.

A ocorrência de cavitação não implica necessariamente na ocorrência de erosão. A detecção do exato momento em que a erosão se inicia ainda é imprevisível devido às complexidades das condições de escoamento e da inabilidade de se analisar ou modelar essas condições.

O índice de 3% de diminuição da altura manométrica é normalizado e entendido como limite de trabalho pela grande maioria dos fabricantes de bombas, mesmo se sabendo que a cavitação se inicia antes desse ponto. Evitar a cavitação completamente torna-se muitas vezes impraticável, devido ao fato do dimensionamento da entrada da bomba ser limitado ao espaço disponível,

Chan (1988) questiona o índice de 3%. Ele conduziu experimentos e mostrou que abaixo de um NPSH crítico (o termo NPSH será detalhado logo abaixo), a taxa de erosão aumenta, para depois diminuir, e então aumentar definitivamente para um NPSH decrescente. O experimento foi conduzido através da pintura e traçagem de uma malha de 5 mm x 5 mm nas superfícies das pás de um rotor, de forma que a região atacada pela cavitação fosse facilmente identificada. Para uma dada vazão, o NPSH foi diminuído de forma que a cavitação se iniciasse, seguido da queda de 3% na altura manométrica. O método estabelece que quando a cavitação se inicia a um determinado NPSH, a taxa de erosão é zero, e quando o NPSH é diminuído abaixo deste ponto, a taxa de erosão aumenta, como é representado na Figura 9.

Os resultados encontrados por Chan são expressos na Figura 10, onde é possível visualizar a existência de uma taxa máxima e uma taxa mínima de erosão entre os pontos de início de cavitação e o de redução de 3% na altura manométrica.

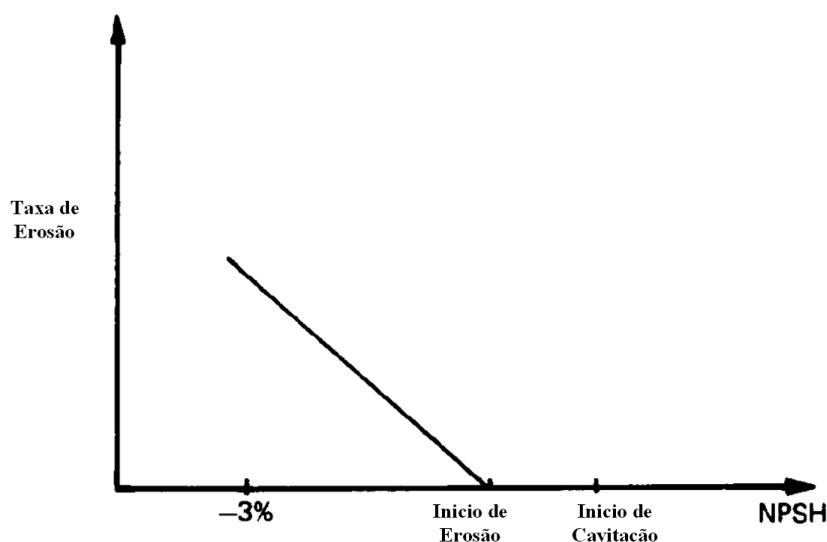


Figura 9 – Taxa Teórica de Erosão x NPSH

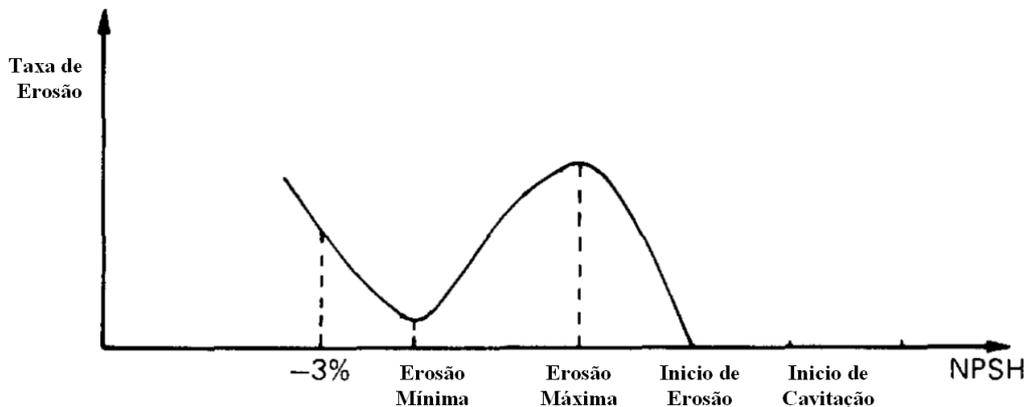


Figura 10 – Taxa de Erosão x NPSH, Chan (1988)

Brennen (1994) detalha os parâmetros de cavitação da seguinte forma:

A pressão estática (p) é normalmente expressa por um número adimensional chamado de coeficiente de pressão (C_p), definido como

$$C_p = (p - p_1) / \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (3)$$

onde p_1 é pressão na entrada da bomba e U a velocidade na ponta da pá na aresta de sucção dado por ΩR_{T1} onde Ω é a velocidade angular e R_{T1} é o raio da aresta de sucção. Na ausência de cavitação a velocidade do fluido e o coeficiente de pressão são independentes do nível de pressão. Por exemplo, uma mudança na pressão de entrada (p_1), irá simplesmente resultar em uma mudança igual em todas as outras pressões, não afetando C_p . Dessa forma, para qualquer escoamento haverá uma localização particular para a qual a pressão p é mínima e a diferença entre essa pressão mínima (p_{min}) e a pressão de entrada (p_1) será dada por:

$$C_{p_{min}} = (p_{min} - p_1) / \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (4)$$

Ainda segundo Brennen (1994), se o valor de $C_{p\min}$ puder ser obtido de forma teórica ou experimental, então é possível estabelecer o valor para a pressão de entrada (p_1) para a qual a cavitação se iniciaria, admitindo-se que isso ocorre quando $p_{\min} = \text{pressão de vapor } (p_v)$.

$$(p_1)_{\text{Iniciada cavitação}} = p_v + \frac{1}{2} \rho U^2 (-C_{p\min}) \quad (5)$$

Muitos parâmetros adimensionais são usados para avaliar o potencial para a ocorrência de cavitação. Um dos mais fundamentais seria o Número de Cavitação (σ), definido por:

$$\sigma = (p_1 - p_v) / \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (6)$$

Claramente todo escoamento tem um valor para o número de cavitação ocorrendo ou não cavitação. Existe porém, um valor específico para o número de cavitação correspondente a uma pressão de entrada particular (p_1) para a qual a cavitação ocorre conforme a pressão é diminuída. Esse valor é chamado de número de início de cavitação, denotado por σ_i :

$$\sigma_i = \left[(p_1)_{\text{Iniciada cavitação}} - p_v \right] / \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (7)$$

Se o início da cavitação ocorre quando $p_{\min} = p_v$, então combinando as equações (3) e (5), fica claro que por esse critério o número de início de cavitação corresponde a $\sigma_i = -C_{p\min}$.

Outros parâmetros de cavitação são freqüentemente utilizados. O NPSP (*Net Positive Suction Pressure*) é o acrônimo para $(p_1^T - p_v)$, onde p_1^T é a pressão total na entrada, dado por:

$$p_1^T = p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (8)$$

O NPSE (*Net Positive Suction Energy*) é definido por $(p_1^T - p_v) / \rho$, e o NPSH (*Net Positive Suction Head*) por $(p_1^T - p_v) / \rho g$, sendo esse último um dos mais utilizados.

2.2 Efeitos da Mistura Água e Etilenoglicol, Temperatura do Fluido e Pressão do Sistema

Hattori (2005) estuda a influência da temperatura da água na erosão por cavitação. Ele conduziu testes de erosão a várias temperaturas, mantendo o número de cavitação constante através da compensação da pressão à medida que a temperatura aumentava. O corpo de prova foi pesado a cada 10 minutos e o teste continuou até que a taxa de erosão chegasse ao máximo, para então começar a cair.

A Figura 11 mostra a curva determinada por Hattori ao utilizar um corpo de prova de cobre puro, mantendo um número de cavitação de $\sigma = 0.015$.

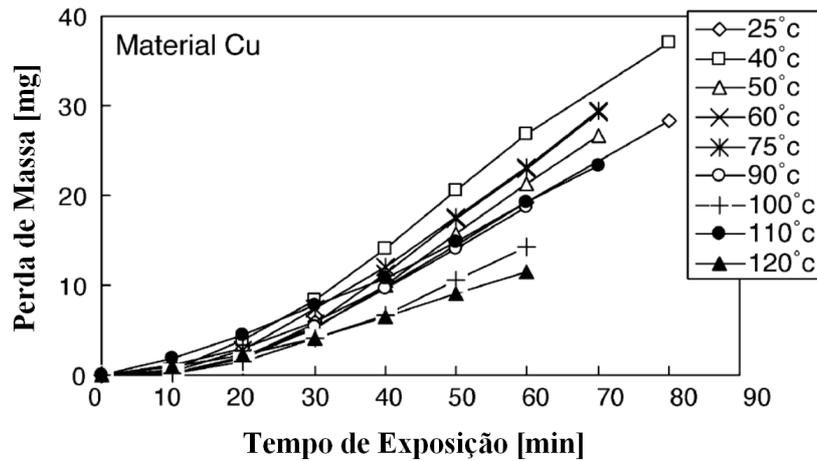


Figura 11 – Curva de Perda de Massa ($\sigma = 0.015$) - Hattori (2006).

Em sua avaliação Hattori considera um parâmetro chamado MDER (Mean *Depth of Erosion Rate* ou Profundidade Média da Taxa de Erosão), definido pela perda de massa dividida pela massa específica do material, área erodida e intervalo de tempo de exposição.

As Figuras 12 (a) e (b) mostram os resultados para os números de cavitação $\sigma = 0,015$ e $0,02$. Para $\sigma = 0,015$, as curvas de MDER mostram um aumento gradual. Após alcançar o pico em torno de 45 min, o MDER parece estabilizar.

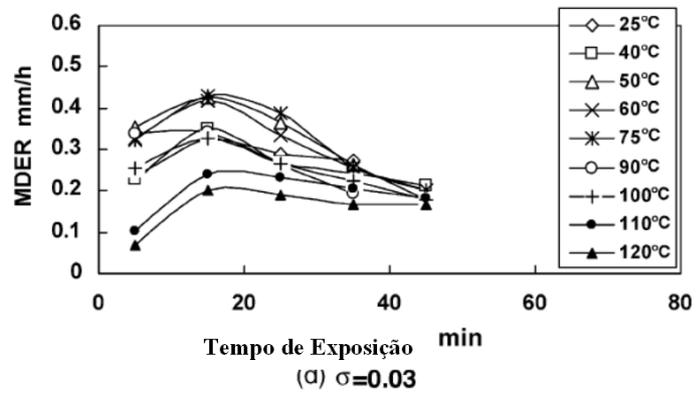
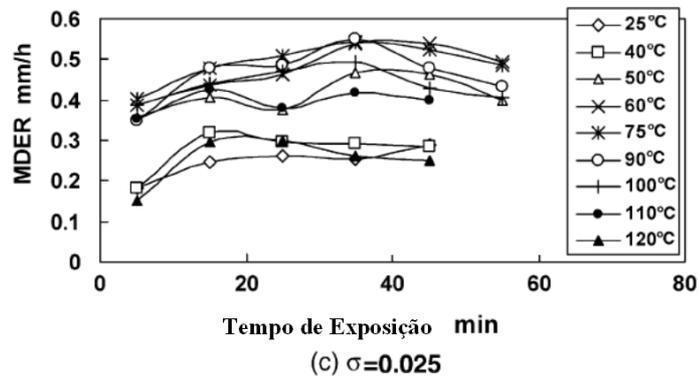
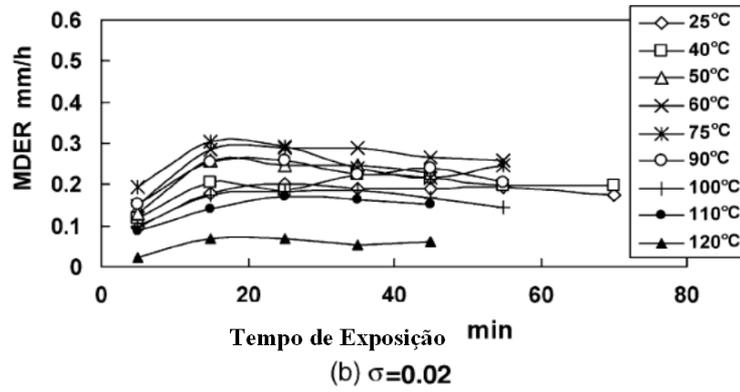
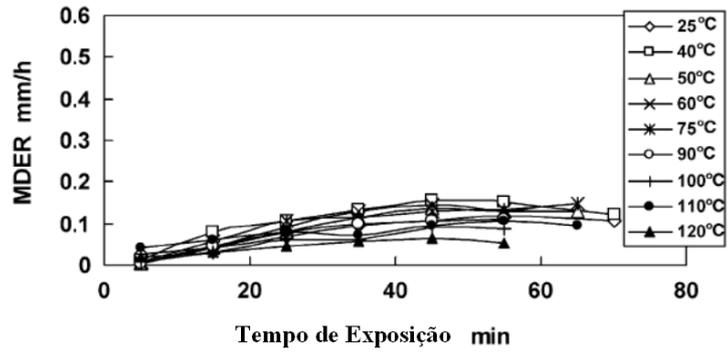


Figura 12 – Curvas de MDER - Hattori (2005).

Para $\sigma = 0,020$, a área erodida é próxima daquela encontrada para $\sigma = 0,015$, entretanto o tempo para alcançar o pico é menor, em torno de 15 min. O tempo para alcançar o pico em 40 °C é prolongado para algo próximo de 45 min. O MDER a 120 °C é muito menor que o encontrado a 110 °C.

As Figuras 12 (c) e (d) mostram as curvas de MDER para os números de cavitação $\sigma = 0,025$ e $0,030$, respectivamente. Para $\sigma = 0,025$, o MDER alcança a taxa máxima após um período de 15 min. Apesar de a curva apresentar flutuações, ela permanece constante até o período de 60 min. O MDER aumenta com a temperatura do líquido até 90 °C, e diminui quando acima de 100 °C.

Para $\sigma = 0,030$, o MDER alcança o pico em 15 min, seguido de uma diminuição. O MDER aumenta com temperaturas do líquido entre 50 e 75 °C, mas diminuí para temperaturas maiores. O MDER máximo foi definido como o valor máximo de uma curva de MDER mostrado na Figura 13.

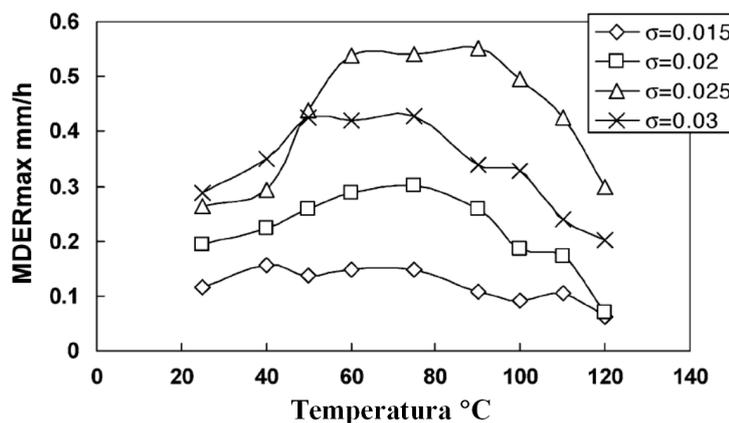


Figura 13 – Relação entre Temperatura e MDER máximo - Hattori (2005).

A Figura 13 mostra a relação entre a temperatura do líquido e o MDER_{max}. O MDER max aumenta gradativamente com a temperatura, e alcança um pico a 75 °C, seguido de um decréscimo gradual. O comportamento do MDER_{max}

para $\sigma = 0,020$ é praticamente o mesmo que para $\sigma = 0,015$, porém o valor para $\sigma = 0,020$ é próximo do dobro do valor para $\sigma = 0,015$. O pico de valor para $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ é 1.6 vezes maior que para $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. O comportamento do MDER_{max} para $\sigma = 0,025$, mostra uma tendência similar ao $\sigma = 0,020$. O pico do MDER_{max} muda para a temperatura de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. O pico para $\sigma = 0,025$ é em torno de 1.8 vezes maior que para $\sigma = 0,020$. O pico para $\sigma = 0,030$ volta a cair para $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, e é 0,78 vezes menor que para $\sigma = 0,025$.

Hosny (1996), através de um método de monitoramento das emissões acústicas resultantes das implosões das bolhas durante o processo de cavitação, encontra um resultado similar ao de Hattori, ao avaliar a intensidade de cavitação, medida em dB, em função da temperatura. Hosny conduz o experimento utilizando água como fluido de teste, e seus resultados são mostrados na Figura 14.

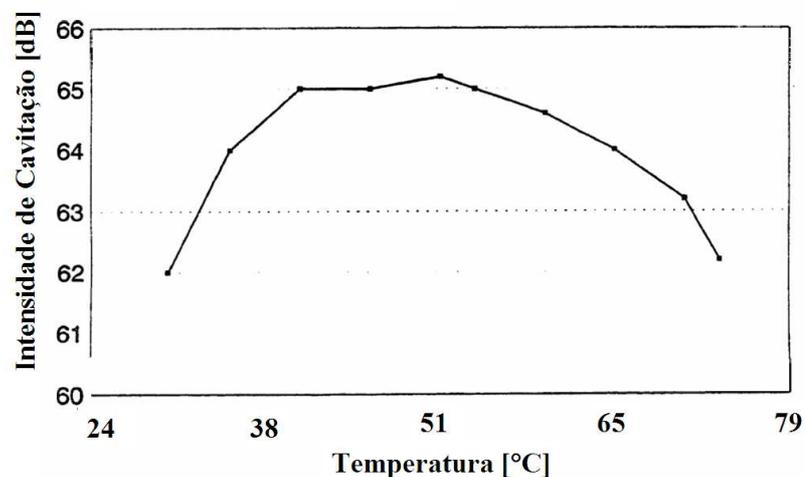


Figura 14 – Intensidade de Cavitação em Função da Temperatura - Hosny (1996).

Hosny (1996) estuda também a intensidade de cavitação e avalia a perda em massa de material, utilizando um corpo de prova de ferro fundido ao se

trabalhar com condições iguais às de cavitação, porém com diferentes concentrações da mistura água/etilenoglicol. Seus resultados são apresentados nas Figuras 15 e 16.

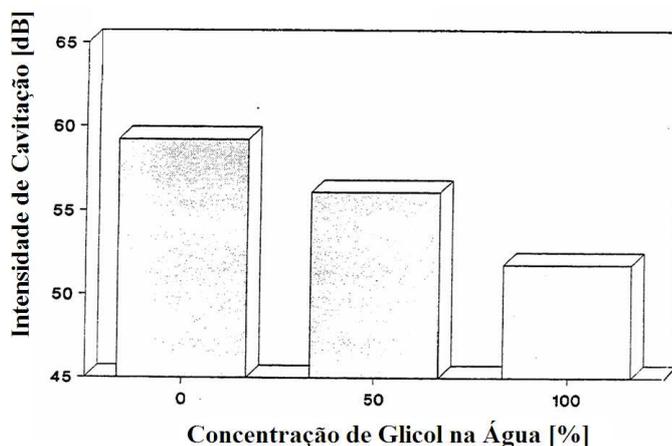


Figura 15– Intensidade de Cavitação em Função da Concentração de Etilenoglicol - Hosny (1996).

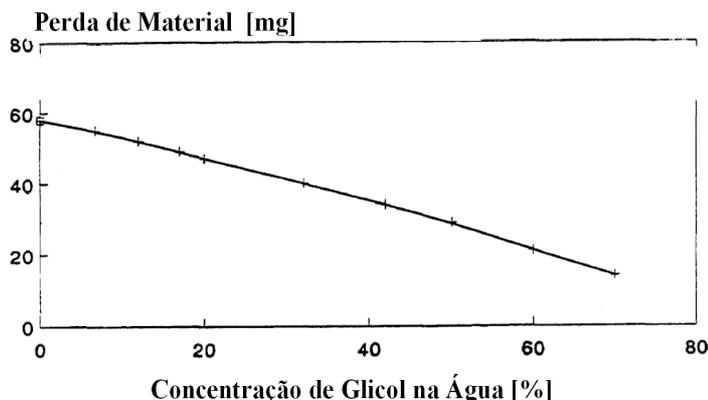


Figura 16 - Efeito da Concentração de Glicol na Erosão por Cavitação - Hosny (1996).

Com o objetivo de estudar os critérios para a ocorrência e prevenção de cavitação em bombas d'água aplicadas no mercado automotivo, Kim (2000) realiza em bancada observações do fenômeno de cavitação ao se utilizar como fluido de arrefecimento, uma mistura de 50% água e 50% etilenoglicol. O teste foi conduzido controlando e avaliando varias pressões de sistema e temperaturas do fluido. O estudo mostra a dependência desses dois fatores

na ocorrência de cavitação e avalia o efeito da cavitação sobre a eficiência e o desempenho da bomba.

A temperatura de cavitação em uma bomba d'água aplicada no sistema de arrefecimento de um motor de combustão interna é estudada por Huang (2004), usando três fluidos diferentes: 100% água, 50% etilenoglicol e 50% água, e 100% etilenoglicol, em diversas rotações de trabalho. Seus testes concluem que, apesar da excelente condutividade térmica, a água é muito mais propensa à formação de bolhas de vapor devido ao fato de ter um ponto de ebulição menor que o etilenoglicol. Com isso a temperatura de cavitação da bomba d'água trabalhando com esse fluido é relativamente baixa. Em contraste, o fluido de arrefecimento contendo 100% etilenoglicol tem uma condutividade térmica menor, mas é menos suscetível à formação de bolhas de vapor devido a seu maior ponto de ebulição. Dessa forma, tanto o ponto de ebulição, como a capacidade de prevenir cavitação aumentam com o percentual de etilenoglicol. Neste artigo, também se conclui que a mistura 50% água e 50% etilenoglicol tem um comportamento similar a 100% água, de forma que a temperatura de cavitação aumenta somente quando o percentual de etilenoglicol excede 50%. O autor entende que a pressão do sistema é um dos principais fatores para a ocorrência de cavitação, porém ele não controla esse parâmetro em seu experimento, de forma que a mesma varia ao longo do teste em função das mudanças de temperatura.

Pode-se observar que diversos trabalhos já foram desenvolvidos visando estudar, de forma ampla ou específica, o comportamento e os efeitos do fenômeno de cavitação. Alguns trabalhos se dedicam ao estudo da influência da temperatura e da pressão do sistema na geração de cavitação, além de avaliar a sua influência sobre a eficiência e desempenho da bomba. Outros trabalhos têm como objetivo principal estudar o efeito de diferentes misturas de água e etilenoglicol no fenômeno de cavitação, ao se trabalhar em variadas temperaturas. Esses estudos avaliam os três fatores de maior

influência no controle da cavitação em sistemas de arrefecimento. Estes fatores são a pressão de vapor do fluido, a pressão e a temperatura do sistema de arrefecimento. Entretanto, nenhum dos trabalhos encontrados apresenta resultados de ensaios onde esses três parâmetros são controlados simultaneamente.

3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ETILENOGLICOL NA TEMPERATURA DE CAVITAÇÃO

3.1 Medição dos Parâmetros de Trabalho do Sistema de Arrefecimento

Com o intuito de analisar o comportamento e as variações de temperatura e pressão do sistema de arrefecimento, um veículo equipado com um motor 1,8L e que utiliza gasolina como combustível foi instrumentado de acordo com o esquema da Figura 17.

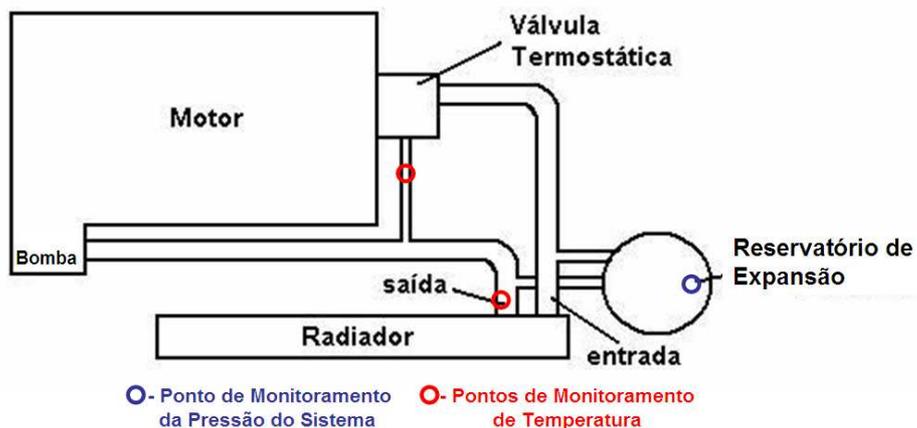


Figura 17 – Instrumentação do Motor

A válvula termostática tem a função de prover um aquecimento rápido do motor e de controlar a sua temperatura, fazendo com que o fluido de arrefecimento não circule pelo radiador até atingir uma temperatura em torno de 90 °C. Como o sistema é fechado, sua pressão varia em função da variação de sua temperatura.

- Transdutores de pressão piezoelétricos, com faixa de trabalho de -1 a 20 bar, exatidão de 99,7 %, fabricados pela empresa Novus Eletronics. A Figura 20 ilustra o transdutor utilizado;



Figura 20 – Transdutor de Pressão

- Módulo FP-AI-110, fabricado pela National Instruments, que mede os sinais de 4 a 20 mA enviados pelo transdutor de pressão e retorna valores escalares para o software de monitoramento. Módulo FP-TC-120, fabricado pela National Instruments, específico para receber sinais de termopares, e retorná-los como valores escalares para o software de monitoramento. A Figura 21 ilustra esses equipamentos.

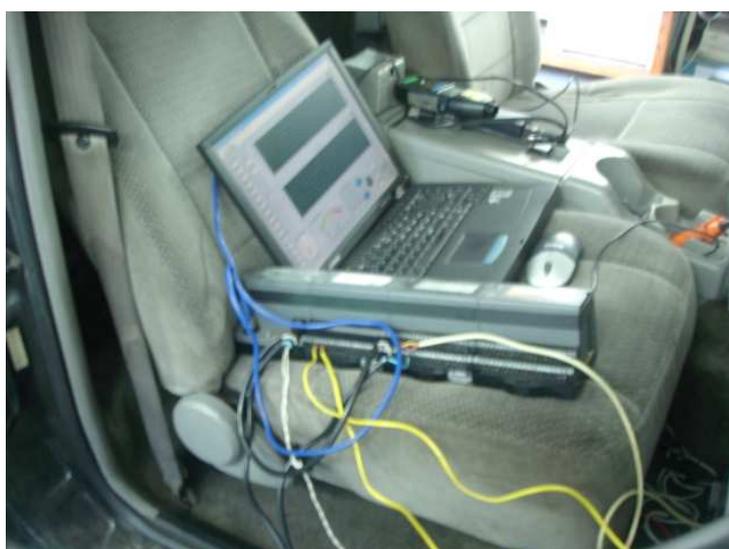


Figura 21 – Módulos para Conversão dos Sinais

- Software de monitoramento LabView 7.1, desenvolvido pela National Instruments, que recebe, trata e apresenta os resultados.

A Figura 22 identifica com um círculo tracejado o ponto onde a pressão do sistema foi medida.



Figura 22 – Ponto de Tomada das Pressões do Sistema

A Figura 23 apresenta o resultado do monitoramento do veículo ao trafegar em condições variadas de estrada e cidade. As informações foram armazenadas a cada 5 segundos.

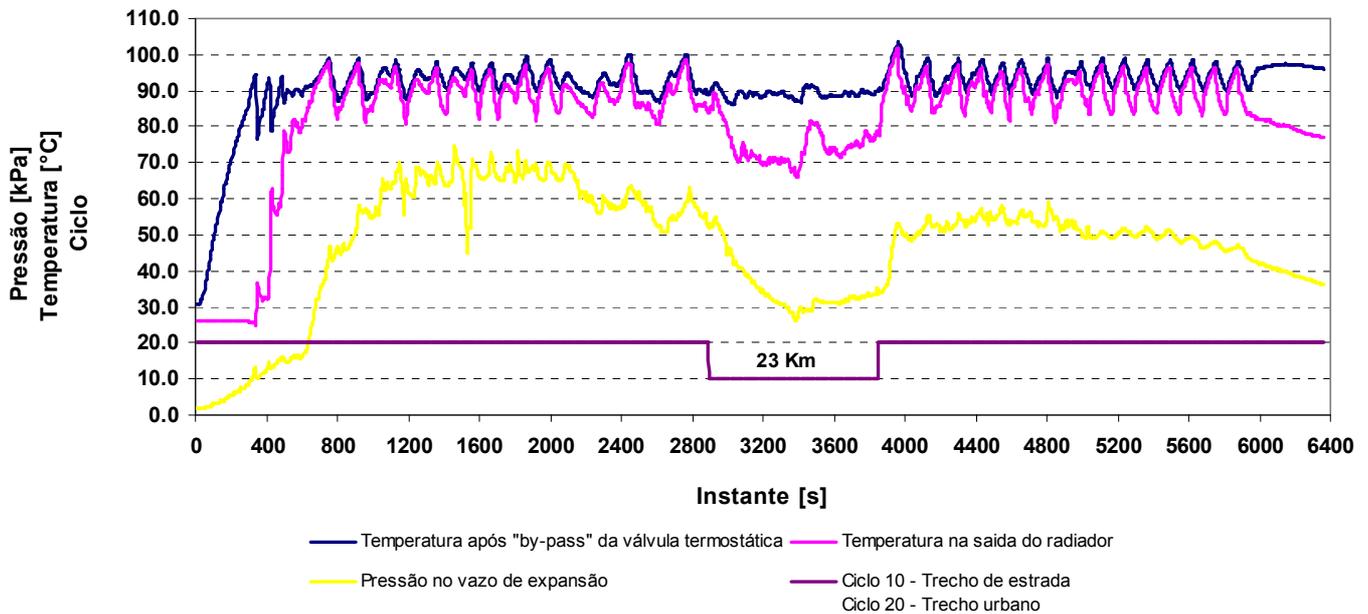


Figura 23 – Monitoramento de Pressões e Temperaturas do Sistema de Arrefecimento

As medições se iniciam poucos instantes após a partida do motor, quando a temperatura na saída da válvula termostática está em torno de 30 °C, a temperatura na saída do radiador 26 °C, e a pressão no reservatório de expansão é igual à atmosférica.

A temperatura na saída da válvula termostática aumenta continuamente até o instante 345 s, quando esta válvula se abre a 94°C, liberando a passagem do fluido de arrefecimento.

A partir deste ponto a válvula passa a atuar abrindo e fechando a passagem para o radiador. No instante 757s a temperatura na saída da válvula termostática se aproxima da temperatura do fluido de arrefecimento na saída do radiador e mantém um comportamento similar para o primeiro trecho de cidade, que corresponde ao instante 0 e 2900 , onde a temperatura no by pass da válvula termostática oscila por volta de 90 e 100 °C, enquanto a temperatura na saída do radiador se alterna entre 80 e 100 °C.

Até este ponto, a condição mais crítica em termos de ocorrência de cavitação se dá no instante 342 s, ainda na fase de aquecimento do motor, quando a temperatura do fluido de arrefecimento chega a 94 °C e a pressão no sistema é de apenas 11 kPa.

A avaliação dos parâmetros de trabalho em estrada é feita em um percurso de 23 km, compreendido entre os instantes 757 e 3862 s. Para esta condição, a temperatura na saída do radiador se alterna entre 70 e 80 °C, aproximadamente, enquanto a temperatura na saída da válvula termostática oscila entre 85 e 90 °C, sendo que a menor pressão de sistema encontrada foi de 26 kPa.

Ao retornar ao perímetro urbano, monitora-se um pico de temperatura onde o fluido de arrefecimento, na saída do radiador e da válvula termostática, chega a 103 °C no instante 3967 s, quando a pressão de sistema é 53 kPa.

3.2 Bancada de Teste

A bancada de teste ilustrada na Figura 24 é constituída de:

a) um reservatório de aço inoxidável ligado a uma linha de ar comprimido, uma linha de água refrigerada e resistências elétricas, que têm respectivamente a função de pressurizar o sistema e controlar a temperatura do fluido de teste. O reservatório tem capacidade total de 80 litros, e opera com 75 % de sua capacidade ocupada com líquido de arrefecimento e os outros 25 % com ar pressurizado. A proporção é controlada através do indicador de nível.

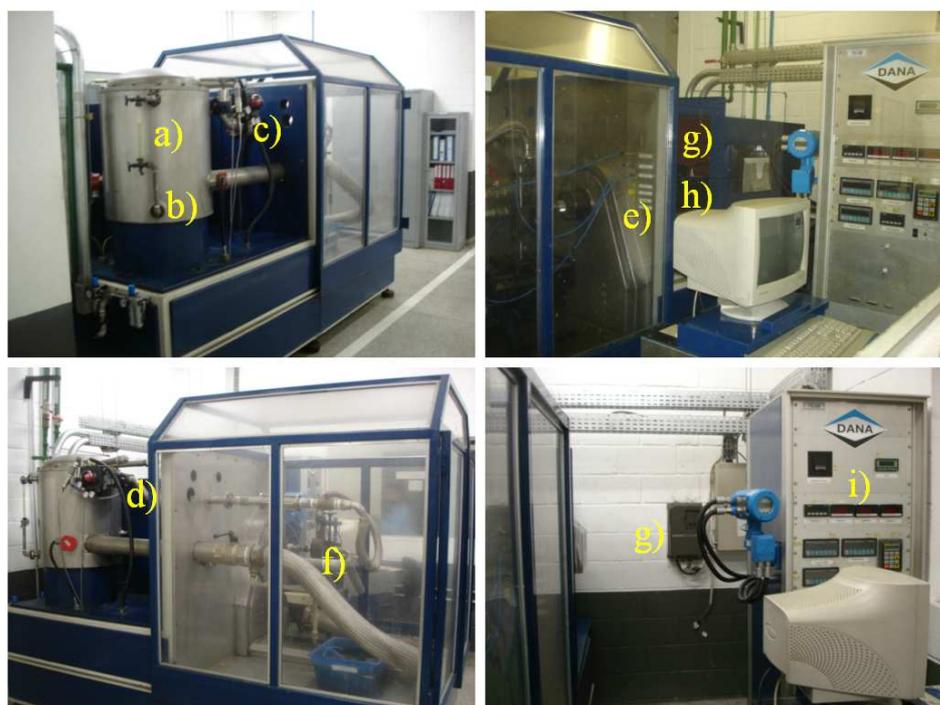


Figura 24 – Bancada de Teste

b) As resistências elétricas são flangeadas e construídas com elementos tubulares blindados de aço inoxidável, isolados internamente com óxido de

magnésio, com o filamento resistivo feito de NI-Cr 80/20, encapsulados em tubos de aço inoxidável. Cada resistência tem uma potência de 450W, e são alimentadas com corrente alternada a uma tensão de 230V e 60Hz.

c) Uma válvula proporcional eletro-pneumática, posicionada após o medidor de vazão, como ilustrado na Figura 25, tem como sinal de entrada 4 mA (totalmente aberta) a 20 mA (totalmente fechada).



Figura 25 - Reservatório, Válvula Proporcional, Resistências, e Linhas de Ar Comprimido e Água de Refrigeração.

d) Um medidor de vazão eletromagnético de 3" e capacidade máxima de 9,46 l/s, está montado a uma distância de 2 m da saída da bomba (aproximadamente 25 vezes o diâmetro da tubulação). Ele possui um

revestimento interno de PTFE, e suporta temperaturas de até 120 °C. A Figura 26 detalha o medidor de vazão.



Figura 26 - Medidor de Vazão Eletromagnético

e) Três termopares tipo K, com o elemento positivo feito em níquel-cromo, e a negativa em níquel-alumínio, tem a faixa de trabalho de -200 a 1200°C e podem operar tanto em meios oxidantes como inertes. Três transdutores de pressão que trabalham de -1 a 20 bar, com um sinal de saída de 4 a 20mA respectivamente. A Figura 27 mostra o posicionamento dos termopares e dos transdutores de pressão. A imagem do lado esquerdo mostra a frente enquanto a do lado mostra o fundo do equipamento

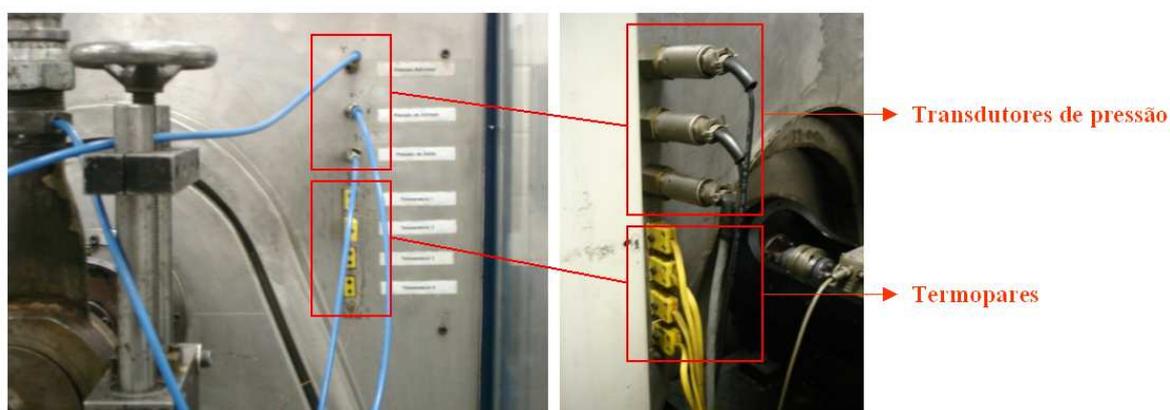


Figura 27 - Termopares e Transdutores de Pressão

f) Um dispositivo de alumínio usinado com as mesmas dimensões do bloco do motor, de forma a reproduzir a interface da bomba com o motor. A Figura 28 mostra tal dispositivo.



Figura 28 - Dispositivo de Interface

g) Um motor elétrico de 7,5 kW de potência, e rotação máxima de 8000 rpm quando alimentado a 230 V, 60Hz e 19,9A, utilizado para acionar a bomba. Sua rotação é controlada por meio de um inversor de frequência, que trabalha com sinais PWM convertendo corrente alternada em corrente contínua. Então a corrente contínua é modulada e transformada em três fases de corrente alternada para o motor. Dessa forma o inversor converte um sinal fixo de frequência em uma saída variável de frequência que causa a variação na rotação operacional do motor. A Figura 29 apresenta o motor no lado esquerdo e o inversor de frequência à direita.



Figura 29 - Motor e Inversor de Frequência

h) Uma célula de torque com limite de 20 N.m, com sinal de saída de 5 kHz a 15 khz, onde 5 kHz corresponde a um sinal de torque negativo, 10 kHz corresponde a zero e 15 kHz a um sinal de torque positivo. A célula é montada entre o motor e a bomba, e é utilizada para medir o torque de acionamento e a potência consumida. A Figura 30 ilustra o componente.



Figura 30 - Célula de Torque

i) Um painel, mostrado na Figura 31, com controladores digitais que processam os sinais dos equipamentos descritos acima, e geram como saída, valores expressos em unidades de medidas físicas.



Figura 31- Controladores

3.3 Simulação em bancada da temperatura de cavitação do sistema de arrefecimento

3.3.1 Condições de Teste

Este estudo examina a temperatura de cavitação da mesma bomba utilizada no parágrafo 3.1, para concentrações distintas da mistura etilenoglicol / água, simulando diferentes condições de pressurização do sistema. As associações entre as concentrações da mistura etilenoglicol / água, pressão do sistema e rotação da bomba, testadas neste experimento, são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Associações Testadas

Concentração das mistura etilenoglicol / água [%]	Pressão do Sistema [kPa]	Rotação da Bomba [rpm]
50/50	50	1000 2000 3000 4000 5000
50/50	15	1000 2000 3000 4000 5000
30/70	50	1000 2000 3000 4000 5000
30/70	15	1000 2000 3000 4000 5000
0/100	50	1000 2000 3000 4000 5000
0/100	15	1000 2000 3000 4000 5000

As condições de pressurização do sistema foram determinadas através do resultado do estudo de campo descrito no parágrafo 3.1, ou seja, a pressão de 15 kPa representa a condição de operação, onde a válvula termostática do sistema de arrefecimento está prestes a abrir e a temperatura do fluido no by pass chega a algo em torno de 93° C. Porém, como o fluido ainda não circula pelo radiador, a pressão do sistema é baixa, propiciando condições favoráveis à ocorrência de cavitação (alta temperatura em condições de baixa pressão). A pressão de 50 kPa representa a condição do sistema para a maior temperatura de trabalho, aproximadamente 104° C, quando o veículo saiu da estrada e voltou a trafegar em área urbana. Esse cenário pode ser observado, e melhor compreendido, através da análise da Figura 23

Todas as associações entre a concentração da mistura e a pressão do sistema foram testadas com a bomba trabalhando entre 1000 e 5000 rpm, com a discretização de 1000 rpm. É importante lembrar que quanto maior for a rotação da bomba, menor é a pressão em sua entrada, e conseqüentemente, maior é a propensão à ocorrência de cavitação.

3.3.2 Análise de incertezas

O objetivo deste tópico é identificar e classificar os valores numéricos das incertezas associadas aos instrumentos utilizados no trabalho. A análise detalhada e os resultados obtidos são apresentados no Anexo A.

As incertezas são classificadas pela forma com a qual o valor numérico é determinado. Se dados estatísticos estão disponíveis, a incerteza é classificada como Tipo A, e como Tipo B quando não existe tal informação (Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia,

2003). Neste trabalho, todas as incertezas são classificadas como Tipo B, pois não existem dados estatísticos disponíveis e definidas por:

$$u = 0,58\alpha \quad (9)$$

onde $\pm \alpha$ define limites dentre os quais se espera encontrar o valor verdadeiro.

A incerteza expressa com um determinado nível de confiança é dado por $k \cdot u$, onde k é o fator de abrangência. Valores numéricos de k são dados na tabela 2.

Tabela 2 – Fator de Abrangência

Nível de Confiança (%)	Fator de Abrangência - k
68,27	1,000
90,00	1,645
95,00	1,960
95,45	2,000
99,00	2,576
99,73	3,000

3.4.1 Incertezas Associadas ao Mapeamento dos Parâmetros de Funcionamento do Sistema de Arrefecimento.

Termopar tipo K:

$$u_T = 0,580 \times 0,400\% = 0,232\%$$

Então para um nível de confiança de 95 %, a incerteza será

$$\pm 1,96 \times 0,232\% = 0,455\%$$

Transdutores de pressão:

$$u_p = 0,580 \times 0,300\% = 0,174\%$$

Então para um nível de confiança de 95 %, a incerteza será

$$\pm 1,96 \times 0,174\% = 0,341\%$$

3.4.2 Incertezas Associadas a Simulação em Bancada

Termopar tipo K:

$$u_T = 0,580 \times 0,400\% = 0,232\%$$

Então para um nível de confiança de 95%, a incerteza será

$$\pm 1,96 \times 0,232\% = 0,455\%$$

Transdutores de pressão:

$$u_p = 0,580 \times 0,300\% = 0,174\%$$

Então para um nível de confiança de 95%, a incerteza será

$$\pm 1,96 \times 0,174\% = 0,341\%$$

Incerteza Composta Associada à Medição do Diferencial de Pressão:

$$DP = P_2 - P_1 \quad (10)$$

Um coeficiente de sensibilidade deve ser determinado para cada uma das duas variáveis P_1 e P_2 , porque os componentes de incerteza são associados no procedimento de análise de DP. A definição matemática de um componente de sensibilidade pode ser dado, considerando que uma determinada saída Y , que é função de n entradas:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) \quad (11)$$

O coeficiente de sensibilidade é dado por

$$S_{x_i} = \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \left(\frac{x_i}{y} \right) \quad (12)$$

O coeficiente de sensibilidade pode ser interpretado como a mudança percentual em DP que resulta da mudança de 1 % na variável.

Então o coeficiente de sensibilidade para P_1 é:

$$S_{P_1} = \left(\frac{\partial DP}{\partial P_1} \right) \left(\frac{P_1}{DP} \right) = - \frac{P_1}{P_2 - P_1} \quad (13)$$

e para P_2 é:

$$S_{P_2} = \left(\frac{\partial DP}{\partial P_2} \right) \left(\frac{P_2}{DP} \right) = \frac{P_2}{P_2 - P_1} \quad (14)$$

a incerteza combinada é dada pela equação:

$$\left(\frac{u(y)}{y} \right)^2 = \sum_{i=1}^n S_{x_i}^2 u^2(x_i) \quad (15)$$

3.4 Resultados

As figuras a seguir mostram curvas que expressam a diferença de pressão entre a saída e a entrada da bomba (ΔP) em função da temperatura do fluido. Para a realização do experimento, a válvula proporcional detalhada no item “c)” do parágrafo 3.2 é ajustada em 50% de sua abertura total e assim mantida em todas as condições de teste. Então, para cada rotação existe uma diferença de pressão ΔP que identifica a ocorrência de cavitação quando esta sofre uma queda de 5%. Esta condição é representada nos gráficos como o ponto DP5%. Algumas curvas trazem também um ponto chamado DP10%, que representa uma queda de 10% no diferencial de pressão e indica uma condição de cavitação mais severa.

É importante salientar que o fenômeno de cavitação é função apenas da rotação de trabalho da bomba, da temperatura do fluido, e da concentração de etilenoglicol na água, que impacta diretamente na pressão de vapor da mistura. Ou seja, não importa se a bomba trabalha com um diferencial de pressão de 100 ou 10 kPa, a suscetibilidade à cavitação dependerá apenas dos fatores citados acima.

A máxima temperatura experimentada foi 110° C, por limitação da bancada, e por ter sido evidenciado no parágrafo 3.1 que as temperaturas em um sistema de arrefecimento convencional não superam os 105° C.

A Figura 32 expressa os resultados da simulação do sistema de arrefecimento em bancada trabalhando com uma mistura 50% etilenoglicol e 50% água, com pressão de sistema de 50 kPa. Pode-se ver que mesmo aumentando a temperatura do fluido para 110° C, a cavitação não ocorre para rotações de até 3000 rpm. Porém, evidencia-se a ocorrência do fenômeno para as rotações de 4000 e 5000 rpm, sendo que as temperaturas de cavitação foram respectivamente 107,6 e 107,0° C.

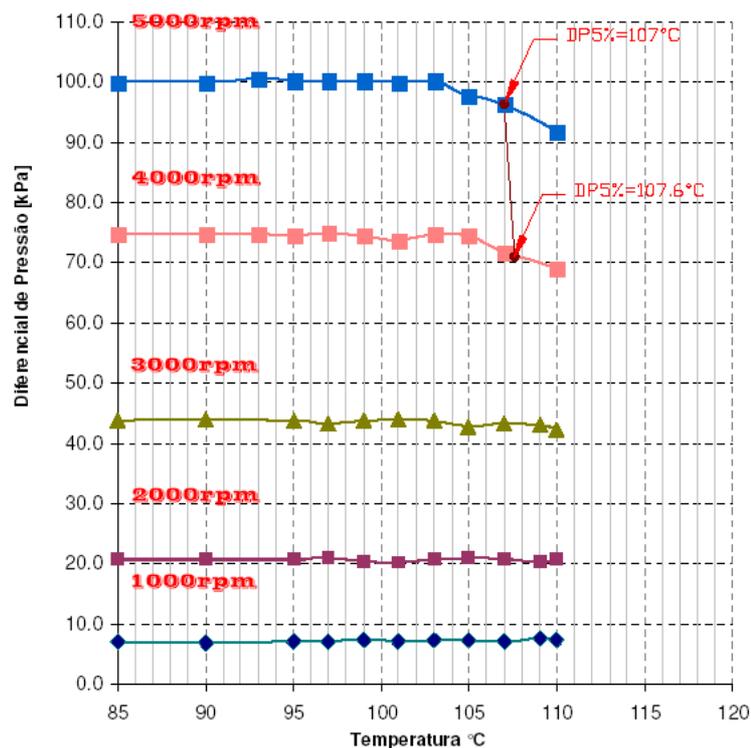


Figura 32 – Mistura de 50% Etilenoglicol e 50% água, com pressão de sistema de 50 kPa

É esperado que a temperatura de cavitação a 4000 rpm seja maior que para 5000 rpm. Porém, a 5000 rpm com a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água e 50 kPa de pressão de sistema a incerteza combinada no ponto DP5% é de 2,6%, o que indica que o diferencial de pressão medido (96,3 kPa) pode variar entre 97,7 kPa e 95,1 kPa, o que reflete numa variação na temperatura de cavitação de 105 °C a 108 °C aproximadamente. Seguindo o mesmo raciocínio para a rotação de 4000 rpm, a temperatura de cavitação varia entre 101 e 109°C, onde para este ponto a incerteza combinada é 3,1%. A Figura 33 mostra a sobreposição das faixas onde a temperatura de cavitação pode se encontrar, para as rotações de 4000 e 5000 rpm. É importante salientar que a “espessura da faixa” depende do valor da incerteza como também do gradiente de DP em função da temperatura.

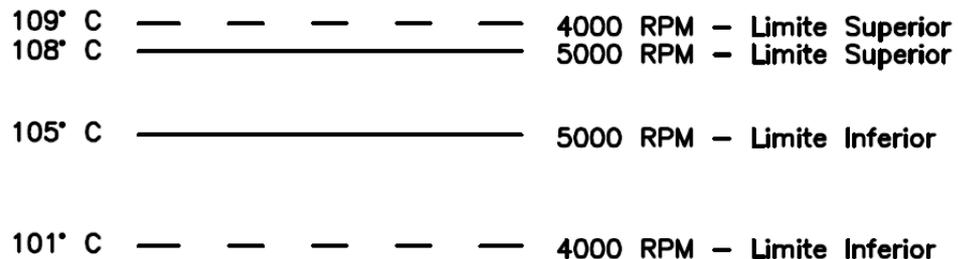


Figura 33 – Temperatura de cavitação para a mistura 50% etilenoglicol e 50% água, a 50 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas

A Figura 34 traz o resultado da simulação para a mesma concentração de 50% etilenoglicol e 50% água, porém com a pressão de sistema de 15 kPa. Pode-se verificar que para esta condição a temperatura de cavitação cai consideravelmente para as rotações de 5000 e 4000 rpm, e que para 3000 rpm temos agora a ocorrência de cavitação, fato não verificado quando trabalhando com a pressão de sistema de 50 kPa. Pode-se ainda verificar que para esta condição chega-se facilmente ao ponto DP10%, algo não atingido anteriormente. A diferença entre a temperatura de cavitação

(DP5%) para as diferentes faixas de rotação também aumentou, ficando 2° C entre 5000 e 4000rpm e 4° C para 4000 e 3000 rpm. Não foi evidenciada a ocorrência de cavitação para as rotações de 2000 e 1000 rpm.

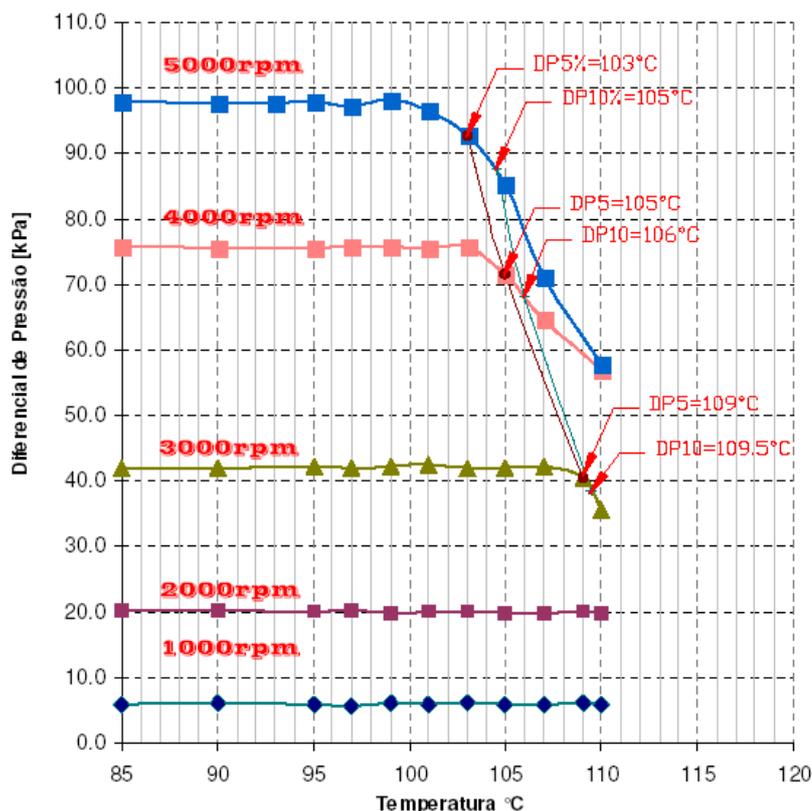


Figura 34 – Mistura de 50% Etilenoglicol e 50% água, com pressão de sistema de 15 kPa

Para a mistura 50% etilenoglicol e 50% água, a 15 kPa de pressão de sistema a 5000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 2,0%, o que significa que a temperatura de cavitação para esta condição pode estar entre 102 ° C e 104 ° C. Na rotação de 4000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 2,0%, ou seja, temperatura de cavitação entre 105 ° C e 107 ° C. Em 3000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 2,5%, refletindo em uma temperatura de cavitação entre 105 ° C e 109 °. A Figura 35 mostra a sobreposição das faixas de incerteza.

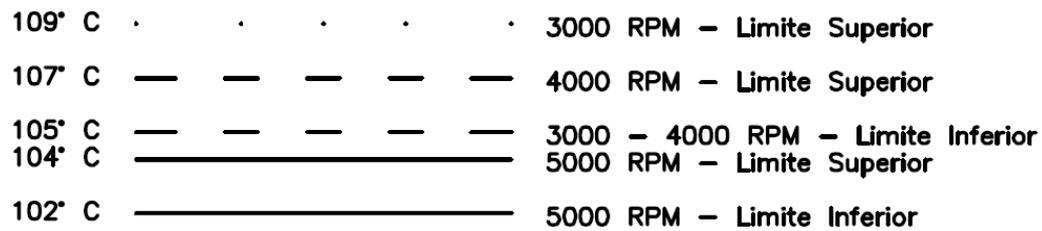


Figura 35 – Temperatura de cavitação para a mistura 50% etilenoglicol e 50% água, a 15 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas

Os resultados da simulação para a mistura de 30 % etilenoglicol e 70 % água com a pressão de sistema de 50 kPa são mostrados na Figura 36. Esta configuração mostrou-se menos suscetível a ocorrência de cavitação que a concentração de 50 % etilenoglicol e 50 % água com pressão de sistema de 15 kPa, porém mais propensa à ocorrência do fenômeno que a concentração de 50% etilenoglicol e 50 % água com pressão de sistema de 50 kPa. A cavitação ocorreu apenas para as rotações de 5000 e 4000 rpm, alcançando o ponto DP10% em ambos os casos. A diferença para a temperatura de cavitação entre as duas rotações ficou em 2° C.

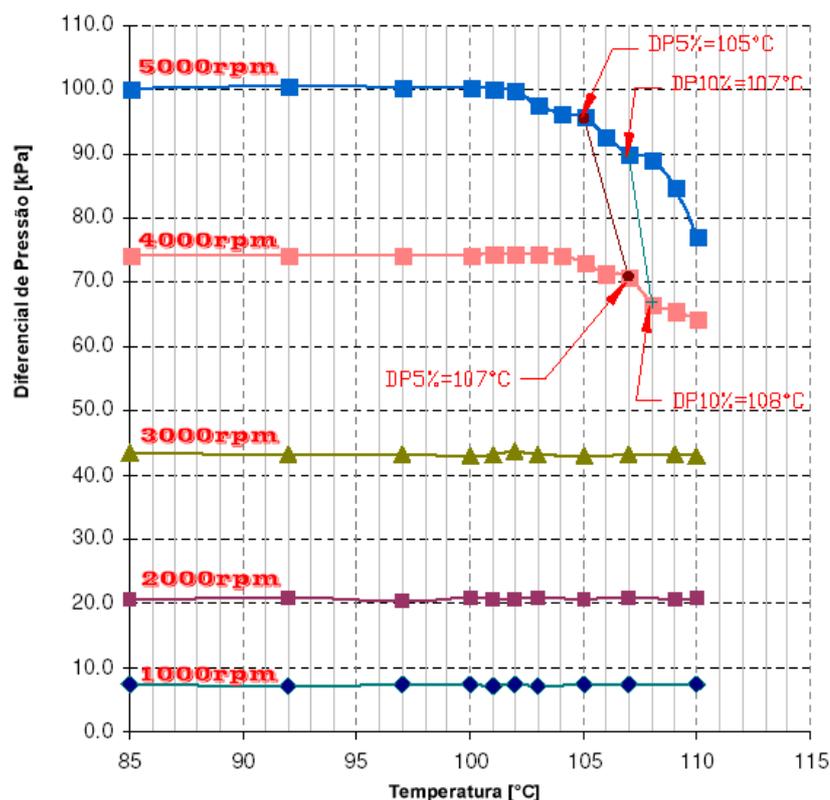


Figura 36 – Mistura de 30% Etilenoglicol e 70% água, com pressão de sistema de 50 kPa

Com a mistura 30% etilenoglicol e 70% água, a 50 kPa de pressão de sistema a 5000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 2,6%, o que significa que a temperatura de cavitação para esta condição pode estar entre 103 ° C e 106 ° C. Na rotação de 4000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 3,0%, ou seja, temperatura de cavitação entre 105 ° C e 108 ° C. A Figura 37 mostra a sobreposição das faixas de incerteza.

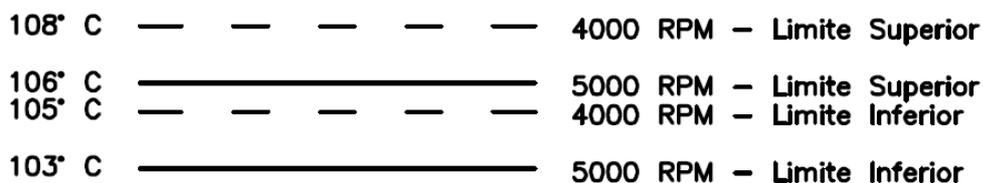


Figura 37 – Temperatura de cavitação para a mistura 30% etilenoglicol e 70% água, a 50 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas.

A Figura 38 apresenta os resultados da simulação para a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água com a pressão de sistema de 15 kPa. O ponto DP10% foi atingido para as rotações de 5000, 4000 e 3000 rpm, sendo que a temperatura de cavitação, representada pelo ponto DP5%, se deu respectivamente a 98, 102 e 108 ° C, ou seja, uma diferença de 4 ° C entre 5000 e 4000 rpm e 6 ° C entre 4000 e 3000 rpm. Não houve cavitação para as rotações de 2000 e 1000 rpm.

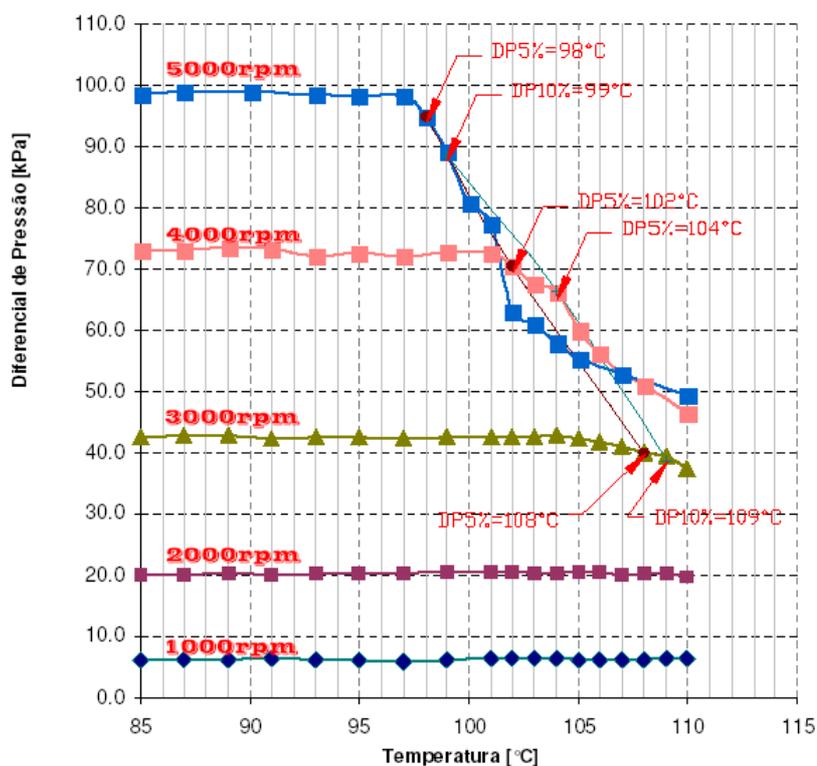


Figura 38– Mistura de 30% Etilenoglicol e 70% água, com pressão de sistema de 15 kPa

Na mistura 30% etilenoglicol e 70% água, a 15 kPa de pressão de sistema a 5000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 1,9%, o que significa que a temperatura de cavitação para esta condição pode estar entre 97 ° C e 98 ° C. Na rotação de 4000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 2,1%, ou seja, temperatura de cavitação entre 97 ° C e 102 ° C. Em 3000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 2,3%, refletindo numa

temperatura de cavitação entre 107 ° C e 109 °. A Figura 39 mostra a sobreposição das faixas de incerteza.

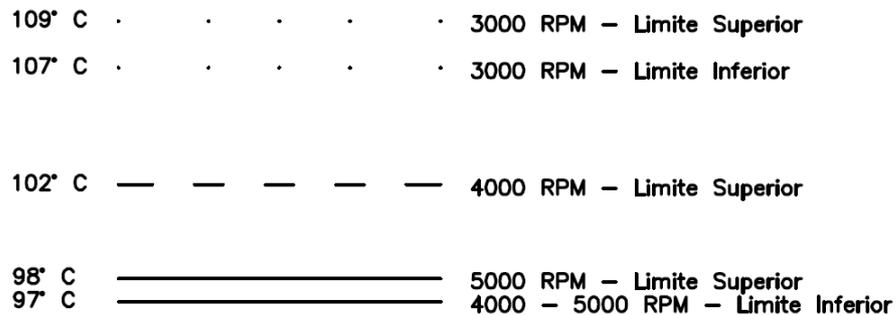


Figura 39 – Temperatura de cavitação para a mistura 30% etilenoglicol e 70% água, a 15 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas.

A Figura 40 traz os resultados dos testes feitos com 100% de água e pressão de sistema de 50 kPa. Cavitação ocorreu apenas para as rotações de 5000, 4000 e 3000 rpm, e a temperatura de cavitação foi respectivamente 98, 104 e 107° C. As diferenças de temperatura foram de 6° C entre as rotações de 5000 e 4000 rpm, e 3° C entre as rotações de 4000 e 3000 rpm.

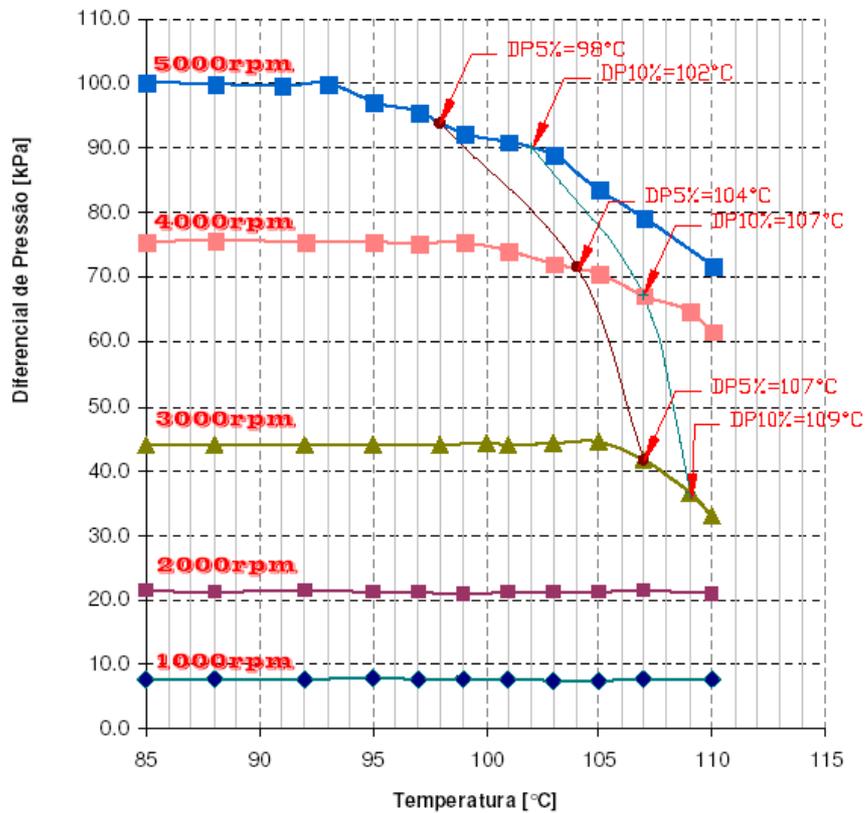


Figura 40– 100% água, com pressão de sistema de 50 kPa

Para 100% de água, com 50 kPa de pressão de sistema a 5000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 2,7%, o que significa que a temperatura de cavitação para esta condição pode estar entre 97 ° C e 102 ° C. Na rotação de 4000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 2,9%, ou seja, temperatura de cavitação entre 103 ° C e 107 ° C. Em 3000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 3,9%, refletindo em uma temperatura de cavitação entre 105 ° C e 107 ° C. A Figura 41 mostra a sobreposição das faixas de incerteza, para as rotações de 3000 e 4000 rpm.

107° C	— — — — —	3000 – 4000 RPM – Limite Superior
105° C	· · · · ·	3000 RPM – Limite Inferior
103° C	— — — — —	4000 RPM – Limite Inferior
102° C	—————	5000 RPM – Limite Superior
97° C	—————	5000 RPM – Limite Inferior

Figura 41 – Temperatura de cavitação para 100% água, a 50 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas.

A Figura 42 representa os resultados para 100% de água e pressão de sistema de 15 kPa. Não houve cavitação para as rotações de 2000 e 1000 rpm. A temperatura de cavitação para as rotações de 5000, 4000 e 3000 rpm foram respectivamente 92, 94 e 105° C, e as diferenças de temperatura foram 2° C entre 5000 e 4000, e 11° C entre 4000 e 3000 rpm.

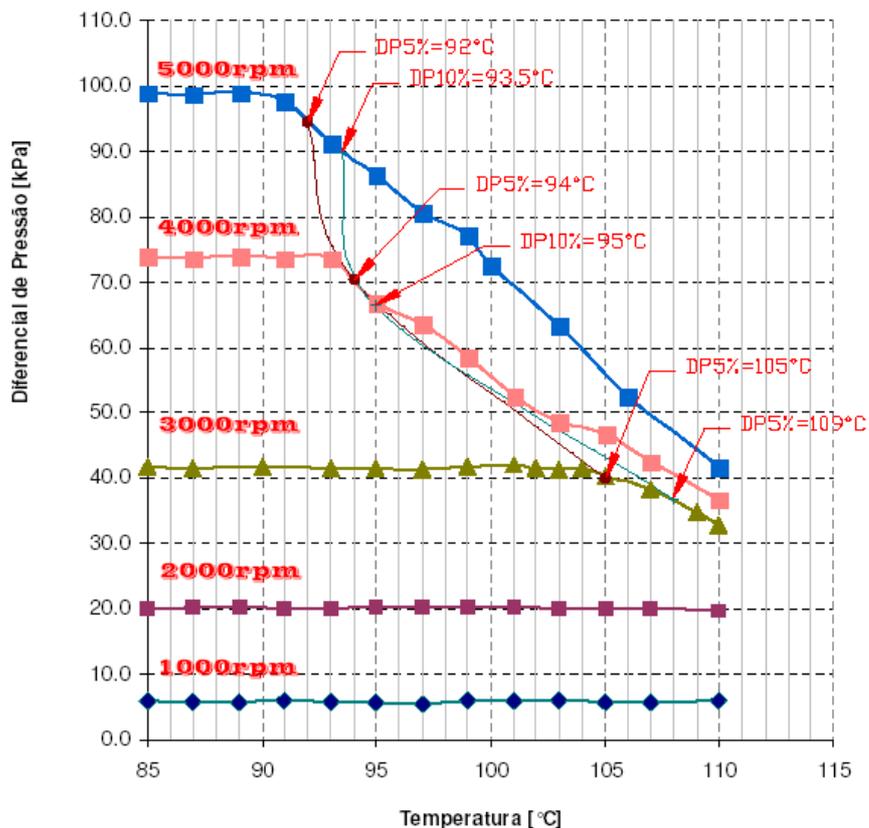


Figura 42 – 100% água, com pressão de sistema de 15 kPa

E com 100% de água, e 15 kPa de pressão de sistema a 5000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 1,9%, o que significa que a temperatura de cavitação para esta condição pode estar entre 89 ° C e 92 ° C. Na rotação de 4000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 2,1%, ou seja, temperatura de cavitação entre 94 ° C e 95 ° C. Em 3000 rpm, o ponto DP5% tem incerteza combinada de 2,3%, refletindo numa temperatura de cavitação entre 99 ° C e 106 ° C. A Figura 43 mostra as faixas de incerteza.

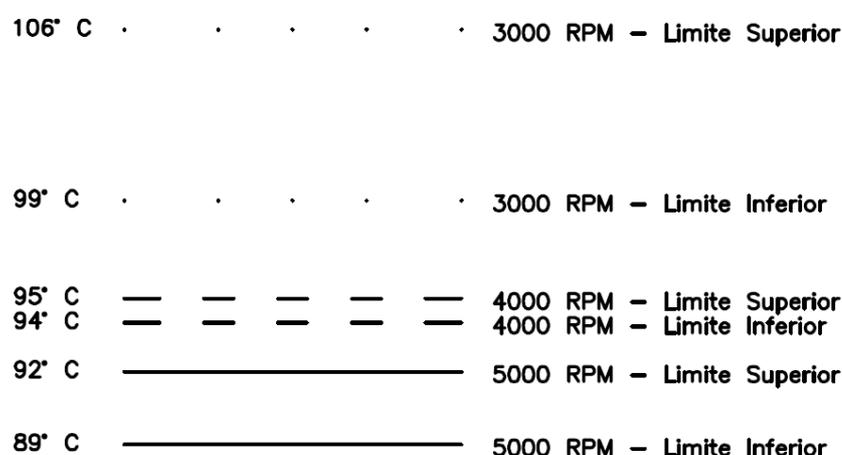


Figura 43 – Temperatura de cavitação para 100% água, a 50 kPa de pressão de sistema, ponderando as incertezas.

A Figura 44 traz a comparação e identificação da temperatura de cavitação (DP5%) para as concentrações de 50% etilenoglicol e 50% água, 30% etilenoglicol e 70% água, e 100% água, com a bomba trabalhando a 5000 rpm e o sistema com pressão de 50 kPa.

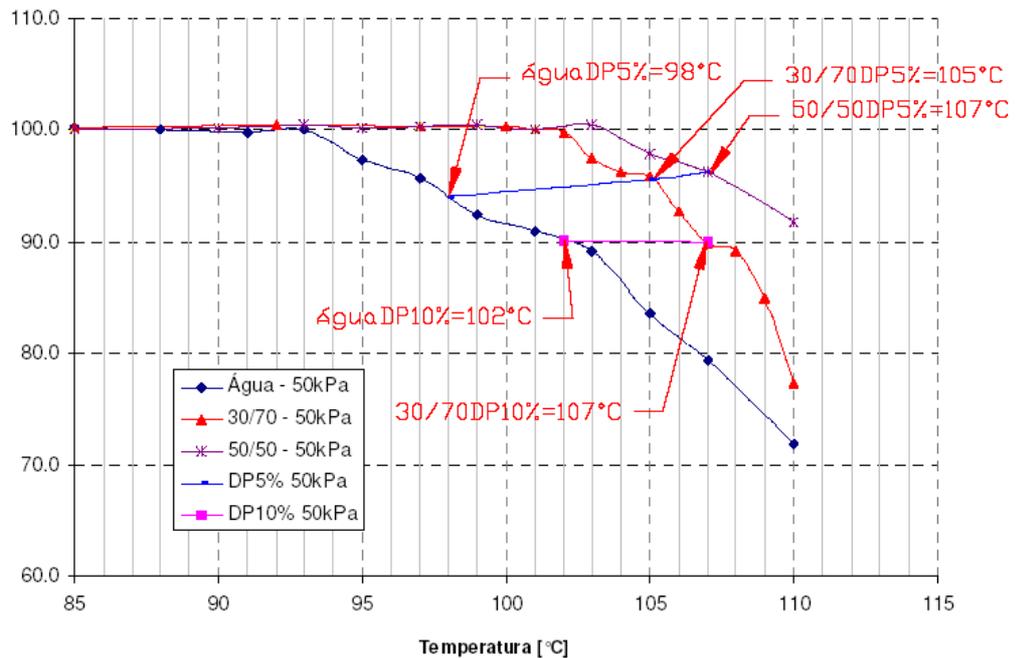


Figura 44 – Bomba a 5000 rpm e sistema com 50 kPa

A Figura 45 traz a comparação e identificação da temperatura de cavitação para as concentrações de 50% etilenoglicol e 50% água, 30% etilenoglicol e 70% água, e 100% água, com a bomba trabalhando a 5000 rpm e o sistema com pressão de 15 kPa.

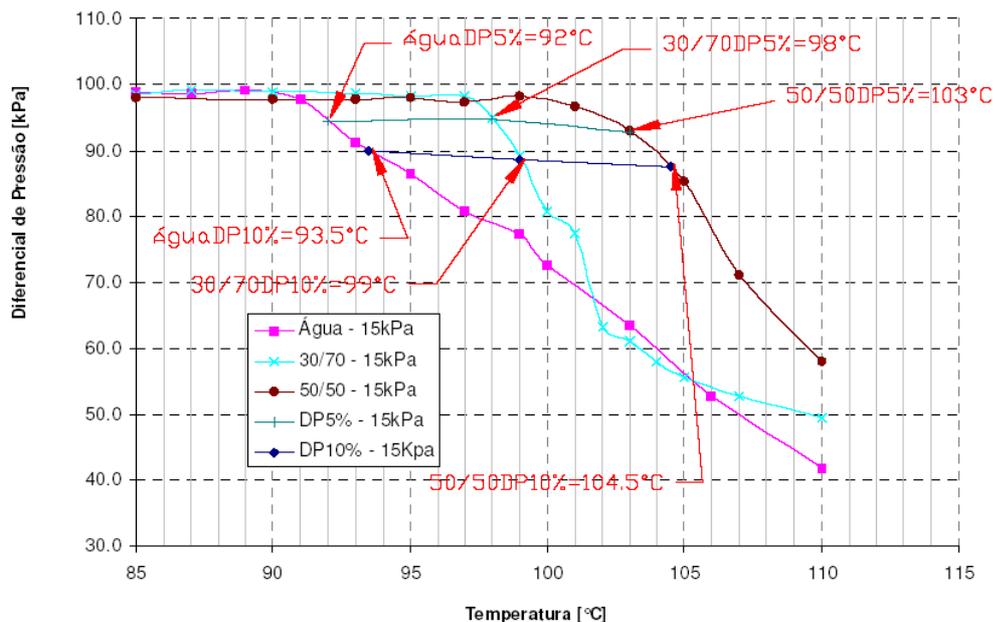


Figura 45 – Bomba a 5000 rpm e sistema com 15 kPa

A Figura 49 traz a comparação e identificação da temperatura de cavitação para as concentrações de 50% etilenoglicol e 50% água, 30% etilenoglicol e 70% água, e 100% água, com a bomba trabalhando a 4000 rpm e o sistema com pressão de 50 kPa.

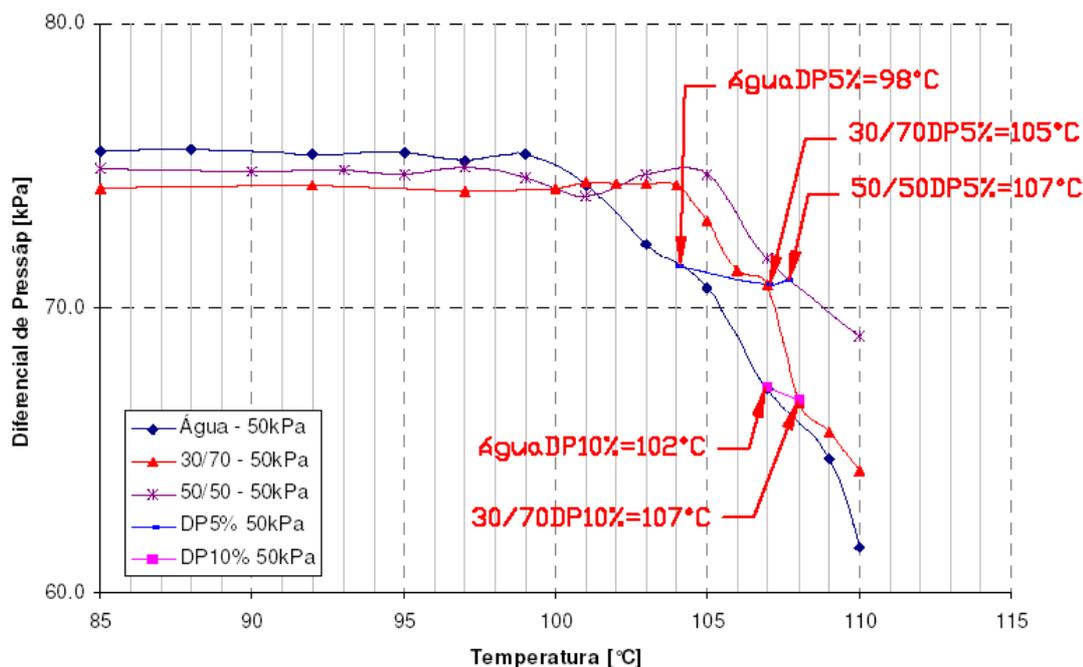


Figura 46 – Bomba a 4000 rpm e sistema com 50 kPa

A Figura 47 traz a comparação e identificação da temperatura de cavitação para as concentrações de 50% etilenoglicol e 50% água, 30% etilenoglicol e 70% água, e 100% água, com a bomba trabalhando a 4000 rpm e o sistema com pressão de 15 kPa.

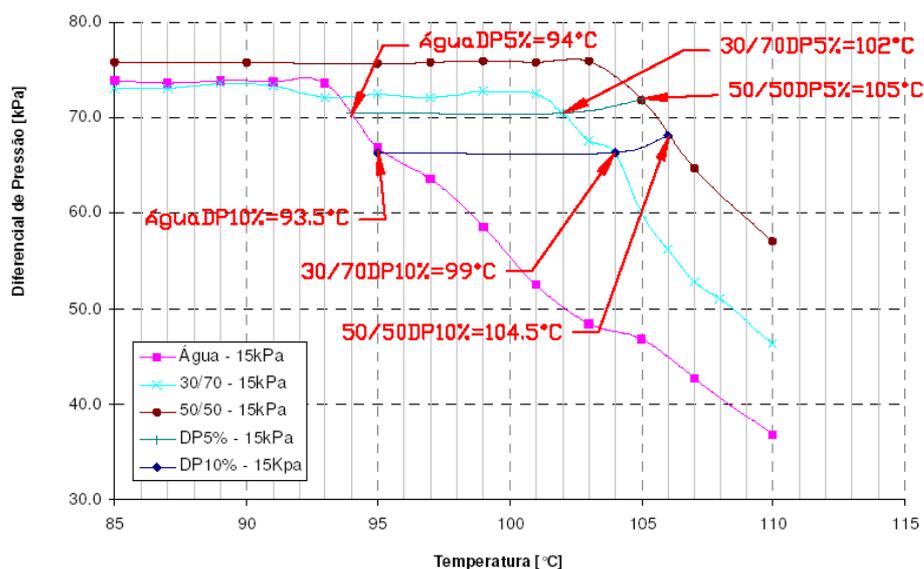


Figura 47 – Bomba a 4000 rpm e sistema com 15 kPa

A Figura 48 traz a comparação e identificação da temperatura de cavitação para as concentrações de 50% etilenoglicol e 50% água, 30% etilenoglicol e 70% água, e 100% água, com a bomba trabalhando a 3000 rpm e o sistema com pressão de 50 kPa.

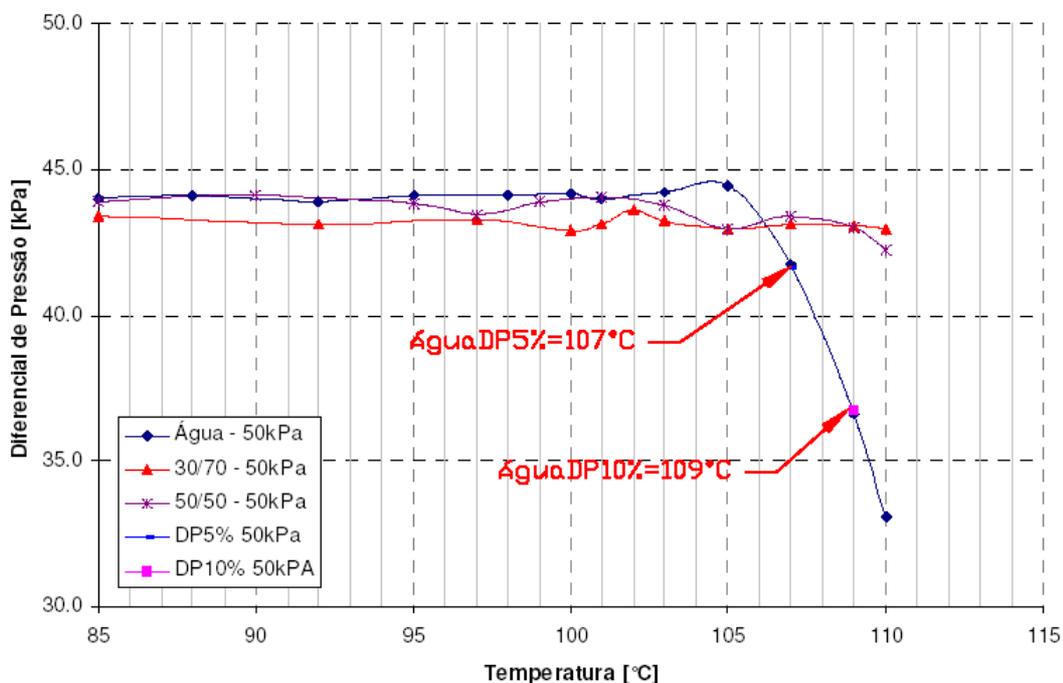


Figura 48 – Bomba a 3000 rpm e sistema com 50 kPa

A Figura 49 traz a comparação e identificação da temperatura de cavitação para as concentrações de 50% etilenoglicol e 50% água, 30% etilenoglicol e 70% água, e 100% água, com a bomba trabalhando a 3000 rpm e o sistema com pressão de 15 kPa.

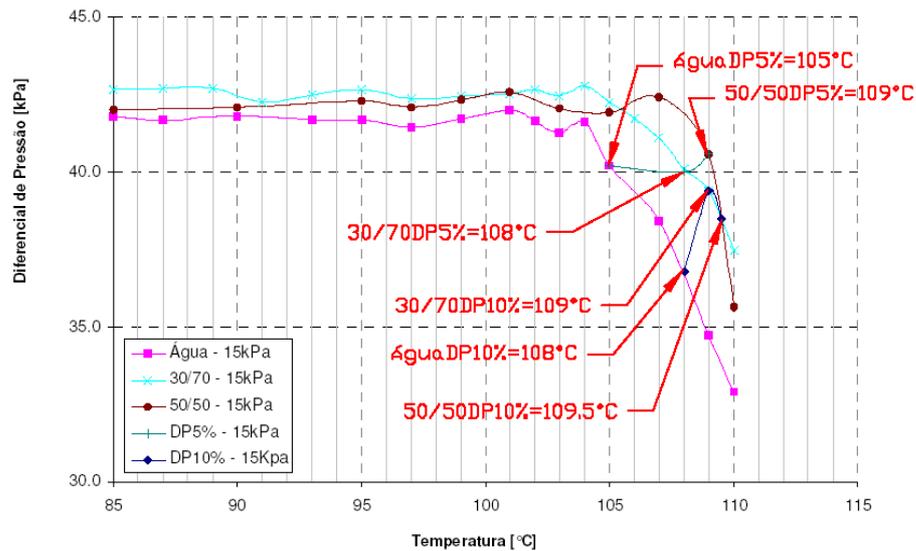


Figura 49 – Bomba a 3000 rpm e sistema com 15 kPa

As figuras 44 a 49 ilustram de forma comparativa a influência do etilenoglicol na ocorrência de caviatação ao demonstrar a temperatura de cavitação das variadas misturas em uma pressão de sistema equivalente.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho examina a ocorrência de cavitação em sistemas de arrefecimento, estudando as condições e a intensidade com que o fenômeno ocorre ao se variar os regimes e as circunstâncias de trabalho. O estudo se desenvolve a partir da medição das variações dos parâmetros de trabalho do sistema de arrefecimento de um veículo ao trafegar em trânsito urbano e estrada, para então simular essas condições em bancada, de forma a identificar em que condições o fenômeno cavitação ocorre, e também ponderar a influência das variáveis envolvidas no processo.

A simulação é desenvolvida com três diferentes fluidos de arrefecimento: Mistura 50% etilenoglicol / 50% água, mistura 30% etilenoglicol / 70% água, e 100% água. Três fatores têm maior influência na ocorrência do fenômeno cavitação em sistemas de arrefecimento. Eles são a pressão de vapor do fluido bombeado, a temperatura do fluido, e a pressão na entrada da bomba, que varia em função da rotação da bomba.

Os testes em bancada nas três diferentes concentrações da mistura etilenoglicol e água avaliaram fluidos com três diferentes condições de pressão de vapor.

A pressão na entrada foi variada, associando-se diferentes pressões de sistema e diferentes rotações de trabalho da bomba. A determinação dos valores das pressões de sistema para a realização da simulação em bancada se deu através do monitoramento das pressões no vaso de expansão do veículo testado.

Os resultados dos testes foram ao encontro das conclusões de Hosny (1996), revelando que quanto maior for a concentração de etilenoglicol na mistura, menor será a suscetibilidade do sistema à ocorrência de cavitação,

devido à elevação da temperatura necessária para alcançar a pressão de vapor.

Em contrapartida, constatou-se em todas as misturas testadas, que quão maior for a rotação da bomba, mais propenso à ocorrência de cavitação será o sistema de arrefecimento, devido à diminuição de pressão na entrada da bomba. Dessa forma complementa-se o trabalho de Kim (2000), que avaliou a ocorrência de cavitação para diferentes pressões de sistema, utilizando apenas a mistura de 50% água e 50% etilenoglicol.

Ao comparar os resultados das simulações feitas em bancada, expressos no parágrafo 3.3.3. com as medições dos parâmetros de funcionamento, experimentadas no parágrafo 3.1, conclui-se que ao se utilizar a mistura de 50% etilenoglicol com 50% água, como fluido de arrefecimento, a cavitação não ocorre mesmo para as rotações mais elevadas, pois a temperatura de cavitação não é alcançada para esta condição.

Com a mistura de 30% etilenoglicol com 70% água, a bomba estaria na eminência de ocorrência de cavitação, quando trabalhando a uma rotação igual ou superior a 5000 rpm, e o motor já tenha concluído sua fase de aquecimento.

Para a condição onde água pura é utilizada como fluido de arrefecimento, a bomba cavita para rotações superiores a 4000 rpm, na fase de aquecimento do motor, onde a pressão do sistema é menor e a temperatura do fluido chega a algo em torno de 94° C. Para rotações superiores a 5000 rpm, a bomba está em freqüente estado de cavitação para praticamente todas as condições de operação do motor.

A análise das incertezas mostrou que quanto maior for a rotação, menor será a influência da medição da pressão de entrada na incerteza combinada, ou seja, quanto maior a rotação, menor será a incerteza. Ao se avaliar as

incertezas combinadas, verifica-se a ocorrência de sobreposições entre as faixas onde a temperatura de cavitação é esperada de se encontrar.

A temperatura de cavitação numa bomba d'água aplicada no sistema de arrefecimento de um motor de combustão interna foi estudada também por Huang (2004), usando três fluidos diferentes: 100% água, 50% etilenoglicol e 50% água, e 100% etilenoglicol, em diversas rotações de trabalho, o aqui apresentado, contribui acrescentando resultados para as misturas 70% água e 30% etilenoglicol, e estudando diferentes pressões de trabalho.

Ao correlacionar os resultados dos experimentos realizados neste trabalho, com os resultados de Hattori (2005) e Hosny (1996), que estudaram a influência da temperatura na intensidade de cavitação, conclui-se que a faixa de temperatura mais crítica em termos de erosão encontra-se entre 50 e 85° C. Isto indica que um sistema de arrefecimento, no caso de ocorrência de cavitação, estará em uma faixa mais amena, pois mesmo operando na condição mais crítica, a 5000 rpm com 100% de água no sistema, a cavitação só ocorre a partir de 89° C.

5. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a temperatura de cavitação para rotações intermediárias, em torno e posterior do ponto onde se identificou o início de cavitação;
- Avaliar novas composições da mistura etilenoglicol / água;
- Avaliar alternativas para o etilenoglicol que tenham um impacto menor no meio ambiente;
- Furar o bloco do motor, medir as variações de pressão na entrada da bomba quando o veículo trafega em trechos de estrada e cidade, correlacionando os resultados com os obtidos nesse trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERCHICHE, N; FRANC, J.P.; MICHEL J.M. **A Cavitation Erosion Model for Ductile Materials**. France: Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, 2001.
- CHAN, W. K. **Correlation between cavitation type and cavitation erosion in centrifugal pumps**. Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 11, No. 3, September 1990.
- HOFMANN, M.; STOFFEL, B. **Experimental and Numerical Studies on a Centrifugal Pump with 2D Curved Blades in Cavitation Condition**. Germany: Laboratory for Turbomachinery and Fluid Power, Darmstadt University of Technology, 2001.
- LAUTERBORN, W.; LINDAU, O. **Investigation of the Counterjet Developed in a Cavitation Bubble that Collapses Near a Rigid Boundary**. Germany: Physikalisches Institut, Universität Göttingen, 2001.
- HATTORI, S.; NAKAO, E. **Evaluation of Cavitation Erosion based on Erosion Particles**. Japan: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Fukui University, 2001.
- HUANG, K.D.; TZENG, S. C.; MA, W.P. **Effects of anti-freeze concentration in the engine coolant on the cavitation temperature of a water pump**. Applied Energy 79 (2004) 261–273. Elsevier, 2004.
- DULAR, M.; STOFFEL, B.; SIROK, B. **Development of a cavitation erosion model**. Wear 261 (2006) 642–655. Elsevier, 2006.
- CHAN, W. K., **Detection of erosion in centrifugal pumps**. Singapore: School of Mechanics and Production, Nanyang Technological Institute. Butterworth Publishers, 1988.
- BRENNEM, C. E. **Hydrodynamics of Pumps**. USA: California Institute of Technology, Pasadena, California, Concepts ETI, Inc., 1994
- TSUJIMOTO, Y. **Simple Rules for Cavitation Instabilities in Turbomachinery**. Japan: Engineering Science, Osaka University, 2001.
- FARHAT, M.; AVELLAN, F. **On the Detachment of a Leading Edge Cavitation**. Switzerland: Laboratory For Hydraulic Machines. Swiss Federal Institute of Technology, 2001.

ISHIDA, H.; NUNTADUSIT, C.; KIMOTO, H. **Cavitation Bubble Behavior Near Solid Boundaries**. Japan: Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 2001

HATTORI, S.; GOTO, Y.; FUKUYAMAB, T. **Influence of temperature on erosion by a cavitating liquid jet**. Japan: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Fukui, 2005.

MOCHIZUKI, H.; YOKOTA, M.; HATTORI, S. **Effects of materials and solution temperatures on cavitation erosion of pure titanium and titanium alloy in seawater**. *Wear* 262 (2007) 522–528. Elsevier, 2006.

MARSCHALL, H. B.; MORCH, K. A.; KELLER, A. P. KJELDSSEN, M. **Cavitation Inception by Almost Spherical Solid Particles in Water**. Germany: Department of Physics, Technical University of Denmark, 2001.

SOYAMA, Y.; KUMANO, H.; SAKA, M. **A New Parameter to Predict Cavitation Erosion**. Japan: Tohoku University, 2001.

FEDOTKIN, I.; YACHNO, O. **Some Problems of Development of Cavitation Technologies for Industry Application**. Ukraine: National Technical University, 2001.

KEGEL, T. M.; **Basic Measurement Uncertainty**. USA: Colorado Engineering Experiment Station. 71st International School of Hydrocarbon Measurement, April, 1996.

KIM, K.; LEE, J.; CHON, M.; YUN, J. **A New Approach of Cavitation Criterion Analysis for Automotive Water Pumps**. Korea: Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 2000.

INMETRO. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2003.

HOSNY, D. M. **Real Time Cavitation Detection Method**. SAE International. Paper 960878, 1996.

HOSNY, M. D.; HUDGENS, D.; COX, T. **Cavitation Correlation to Fluid Media Properties**. SAE International. Paper 960882, 1996.

BRENNEM, C. E. **The Amazing World of Bubbles**. USA: Engineering and Science, n°1, 2007.

ELLIS, A.T.; BENJAMIN, T.B. **The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries**. England: *Phil. Trans. Roy. Soc., London, Ser. A*, 260, 221–240, 1966.

SHIMA, A.; TAKAYAMA, K.; TOMITA, Y.; OHSAWA, N. **Mechanism of impact pressure generation from spark-generated bubble collapse near a wall.** Japan: AIAA Journal, Vol. 21 (55 – 59), 1983.

IWAY, Y.; OKADA, T. **General Mechanism of Cavitation Damage.** England: Cavitation of Hydraulic Machinery, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000.

INMETRO. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2003. 75p.

ANEXO A

Valores das incertezas combinadas

A Tabela A1 mostra o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 1000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando água como fluido.

Tabela A1 – Incerteza combinada para 1000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u _c [%]
1	85	11,5	17,6	6,1	6,0
2	87	11,4	17,3	5,9	6,1
3	89	11,6	17,3	5,7	6,3
4	91	11,2	17,1	5,9	6,0
5	93	11,3	17,0	5,7	6,2
6	95	11,7	17,4	5,7	6,4
7	97	11,8	17,4	5,6	6,5
8	99	10,8	16,8	6,0	5,8
9	101	11,5	17,4	5,9	6,2
10	103	11,2	17,3	6,1	5,9
11	105	11,6	17,3	5,7	6,3
12	107	11,2	16,9	5,7	6,2
13	110	11,5	17,4	5,9	6,2

As Tabelas A2 e A3 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A2 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-1,9	-0,3	10,8	29,9
2	-1,9	-0,3	11,5	30,4
3	-2,0	-0,4	12,4	31,0
4	-1,9	-0,3	10,8	30,0
5	-2,0	-0,3	11,8	30,6
6	-2,1	-0,4	12,8	31,1
7	-2,1	-0,4	13,4	31,5
8	-1,8	-0,3	10,0	29,4
9	-1,9	-0,3	11,5	30,4
10	-1,8	-0,3	10,2	29,5
11	-2,0	-0,4	12,4	31,0
12	-2,0	-0,3	11,6	30,5
13	-1,9	-0,3	11,5	30,4

Tabela A3 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	2,9	0,5	25,2	70,1
2	2,9	0,5	26,3	69,6
3	3,0	0,5	27,7	69,0
4	2,9	0,5	25,3	70,0
5	3,0	0,5	26,8	69,4
6	3,1	0,5	28,2	68,9
7	3,1	0,5	29,2	68,5
8	2,8	0,5	24,0	70,6
9	2,9	0,5	26,3	69,6
10	2,8	0,5	24,4	70,5
11	3,0	0,5	27,7	69,0
12	3,0	0,5	26,5	69,5
13	2,9	0,5	26,3	69,6

A Tabela A4 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 1000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando água como fluido.

Tabela A4 – Incerteza combinada para 2000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u _c [%]
1	85	11,3	31,3	20,0	2,9
2	87	11,0	31,3	20,3	2,8
3	89	11,2	31,5	20,3	2,9
4	91	11,9	31,9	20,0	3,0
5	93	11,0	31,1	20,1	2,9
6	95	11,2	31,5	20,3	2,9
7	97	11,7	31,9	20,2	2,9
8	99	11,0	31,3	20,3	2,8
9	101	11,2	31,4	20,2	2,9
10	103	11,1	31,1	20,0	2,9
11	105	11,4	31,3	19,9	2,9
12	107	11,3	31,3	20,0	2,9
13	110	11,4	31,3	19,9	2,9

As Tabelas A5 e A6 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A5 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S _{P1}	S _{P1 x u_p}	100 x (S _{P1 x u_p}) ²	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,6	-0,1	1,0	11,5
2	-0,5	-0,1	0,9	11,0
3	-0,6	-0,1	0,9	11,2
4	-0,6	-0,1	1,1	12,2
5	-0,5	-0,1	0,9	11,1
6	-0,6	-0,1	0,9	11,2
7	-0,6	-0,1	1,0	11,9
8	-0,5	-0,1	0,9	11,0
9	-0,6	-0,1	0,9	11,3
10	-0,6	-0,1	0,9	11,3
11	-0,6	-0,1	1,0	11,7
12	-0,6	-0,1	1,0	11,5
13	-0,6	-0,1	1,0	11,7

Tabela A6 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P_2}	$S_{P_2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P_2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,6	0,3	7,4	88,5
2	1,5	0,3	7,2	89,0
3	1,6	0,3	7,3	88,8
4	1,6	0,3	7,7	87,8
5	1,5	0,3	7,3	88,9
6	1,6	0,3	7,3	88,8
7	1,6	0,3	7,6	88,1
8	1,5	0,3	7,2	89,0
9	1,6	0,3	7,3	88,7
10	1,6	0,3	7,3	88,7
11	1,6	0,3	7,5	88,3
12	1,6	0,3	7,4	88,5
13	1,6	0,3	7,5	88,3

A Tabela A7 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 3000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando água como fluido.

Tabela A7 – Incerteza combinada para 3000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	11,9	53,7	41,8	2,3
2	87	11,8	53,5	41,7	2,3
3	89	12,1	53,9	41,8	2,3
4	91	12,5	54,2	41,7	2,3
5	93	11,6	53,3	41,7	2,3
6	95	11,8	53,3	41,5	2,3
7	97	11,5	53,2	41,7	2,3
8	99	11,5	53,5	42,0	2,3
9	101	11,6	53,3	41,7	2,3
10	103	11,8	53,1	41,3	2,3
11	105	11,4	53,0	41,6	2,3
12	107	11,2	51,4	40,2	2,3
13	110	11,6	50,0	38,4	2,3
13	110	11,2	46,0	34,75	2,4
13	110	11,4	44,3	32,9	2,4

As Tabelas A8 e A9 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A8 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,3	0,0	0,2	4,7
2	-0,3	0,0	0,2	4,6
3	-0,3	-0,1	0,3	4,8
4	-0,3	-0,1	0,3	5,1
5	-0,3	0,0	0,2	4,5
6	-0,3	0,0	0,2	4,7
7	-0,3	0,0	0,2	4,5
8	-0,3	0,0	0,2	4,4
9	-0,3	0,0	0,2	4,5
10	-0,3	0,0	0,2	4,7
11	-0,3	0,0	0,2	4,4
12	-0,3	0,0	0,2	4,5
13	-0,3	-0,1	0,3	5,1
14	-0,3	-0,1	0,3	5,6
15	-0,3	-0,1	0,4	6,2

Tabela A9 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 3000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,3	0,2	5,0	95,3
2	1,3	0,2	5,0	95,4
3	1,3	0,2	5,0	95,2
4	1,3	0,2	5,1	94,9
5	1,3	0,2	4,9	95,5
6	1,3	0,2	5,0	95,3
7	1,3	0,2	4,9	95,5
8	1,3	0,2	4,9	95,6
9	1,3	0,2	4,9	95,5
10	1,3	0,2	5,0	95,3
11	1,3	0,2	4,9	95,6
12	1,3	0,2	4,9	95,5
13	1,3	0,2	5,1	94,9
14	1,3	0,2	5,3	94,4
15	1,3	0,2	5,5	93,8

A Tabela A10 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 4000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando água como fluido.

Tabela A10 – Incerteza combinada para 4000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	11,4	85,2	73,8	2,0
2	87	11,3	84,9	73,6	2,0
3	89	11,5	85,3	73,8	2,0
4	91	11,5	85,2	73,7	2,0
5	93	11,2	84,8	73,6	2,0
6	95	11,4	78,3	66,9	2,1
7	97	11,3	75,0	63,7	2,1
8	99	11,5	70,1	58,6	2,1
9	101	11,2	63,8	52,6	2,1
10	103	11,6	60,1	48,5	2,2
11	105	11,7	58,5	46,8	2,2
12	107	11,5	54,2	42,7	2,3
13	110	11,3	48,1	36,8	2,3

As Tabelas A11 e A12 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A11 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1} \times u_p$	$100 \times (S_{P1} \times u_p)^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,2	0,0	0,1	1,8
2	-0,2	0,0	0,1	1,7
3	-0,2	0,0	0,1	1,8
4	-0,2	0,0	0,1	1,8
5	-0,2	0,0	0,1	1,7
6	-0,2	0,0	0,1	2,1
7	-0,2	0,0	0,1	2,2
8	-0,2	0,0	0,1	2,6
9	-0,2	0,0	0,1	3,0
10	-0,2	0,0	0,2	3,6
11	-0,3	0,0	0,2	3,9
12	-0,3	0,0	0,2	4,3
13	-0,3	-0,1	0,3	5,2

Tabela A12 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2} \times u_p$	$100 \times (S_{P2} \times u_p)^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,2	0,2	4,0	98,2
2	1,2	0,2	4,0	98,3
3	1,2	0,2	4,0	98,2
4	1,2	0,2	4,0	98,2
5	1,2	0,2	4,0	98,3
6	1,2	0,2	4,1	97,9
7	1,2	0,2	4,2	97,8
8	1,2	0,2	4,3	97,4
9	1,2	0,2	4,5	97,0
10	1,2	0,2	4,6	96,4
11	1,3	0,2	4,7	96,1
12	1,3	0,2	4,9	95,7
13	1,3	0,2	5,2	94,8

A Tabela A13 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 5000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando água como fluido.

Tabela A13 – Incerteza combinada para 5000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	10,5	109,4	98,9	1,9
2	87	10,1	108,7	98,6	1,9
3	89	10,8	109,9	99,1	1,9
4	91	10,9	108,6	97,7	1,9
5	93	11,0	102,1	91,1	2,0
6	95	10,5	96,9	86,4	2,0
7	97	10,6	91,4	80,8	2,0
8	99	10,9	88,1	77,2	2,0
9	100	11,1	83,8	72,7	2,0
10	103	10,9	74,3	63,4	2,1
11	106	10,8	63,5	52,7	2,1
12	110	11,0	52,8	41,8	2,2

As Tabelas A14 e A15 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A14 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1} \times u_p$	$100 \times (S_{P1} \times u_p)^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,1	0,0	0,0	0,9
2	-0,1	0,0	0,0	0,9
3	-0,1	0,0	0,0	1,0
4	-0,1	0,0	0,0	1,0
5	-0,1	0,0	0,0	1,1
6	-0,1	0,0	0,0	1,2
7	-0,1	0,0	0,1	1,3
8	-0,1	0,0	0,1	1,5
9	-0,2	0,0	0,1	1,7
10	-0,2	0,0	0,1	2,1
11	-0,2	0,0	0,1	2,8
12	-0,3	0,0	0,2	4,2

Tabela A15 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 5000 rpm, água com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2} \times u_p$	$100 \times (S_{P2} \times u_p)^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,1	0,2	3,7	99,1
2	1,1	0,2	3,7	99,1
3	1,1	0,2	3,7	99,0
4	1,1	0,2	3,7	99,0
5	1,1	0,2	3,8	98,9
6	1,1	0,2	3,8	98,8
7	1,1	0,2	3,9	98,7
8	1,1	0,2	3,9	98,5
9	1,2	0,2	4,0	98,3
10	1,2	0,2	4,2	97,9
11	1,2	0,2	4,4	97,2
12	1,3	0,2	4,8	95,8

A Tabela A16 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 1000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando água como fluido.

Tabela A16 – Incerteza combinada para 1000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	42,8	50,5	7,7	15,0
2	87	42,7	50,4	7,7	14,9
3	89	42,9	50,5	7,6	15,2
4	91	42,8	50,6	7,8	14,7
5	93	42,6	50,4	7,8	14,8
6	95	42,7	50,3	7,6	15,1
7	97	42,9	50,7	7,8	14,9
8	99	43,3	50,8	7,5	15,6
9	101	43,5	51,0	7,5	15,6
10	103	43,2	50,9	7,7	15,1
11	105	43,1	50,7	7,6	15,2

As Tabelas A17 e A18 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A17 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1} \times u_p$	$100 \times (S_{P1} \times u_p)^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-5,6	-1,0	93,5	41,8
2	-5,5	-1,0	93,1	41,8
3	-5,6	-1,0	96,5	41,9
4	-5,5	-1,0	90,6	41,7
5	-5,5	-1,0	91,5	41,7
6	-5,6	-1,0	94,9	41,9
7	-5,5	-1,0	92,2	41,7
8	-5,8	-1,0	102,3	42,1
9	-5,8	-1,0	101,8	42,1
10	-5,6	-1,0	95,3	41,9
11	-5,7	-1,0	97,4	42,0

Tabela A18 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P_2}	$S_{P_2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P_2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	6,6	1,1	130,2	58,2
2	6,5	1,1	129,7	58,2
3	6,6	1,2	133,7	58,1
4	6,5	1,1	126,7	58,3
5	6,5	1,1	127,8	58,3
6	6,6	1,1	131,9	58,1
7	6,5	1,1	128,6	58,3
8	6,8	1,2	140,5	57,9
9	6,8	1,2	140,0	57,9
10	6,6	1,2	132,3	58,1
11	6,7	1,2	134,7	58,0

A Tabela A19 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 2000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando água como fluido.

Tabela 19 – Incerteza combinada para 2000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	42,1	63,5	21,4	6,2
2	88	42,2	63,4	21,2	6,3
3	92	42,1	63,6	21,5	6,2
4	95	42,4	63,8	21,4	6,2
5	97	42,1	63,4	21,3	6,2
6	99	42,7	63,6	20,9	6,4
7	101	42,5	63,6	21,1	6,3
8	103	42,2	63,5	21,3	6,2
9	105	42,3	63,6	21,3	6,2
10	107	42,1	63,5	21,4	6,2
11	110	42,2	63,3	21,1	6,3

As Tabelas A20 e A21 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A20 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-2,0	-0,3	11,7	30,5
2	-2,0	-0,3	12,0	30,7
3	-2,0	-0,3	11,6	30,5
4	-2,0	-0,3	11,9	30,7
5	-2,0	-0,3	11,9	30,6
6	-2,0	-0,4	12,6	31,1
7	-2,0	-0,4	12,3	30,9
8	-2,0	-0,3	11,9	30,7
9	-2,0	-0,3	12,0	30,7
10	-2,0	-0,3	11,7	30,5
11	-2,0	-0,3	12,1	30,8

Tabela A21 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	3,0	0,5	26,7	69,5
2	3,0	0,5	27,1	69,3
3	3,0	0,5	26,5	69,5
4	3,0	0,5	27,0	69,3
5	3,0	0,5	26,9	69,4
6	3,0	0,5	28,0	68,9
7	3,0	0,5	27,5	69,1
8	3,0	0,5	27,0	69,3
9	3,0	0,5	27,0	69,3
10	3,0	0,5	26,7	69,5
11	3,0	0,5	27,2	69,2

A Tabela 24 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 3000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando água como fluido.

Tabela A22 – Incerteza combinada para 3000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u _c [%]
1	85	41,9	85,9	44,0	3,8
2	88	41,6	85,7	44,1	3,8
3	92	41,7	85,6	43,9	3,8
4	95	41,8	85,9	44,1	3,8
5	98	41,6	85,7	44,1	3,8
6	100	41,7	85,9	44,2	3,8
7	101	41,8	85,8	44,0	3,8
8	103	42,5	86,7	44,2	3,8
9	105	41,9	86,3	44,4	3,8
10	107	41,5	83,2	41,7	3,9
11	109	41,7	78,3	36,6	4,2
12	110	41,8	74,9	33,1	4,5

As Tabelas A23 e A24 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A23 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S _{P1}	S _{P1 x u_p}	100 x (S _{P1 x u_p}) ²	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-1,0	-0,2	2,7	19,2
2	-0,9	-0,2	2,7	19,1
3	-0,9	-0,2	2,7	19,2
4	-0,9	-0,2	2,7	19,1
5	-0,9	-0,2	2,7	19,1
6	-0,9	-0,2	2,7	19,1
7	-1,0	-0,2	2,7	19,2
8	-1,0	-0,2	2,8	19,4
9	-0,9	-0,2	2,7	19,1
10	-1,0	-0,2	3,0	19,9
11	-1,1	-0,2	3,9	22,1
12	-1,3	-0,2	4,8	23,7

Tabela A24 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 3000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	2,0	0,3	11,5	80,8
2	1,9	0,3	11,4	80,9
3	1,9	0,3	11,5	80,8
4	1,9	0,3	11,5	80,9
5	1,9	0,3	11,4	80,9
6	1,9	0,3	11,4	80,9
7	2,0	0,3	11,5	80,8
8	2,0	0,3	11,6	80,6
9	1,9	0,3	11,4	80,9
10	2,0	0,3	12,0	80,1
11	2,1	0,4	13,9	77,9
12	2,3	0,4	15,5	76,3

A Tabela A25 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 4000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando água como fluido.

Tabela A25 – Incerteza combinada para 4000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	41,1	116,6	75,5	2,8
2	88	41,1	116,7	75,6	2,8
3	92	41,2	116,6	75,4	2,9
4	95	41,0	116,5	75,5	2,8
5	97	41,1	116,3	75,2	2,9
6	99	41,6	117,0	75,4	2,9
7	101	41,5	115,8	74,3	2,9
8	103	41,2	113,5	72,3	2,9
9	105	41,6	112,3	70,7	2,9
10	107	41,5	108,7	67,2	3,0
11	109	41,7	106,4	64,7	3,1
12	110	41,6	103,2	61,6	3,1

As Tabelas A26 e A27 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A

segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A26 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,5	-0,1	0,9	11,1
2	-0,5	-0,1	0,9	11,0
3	-0,5	-0,1	0,9	11,1
4	-0,5	-0,1	0,9	11,0
5	-0,5	-0,1	0,9	11,1
6	-0,6	-0,1	0,9	11,2
7	-0,6	-0,1	0,9	11,4
8	-0,6	-0,1	1,0	11,7
9	-0,6	-0,1	1,0	12,1
10	-0,6	-0,1	1,2	12,7
11	-0,6	-0,1	1,3	13,3
12	-0,7	-0,1	1,4	14,0

Tabela A27 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,5	0,3	7,2	88,9
2	1,5	0,3	7,2	89,0
3	1,5	0,3	7,2	88,9
4	1,5	0,3	7,2	89,0
5	1,5	0,3	7,2	88,9
6	1,6	0,3	7,3	88,8
7	1,6	0,3	7,4	88,6
8	1,6	0,3	7,5	88,3
9	1,6	0,3	7,6	87,9
10	1,6	0,3	7,9	87,3
11	1,6	0,3	8,2	86,7
12	1,7	0,3	8,5	86,0

A Tabela A28 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 5000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando água como fluido.

Tabela A28 – Incerteza combinada para 5000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	42,3	142,5	100,2	2,6
2	88	42,4	142,5	100,1	2,6
3	91	42,1	141,9	99,8	2,6
4	93	42,2	142,3	100,1	2,6
5	95	41,9	139,2	97,3	2,6
6	97	42,8	138,5	95,7	2,6
7	99	42,1	134,6	92,5	2,7
8	101	41,8	132,8	91,0	2,7
9	103	42,3	131,4	89,1	2,7
10	105	41,6	125,2	83,6	2,7
11	107	41,9	121,3	79,4	2,8
12	110	41,7	113,6	71,9	2,9

As Tabelas A29 e A30 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A29 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,4	-0,1	0,5	8,1
2	-0,4	-0,1	0,5	8,1
3	-0,4	-0,1	0,5	8,1
4	-0,4	-0,1	0,5	8,1
5	-0,4	-0,1	0,6	8,3
6	-0,4	-0,1	0,6	8,7
7	-0,5	-0,1	0,6	8,9
8	-0,5	-0,1	0,6	9,0
9	-0,5	-0,1	0,7	9,4
10	-0,5	-0,1	0,7	9,9
11	-0,5	-0,1	0,8	10,7
12	-0,6	-0,1	1,0	11,9

Tabela A30 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 5000 rpm, água com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,4	0,2	6,1	91,9
2	1,4	0,2	6,1	91,9
3	1,4	0,2	6,1	91,9
4	1,4	0,2	6,1	91,9
5	1,4	0,2	6,2	91,7
6	1,4	0,3	6,3	91,3
7	1,5	0,3	6,4	91,1
8	1,5	0,3	6,5	91,0
9	1,5	0,3	6,6	90,6
10	1,5	0,3	6,8	90,1
11	1,5	0,3	7,1	89,3
12	1,6	0,3	7,6	88,1

A Tabela A31 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 1000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água como fluido.

Tabela A31 – Incerteza combinada para 1000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	11,4	17,6	6,2	5,9
2	87	12,2	18,4	6,2	6,2
3	89	12,8	19,1	6,3	6,4
4	91	12,4	18,8	6,4	6,2
5	93	12,3	18,5	6,2	6,3
6	95	12,2	18,4	6,2	6,2
7	97	12,8	18,8	6,0	6,6
8	99	12,3	18,5	6,2	6,3
9	101	11,7	18,0	6,3	5,9
10	102	12,8	19,2	6,4	6,3
11	103	12,6	19,0	6,4	6,2
12	104	13,0	19,5	6,5	6,3
13	105	12,9	19,1	6,2	6,4
14	106	11,8	18,1	6,3	6,0
15	107	12,1	18,3	6,2	6,2
16	108	12,8	19,0	6,2	6,5
17	109	13,1	19,5	6,4	6,4
18	110	12,9	19,4	6,5	6,2

As Tabelas A32 e A33 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A32 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-1,8	-0,3	10,2	29,6
2	-2,0	-0,3	11,8	30,6
3	-2,0	-0,4	12,7	31,1
4	-2,0	-0,3	11,5	30,4
5	-2,0	-0,3	12,0	30,7
6	-2,0	-0,3	11,9	30,7
7	-2,1	-0,4	13,9	31,7
8	-2,0	-0,3	12,1	30,8
9	-1,8	-0,3	10,4	29,6
10	-2,0	-0,4	12,3	30,9
11	-2,0	-0,3	11,9	30,7
12	-2,0	-0,3	12,2	30,8
13	-2,1	-0,4	13,0	31,3
14	-1,9	-0,3	10,8	29,9
15	-2,0	-0,3	11,6	30,5
16	-2,1	-0,4	13,1	31,3
17	-2,0	-0,4	12,7	31,1
18	-2,0	-0,3	11,9	30,7

Tabela A33 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	2,8	0,5	24,4	70,4
2	3,0	0,5	26,8	69,4
3	3,0	0,5	28,1	68,9
4	3,0	0,5	26,4	69,6
5	3,0	0,5	27,1	69,3
6	3,0	0,5	27,0	69,3
7	3,1	0,5	29,9	68,3
8	3,0	0,5	27,2	69,2
9	2,8	0,5	24,6	70,4
10	3,0	0,5	27,5	69,1
11	3,0	0,5	27,0	69,3
12	3,0	0,5	27,4	69,2
13	3,1	0,5	28,6	68,7
14	2,9	0,5	25,3	70,1
15	3,0	0,5	26,5	69,5
16	3,1	0,5	28,7	68,7
17	3,0	0,5	28,1	68,9
18	3,0	0,5	27,0	69,3

A Tabela A34 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 2000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água como fluido.

Tabela A34 – Incerteza combinada para 2000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	11,8	31,7	19,9	3,0
2	87	11,5	31,6	20,1	2,9
3	89	11,2	31,4	20,2	2,9
4	91	12,0	32,0	20,0	3,0
5	93	10,3	30,7	20,4	2,8
6	95	10,2	30,4	20,2	2,8
7	97	11,0	31,2	20,2	2,8
8	99	10,3	30,8	20,5	2,8
9	101	10,1	30,5	20,4	2,7
10	102	10,8	31,3	20,5	2,8
11	103	10,9	31,1	20,2	2,8
12	104	10,8	31,2	20,4	2,8
13	105	10,2	30,7	20,5	2,7
14	106	9,2	29,8	20,6	2,6
15	107	11,1	31,1	20,0	2,9
16	108	10,8	31,0	20,2	2,8
17	109	11,0	31,2	20,2	2,8
18	110	10,9	30,7	19,8	2,9

As Tabelas A35 e A36 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A35 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada [%]
1	-0,6	-0,1	1,1	12,2
2	-0,6	-0,1	1,0	11,7
3	-0,6	-0,1	0,9	11,3
4	-0,6	-0,1	1,1	12,3
5	-0,5	-0,1	0,8	10,1
6	-0,5	-0,1	0,8	10,1
7	-0,5	-0,1	0,9	11,0
8	-0,5	-0,1	0,8	10,1
9	-0,5	-0,1	0,7	9,9
10	-0,5	-0,1	0,8	10,7
11	-0,5	-0,1	0,9	11,0
12	-0,5	-0,1	0,9	10,7
13	-0,5	-0,1	0,7	9,9
14	-0,4	-0,1	0,6	8,7
15	-0,6	-0,1	0,9	11,3
16	-0,5	-0,1	0,9	10,9
17	-0,5	-0,1	0,9	11,1
18	-0,5	-0,1	0,9	11,2

Tabela A36 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,6	0,3	7,7	87,8
2	1,6	0,3	7,5	88,3
3	1,6	0,3	7,3	88,7
4	1,6	0,3	7,7	87,7
5	1,5	0,3	6,9	89,9
6	1,5	0,3	6,9	89,9
7	1,5	0,3	7,2	89,0
8	1,5	0,3	6,8	89,9
9	1,5	0,3	6,8	90,1
10	1,5	0,3	7,1	89,3
11	1,5	0,3	7,2	89,0
12	1,5	0,3	7,1	89,3
13	1,5	0,3	6,8	90,1
14	1,4	0,3	6,3	91,3
15	1,6	0,3	7,3	88,7
16	1,5	0,3	7,1	89,1
17	1,5	0,3	7,2	88,9
18	1,5	0,3	7,3	88,8

A Tabela 39 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 3000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água como fluido.

Tabela A37– Incerteza combinada para 3000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u _c [%]
1	85	14,1	56,8	42,7	2,4
2	87	13,1	55,8	42,7	2,3
3	89	11,6	54,3	42,7	2,3
4	91	12,8	55,1	42,3	2,3
5	93	12,5	55,0	42,5	2,3
6	95	12,2	54,9	42,7	2,3
7	97	11,2	53,6	42,4	2,2
8	99	12,0	54,5	42,5	2,3
9	101	13,8	56,4	42,6	2,4
10	102	12,2	54,9	42,7	2,3
11	103	10,6	53,1	42,5	2,2
12	104	9,9	52,7	42,8	2,2
13	105	10,1	52,4	42,3	2,2
14	106	11,2	53,0	41,8	2,3
15	107	11,8	52,9	41,1	2,3
16	108	11,5	51,6	40,1	2,3
17	109	11,3	50,7	39,4	2,3
18	110	11,4	48,9	37,5	2,3

As Tabelas A38 e A39 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A38– Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,3	-0,1	0,3	5,8
2	-0,3	-0,1	0,3	5,2
3	-0,3	0,0	0,2	4,4
4	-0,3	-0,1	0,3	5,1
5	-0,3	-0,1	0,3	4,9
6	-0,3	0,0	0,2	4,7
7	-0,3	0,0	0,2	4,2
8	-0,3	0,0	0,2	4,6
9	-0,3	-0,1	0,3	5,7
10	-0,3	0,0	0,2	4,7
11	-0,2	0,0	0,2	3,8
12	-0,2	0,0	0,2	3,4
13	-0,2	0,0	0,2	3,6
14	-0,3	0,0	0,2	4,3
15	-0,3	0,0	0,2	4,7
16	-0,3	0,0	0,2	4,7
17	-0,3	0,0	0,2	4,7
18	-0,3	-0,1	0,3	5,2

Tabela A39 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 3000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,3	0,2	5,4	94,2
2	1,3	0,2	5,2	94,8
3	1,3	0,2	4,9	95,6
4	1,3	0,2	5,1	94,9
5	1,3	0,2	5,1	95,1
6	1,3	0,2	5,0	95,3
7	1,3	0,2	4,8	95,8
8	1,3	0,2	5,0	95,4
9	1,3	0,2	5,3	94,3
10	1,3	0,2	5,0	95,3
11	1,2	0,2	4,7	96,2
12	1,2	0,2	4,6	96,6
13	1,2	0,2	4,6	96,4
14	1,3	0,2	4,9	95,7
15	1,3	0,2	5,0	95,3
16	1,3	0,2	5,0	95,3
17	1,3	0,2	5,0	95,3
18	1,3	0,2	5,1	94,8

A Tabela A40 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 4000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água como fluido.

Tabela A40 – Incerteza combinada para 4000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u _c [%]
1	85	13,8	86,9	73,1	2,1
2	87	13,6	86,6	73,0	2,1
3	89	12,8	86,4	73,6	2,1
4	91	12,4	85,7	73,3	2,1
5	93	12,1	84,2	72,1	2,1
6	95	12,5	85,1	72,6	2,1
7	97	12,8	84,9	72,1	2,1
8	99	11,8	84,5	72,7	2,0
9	101	11,9	84,5	72,6	2,0
10	102	12,1	82,6	70,5	2,1
11	103	9,7	77,3	67,6	2,0
12	104	10,5	76,7	66,2	2,0
13	105	10,8	70,7	59,9	2,1
14	106	11,2	67,4	56,2	2,1
15	107	10,2	63,0	52,8	2,1
16	108	11,8	62,9	51,1	2,2
17	110	11,6	58,0	46,4	2,2

As Tabelas A41 e A42 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A41 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,2	0,0	0,1	2,5
2	-0,2	0,0	0,1	2,4
3	-0,2	0,0	0,1	2,1
4	-0,2	0,0	0,1	2,1
5	-0,2	0,0	0,1	2,0
6	-0,2	0,0	0,1	2,1
7	-0,2	0,0	0,1	2,2
8	-0,2	0,0	0,1	1,9
9	-0,2	0,0	0,1	1,9
10	-0,2	0,0	0,1	2,1
11	-0,1	0,0	0,1	1,5
12	-0,2	0,0	0,1	1,8
13	-0,2	0,0	0,1	2,3
14	-0,2	0,0	0,1	2,7
15	-0,2	0,0	0,1	2,6
16	-0,2	0,0	0,2	3,4
17	-0,3	0,0	0,2	3,8

Tabela A42 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,2	0,2	4,3	97,5
2	1,2	0,2	4,3	97,6
3	1,2	0,2	4,2	97,9
4	1,2	0,2	4,1	97,9
5	1,2	0,2	4,1	98,0
6	1,2	0,2	4,2	97,9
7	1,2	0,2	4,2	97,8
8	1,2	0,2	4,1	98,1
9	1,2	0,2	4,1	98,1
10	1,2	0,2	4,2	97,9
11	1,1	0,2	4,0	98,5
12	1,2	0,2	4,1	98,2
13	1,2	0,2	4,2	97,7
14	1,2	0,2	4,4	97,3
15	1,2	0,2	4,3	97,4
16	1,2	0,2	4,6	96,6
17	1,3	0,2	4,7	96,2

A Tabela A43 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 5000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água como fluido.

Tabela A43 – Incerteza combinada para 5000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u _c [%]
1	85	10,9	109,3	98,4	1,9
2	87	10,8	109,9	99,1	1,9
3	90	11,3	110,2	98,9	1,9
4	93	11,4	110,0	98,6	2,0
5	95	11,2	109,4	98,2	1,9
6	97	11,2	109,5	98,3	1,9
7	98	10,3	105,2	94,9	1,9
8	99	11,7	101,0	89,3	2,0
9	100	11,0	91,7	80,7	2,0
10	101	11,2	88,5	77,3	2,0
11	102	10,7	73,8	63,1	2,1
12	103	10,5	71,5	61,0	2,1
13	104	10,8	68,7	57,9	2,1
14	105	10,2	65,7	55,5	2,1
15	107	10,4	63,1	52,7	2,1
16	110	10,8	60,2	49,4	2,2

As Tabelas A44 e A45 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A44 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,1	0,0	0,0	1,0
2	-0,1	0,0	0,0	1,0
3	-0,1	0,0	0,0	1,0
4	-0,1	0,0	0,0	1,1
5	-0,1	0,0	0,0	1,0
6	-0,1	0,0	0,0	1,0
7	-0,1	0,0	0,0	1,0
8	-0,1	0,0	0,1	1,3
9	-0,1	0,0	0,1	1,4
10	-0,1	0,0	0,1	1,6
11	-0,2	0,0	0,1	2,1
12	-0,2	0,0	0,1	2,1
13	-0,2	0,0	0,1	2,4
14	-0,2	0,0	0,1	2,4
15	-0,2	0,0	0,1	2,6
16	-0,2	0,0	0,1	3,1

Tabela A45 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 5000 rpm, mistura 30/70 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,1	0,2	3,7	99,0
2	1,1	0,2	3,7	99,0
3	1,1	0,2	3,8	99,0
4	1,1	0,2	3,8	98,9
5	1,1	0,2	3,8	99,0
6	1,1	0,2	3,8	99,0
7	1,1	0,2	3,7	99,0
8	1,1	0,2	3,9	98,7
9	1,1	0,2	3,9	98,6
10	1,1	0,2	4,0	98,4
11	1,2	0,2	4,1	97,9
12	1,2	0,2	4,2	97,9
13	1,2	0,2	4,3	97,6
14	1,2	0,2	4,2	97,6
15	1,2	0,2	4,3	97,4
16	1,2	0,2	4,5	96,9

A Tabela A46 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 1000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água como fluido.

Tabela A46 – Incerteza combinada para 1000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	42,9	50,2	7,3	15,7
2	92	43,1	50,3	7,2	16,0
3	97	43,5	50,9	7,4	15,7
4	100	43,2	50,5	7,3	15,8
5	101	43,4	50,6	7,2	16,1
6	102	43,4	50,7	7,3	16,0
7	103	44,1	51,2	7,1	16,5
8	105	42,8	50,1	7,3	15,7
9	107	42,5	49,9	7,4	15,4
10	110	42,2	49,6	7,4	15,3

As Tabelas A46 e A47 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A46 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1} \times u_p$	$100 \times (S_{P1} \times u_p)^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-5,9	-1,0	104,6	42,2
2	-6,0	-1,0	108,5	42,3
3	-5,9	-1,0	104,6	42,2
4	-5,9	-1,0	106,0	42,3
5	-6,0	-1,0	110,0	42,4
6	-6,0	-1,0	108,5	42,3
7	-6,2	-1,1	116,0	42,6
8	-5,9	-1,0	104,1	42,2
9	-5,7	-1,0	99,9	42,0
10	-5,7	-1,0	98,5	42,0

Tabela A47 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P_2}	$S_{P_2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P_2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	6,9	1,2	143,2	57,8
2	7,0	1,2	147,8	57,7
3	6,9	1,2	143,2	57,8
4	6,9	1,2	144,9	57,7
5	7,0	1,2	149,5	57,6
6	7,0	1,2	147,8	57,7
7	7,2	1,3	156,5	57,4
8	6,9	1,2	142,6	57,8
9	6,7	1,2	137,7	58,0
10	6,7	1,2	136,0	58,0

A Tabela A48 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 2000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água como fluido.

Tabela A48 – Incerteza combinada para 2000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	44,5	65,1	20,6	6,7
2	92	44,3	65,2	20,9	6,6
3	97	44,4	64,8	20,4	6,7
4	100	44,1	64,9	20,8	6,6
5	101	44,3	65,0	20,7	6,6
6	102	44,8	65,5	20,7	6,7
7	103	44,7	65,5	20,8	6,6
8	105	44,8	65,4	20,6	6,7
9	107	44,5	65,3	20,8	6,6
10	109	44,6	65,3	20,7	6,7
11	110	43,8	64,7	20,9	6,5

As Tabelas A49 e A50 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos

componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A49 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-2,2	-0,4	14,1	31,8
2	-2,1	-0,4	13,6	31,6
3	-2,2	-0,4	14,3	31,9
4	-2,1	-0,4	13,6	31,6
5	-2,1	-0,4	13,9	31,7
6	-2,2	-0,4	14,2	31,9
7	-2,2	-0,4	14,0	31,8
8	-2,2	-0,4	14,3	31,9
9	-2,1	-0,4	13,9	31,7
10	-2,2	-0,4	14,1	31,8
11	-2,1	-0,4	13,4	31,5

Tabela A50 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	3,2	0,5	30,2	68,2
2	3,1	0,5	29,5	68,4
3	3,2	0,6	30,5	68,1
4	3,1	0,5	29,4	68,4
5	3,1	0,5	29,9	68,3
6	3,2	0,6	30,4	68,1
7	3,2	0,5	30,1	68,2
8	3,2	0,6	30,5	68,1
9	3,1	0,5	29,9	68,3
10	3,2	0,5	30,2	68,2
11	3,1	0,5	29,1	68,5

A Tabela A51 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 3000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água como fluido.

Tabela A51 – Incerteza combinada para 3000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	46,4	89,8	43,4	4,1
2	92	46,7	89,8	43,1	4,1
3	97	46,6	89,9	43,3	4,1
4	100	46,8	89,7	42,9	4,1
5	101	46,5	89,6	43,1	4,1
6	102	47,0	90,6	43,6	4,1
7	103	46,8	90,1	43,3	4,1
8	105	46,7	89,7	43,0	4,1
9	107	46,4	89,5	43,1	4,1
10	109	46,1	89,2	43,1	4,1
11	110	45,9	88,9	43,0	4,0

As Tabelas A52 e A53 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A52 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-1,1	-0,2	3,5	21,1
2	-1,1	-0,2	3,6	21,3
3	-1,1	-0,2	3,5	21,2
4	-1,1	-0,2	3,6	21,4
5	-1,1	-0,2	3,5	21,2
6	-1,1	-0,2	3,5	21,2
7	-1,1	-0,2	3,5	21,3
8	-1,1	-0,2	3,6	21,3
9	-1,1	-0,2	3,5	21,2
10	-1,1	-0,2	3,5	21,1
11	-1,1	-0,2	3,5	21,1

Tabela A53 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 3000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P_2}	$S_{P_2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P_2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	2,1	0,4	13,0	78,9
2	2,1	0,4	13,1	78,7
3	2,1	0,4	13,1	78,8
4	2,1	0,4	13,2	78,6
5	2,1	0,4	13,1	78,8
6	2,1	0,4	13,1	78,8
7	2,1	0,4	13,1	78,7
8	2,1	0,4	13,2	78,7
9	2,1	0,4	13,1	78,8
10	2,1	0,4	13,0	78,9
11	2,1	0,4	12,9	78,9

A Tabela A54 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 4000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água como fluido.

Tabela A54 – Incerteza combinada para 4000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	45,9	120,1	74,2	3,0
2	92	46,3	120,6	74,3	3,0
3	97	46,1	120,2	74,1	3,0
4	100	46,2	120,4	74,2	3,0
5	101	46,0	120,5	74,5	3,0
6	102	46,2	120,6	74,4	3,0
7	103	46,1	120,5	74,4	3,0
8	104	46,3	120,6	74,3	3,0
9	105	46,6	119,7	73,1	3,1
10	106	45,4	116,7	71,3	3,1
11	107	44,8	115,6	70,8	3,0
12	108	45,4	112,1	66,7	3,2
13	109	46,1	111,8	65,7	3,2
14	110	46,2	110,5	64,3	3,2

As Tabelas A55 e A56 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A55 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,6	-0,1	1,2	12,7
2	-0,6	-0,1	1,2	12,8
3	-0,6	-0,1	1,2	12,8
4	-0,6	-0,1	1,2	12,8
5	-0,6	-0,1	1,2	12,7
6	-0,6	-0,1	1,2	12,8
7	-0,6	-0,1	1,2	12,8
8	-0,6	-0,1	1,2	12,8
9	-0,6	-0,1	1,2	13,2
10	-0,6	-0,1	1,2	13,1
11	-0,6	-0,1	1,2	13,1
12	-0,7	-0,1	1,4	14,1
13	-0,7	-0,1	1,5	14,5
14	-0,7	-0,1	1,6	14,9

Tabela A56 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P_2}	$S_{P_2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P_2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,6	0,3	7,9	87,3
2	1,6	0,3	8,0	87,2
3	1,6	0,3	8,0	87,2
4	1,6	0,3	8,0	87,2
5	1,6	0,3	7,9	87,3
6	1,6	0,3	8,0	87,2
7	1,6	0,3	7,9	87,2
8	1,6	0,3	8,0	87,2
9	1,6	0,3	8,1	86,8
10	1,6	0,3	8,1	86,9
11	1,6	0,3	8,1	86,9
12	1,7	0,3	8,6	85,9
13	1,7	0,3	8,8	85,5
14	1,7	0,3	8,9	85,1

A Tabela A57 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 5000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando a mistura de 30% etilenoglicol e 70% água como fluido.

Tabela A57 – Incerteza combinada para 5000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	41,2	141,4	100,2	2,6
2	92	41,5	142,0	100,5	2,6
3	97	41,3	141,6	100,3	2,6
4	100	41,1	141,5	100,4	2,6
5	101	41,8	141,9	100,1	2,6
6	102	41,6	141,3	99,7	2,6
7	103	41,2	138,7	97,5	2,6
8	104	41,2	137,5	96,3	2,6
9	105	41,6	137,5	95,9	2,6
10	106	41,0	133,7	92,7	2,6
11	107	41,6	131,5	89,9	2,7
12	108	41,2	130,4	89,2	2,7
13	109	41,8	126,8	85,0	2,7
14	110	41,6	119,0	77,4	2,8

As Tabelas A58 e A59 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A58 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,4	-0,1	0,5	7,8
2	-0,4	-0,1	0,5	7,9
3	-0,4	-0,1	0,5	7,8
4	-0,4	-0,1	0,5	7,8
5	-0,4	-0,1	0,5	8,0
6	-0,4	-0,1	0,5	8,0
7	-0,4	-0,1	0,5	8,1
8	-0,4	-0,1	0,6	8,2
9	-0,4	-0,1	0,6	8,4
10	-0,4	-0,1	0,6	8,6
11	-0,5	-0,1	0,6	9,1
12	-0,5	-0,1	0,6	9,1
13	-0,5	-0,1	0,7	9,8
14	-0,5	-0,1	0,9	10,9

Tabela A59 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 5000 rpm, mistura 30/70 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,4	0,2	6,0	92,2
2	1,4	0,2	6,0	92,1
3	1,4	0,2	6,0	92,2
4	1,4	0,2	6,0	92,2
5	1,4	0,2	6,1	92,0
6	1,4	0,2	6,1	92,0
7	1,4	0,2	6,1	91,9
8	1,4	0,2	6,2	91,8
9	1,4	0,2	6,2	91,6
10	1,4	0,3	6,3	91,4
11	1,5	0,3	6,5	90,9
12	1,5	0,3	6,5	90,9
13	1,5	0,3	6,7	90,2
14	1,5	0,3	7,2	89,1

A Tabela A60 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 1000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água como fluido.

Tabela A60 – Incerteza combinada para 1000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	11,5	17,5	6,0	6,1
2	90	11,3	17,4	6,1	5,9
3	95	11,4	17,3	5,9	6,1
4	97	11,2	17,0	5,8	6,1
5	99	11,4	17,5	6,1	6,0
6	101	11,2	17,1	5,9	6,0
7	103	11,0	17,1	6,1	5,8
8	105	10,8	16,8	6,0	5,8
9	107	11,2	17,2	6,0	6,0
10	109	11,4	17,5	6,1	5,9
11	110	11,4	17,4	6,0	6,0

As Tabelas A61 e A62 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída,

respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A61 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-1,9	-0,3	11,1	30,2
2	-1,9	-0,3	10,4	29,7
3	-1,9	-0,3	11,5	30,4
4	-1,9	-0,3	11,4	30,3
5	-1,9	-0,3	10,6	29,8
6	-1,9	-0,3	11,0	30,1
7	-1,8	-0,3	9,8	29,3
8	-1,8	-0,3	9,7	29,2
9	-1,9	-0,3	10,6	29,8
10	-1,9	-0,3	10,5	29,7
11	-1,9	-0,3	10,9	30,0

Tabela A62 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	2,9	0,5	25,8	69,8
2	2,9	0,5	24,6	70,3
3	2,9	0,5	26,3	69,6
4	2,9	0,5	26,2	69,7
5	2,9	0,5	24,9	70,2
6	2,9	0,5	25,6	69,9
7	2,8	0,5	23,8	70,7
8	2,8	0,5	23,6	70,8
9	2,9	0,5	25,0	70,2
10	2,9	0,5	24,8	70,3
11	2,9	0,5	25,5	70,0

A Tabela A63 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 2000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água como fluido.

Tabela A63 – Incerteza combinada para 2000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u _c [%]
1	85	11,9	32,2	20,3	2,9
2	90	12,0	32,3	20,3	3,0
3	95	11,8	32,0	20,2	2,9
4	97	11,8	32,1	20,3	2,9
5	99	12,0	32,0	20,0	3,0
6	101	11,9	32,1	20,2	3,0
7	103	12,0	32,2	20,2	3,0
8	105	12,1	32,0	19,9	3,0
9	107	12,4	32,3	19,9	3,0
10	109	12,0	32,1	20,1	3,0
11	111	11,8	31,7	19,9	3,0

As Tabelas A64 e A65 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A64 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,6	-0,1	1,0	12,0
2	-0,6	-0,1	1,1	12,1
3	-0,6	-0,1	1,0	12,0
4	-0,6	-0,1	1,0	11,9
5	-0,6	-0,1	1,1	12,4
6	-0,6	-0,1	1,1	12,1
7	-0,6	-0,1	1,1	12,2
8	-0,6	-0,1	1,1	12,5
9	-0,6	-0,1	1,2	12,8
10	-0,6	-0,1	1,1	12,3
11	-0,6	-0,1	1,1	12,2

Tabela A65 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,6	0,3	7,6	88,0
2	1,6	0,3	7,7	87,9
3	1,6	0,3	7,6	88,0
4	1,6	0,3	7,6	88,1
5	1,6	0,3	7,8	87,6
6	1,6	0,3	7,7	87,9
7	1,6	0,3	7,7	87,8
8	1,6	0,3	7,8	87,5
9	1,6	0,3	8,0	87,2
10	1,6	0,3	7,7	87,7
11	1,6	0,3	7,7	87,8

A Tabela A66 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 3000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água como fluido.

Tabela A66 – Incerteza combinada para 3000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	15,3	57,3	42,0	2,5
2	90	15,4	57,5	42,1	2,5
3	95	15,6	57,9	42,3	2,5
4	97	15,1	57,2	42,1	2,4
5	99	15,8	58,1	42,3	2,5
6	101	15,1	57,7	42,6	2,4
7	103	15,9	58,0	42,1	2,5
8	105	15,7	57,7	42,0	2,5
9	107	15,9	58,3	42,4	2,5
10	109	15,5	56,1	40,6	2,5
11	111	15,8	51,5	35,7	2,6

As Tabelas A67 e A68 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A67 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1} \times u_p$	$100 \times (S_{P1} \times u_p)^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,4	-0,1	0,4	6,7
2	-0,4	-0,1	0,4	6,7
3	-0,4	-0,1	0,4	6,8
4	-0,4	-0,1	0,4	6,5
5	-0,4	-0,1	0,4	6,9
6	-0,4	-0,1	0,4	6,4
7	-0,4	-0,1	0,4	7,0
8	-0,4	-0,1	0,4	6,9
9	-0,4	-0,1	0,4	6,9
10	-0,4	-0,1	0,4	7,1
11	-0,4	-0,1	0,6	8,6

Tabela A68 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 3000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,4	0,2	5,6	93,3
2	1,4	0,2	5,6	93,3
3	1,4	0,2	5,7	93,2
4	1,4	0,2	5,6	93,5
5	1,4	0,2	5,7	93,1
6	1,4	0,2	5,6	93,6
7	1,4	0,2	5,8	93,0
8	1,4	0,2	5,7	93,1
9	1,4	0,2	5,7	93,1
10	1,4	0,2	5,8	92,9
11	1,4	0,3	6,3	91,4

A Tabela A69 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 4000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água como fluido.

Tabela A69 – Incerteza combinada para 4000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	12,0	87,8	75,8	2,0
2	90	11,9	87,6	75,7	2,0
3	95	11,8	87,4	75,6	2,0
4	97	12,0	87,8	75,8	2,0
5	99	12,0	87,9	75,9	2,0
6	101	11,9	87,6	75,7	2,0
7	103	12,1	88,1	76,0	2,0
8	105	11,8	83,6	71,8	2,0
9	107	11,0	75,7	64,7	2,1
10	110	10,4	67,4	57,0	2,1

As Tabelas A70 e A71 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos

componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A70 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,2	0,0	0,1	1,8
2	-0,2	0,0	0,1	1,8
3	-0,2	0,0	0,1	1,8
4	-0,2	0,0	0,1	1,8
5	-0,2	0,0	0,1	1,8
6	-0,2	0,0	0,1	1,8
7	-0,2	0,0	0,1	1,9
8	-0,2	0,0	0,1	2,0
9	-0,2	0,0	0,1	2,1
10	-0,2	0,0	0,1	2,3

Tabela A71 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,2	0,2	4,1	98,2
2	1,2	0,2	4,1	98,2
3	1,2	0,2	4,0	98,2
4	1,2	0,2	4,1	98,2
5	1,2	0,2	4,1	98,2
6	1,2	0,2	4,1	98,2
7	1,2	0,2	4,1	98,1
8	1,2	0,2	4,1	98,0
9	1,2	0,2	4,1	97,9
10	1,2	0,2	4,2	97,7

A Tabela A72 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 5000 rpm, com pressão de sistema de 15 kPa, utilizando a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água como fluido.

Tabela A72 – Incerteza combinada para 5000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	12,1	110,1	98,0	2,0
2	90	12,2	110,0	97,8	2,0
3	93	12,0	109,7	97,7	2,0
4	95	12,1	110,1	98,0	2,0
5	97	11,8	109,1	97,3	2,0
6	99	11,9	110,1	98,2	2,0
7	101	12,2	108,8	96,6	2,0
8	103	12,5	105,4	92,9	2,0
9	105	11,9	97,2	85,3	2,0
10	107	11,0	82,1	71,1	2,0
11	110	9,5	67,5	58,0	2,0

As Tabelas A73 e A74 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A73 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1} \times u_p$	$100 \times (S_{P1} \times u_p)^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,1	0,0	0,0	1,2
2	-0,1	0,0	0,0	1,2
3	-0,1	0,0	0,0	1,2
4	-0,1	0,0	0,0	1,2
5	-0,1	0,0	0,0	1,2
6	-0,1	0,0	0,0	1,2
7	-0,1	0,0	0,0	1,2
8	-0,1	0,0	0,1	1,4
9	-0,1	0,0	0,1	1,5
10	-0,2	0,0	0,1	1,8
11	-0,2	0,0	0,1	1,9

Tabela A74 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 5000 rpm, mistura 50/50 com 15 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P_2}	$S_{P_2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P_2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,1	0,2	3,8	98,8
2	1,1	0,2	3,8	98,8
3	1,1	0,2	3,8	98,8
4	1,1	0,2	3,8	98,8
5	1,1	0,2	3,8	98,8
6	1,1	0,2	3,8	98,8
7	1,1	0,2	3,8	98,8
8	1,1	0,2	3,9	98,6
9	1,1	0,2	3,9	98,5
10	1,2	0,2	4,0	98,2
11	1,2	0,2	4,1	98,1

A Tabela A75 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 1000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água como fluido.

Tabela A75 – Incerteza combinada para 1000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	43,5	50,6	7,1	16,4
2	90	43,7	50,7	7,0	16,6
3	95	43,6	50,8	7,2	16,1
4	97	43,7	50,9	7,2	16,3
5	99	43,5	50,9	7,4	15,8
6	101	43,3	50,5	7,2	16,1
7	103	43,2	50,6	7,4	15,6
8	105	42,8	50,3	7,5	15,4
9	107	43,7	50,9	7,2	16,2
10	109	43,5	51,1	7,6	15,4
11	110	43,4	50,8	7,4	15,7

As Tabelas A76 e A77 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos

componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A76 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 1000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada [%]
1	-6,1	-1,1	113,6	42,5
2	-6,2	-1,1	118,0	42,6
3	-6,0	-1,1	110,3	42,4
4	-6,1	-1,1	112,3	42,5
5	-5,9	-1,0	106,0	42,3
6	-6,0	-1,0	109,5	42,4
7	-5,8	-1,0	103,2	42,2
8	-5,7	-1,0	99,3	42,0
9	-6,1	-1,1	111,5	42,4
10	-5,7	-1,0	99,8	42,0
11	-5,8	-1,0	103,4	42,2

Tabela A77 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 1000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	7,1	1,2	153,8	57,5
2	7,2	1,3	158,8	57,4
3	7,0	1,2	149,8	57,6
4	7,1	1,2	152,2	57,5
5	6,9	1,2	144,9	57,7
6	7,0	1,2	148,9	57,6
7	6,8	1,2	141,6	57,8
8	6,7	1,2	137,0	58,0
9	7,1	1,2	151,3	57,6
10	6,7	1,2	137,6	58,0
11	6,8	1,2	141,9	57,8

A Tabela A78 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 2000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água como fluido.

Tabela A78 – Incerteza combinada para 2000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	12,0	32,8	20,8	2,9
2	90	11,9	32,8	20,9	2,9
3	95	11,8	32,7	20,9	2,9
4	97	11,8	32,9	21,1	2,9
5	99	12,0	32,7	20,7	2,9
6	101	11,9	32,3	20,4	2,9
7	103	12,0	32,9	20,9	2,9
8	105	12,1	33,1	21,0	2,9
9	107	12,4	33,3	20,9	3,0
10	109	12,0	32,5	20,5	2,9
11	110	11,8	32,6	20,8	2,9

As Tabelas A79 e A80 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A79 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 2000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,6	-0,1	1,0	11,8
2	-0,6	-0,1	1,0	11,6
3	-0,6	-0,1	1,0	11,5
4	-0,6	-0,1	1,0	11,4
5	-0,6	-0,1	1,0	11,9
6	-0,6	-0,1	1,0	11,9
7	-0,6	-0,1	1,0	11,8
8	-0,6	-0,1	1,0	11,8
9	-0,6	-0,1	1,1	12,2
10	-0,6	-0,1	1,0	12,0
11	-0,6	-0,1	1,0	11,6

Tabela A80 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 2000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P_2}	$S_{P_2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P_2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,6	0,3	7,5	88,2
2	1,6	0,3	7,5	88,4
3	1,6	0,3	7,4	88,5
4	1,6	0,3	7,4	88,6
5	1,6	0,3	7,6	88,1
6	1,6	0,3	7,6	88,1
7	1,6	0,3	7,5	88,2
8	1,6	0,3	7,5	88,2
9	1,6	0,3	7,7	87,8
10	1,6	0,3	7,6	88,0
11	1,6	0,3	7,4	88,4

A Tabela A81 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 3000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água como fluido.

Tabela A81 – Incerteza combinada para 3000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	11,9	55,8	43,9	2,3
2	90	12,1	56,2	44,1	2,3
3	95	12,0	55,9	43,9	2,3
4	97	12,1	55,5	43,4	2,3
5	99	11,8	55,7	43,9	2,3
6	101	12,1	56,1	44,0	2,3
7	103	11,9	55,7	43,8	2,3
8	105	11,7	54,7	43,0	2,3
9	107	12,0	55,4	43,4	2,3
10	109	11,7	54,7	43,0	2,3
11	110	16,8	59,1	42,3	2,5

As Tabelas A82 e A83 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos

componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A82 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,3	0,0	0,2	4,4
2	-0,3	0,0	0,2	4,4
3	-0,3	0,0	0,2	4,4
4	-0,3	0,0	0,2	4,5
5	-0,3	0,0	0,2	4,3
6	-0,3	0,0	0,2	4,4
7	-0,3	0,0	0,2	4,4
8	-0,3	0,0	0,2	4,4
9	-0,3	0,0	0,2	4,5
10	-0,3	0,0	0,2	4,4
11	-0,4	-0,1	0,5	7,5

Tabela A83 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 3000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,3	0,2	4,9	95,6
2	1,3	0,2	4,9	95,6
3	1,3	0,2	4,9	95,6
4	1,3	0,2	4,9	95,5
5	1,3	0,2	4,9	95,7
6	1,3	0,2	4,9	95,6
7	1,3	0,2	4,9	95,6
8	1,3	0,2	4,9	95,6
9	1,3	0,2	4,9	95,5
10	1,3	0,2	4,9	95,6
11	1,4	0,2	5,9	92,5

A Tabela A84 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 4000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água como fluido.

Tabela A84 – Incerteza combinada para 4000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	45,4	120,3	74,9	3,0
2	90	45,3	120,1	74,8	3,0
3	93	45,6	120,5	74,9	3,0
4	95	45,5	120,2	74,7	3,0
5	97	45,1	120,1	75,0	3,0
6	99	44,8	119,4	74,6	3,0
7	101	47,8	121,7	73,9	3,1
8	103	45,6	120,3	74,7	3,0
9	105	45,4	120,1	74,7	3,0
10	107	48,0	119,8	71,8	3,1

As Tabelas A85 e A86 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A85 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 4000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,6	-0,1	1,1	12,5
2	-0,6	-0,1	1,1	12,5
3	-0,6	-0,1	1,1	12,5
4	-0,6	-0,1	1,1	12,5
5	-0,6	-0,1	1,1	12,4
6	-0,6	-0,1	1,1	12,3
7	-0,6	-0,1	1,3	13,4
8	-0,6	-0,1	1,1	12,6
9	-0,6	-0,1	1,1	12,5
10	-0,7	-0,1	1,4	13,8
11	-0,7	-0,1	1,3	13,5

Tabela A86 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de saída a 4000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P_2}	$S_{P_2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P_2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,6	0,3	7,8	87,5
2	1,6	0,3	7,8	87,5
3	1,6	0,3	7,8	87,5
4	1,6	0,3	7,8	87,5
5	1,6	0,3	7,8	87,6
6	1,6	0,3	7,8	87,7
7	1,6	0,3	8,2	86,6
8	1,6	0,3	7,9	87,4
9	1,6	0,3	7,8	87,5
10	1,7	0,3	8,4	86,2
11	1,7	0,3	8,3	86,5

A Tabela A87 trás o cálculo da incerteza combinada para as medições feitas a 5000 rpm, com pressão de sistema de 50 kPa, utilizando a mistura de 50% etilenoglicol e 50% água como fluido.

Tabela A87 – Incerteza combinada para 5000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	T [°C]	P1 [kPa]	P2 [kPa]	DP [kPa]	u_c [%]
1	85	41,3	141,3	100,0	2,6
2	90	41,2	141,4	100,2	2,6
3	93	41,1	141,6	100,5	2,6
4	95	41,5	141,8	100,3	2,6
5	97	41,4	141,8	100,4	2,6
6	99	41,8	142,3	100,5	2,6
7	101	41,6	141,7	100,1	2,6
8	103	41,5	141,9	100,4	2,6
9	105	41,2	139,0	97,8	2,6
10	107	41,8	138,1	96,3	2,6
11	110	41,7	133,5	91,8	2,7

As Tabelas A88 e A89 apresentam o cálculo dos coeficientes de sensibilidade das medições das pressões de entrada e saída, respectivamente. A primeira coluna referencia a seqüência de medição. A segunda, terceira e quarta coluna contém a informação para cada um dos

componentes da Eq. 13. A quinta coluna traz a contribuição para a incerteza combinada.

Tabela A88 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P1}	$S_{P1 \times u_p}$	$100 \times (S_{P1 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Entrada[%]
1	-0,4	-0,1	0,5	7,9
2	-0,4	-0,1	0,5	7,8
3	-0,4	-0,1	0,5	7,8
4	-0,4	-0,1	0,5	7,9
5	-0,4	-0,1	0,5	7,9
6	-0,4	-0,1	0,5	7,9
7	-0,4	-0,1	0,5	7,9
8	-0,4	-0,1	0,5	7,9
9	-0,4	-0,1	0,5	8,1
10	-0,4	-0,1	0,6	8,4
11	-0,5	-0,1	0,6	8,9

Tabela A89 – Coeficientes de sensibilidade para a pressão de entrada a 5000 rpm, mistura 50/50 com 50 kPa de pressão de sistema.

Índice	S_{P2}	$S_{P2 \times u_p}$	$100 \times (S_{P2 \times u_p})^2$	Contribuição do Transdutor de Pressão da Saída [%]
1	1,4	0,2	6,0	92,1
2	1,4	0,2	6,0	92,2
3	1,4	0,2	6,0	92,2
4	1,4	0,2	6,1	92,1
5	1,4	0,2	6,0	92,1
6	1,4	0,2	6,1	92,1
7	1,4	0,2	6,1	92,1
8	1,4	0,2	6,0	92,1
9	1,4	0,2	6,1	91,9
10	1,4	0,2	6,2	91,6
11	1,5	0,3	6,4	91,1

ANEXO B

Propriedades das Misturas Água / Etilenoglicol Testado (as informações abaixo foram cedidas pela empresa Tirreno – Indústria e Comercio de Produtos Químicos Ltda.).

FLUIDO PARA ARREFECIMENTO TIRRENO ORGANIC COOL 100

Ponto de congelamento (°C)

Temperatura (°C)	Concentração do Tirreno Organic Cool 100 (%v/v)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0	-2.5	-9.5	-16	-22.5	-38	-53				

Ponto de ebulição 760 mmHg (°C)

Temperatura (°C)	Concentração do Tirreno Organic Cool 100 (%v/v)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
100	100	101	102	104	108	110	112				

Condutividade elétrica (µS/cm)

Temperatura (20°C)	Concentração do Tirreno Organic Cool 100 (%v/v)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5.6	1000	1435	1835	1896	1825	1560	1399	1116	832	600

Densidade (g/ml)

Temperatura (°C)	Concentração do Tirreno Organic Cool 100 (%v/v)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-50							1.118	1.132	1.143		
-40							1.113	1.126	1.138		
-30						1.095	1.108	1.120	1.132	1.140	
-20					1.074	1.091	1.103	1.115	1.125	1.134	
-10				1.055	1.071	1.086	1.097	1.109	1.119	1.127	1.137
0	0.999	1.019	1.036	1.052	1.067	1.081	1.092	1.103	1.112	1.121	1.130
10	0.999	1.017	1.033	1.048	1.062	1.076	1.086	1.097	1.106	1.114	1.123
20	0.998	1.015	1.030	1.044	1.057	1.070	1.080	1.091	1.099	1.106	1.116
30	0.996	1.012	1.026	1.040	1.052	1.064	1.074	1.084	1.093	1.100	1.108
40	0.992	1.008	1.022	1.035	1.046	1.058	1.067	1.077	1.085	1.093	1.101
50	0.988	1.002	1.016	1.029	1.040	1.052	1.061	1.070	1.079	1.086	1.095
60	0.983	0.998	1.010	1.023	1.034	1.045	1.054	1.063	1.071	1.079	1.088
70	0.978	0.994	1.004	1.017	1.027	1.038	1.047	1.056	1.064	1.072	1.081
80	0.972	0.989	0.997	1.010	1.020	1.031	1.039	1.048	1.057	1.064	1.074
90	0.965	0.981	0.990	1.002	1.013	1.023	1.032	1.041	1.049	1.057	1.068
100		0.970	0.982	0.996	1.005	1.015	1.024	1.033	1.041	1.050	1.060
110							1.016	1.025	1.034	1.042	1.053
120									1.026	1.034	1.045

congelamento

Ebulição

Viscosidade Cinemática (cSt)

Temperatura (°C)	Concentração do Tirreno Organic Cool 100 (%v/v)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-50							172.0	285.6	254.7		
-40							112.2	181.4	175.6		
-30						36.8	71.3	112.2	121.7	158.4	
-20					16.5	23.7	44.9	67.8	81.4	105.3	
-10				6.7	11.0	15.3	29.8	39.6	53.6	68.6	89.4
0		2.6	3.6	4.9	7.4	9.9	18.4	24.5	34.5	44.4	57.2
10	1.4	1.9	2.7	3.5	5.1	6.6	12.3	14.6	22.3	28.6	34.1
20	1.1	1.5	2.0	2.6	3.4	4.5	8.2	9.8	14.8	19.7	23.6
30	0.9	1.1	1.6	2.1	2.6	3.4	6.4	6.4	9.8	12.7	15.2
40	0.8	1.0	1.3	1.7	1.9	2.5	3.6	4.8	6.2	9.3	11.1
50	0.7	0.8	1.1	1.3	1.6	2.2	2.8	3.4	5.1	6.5	8.9
60	0.6	0.7	1.0	1.2	1.5	1.9	1.9	2.9	4.0	4.7	6.5
70	0.5	0.6	0.9	1.1	1.2	1.6	1.6	2.2	3.1	3.7	4.8
80	0.4	0.6	0.8	0.9	1.2	1.4	1.3	1.7	2.4	2.9	3.9
90	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.3	1.2	1.4	1.9	2.4	2.7
100		0.4	0.7	0.7	0.9	1.2	1.0	1.4	1.7	2.2	2.2
110							0.8	1.2	1.5	1.9	1.9
120									1.3	1.6	1.6

congelamento

Ebulição

Calor específico (kJ/Kg.K)

	Concentração do Tirreno Organic Cool 100 (%v/v)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-50							2.68	2.52	2.19		
-40							2.75	2.59	2.30		
-30						2.98	2.84	2.64	2.39	2.30	
-20					3.37	3.05	2.93	2.70	2.46	2.35	
-10				3.75	3.42	3.13	3.00	2.76	2.54	2.39	2.22
0		4.06	3.89	3.79	3.48	3.20	3.06	2.85	2.60	2.43	2.28
10	4.23	4.08	3.93	3.83	3.56	3.26	3.15	2.94	2.73	2.47	2.32
20	4.22	4.08	3.94	3.86	3.58	3.32	3.17	2.98	2.76	2.51	2.35
30	4.15	4.09	3.94	3.89	3.62	3.37	3.22	3.04	2.82	2.57	2.41
40	4.15	4.09	3.95	3.91	3.65	3.43	3.31	3.10	2.87	2.61	2.47
50	4.15	4.10	3.96	3.94	3.68	3.49	3.32	3.15	2.92	2.65	2.53
60	4.14	4.10	3.97	3.96	3.72	3.54	3.36	3.20	2.97	2.71	2.59
70	4.14	4.11	3.98	3.96	3.75	3.58	3.41	3.25	3.02	2.76	2.65
80	4.18	4.11	3.98	3.98	3.79	3.60	3.45	3.29	3.08	2.84	2.71
90	4.19	4.11	3.99	3.98	3.83	3.64	3.50	3.32	3.13	2.91	2.76
100		4.12	4.00	3.99	3.86	3.66	3.55	3.36	3.18	2.96	2.82
110							3.58	3.40	3.20	3.01	2.84
120									3.26	3.08	2.88

congelamento

Ebulição

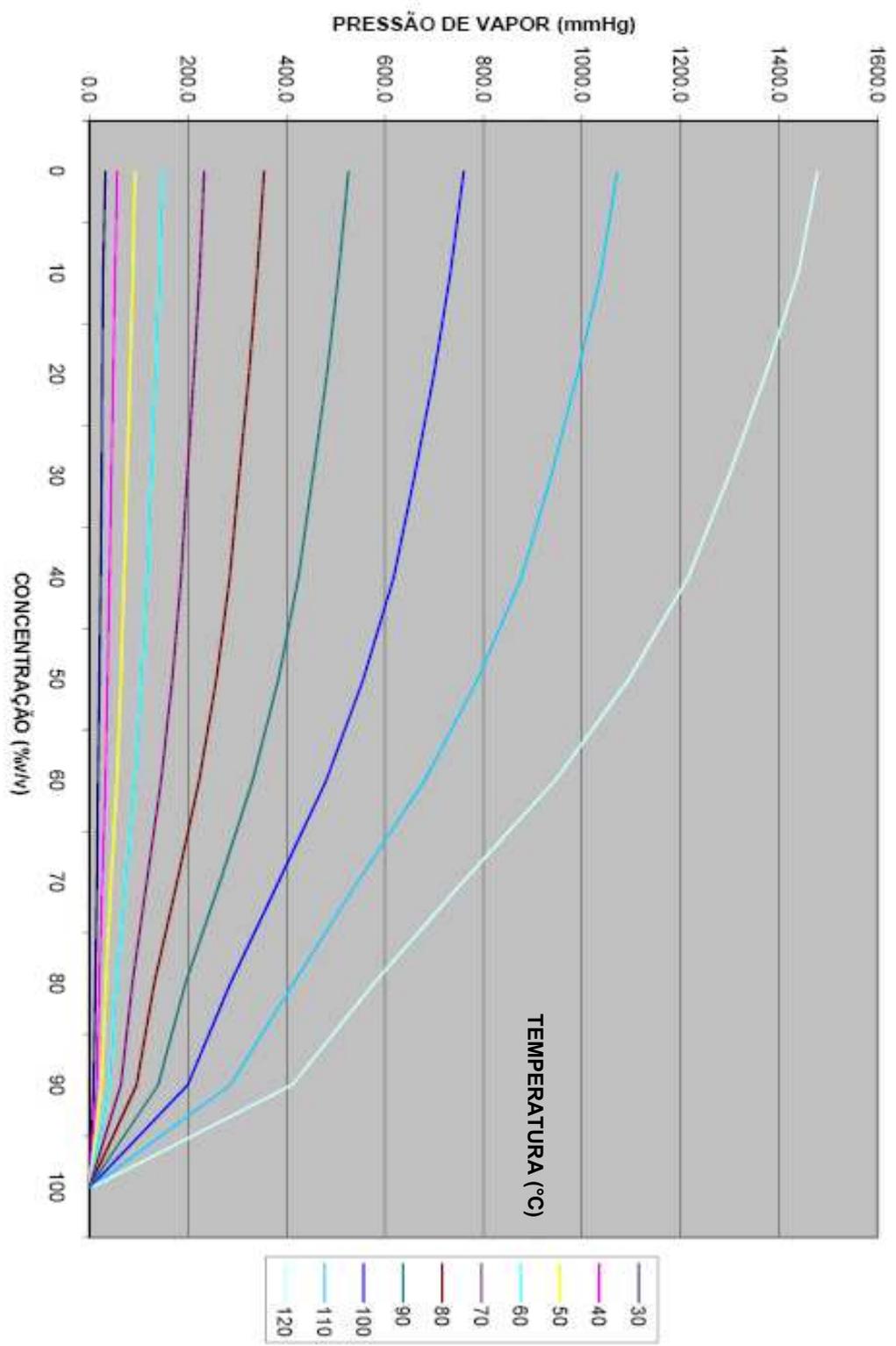
Pressão de vapor (mmHg)

Temperatura (°C)	Concentração do Tirreno Organic Cool 100 (%v/v)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	33.2	28.1	26.7	25.6	23.4	21.0	18.0	15.6	12.5	9.3	0.1
40	56.7	52.2	48.8	44.6	41.1	37.5	32.9	26.5	20.3	15.3	0.1
50	93.1	88.6	82.9	76.9	71.1	64.4	56.4	44.7	33.7	25.4	0.2
60	149.2	143.2	134.7	126.1	117.4	106.2	92.2	73.4	55.6	41.3	0.3
70	233.1	224.0	211.8	198.7	186.0	168.5	145.5	116.3	87.1	64.2	0.5
80	354.8	340.9	323.9	304.1	284.9	258.2	222.8	178.3	131.4	96.0	0.9
90	525.9	505.8	482.0	453.7	424.6	384.1	331.6	265.1	194.8	139.6	1.6
100	759.8	732.9	699.2	660.1	617.6	556.5	480.6	384.1	286.3	200.1	2.8
110	1071.4	1037.9	990.5	936.9	877.0	788.3	680.4	544.4	413.5	286.1	5.0
120	1477.5	1438.9	1372.4	1297.8	1215.2	1094.9	945.1	757.6	577.4	411.5	9.0

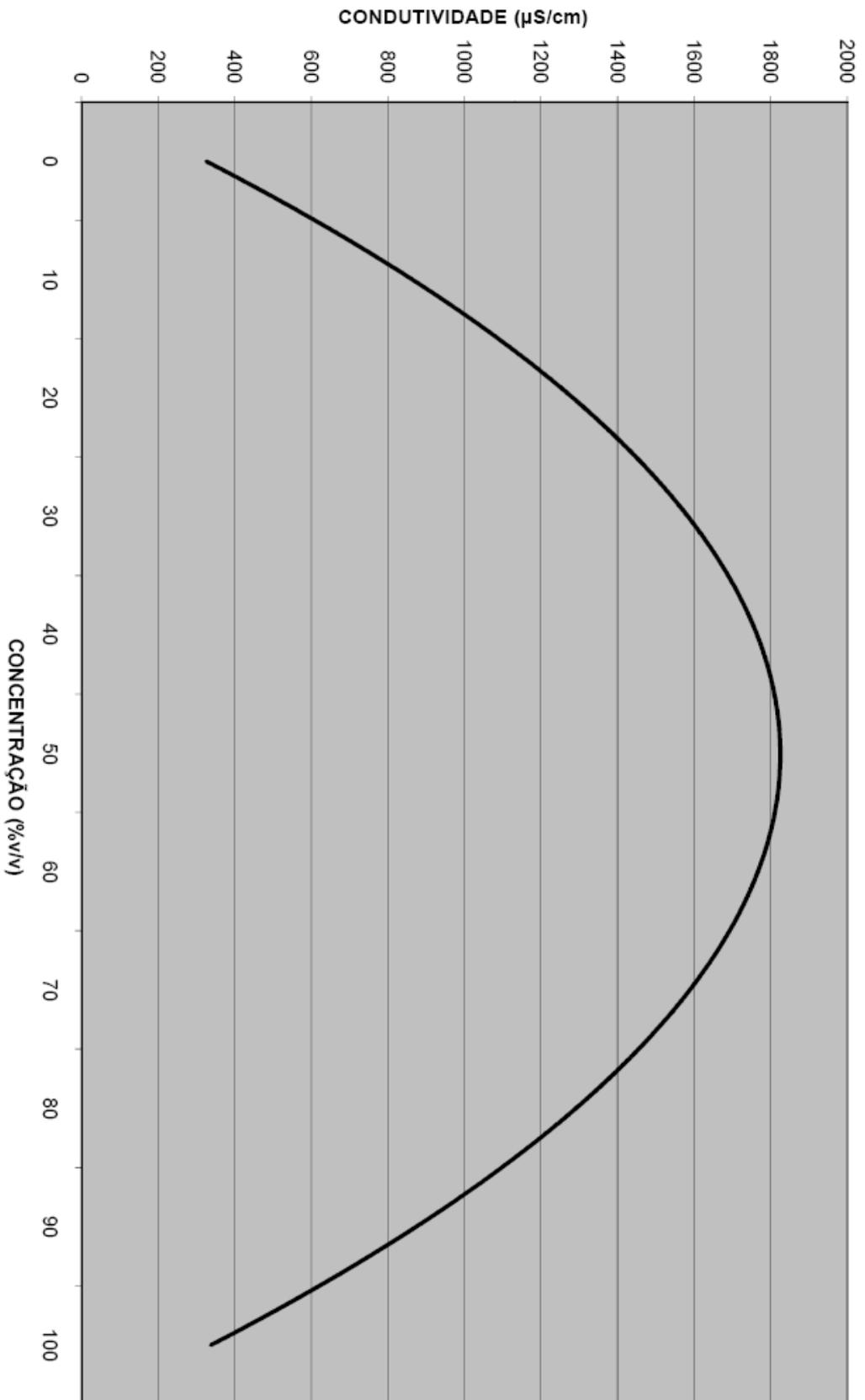
congelamento

Ebulição

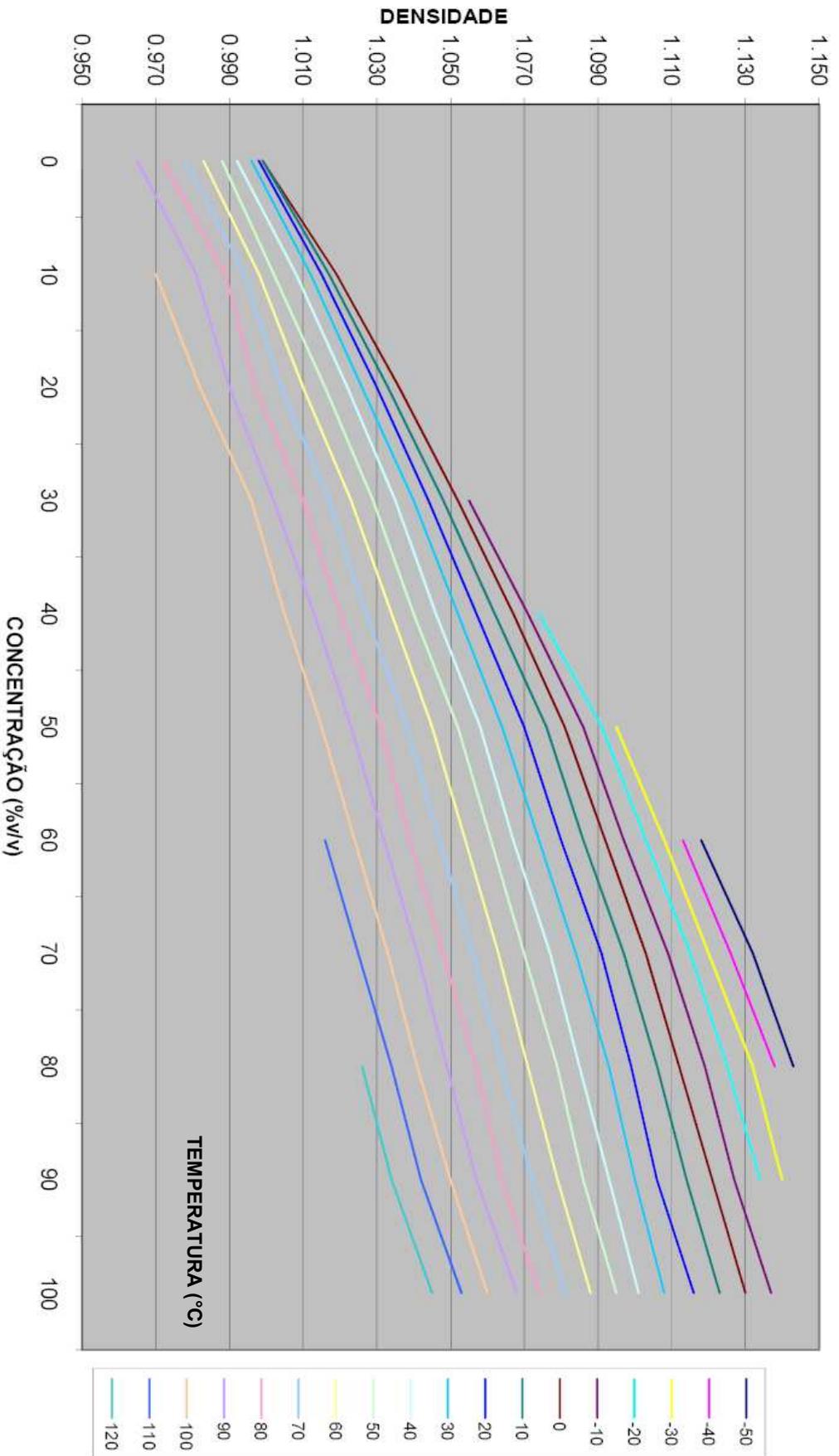
PRESSÃO DE VAPOR



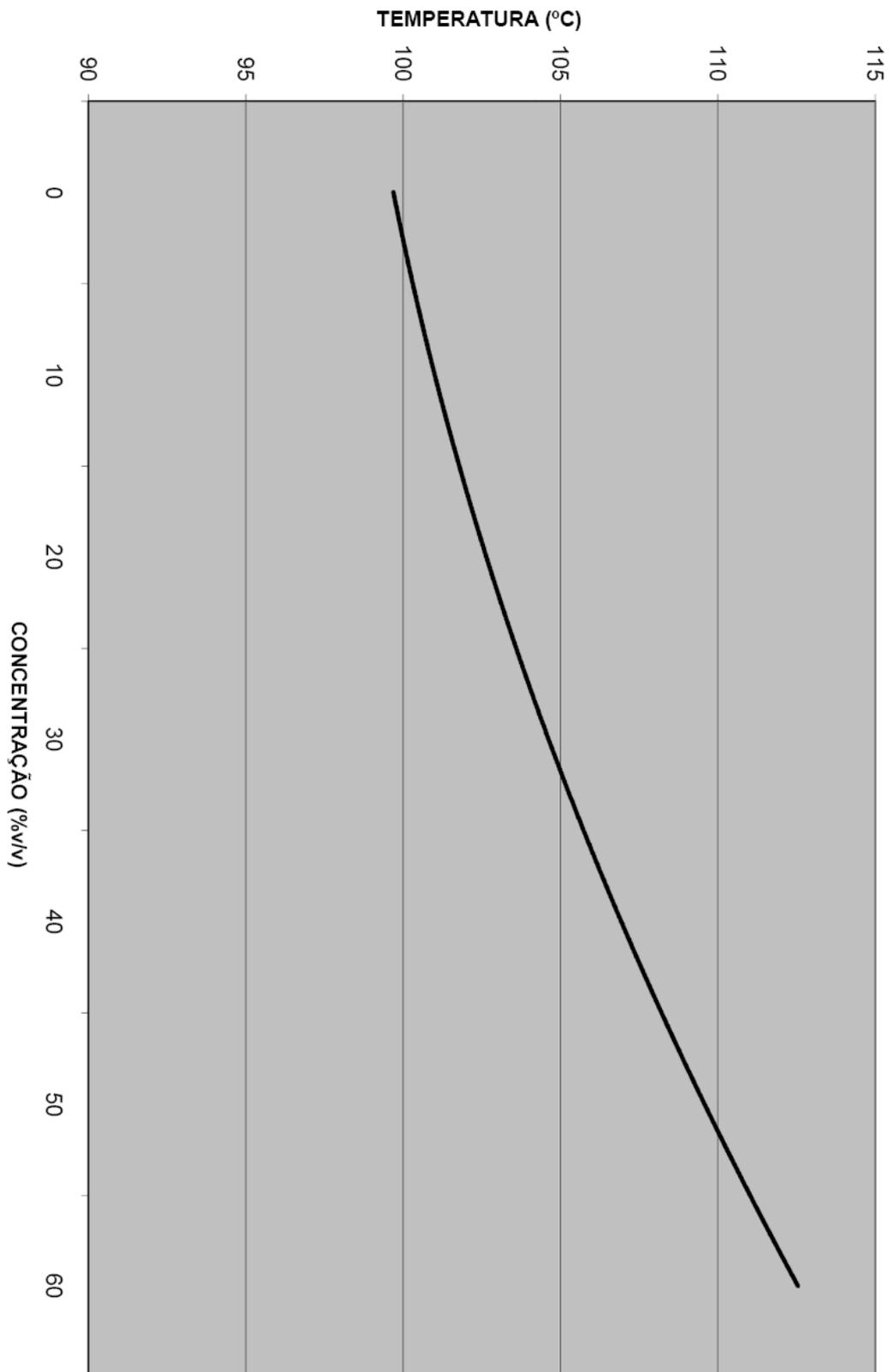
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA



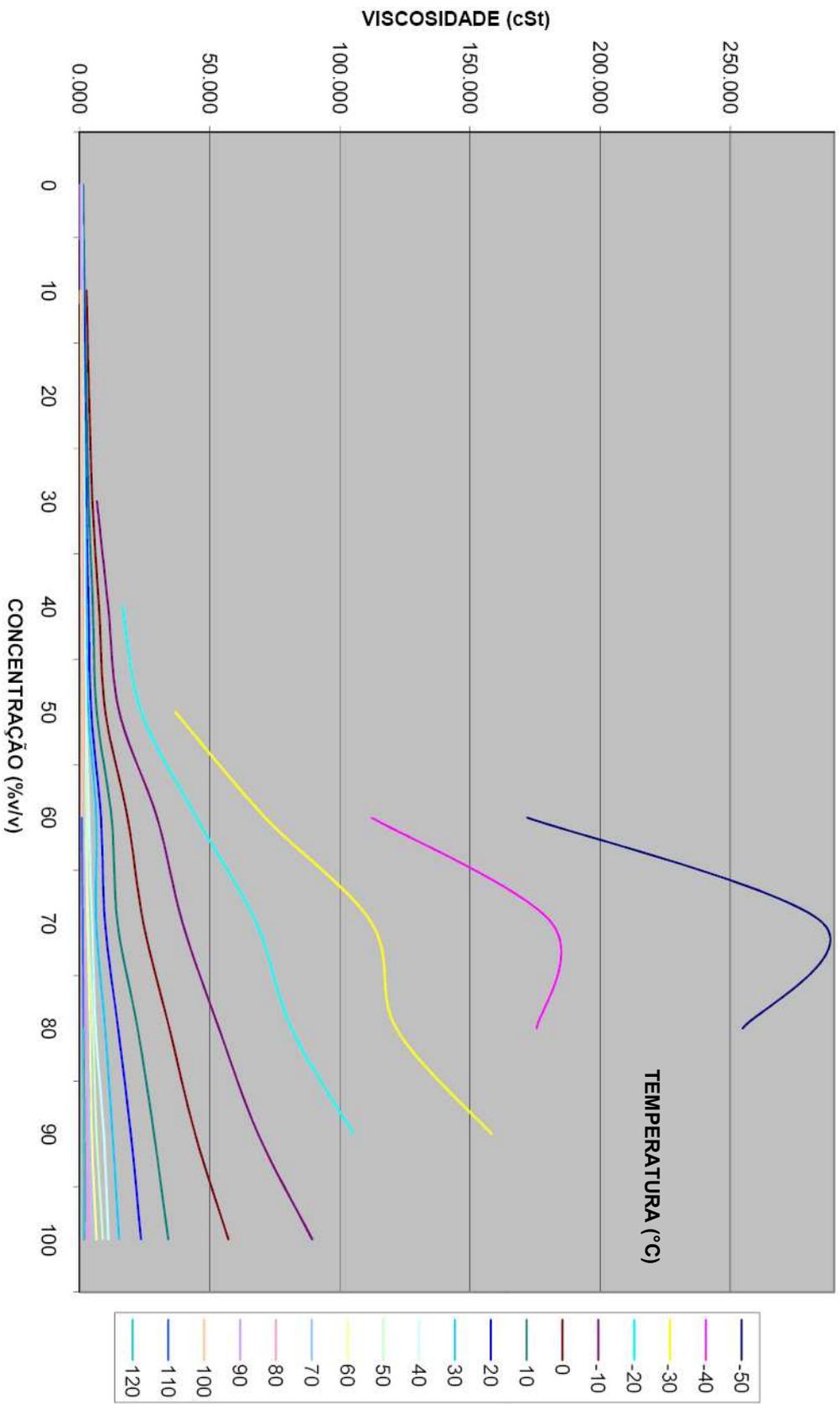
DENSIDADE



PONTO DE EBULIÇÃO



VISCOSIDADE CINEMÁTICA



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)