



MAURICIO PARDO VARON

ESTUDO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA SUBMERSA (BCS) COMO MEDIDOR DE VAZÃO

CAMPINAS
2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

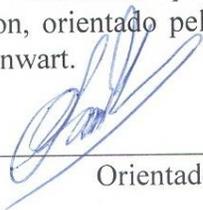
MAURICIO PARDO VARON

ESTUDO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA SUBMERSA (BCS) COMO MEDIDOR DE VAZÃO

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo na área de Exploração.

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Mauricio Pardo Varon, orientado pelo Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart.



Orientador

CAMPINAS
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

V434 Varon, Mauricio Pardo, 1984-
Estudo de uma bomba centrífuga submersa (BCS) como medidor de vazão /
Mauricio Pardo Varon. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Antonio Carlos Bannwart.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Bombas centrifugas. 2. Incerteza (Teoria da informação). 3. escoamento
bifásico. 4. Fluxo viscoso. 5. Dinâmica dos fluidos. I. Bannwart, Antonio
Carlos, 1955-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Study of a centrifugal pump (ESP) utilized as flow rate measurer

Palavras-chave em inglês:

Centrifugal pumps

Uncertainty (Information theory)

Two-phase flow

Viscous flow

Fluid dynamics

Área de concentração: Exploração

Titulação: Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

Banca examinadora:

Antonio Carlos Bannwart [Orientador]

Valdir Estevam

Ricardo Augusto Mazza

Data de defesa: 18-02-2013

Programa de Pós-Graduação: Ciências e Engenharia de Petróleo



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

ESTUDO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA SUBMERSA (BCS) COMO MEDIDOR DE VAZÃO

Autor: Mauricio Pardo Varon

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta dissertação:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Antonio Carlos Bannwart", written over a horizontal line.

Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart, Presidente
DEP/FEM/UNICAMP

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Ricardo Augusto Mazza", written over a horizontal line.

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza
DE/FEM/UNICAMP

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Valdir Estevam", written over a horizontal line.

Dr. Valdir Estevam
PETROBRAS/RJ

Campinas, 18 de fevereiro de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Oscar e Ruby e os meus irmãos TT e Julián.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento e conclusão deste trabalho foram possíveis com a colaboração de muitas pessoas que fizeram parte deste processo e meus agradecimentos são para:

No primeiro lugar, a minha família pelo suporte e apoio incondicional durante esta estadia no exterior.

À minha namorada Julie pelo carinho e companhia especial e incondicional.

Ao professor Antonio Bannwart por ter me brindado a oportunidade de realizar meus estudos de mestrado na Unicamp, por ter me confiado à responsabilidade da realização deste projeto e pelo acompanhamento durante a sua realização.

A toda equipe do LABPETRO pela grande contribuição e apoio durante as etapas do projeto e às amizades que aí surgiram: Jorge, William, Matheus, Cesar, Leandro, Ivana, Luan, Orlando e Natache.

À CNPq pela bolsa concedida e à Petrobras pelo apoio ao projeto, especialmente ao Dr. Valdir Estevam.

RESUMO

VARON, Mauricio Pardo, Estudo de uma Bomba Centrífuga Submersa como Medidor de Vazão. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2013. 126 p. Dissertação de Mestrado.

O Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) é um dos métodos mais importantes de elevação artificial de petróleo, no Brasil e no mundo. A bomba de BCS é acionada por um motor elétrico acoplado diretamente ao eixo da bomba. Comumente, possui também um conjunto de sensores que fazem o monitoramento da operação do motor, além de outras variáveis próprias como, por exemplo, o ganho de pressão gerado pela BCS. Por outro lado, a operação remota do motor na superfície se dá através de um inversor de frequência que fornece, além da rotação, o consumo elétrico da BCS.

A medição da vazão de líquido produzida por cada poço é tradicionalmente realizada com instrumentação especializada de alto custo. Dado que o sensor do motor da BCS e o inversor de frequência que a opera já fornecem informações utilizadas para o monitoramento do equipamento e para o gerenciamento do poço, a vazão de líquido local na BCS poderia ser determinada com base em curvas de desempenho previamente levantadas nas condições de operação esperadas.

O ganho de pressão gerado pela BCS e a potência elétrica consumida pelo motor que a aciona são as variáveis de desempenho consideradas neste estudo para avaliar a incerteza da vazão de líquido local estimada através da bomba em diversas condições de operação (incluindo escoamento bifásico e viscoso). A avaliação é feita com base na norma API RP 11S2, que estabelece as práticas recomendadas para testes de BCS.

Palavras-Chave

Bombas centrífugas, Incerteza (teoria da informação), Escoamento bifásico, Escoamento viscoso, Instrumentação eletrônica.

ABSTRACT

VARON, Mauricio Pardo, Study of a centrifugal pump (ESP) utilized as flow rate measurer. Department of Petroleum Engineering from the Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas, 2013. 126 p. Thesis of Master in Petroleum Engineering.

ESP (Electrical Submersible Pump) is one the most important artificial lift methods for oil in Brazil and worldwide. The centrifugal pump is driven by an electric motor directly coupled to the pump shaft. Commonly, also has a set of sensors that monitor the electric motor operation, and other variables themselves, for example, the pressure gain generated by the ESP.

Moreover, the remote operation of the equipment at the surface is performed via a frequency inverter that provides, in addition to the rotation, the power consumption of the ESP.

Measurement of liquid flow rate produced by each well is traditionally performed with specialized instrumentation costly. As the motor sensor and the frequency inverter that drives the ESP already provide information used for monitoring equipment and for managing the well, the local liquid flow rate in the ESP could be determined based on correlations with these data. The pressure gain generated by the ESP and electrical power consumed by the motor are the considered variables for this study to correlate with the flow rate of fluid produced and to assess the quality of the results by analyzing uncertainties. To achieve this, a series of performance curves are obtained at different operating conditions (including two-phase flow and viscous) to observe how the uncertainty of the results are affected by correlated variables. The assessment is based on the standard API RP 11S2, which establishes best practices for testing BCS.

Key Words

Centrifugal pumps, Uncertainty (information theory), Two-phase flow, Viscous flow, Electronic instrumentation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XVII
LISTA DE TABELAS.....	XIX
LISTA DE NOMENCLATURAS.....	XXI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivo.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 Conceito de Bomba.....	5
2.1.1 Bomba Centrífuga.....	5
2.1.2 Bomba Centrífuga Submersível (BCS).....	5
2.2 Desempenho e Semelhança do BCS.....	7
2.3 Medição, Erro e Incerteza.....	11
2.3.1 Conceitos básicos.....	11
2.3.2 Análise de incerteza.....	13
2.4 Norma para Teste Experimental de BCS – API RP11S2. [API, 2008].....	16
2.5 Motores de Indução.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1 Desempenho de BCS com Escoamento Bifásico.....	21
3.1.1 Comportamento de BCS com misturas bifásicas.....	22
3.2 Desempenho de BCS com Escoamento Viscoso.....	24
3.3 Revisão do caso de sucesso da Statoil no campo Peregrino em Brasil. (OLSEN, 2012).....	27
4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	29
4.1 Circuito de teste de BCS.....	29
4.2 BCS P47 serie 538.....	31
4.3 Instrumentação e Aquisição de dados.....	31

4.4	Procedimento Experimental.....	36
5.	RESULTADOS.....	39
5.1	Curvas do Ganho de pressão Δp da P47.com três estágios.....	40
5.1.1	Δp da P47 operando com água – ar.....	40
5.1.2	Eficiência da P47 operando água – ar.....	42
5.1.3	Δp da P47 operando com óleo mineral.....	44
5.1.4	Eficiência da P47 operando com óleo mineral.....	46
5.2	Curvas de Potência P da P47 com três estágios.....	47
5.2.1	Potência elétrica P_e consumida pelo motor operando a P47.....	47
5.2.2	Medições da P_m exercida pela P47 operando com água – ar.....	49
5.3	Determinação e Análise das Incertezas na Determinação da Vazão de Líquido.....	51
5.3.1	$qL = f\Delta p$ da P47 operando com água – ar.....	52
5.3.2	$qL = f\Delta p$ da P47 operando óleo mineral.....	58
5.3.3	$qL = fP_e$ e $qL = fP_m$ da P47 operando com água.....	61
6.	CONCLUSÕES.....	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
	APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS.....	75
	APÊNDICE B – PRÁTICAS RECOMENDADAS PARA TESTES DE BCS – API RP11S2	
	77	
	APÊNDICE C – REGRESSÕES POLINOMIAIS.....	79
	ANEXO I – CURVAS DO FABRICANTE DA BCS P47 SÉRIE 538.....	81
	ANEXO II – TESTES DE AFINIDADE E REPETIBILIDADE DA P47.....	83
	ANEXO III – DADOS REOLÓGICOS DO ÒLEO MINERAL LUBRIFICANTE.....	85
	ANEXO IV – TABELAS DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	87
	ANEXO V – FOTOS DO CIRCUITO DE TESTES.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Configuração básica do equipamento BCS. (BEARDEN, 2007).....	3
Figura 2-1. Ilustração do estágio típico de uma BCS e direção do fluxo dentro dele. (BEARDEN, 2007)...	7
Figura 2-2. Rotor e difusor de tipo de fluxo radial respectivamente. (BEARDEN, 2007)	8
Figura 2-3. Rotor e difusor de tipo de fluxo misto. (BEARDEN, 2007)	8
Figura 2-4. Relação do tipo de estagio e a vazão. (BEARDEN, 2007).....	9
Figura 2-5. Exemplo de curvas de desempenho de uma BCS. (TAKACS, 2009).....	10
Figura 2-6. Exemplo de representação gráfica de incertezas. (CABRAL, 2004)	15
Figura 2-7. Faixas de tolerância numa curva típica de desempenho de BCS. (API, 2008).....	18
Figura 2-8. Curva do comportamento do torque do motor. (TAKACS, 2009).....	19
Figura 2-9. Exemplo de curvas de desempenho de motores elétricos. (TAKACS, 2009).....	20
Figura 3-1. Degradação da <i>elevação</i> da BCS com aumento da fração de gás. (Pessoa; Prado, 2001).....	23
Figura 3-2. Ábaco da HI de fatores de correção de desempenho de bombas centrífugas com fluidos viscosos. (KENNETH, 1998).....	25
Figura 3-3. Mudança do desempenho de uma BCS (AMARAL, 2007).	26
Figura 4-1. Esquema geral do circuito experimental para BCS.	29
Figura 4-2. Perfil da bancada experimental de BCS.	31
Figura 4-3. Interface gráfica do sistema de aquisição de dados em <i>LabView 2011</i>	34
Figura 4-4. Esquema do elemento laminar para medição da vazão de gás.	35
Figura 4-5. Carretel para injeção de ar na sucção da BCS.	35
Figura 5-1. Δp da P47 operando com água – ar a 3500 RPM.	41
Figura 5-2. Δp da P47 operando com água – ar a 2400 RPM.	41
Figura 5-3. Eficiência da P47 operando com água – ar a 3500 RPM.	42
Figura 5-4. Eficiência da P47 operando com água – ar a 2400 RPM.	42
Figura 5-5. Comportamento do Δp em função da vazão volumétrica do ar no PME.	43
Figura 5-6. Comportamento do Δp em função da fração de vazão homogênea de ar α nos PME.....	43
Figura 5-7. Δp da P47 operando com óleo mineral a 3500RPM.	45
Figura 5-8. Δp da P47 operando com óleo mineral a 2400RPM.....	46
Figura 5-9. Eficiência da P47 operando com óleo mineral a 3500 RPM.	46
Figura 5-10. Eficiência da P47 operando com óleo mineral a 2400 RPM.	47
Figura 5-11. Pe consumida pelo motor com a P47 (3 estágios) a 3500 RPM com água – ar.	47
Figura 5-12. Pe consumida pelo motor com a P47 (3 estágios) a 2400 RPM com água – ar.	48
Figura 5-13. Pe consumida pelo motor com a P47 (3 estágios) a 3500 RPM com óleo.....	49
Figura 5-14. Pe consumida pelo motor com a P47 (3 estágios) a 2400 RPM com óleo.....	49
Figura 5-15. Pm entregueada à P47 (3 estágios) a 3500 RPM com água.....	50
Figura 5-16. Pm entregueada à P47 (3 estágios) a 2400 RPM com óleo.	50
Figura 5-17. Vazão de líquido em função do Δp para 3500 RPM com água – ar.	52
Figura 5-18. Vazão de líquido em função do Δp para 2400 RPM com água – ar.	52
Figura 5-19. Incerteza do Δp em função da fração de vazão a 3500 RPM.	53

Figura 5-20. Incerteza do Δp em função da fração de vazio a 2400 RPM.	54
Figura 5-21. Incerteza do qL calculado a partir do Δp com água – ar a 3500 RPM.	55
Figura 5-22. Incerteza do qL calculado a partir do Δp com água – ar a 2400 RPM.	55
Figura 5-23. Incerteza do qL nos PME em cada qG a 3500 RPM.	56
Figura 5-24. Incerteza da vazão de líquido em função do Δp para 2400 RPM.	56
Figura 5-25. Vazão de líquido em função do Δp para bombeio viscoso a 3500 RPM.	58
Figura 5-26. Vazão de líquido em função do Δp para bombeio viscoso a 2400 RPM.	58
Figura 5-27. Desvio padrão do Δp em função da vazão de líquido para bombeio viscoso a 3500 RPM.	59
Figura 5-28. Desvio padrão do Δp em função da vazão de líquido para bombeio viscoso a 2400 RPM.	59
Figura 5-29. Incerteza propagada do qL em função do qL calculado nos PME da P47.	60
Figura 5-30. Relação da incerteza do qL com as viscosidades testadas na P47.	61
Figura 5-31. Curvas características do modelo do motor elétrico WEG utilizado nos experimentos com a P47.	62
Figura 5-32. Potência elétrica por estágio da P47 a várias rotações com água.	63
Figura 5-33. Potência do eixo por estágio da P47 a várias rotações com água.	63
Figura 5-34. Incerteza da P_m entregueada à P47 operando com água.	64
Figura 5-35. Incerteza da P_e consumida pelo motor operando a P47 com água.	64
Figura 5-36. Incerteza uqL em função do qL calculado a partir do P_m com água.	65
Figura 5-37. Incerteza uqL em função do qL calculado a partir do P_e com água.	65
Figura A-1. Curva de calibração do PT-100 na sucção da BCS.	75
Figura A-2. Curva de calibração do PT-100 na descarga da BCS.	75
Figura A-3. Curva de calibração do transdutor de pressão de 125 psi utilizado na sucção da BCS.	76
Figura A-4. Curva de calibração do transdutor de pressão <i>Validyne</i> utilizado na descarga da BCS.	76
Figura A.I-1. Curvas de fábrica do desempenho da P47 com água a 3500 RPM.	81
Figura A.I-2. Curvas de fábrica do desempenho da P47 com água a 2917 RPM.	82
Figura A.I-3. Conjunto de curvas de elevação da P47 com água em diversas rotações.	82
Figura A.II-1. Δp do P47 com três estágios com água.	83
Figura A.II-2. Teste de afinidade do Δp da P47 com três estágios com água.	83
Figura A.II-3. Testes de repetibilidade do ganho de pressão da P47.	84
Figura A.II-4. Testes de repetibilidade da potência elétrica da P47.	84
Figura A.II-5. Testes de repetibilidade da eficiência P47.	84
Figura A.III-1. Curva de viscosidade – tempo do óleo mineral utilizado nos testes.	85
Figura A.III-2. Curva reológica do óleo mineral utilizado nos testes.	85
Figura A.V-1. (1) BCS P47, (2) Medidor mássico Coriolis e (3) Carretel de injeção de ar.	101
Figura A.V-2. Medidor de vazão de ar (LFE).	102
Figura A.V-3. Conjunto motor – torquímetro – mancal (selo).	102
Figura A.V-4. Tanques de armazenagem de água (verde) e óleo (cinza).	103
Figura A.V-5. Trocador de calor.	103
Figura A.V-6. Variadores de velocidades.	104
Figura A.V-7. Válvula de controle de vazão de ar.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Tolerância mínima dos instrumentos de medição recomendada pela norma API RP11S2. (API, 2008).....	17
Tabela 2-2. Faixas de tolerância estabelecidas pela norma API RP11S2. (API, 2008)	17
Tabela 4-1. Equipamentos do circuito de teste para BCS.	30
Tabela 4-2. Especificações do fabricante da P47 série 538 com um estágio.	31
Tabela 4-3. Características e precisão dos instrumentos de medida.	32
Tabela 4-4. Lista de variáveis a medir nos testes da BCS.....	34
Tabela 4-5. Avaliação da precisão dos instrumentos com a norma API RP11S2.	36
Tabela 5-1. Lista de condições de escoamento bifásico ensaiadas.	40
Tabela 5-2. Características do óleo nas condições ensaiadas.	45
Tabela 5-3. Estatísticas gerais dos ensaios da P47 com água – ar.	54
Tabela 5-4. Incertezas de $qL\Delta p$ da P47 operando com água (monofásico) nos PME.	57
Tabela 5-5. Incertezas de $qL\Delta p$ da P47 operando com água – ar nos PME.	57
Tabela 5-6. Incertezas de $qL\Delta p$ da P47 operando com óleo mineral no PME.....	60
Tabela 5-7. Incertezas de $qLPm$ da P47 operando com água no PME.	66
Tabela 5-8. Incertezas de $qLPe$ da P47 operando com água no PME.....	66
Tabela C-1. Regressões polinomiais dos testes água – ar da P47 a 3500 RPM.	79

LISTA DE NOMENCLATURAS

Letras Latinas		Unidades
C_q	Coeficiente de correção da vazão	-
C_H	Coeficiente de correção da elevação	-
C_η	Coeficiente de correção da eficiência	-
C_{P_m}	Coeficiente de correção da potência mecânica	-
H	Elevação ou Altura manométrica (<i>Head</i>)	m
H_w	Altura manométrica de água	m
H_{vis}	Altura manométrica de fluido viscoso	m
p_s	Pressão na sucção	Pa
p_d	Pressão na descarga	Pa
P	Potência	W
P_e	Potência elétrica	W
P_m	Potência mecânica	W
P_{m_w}	Potência mecânica com água	W
$P_{m_{vis}}$	Potência mecânica com fluido viscoso	W
P_h	Potência hidráulica	W
q_L	Vazão volumétrica de líquido	m^3/s
q_G	Vazão volumétrica de gás	m^3/s
q_M	Vazão volumétrica da mistura bifásica	m^3/s
q_w	Vazão volumétrica de água	m^3/s
q_{vis}	Vazão volumétrica de fluido viscoso	m^3/s
T_s	Temperatura na sucção	°C
T_d	Temperatura na descarga	°C
T_o	Torque	N.m
W_L	Vazão mássica de líquido	kg/s
W_G	Vazão mássica de gás	kg/s

Letras Gregas

Δp	Ganho de pressão	Pa
η	Eficiência	-
η_w	Eficiência com água	-
η_{vis}	Eficiência com fluido viscoso	-
η_{motor}	Eficiência do motor	-
ω	Velocidade rotacional	rad/s
μ	Viscosidade absoluta	Pa.s, cP
ρ	Massa específica	kg/m ³
ρ_L	Massa específica do líquido	kg/m ³
ρ_G	Massa específica do gás	kg/m ³
α	Fração de vazio	-
λ	Fração de vazio homogênea	-
σ	Desvio padrão	[variável]
δ	Erro absoluto	[variável]
u	Erro relativo ou incerteza	-

Siglas

BCS	Bomba centrífuga submersa
PME	Ponto de melhor eficiência
BPD	Barris por dia
API	<i>American Petroleum Institute</i>
HI	<i>Hdraulic Institute</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

As Bombas Centrífugas Submersas (BCS) são máquinas hidráulicas comumente utilizadas como método de elevação artificial na produção de hidrocarbonetos. O conjunto completo de uma BCS, mostrado na Figura 1-1, é constituído por um equipamento de fundo e um de superfície.

O equipamento de fundo basicamente possui uma bomba centrífuga de múltiplos estágios, um motor elétrico que fornece potência mecânica à bomba e um selo que comunica mecanicamente a bomba ao motor e o isola dos fluidos do reservatório, dentre outras funções. O equipamento de superfície é composto principalmente por um inversor de frequência e transformador elevador de tensão elétrica. Sua função consiste em operar o equipamento de fundo alimentando e controlando o motor remotamente através de um cabo elétrico. A maioria dos inversores atuais possui módulos automatizados que permitem controlar, proteger e armazenar os dados enviados pelos sensores.

Além disso, a instalação de um conjunto de sensores na base do motor é prática comum das empresas fabricantes de BCS, para fornecer informações em tempo real do ganho de pressão, temperatura do fluido na sucção da bomba, temperatura do motor, além de outras variáveis que servem para monitorar o equipamento, como por exemplo, vibrações e fugas de corrente. Essas informações são enviadas até a superfície em sinais DC sobrepostos ao sinal AC que alimenta o motor, através do mesmo cabo elétrico.

Atualmente, na produção de petróleo, a obtenção das medidas precisas de volume de fluido produzido individualmente por cada poço tem sido um grande desafio devido à complexidade do fluido com baixo grau API. Esta complexidade faz com que os dados apresentem uma precisão pobre, gerando grandes erros nos registros de produção do campo e dificultando seu gerenciamento (BOLIN, 2007).

As BCSs possuem grande vantagem na aplicação em campos de óleos de maior viscosidade, já que podem ser operadas dentro do poço num ambiente em que o gás natural está em solução. A possibilidade de aproveitar a instrumentação localizada no conjunto de sensores para operar a BCS como um instrumento para medir a vazão de líquido é real e merece atenção. (BOLIN, 2007)

Para obter isto, é necessário levantar experimentalmente um conjunto de curvas de desempenho nas condições de operação esperadas no poço. Variáveis como rotação, vazão de líquido, vazão de gás (se presente), temperatura (intimamente relacionada à viscosidade do líquido), ganho de pressão, potência exercida pelo eixo e potência elétrica são os parâmetros básicos em consideração neste estudo. Tais experimentos devem ser realizados atendendo à norma API RP 11S2 que indica as práticas recomendadas para operação e avaliação de BCS em bancada experimental.

1.2 Objetivo

Nesse contexto, o presente trabalho busca avaliar estatisticamente a incerteza propagada da vazão de líquido local que passa através da BCS calculada a partir de curvas de desempenho levantadas para cada condição de teste (variando viscosidade, rotação e vazão volumétrica de gás na sucção). O ganho de pressão Δp e a potência P são avaliados de forma independente, através da propagação do desvio padrão dessas medidas às incertezas associadas à determinação da vazão de líquido. As condições de teste serão com escoamento monofásico (água e óleo mineral) e bifásico (água+ar).

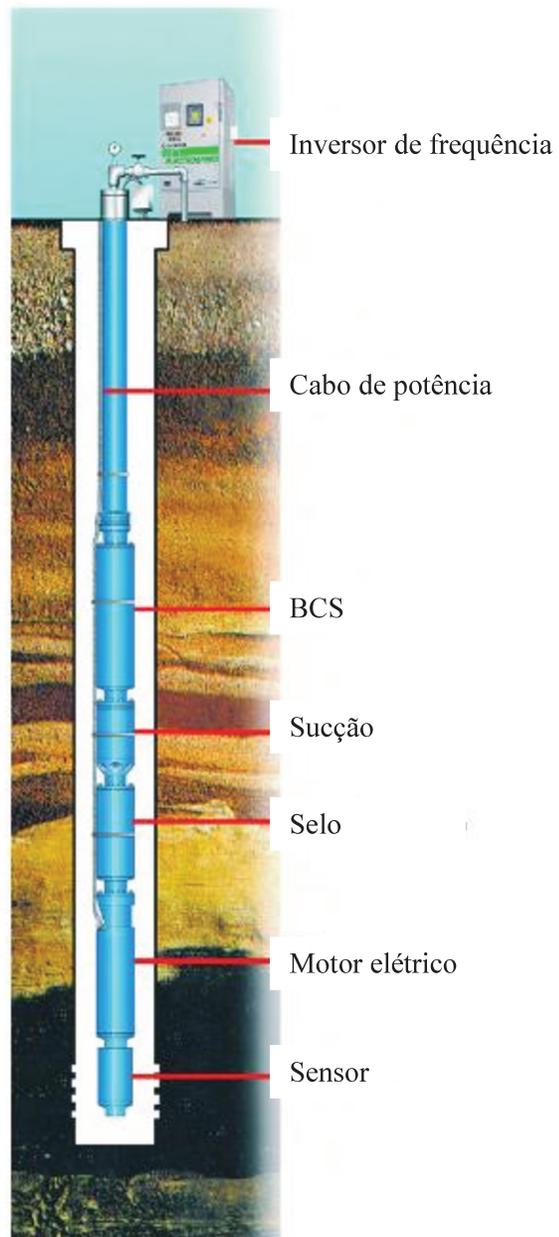


Figura 1-1. Configuração básica do equipamento BCS (BEARDEN, 2007).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceito de Bomba

As bombas são máquinas que transformam energia mecânica em energia hidráulica. A energia mecânica é fornecida por um elemento motriz a qual é transformada em energia hidráulica pela ação da bomba.

A função básica da bomba é transportar qualquer tipo de fluido, o que torna seu uso um componente importante em diversas indústrias, por exemplo, de lubrificantes, combustíveis, alimentos, bebidas, produtos de limpeza e etc.

As bombas podem ser classificadas em *dinâmicas e de deslocamento positivo*.

Nas bombas de tipo *dinâmico* sua ação motriz é exclusivamente rotacional. Seu componente essencial de transmissão da energia é o impulsor ou rotor e seu princípio de funcionamento é regido pelas equações de *Euler*.

As bombas de *deslocamento positivo* são também chamadas de *ação recíproca e rotativa*. A principal característica deste tipo de bomba é a transmissão da através de deslocamentos volumétricos oriundos de êmbolos, engrenagens, etc. (FOX, 2004).

2.1.1 Bomba Centrífuga

As bombas centrífugas são máquinas que deslocam fluidos por meio da força centrífuga gerada pela rotação de um rotor dentro de uma carcaça. O movimento rotacional resultante do fluido faz com que este ganhe simultaneamente pressão e energia cinética. Posteriormente, no difusor, parte dessa energia cinética é convertida em ganho de pressão adicional, através de um incremento da área de fluxo (FOX, 2004).

2.1.2 Bombeio Centrífugo Submerso (BCS)

A bomba centrífuga submersa (BCS) é um equipamento utilizado na indústria do petróleo como um sistema de elevação artificial para produzir petróleo. O princípio de

funcionamento consiste na ação de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios, instalada dentro do poço a uma profundidade determinada, como elemento motriz da mistura de fluidos produzidos pelo reservatório. A bomba fornece um ganho de energia ao reservatório para elevar a mistura produzida até superfície para posteriormente ser tratada e armazenada.

A operação da bomba é realizada através do acionamento de um motor acoplado, o qual, por sua vez comumente possui um conjunto de sensores com a função de monitorar o desempenho do motor e algumas variáveis do comportamento da BCS. Nas maiores empresas que fornecem BCS à indústria do petróleo encontram-se sensores que medem a pressão de sucção da bomba, a pressão de descarga da bomba, a temperatura do fluido, a temperatura do motor, a vibração e fugas ou perdas de corrente. Essas informações são transmitidas através do mesmo cabo elétrico que alimenta o motor, que posteriormente vão ser filtrados para sua leitura e registro de histórico na superfície, além de possibilitar o controle e a proteção do equipamento.

A BCS comumente possui múltiplos estágios montados em série, cuja quantidade varia dependendo das necessidades de elevação do poço no qual vai ser instalado. Cada estágio é formado por um rotor (*impeller*) e um difusor (*diffuser*) como mostrado na Figura 2-1. Nesta figura também se pode observar o trajeto percorrido pelo fluido através de um estágio.

O fluido passando pelo rotor é submetido a um campo centrífugo e se move na direção radial para posteriormente ingressar na zona do difusor. No difusor a energia em forma de velocidade é transformada em pressão até atingir o estágio seguinte, onde o ciclo ocorre da mesma maneira. O ganho de pressão é incremental ao longo da série de estágios da bomba até atingir a elevação total de descarga.

O estágio pode ser de fluxo radial ou misto e sua classificação está relacionada à direção de descarga desde o rotor. Nas Figuras 2-2 e 2-3 se apresentam as fotos do rotor e difusor com a vista inferior superior e inferior de cada para ambos os tipos. A relação da vazão calculada com o tipo de estágio e o ângulo no caso do fluxo misto de duas séries de bombas (400 e 513) da Centrilift são mostrados na Figura 2-4. Os estágios do tipo radial

são utilizados para bombas com baixa capacidade de produção inferiores a 3000 BPD, enquanto os de tipo misto são usados para vazões maiores (TAKACS, 2009).

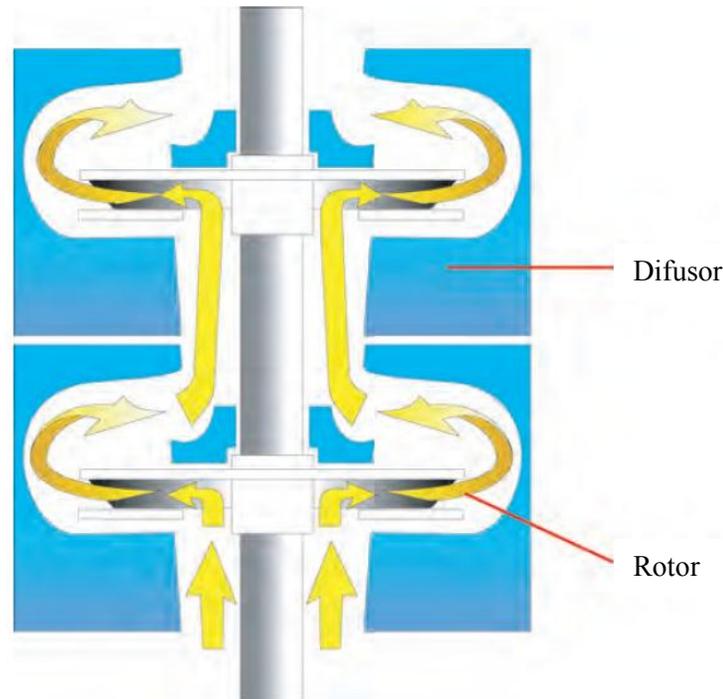


Figura 2-1. Ilustração do estágio típico de uma BCS e direção do fluxo dentro dele (BEARDEN, 2007).

2.2 Desempenho e Semelhança de Bombas de BCS

A BCS é caracterizada através de curvas de desempenho, as quais são traçadas em função da vazão volumétrica e expressam a elevação ou altura manométrica (em inglês – *head*), a potência mecânica requerida para operar a bomba e a sua eficiência. Estes dados são tomados para condições padrão definidas por um fluido de gravidade específica de 1.0 (água a 20°C) e uma rotação de operação fixa de 3500 RPM. Na Figura 2-5 é mostrado um exemplo de curvas de desempenho de uma BCS com um ponto de melhor eficiência (PME) em 2130 BPD para 25 pés de *elevação* fornecidos por um estágio.

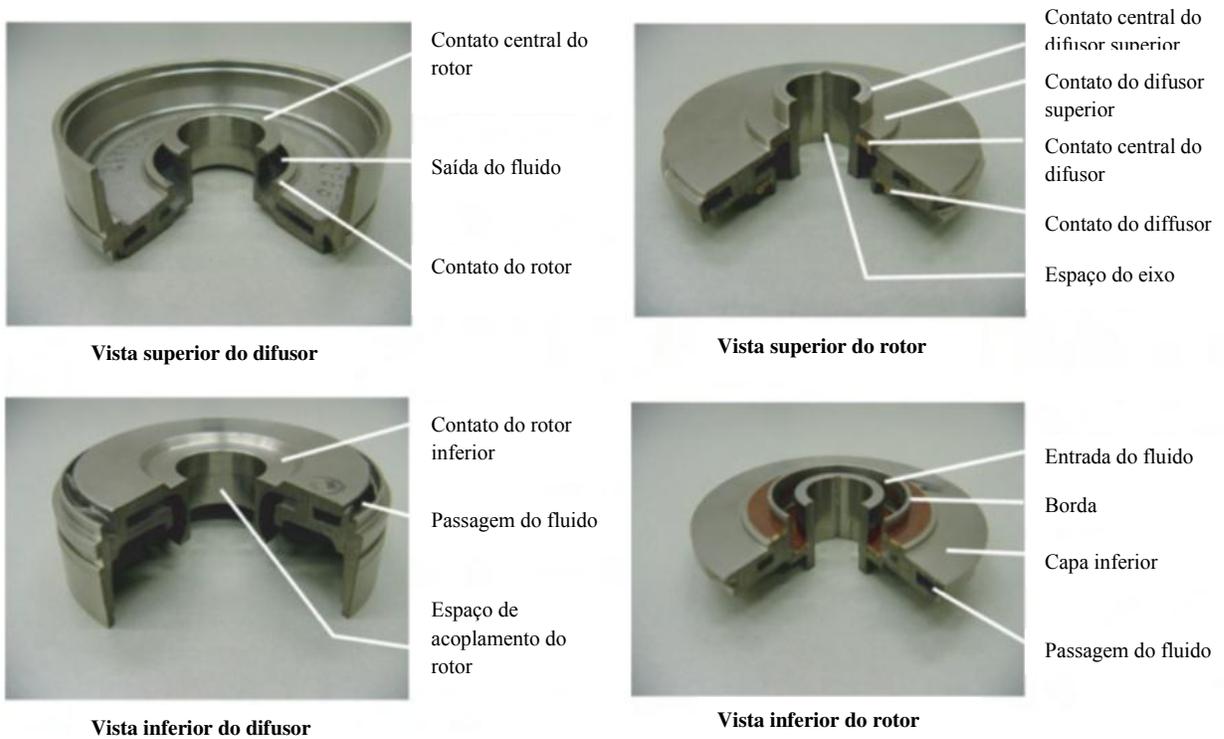


Figura 2-2. Rotor e difusor de tipo de fluxo radial respectivamente. (BEARDEN, 2007)

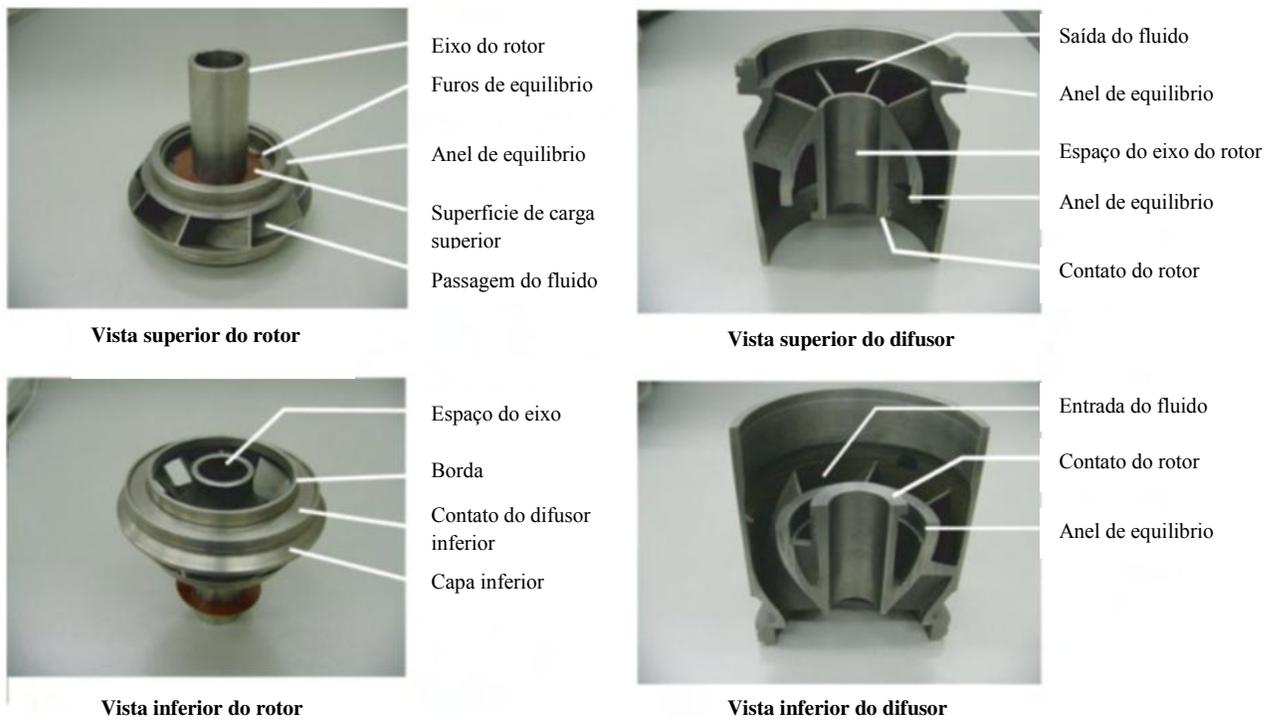


Figura 2-3. Rotor e difusor de tipo de fluxo misto (BEARDEN, 2007).

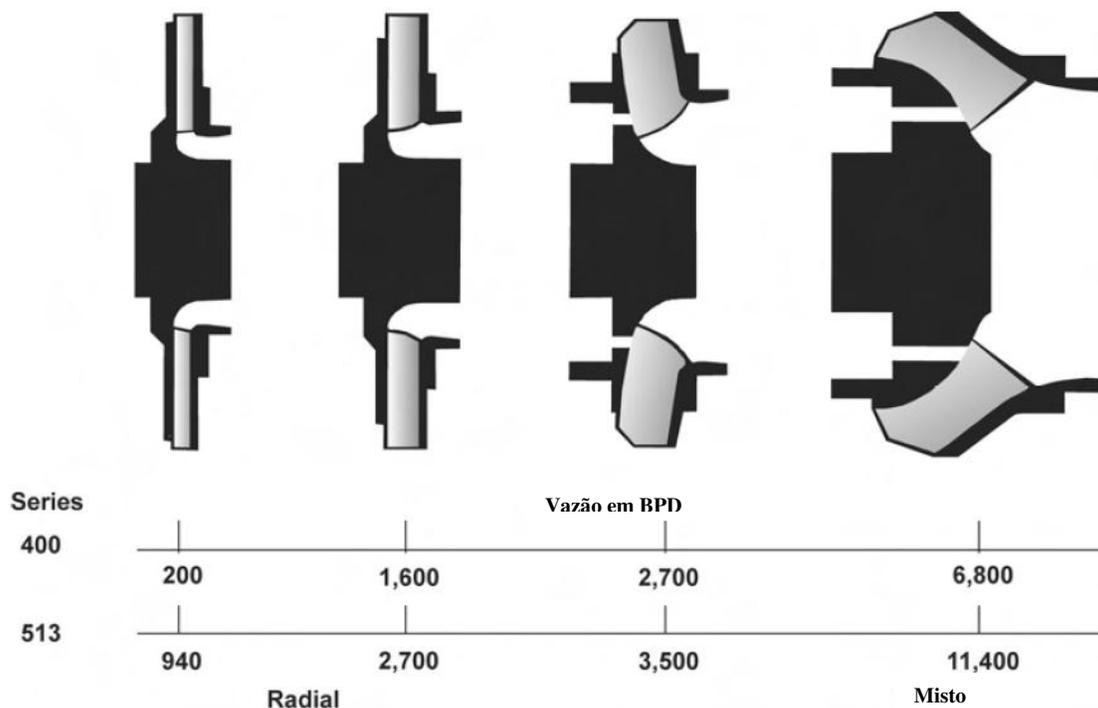


Figura 2-4. Relação do tipo de estagio e a vazão (BEARDEN, 2007).

A *elevação* ou *altura manométrica* H representa a energia específica que a bomba entrega ao fluido na forma de pressão. O ganho de pressão $\Delta p = p_d - p_s$ (pressão na descarga menos pressão na sucção) gerado pela bomba é transformado em unidades de comprimento (comumente expresso metros ou pés de coluna de fluido) através da massa específica ρ do fluido:

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (2.1)$$

A potência recebida pelo fluido quando este é bombeado é denominada potência hidráulica P_h , a qual é função da vazão volumétrica q_L de fluido e do ganho de pressão Δp :

$$P_h = q \Delta p, \quad (2.2)$$

onde q é a vazão volumétrica de fluido bombeado. A potência mecânica no eixo, necessária para acionar a bomba pode ser calculada através da medida do torque T_o exercido pelo eixo e da sua velocidade angular de rotação ω :

$$P_m = \omega T_o. \quad (2.3)$$

A eficiência η da BCS é definida pela razão entre as potências hidráulica e de eixo:

$$\eta = \frac{P_h}{P_m} = \frac{q\Delta p}{\omega T_{eixo}} \quad (2.4)$$

A eficiência é sempre inferior a 100%, devido às perdas que surgem da operação da bomba por diferentes causas, entre os quais estão perdas por atrito, choques, recirculações e vazamentos internos.

A partir da Figura 2-5 deduz-se que a elevação é máxima no bloqueio (vazão nula) e decresce continuamente à medida que a vazão aumenta. A potência absorvida é mínima no bloqueio e aumenta com o aumento da vazão. A eficiência aumenta com a capacidade (vazão) até que o ponto de melhor eficiência (PME) é atingido, e cai, com o aumento adicional da vazão. Para minimizar o consumo de energia é recomendado operar a bomba na região próxima do BEP.

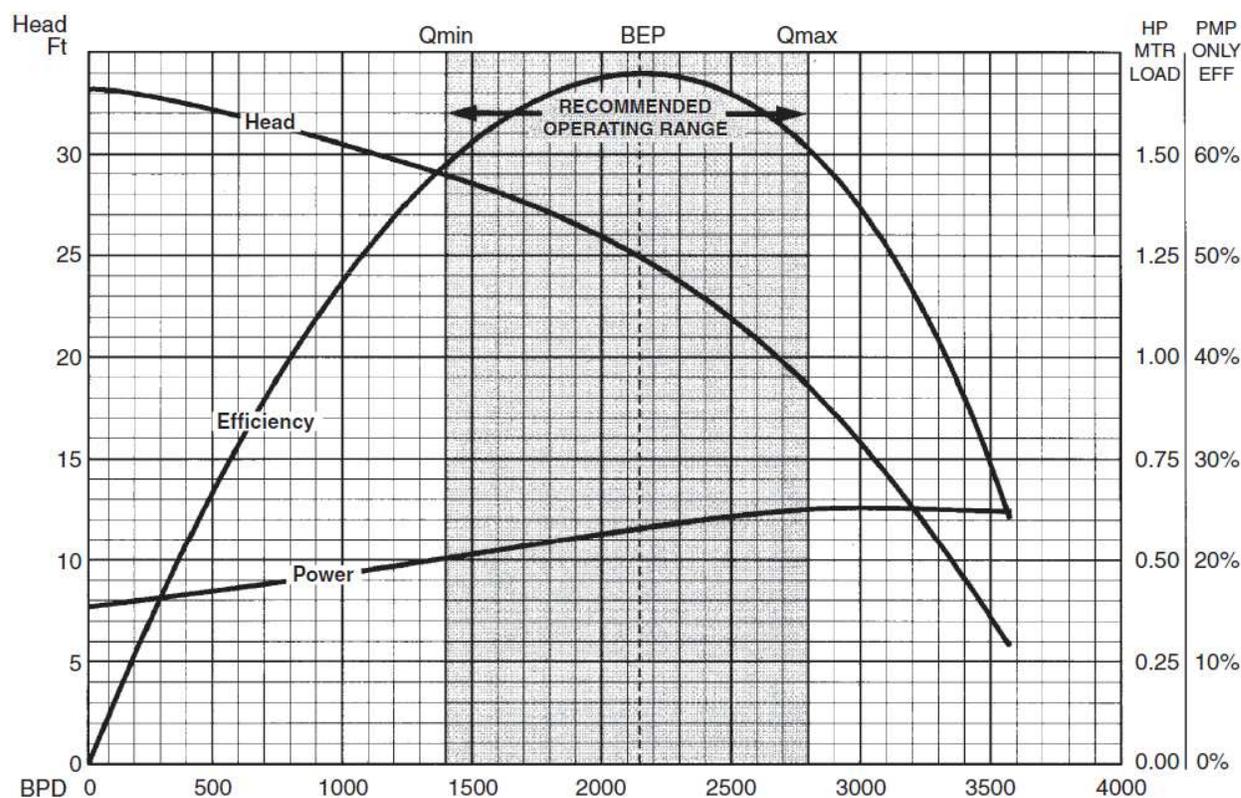


Figura 2-5. Exemplo de curvas de desempenho de uma BCS. (TAKACS, 2009)

As relações que permitem prever o desempenho de uma bomba centrífuga a uma velocidade de rotação diferente da nominal conhecida ou entre bombas geometricamente semelhantes são chamadas de leis de afinidade. A vazão em qualquer ponto de operação varia proporcionalmente com a rotação, a elevação é proporcional ao quadrado da rotação e a potência do eixo é proporcional ao cubo da rotação. Isto é representado pelas equações 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8 (KENNETH, 1998).

$$q^* = \frac{q_L}{\omega D^3} \quad (2.5)$$

$$H^* = \frac{gH}{\omega^2 D^2} = \frac{\Delta p}{\rho_L \omega^2 D^2} \quad (2.6)$$

$$P^* = \frac{P_m}{\rho_L \omega^3 D^5} \quad (2.7)$$

$$\eta = \frac{H^* q^*}{P^*} \quad (2.8)$$

2.3 Medição, Erro e Incerteza

Ao longo da história, o conhecimento adquirido em experimentos de laboratório tem sugerido que qualquer descrição matemática de um fenômeno físico não é mais que uma modelação teórica para sua compreensão. Mesmo que esta modelação seja feita com um elevado rigor, nunca conseguirá representar o fenômeno de forma absoluta. Por isto, é importante ter uma noção do afastamento do valor experimental observado com o valor teórico ou valor referência considerado como verdadeiro, pois sabendo isso é possível avaliar a qualidade dos dados obtidos e, portanto, o grau de precisão das análises feitas a partir deles (CABRAL, 2004).

2.3.1 Conceitos básicos

Para a compreensão dos valores numéricos tratados na análise de incertezas é preciso esclarecer alguns conceitos básicos:

- A exatidão é o grau de concordância entre um valor medido e um valor teórico ou de referência.
- A repetibilidade é o grau de concordância entre várias medidas da mesma grandeza sucessivas, utilizando a mesma técnica e as mesmas condições do experimento, além de ser o mesmo observador e o mesmo instrumento.
- A resolução de um sistema de medição é a mínima variação da grandeza medida que causa uma variação no indicador do sistema.

Erro é definido como sendo a diferença de uma grandeza medida e um valor de referência. O valor de referência pode ser medido por um padrão que possua uma incerteza desprezível e cujo resultado pode ser tomado como o valor verdadeiro. Os erros podem ter diversas fontes e, portanto, são classificados mais comumente na literatura em erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios.

O erro grosseiro é facilmente detectável pelos dados evidentemente afastados dos valores esperados causado, provavelmente, pelas más práticas experimentais e/ou falta de experiência do operador.

O erro sistemático é menos aparente e é igual para qualquer medição independente de quantas vezes seja repetida, porém pode ser minimizado através de uma calibração adequada dos instrumentos ou aplicando fatores de correção nos cálculos.

Finalmente, o erro aleatório é imprevisível e não pode ser controlado já que são causados por fatores ambientais ou pela natureza e desconhecimento do fenômeno físico em observação. A realização de vários experimentos sugere que, na maioria dos casos, os erros seguem uma distribuição normal (*gaussiana*) de probabilidade, sobretudo, quando o tamanho da amostra é significativamente grande (ORLANDO, 2012).

Os instrumentos de medição são utilizados para quantificar uma grandeza ou sistema físico, no entanto, estes podem se afastar em menor ou maior grau do comportamento ideal previsto pelos modelos matemáticos. O certificado de calibração ou mesmo o manual

técnico do aparelho indica o erro sistemático mínimo que comumente é dado como uma faixa em porcentagem no valor lido ou no valor do fundo de escala.

Para definir o grau de afastamento da medida feita com o valor verdadeiro ou ideal se tem os seguintes conceitos em termos de grandezas físicas. Entenda-se como *valor medido* o valor lido no instrumento e o *valor verdadeiro* como o valor esperado ou teórico da grandeza.

$$\text{erro absoluto} = \delta x = |\text{valor medido} - \text{valor verdadeiro}| \quad (2.9)$$

O valor do erro absoluto pode ser positivo ou negativo dependendo se o valor medido está acima ou abaixo do valor verdadeiro, respectivamente. A variável δx representa o valor que deve ser somado e subtraído do valor verdadeiro para obter a faixa de erro e deve ser denotado nas mesmas unidades da grandeza mensurada.

O erro relativo indica o grau de incerteza de uma medida independente da escala e comumente é dado de forma porcentual.

$$\text{erro relativo} = u_{x\%} = \frac{\text{erro absoluto}}{\text{valor verdadeiro}} \cdot 100 \quad (2.10)$$

2.3.2 Análise de incerteza

Entenda-se por incerteza de uma medição como um parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser atribuídos à medida. Sua determinação normalmente é feita a partir da abordagem estatística e considerando uma distribuição normal. Todavia, este tipo de abordagem requer a realização varias medições do mesmo ponto experimental e nem sempre é possível já que pode demandar tempos excessivos de ensaios que é, em muitas aplicações, inviável.

O objetivo da análise de incerteza é quantificar a probabilidade de erro aleatório nos dados medidos. Portanto, na análise se admite que os instrumentos sejam fabricados e calibrados corretamente e que a metodologia de medição e procedimento de aquisição de dados é adequada para a aplicação específica.

Nos trabalhos de engenharia é comum uma abordagem da análise da incerteza para uma única medida por ponto experimental. Para isto são assumidas as seguintes premissas:

- Erros pequenos são mais prováveis que erros grandes.
- A soma e subtração do erro são igualmente prováveis.
- O erro máximo finito não pode ser especificado.

Em casos em que não há experiência ou informação suficiente sobre o fenômeno físico em observação, uma estimativa razoável da incerteza devida ao erro aleatório é somar ou subtrair ao valor medido, metade da menor escala de divisão do instrumento (FOX, 2004).

Como dito anteriormente, por motivos de praticidade, realizar uma única medida por ponto experimental é mais viável, porém com a disponibilidade dos sistemas de aquisição avançados na atualidade é possível obter dados estatísticos da toma de dados pela capacidade de realizar leituras a altas taxas de amostragem. Por isso, baseado no Teorema do Limite Central, devido ao número consideravelmente grande de amostras, pode-se assumir que os pontos seguem uma distribuição de probabilidades aproximadamente normal. Isto é vantajoso já que à medida que o número de amostras aumenta, a aproximação melhora e, portanto não se requer conhecimento sobre o tipo de distribuição que apresenta as amostras para conduzir futuras estimativas de incertezas (ORLANDO, 2012).

A média \bar{x} , dada pela equação (2.11), é utilizada para representar o valor mais provável dado pelo instrumento de medida onde n é o número de amostras e x_i é o valor medido de cada amostra.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.11)$$

Dado que o número de amostras é grande, não há necessidade de diferenciar os conceitos de desvio padrão para população e para amostra já que nesse nível não apresentam diferenças significativas.

O desvio padrão σ , definido pela equação (2.12), é a dispersão de um conjunto de dados do mesmo ponto experimental a fim de quantificar o erro absoluto aleatório causado pelo instrumento de medida nas condições do ensaio.

$$\sigma_n = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

Desses resultados se considera que valores maiores a $2\sigma_n$ devem ser verificadas novamente, e para valores maiores a $3\sigma_n$ devem ser descartados. Portanto, no caso de ter realizado um numero grande de medidas se considera o erro $\delta x = \sigma_n$.

Na Figura 2-6 se pode observar um exemplo de representação gráfica das incertezas de vários pontos. Nesse caso só os valores medidos A, B, C e D deverão ser considerados já que o limite de especificação está dentro das suas faixas de incertezas. O contrario acontece com o ponto E que esta completamente fora do limite especificado (CABRAL, 2004).

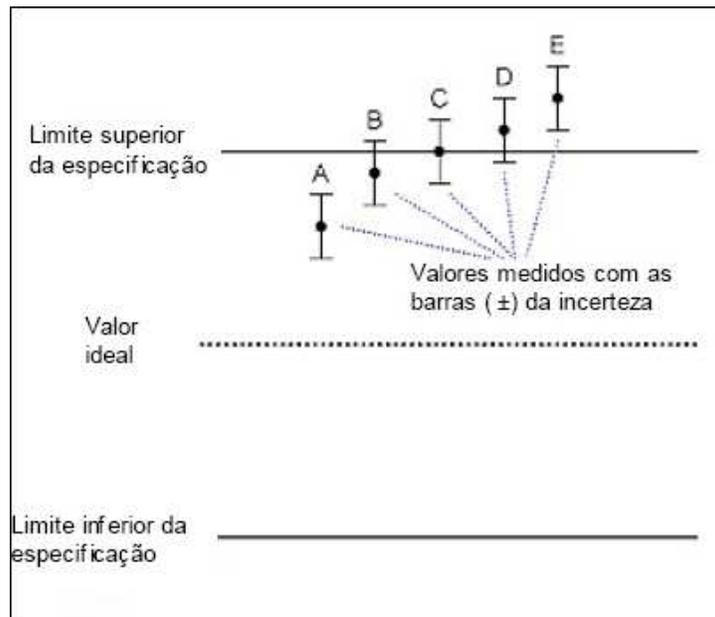


Figura 2-6. Exemplo de representação gráfica de incertezas (CABRAL, 2004).

As equações 2.12 e 2.13 permitem determinar como o erro absoluto e relativo de uma variável dependente é afetado pelos erros individuais de varias variáveis independentes, respectivamente.

Seja x_i o conjunto de variáveis independentes que representa grandezas obtidas experimentalmente com erro absoluto denotado por δx_i para cada variável e seja y a variável dependente calculada a partir das variáveis independentes com um erro resultante denotado por δy .

Se $y = y(x_1, x_2, \dots, x_n)$, então o erro é calculado pela equação (2.13):

$$\delta y = \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

O erro relativo afetado por varias variáveis é calculado pela equação (2.14):

$$u_y = \left[\left(\frac{x_1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_1} u_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{y} \frac{\partial y}{\partial x_2} u_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{y} \frac{\partial y}{\partial x_n} u_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

Sendo $y = q_L$ a vazão de líquido a estimar, $x_i = \Delta p$ o ganho de pressão gerado pela bomba ou $x_i = P_e$ a potência elétrica consumida pelo motor. Na equação (2.13), δx foi considerado como o desvio padrão da variável medida, sendo assim $\delta x = \delta \Delta p$ ou $\delta x = \delta P_e$, no caso específico deste trabalho.

Para o caso da propagação da incerteza da instrumentação, na equação (2.14) os valores x_i são tomados como os valores de fundo de escala, u_x como a incerteza no fundo de escala e u_y a incerteza resultante.

2.4 Norma para Teste Experimental de BCS – API RP11S2

A norma API RP11S2 (API, 2008) indica os parâmetros recomendados para realizar testes em BCS para avaliar desempenho com objetivo de estabelecer consistência do equipamento como um produto. Isto abrange testes de aceitação pelo fabricante, vendedor ou usuário para especificações mínimas predeterminadas.

Os testes devem ser realizados com instrumentação de alta precisão que tenham sido devidamente testados e calibrados. Na prática recomendada pela norma, indica-se cinco pontos de teste:

- Ponto de Melhor Eficiência (PME em inglês BEP - *Best Efficiency Point*)
- PME $\pm 20\%$
- Ponto de vazão máxima (Em inglês - *Open Flow*)
- Ponto de bloqueio (Em inglês - *Shut-off*)

As faixas de tolerância mínima da instrumentação utilizada nas medições são indicadas na Tabela 2-1. Os valores são aplicados no fundo de escala de cada instrumento. Além, a norma fornece faixas que indicam o limite de aceitação dos dados para avaliar o comportamento do equipamento dentro das especificações requeridas; ver Tabela 2-2. Na Figura 2-7 são mostradas as faixas de tolerância nas curvas típicas de desempenho de BCS.

Tabela 2-1. Tolerância mínima dos instrumentos de medição recomendada pela norma API RP11S2. (API, 2008)

Grandeza	Tolerância (% no fundo de escala)
<i>Vazão</i>	$\pm 1.0\%$
<i>Elevação total</i>	$\pm 1.0\%$
<i>Potência elétrica</i>	$\pm 2.0\%$
<i>Rotação – RPM</i>	$\pm 0.5\%$
<i>BHP</i>	$\pm 3.0\%$
<i>Eficiência</i>	$< \pm 5.0\%$

Tabela 2-2. Faixas de tolerância estabelecidas pela norma API RP11S2. (API, 2008)

Curva	Limites	Aplicabilidade
<i>Elevação – Vazão</i>	$\pm 5.0\%$ Elevação	Na faixa de operação
	$\pm 5.0\%$ Vazão	
<i>BHP – Vazão</i>	$\pm 8.0\%$ BHP	Na faixa de operação
<i>Eficiência – Vazão</i>	10% Eficiência	No PME

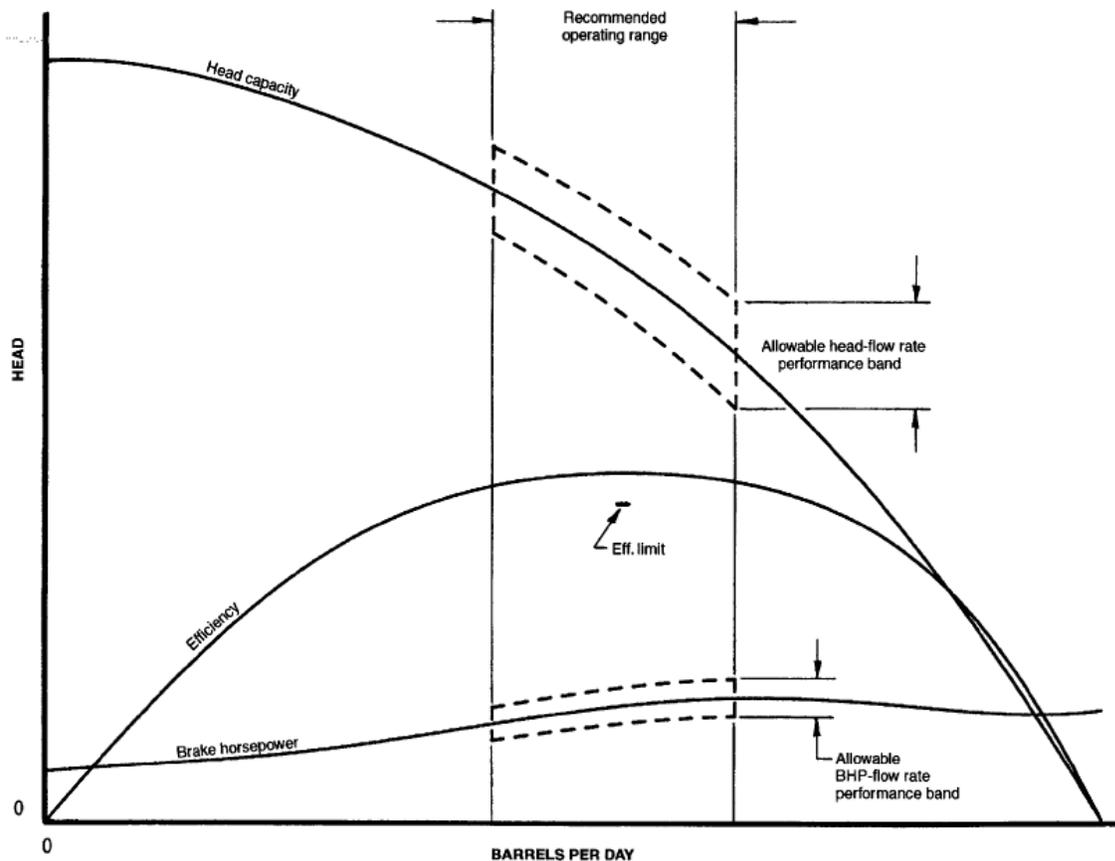


Figura 2-7. Faixas de tolerância numa curva típica de desempenho de BCS. (API, 2008)

2.5 Motores de Indução

Os motores elétricos comumente utilizados nos sistemas de elevação com BCS são de indução, trifásicos de dois pólos do tipo gaiolo. A potência de vários motores em tandem pode atingir valores por acime de 1000HP.

A velocidade síncrona do motor é igual à velocidade rotacional do campo magnético do rotor. A estabilidade do desempenho é atingida a velocidade síncrona alta, normalmente a 3600RPM, na qual se tem o máximo valor de torque (ver Figura 2-8).

A velocidade de operação real do motor nunca atinge o valor exato da velocidade síncrona devido a um efeito chamado escorregamento (em inglês *slip*). O escorregamento é a diferença entre as duas velocidades que operando na máxima carga podem resultar em até 150RPM para uma rotação de 3500RPM (TAKACS, 2009).

Na Figura 2-9 pode-se observar o conjunto de curvas de desempenho de um motor elétrico em função da porcentagem de carga de operação. Nestas curvas, a partir dessa porcentagem, pode-se estimar o comportamento do torque, consumo de elétrico (corrente e fator de potência), efeito de escorregamento e a eficiência considerando que os dados são obtidos experimentalmente.

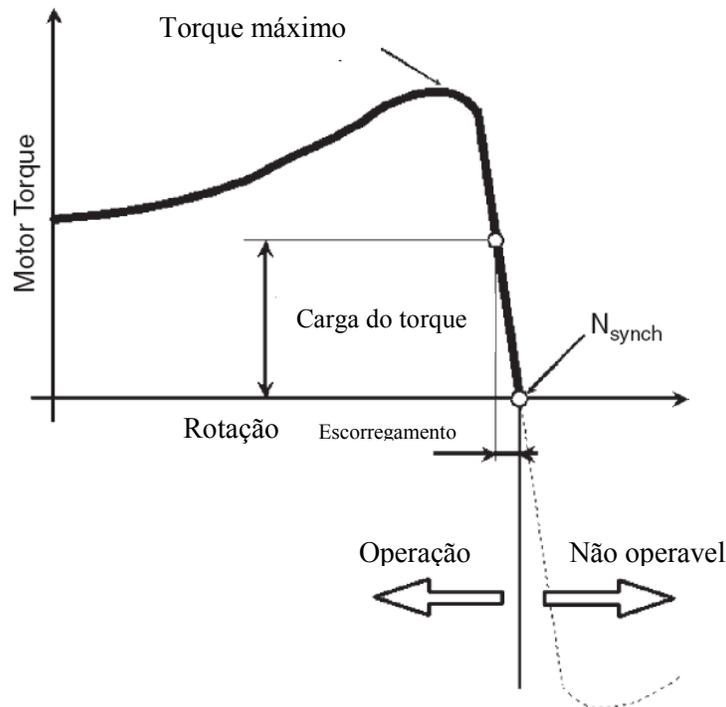


Figura 2-8. Curva do comportamento do torque do motor (TAKACS, 2009)

O acionamento da BCS requer uma potência mecânica P_m que é proporcionada pelo motor. Ela pode ser calculada a partir das medidas elétricas do motor, como a corrente I , a tensão U e seus parâmetros de desempenho como são sua eficiência η_{motor} e o fator de potência φ ; ver equação (2.15).

$$P_m = \sqrt{3}UI \cos(\varphi) \eta_{motor} \quad (2.15)$$

Em aplicações práticas o monitoramento da potência mecânica é realizado através dos parâmetros elétricos. No entanto, esse método possui uma incerteza maior em relação à utilização do torque (equação 2.3), pois envolve um número maior de variáveis que eleva a sua incerteza. Portanto, em testes de desempenho realizados em laboratório o método do torque é mais utilizado por ser mais acurado.

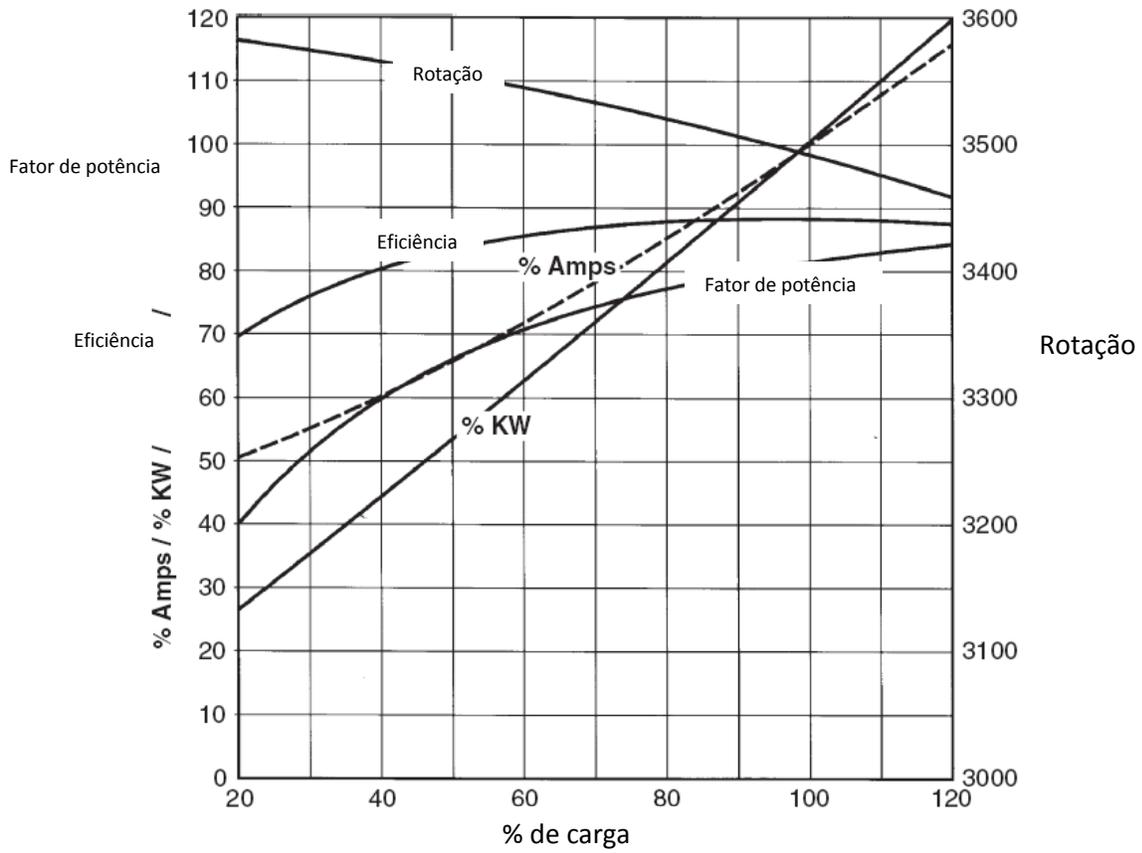


Figura 2-9. Exemplo de curvas de desempenho de motores elétricos (TAKACS, 2009).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Desempenho de BCS com Escoamento Bifásico.

Primeiro, nesta parte do trabalho se faz uma revisão de alguns conceitos básicos de escoamento bifásico para posterior análise dos dados obtidos referentes à fase gasosa na operação da BCS.

A vazão volumétrica do gás q_G é a variável que quantifica o volume de gás por unidade de tempo que é injetado na BCS. Por ser o gás um fluido compressível, o valor da vazão volumétrica é instantâneo nas condições da BCS e é aproximada com a seguinte equação 3.1 admitindo que o ar comporta-se como gás ideal nas condições de operação testadas neste trabalho.

$$q_G = \frac{W_G}{\rho_G} = \frac{(q_{G,LFE})(\rho_{G,std})R_{ar}T_s}{p_s} \quad (3.1)$$

Sendo $q_{g,LFE}$ e $\rho_{g,std}$ a vazão volumétrica e massa específica do gás nas condições do medidor e padrão respectivamente, R_{ar} a constante do ar e p_s e T_s são a pressão e a temperatura na sucção da BCS.

Assumindo que o escoamento bifásico é homogêneo, a vazão volumétrica total q_M é variável que quantifica o volume da mistura de fases por unidade de tempo a determinada pressão e temperatura.

$$q_M = q_G + q_L \quad (3.2)$$

Sendo q_L é a vazão volumétrica do líquido e W_L e ρ_L a vazão mássica e a massa específica do líquido respectivamente.

$$q_L = \frac{W_L}{\rho_L} \quad (3.3)$$

A fração volumétrica do gás α é a razão das vazões volumétricas do gás e total.

$$\alpha = \frac{q_G}{q_G + q_L} \quad (3.4)$$

O modelo homogêneo de escoamento bifásico estabelece que as velocidades do líquido e do gás podem ser consideradas iguais (condição sem escorregamento entre as fases). Esta condição normalmente ocorre quando a vazão do líquido é grande em comparação à vazão do gás e, portanto, esta última escoar em forma de pequenas bolhas.

A massa específica média da mistura bifásica considerando condição sem escorregamento de fases pode ser estimada com a seguinte equação.

$$\rho_M = \rho_L(1 - \alpha) + \rho_G\alpha \quad (3.5)$$

3.1.1 Comportamento de BCS com misturas bifásicas.

A previsão do comportamento das BCS operando com fluidos bifásicos é o grande desafio que motiva pesquisas para modelar o desempenho da bomba com fase líquida e gasosa. O desempenho das BCS na indústria do petróleo é afetado, principalmente, pelo aumento da fração de gás no fluido e/ou pelo aumento da viscosidade. Na Figura 3-1 observa-se o conjunto de curvas do Δp adimensional em função da vazão adimensional, cada uma delas a uma vazão de ar constante e note-se a queda do ganho de pressão para valores de vazão maiores.

No caso do bombeio de líquido com presença de fase gasosa há dois fenômenos conhecidos: *surging* e *gás-locking*. O primeiro é um fenômeno detectado pela existência de oscilações na capacidade de elevação conforme a vazão de líquido diminui com escoamento bifásico. Essa instabilidade faz com que o comportamento da bomba nessas condições, atualmente, não tenha uma modelagem. Por outro lado, o *gás-locking* é um bloqueio da área transversal da passagem do fluido através do rotor pela presença de gás. Isto é causado quando a fração de gás do fluido bifásico é consideravelmente alta. A previsão e modelagem destes fenômenos ainda não está bem entendida na literatura.

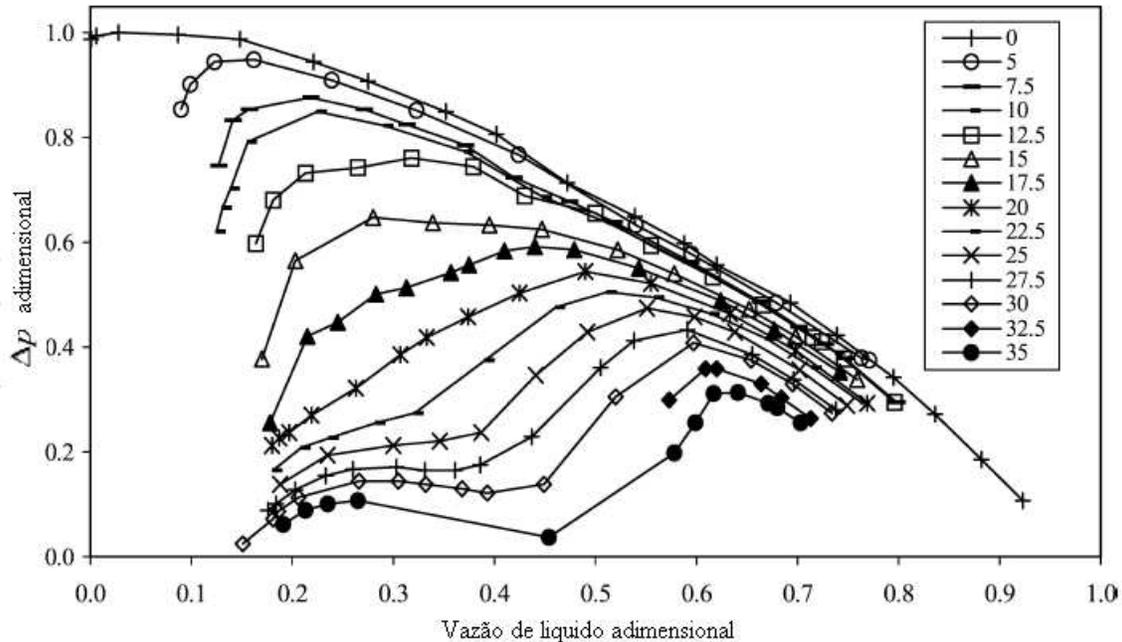


Figura 3-1. Degradação da *elevação* da BCS com aumento da fração de gás (Pessoa; Prado, 2001)

Em termos experimentais, o *surging* pode ser identificado como oscilações abruptas na pressão de descarga da bomba e seu efeito é mais pronunciado conforme diminui a vazão de líquido. O *gas-locking* pode ser identificado pela intermitência da vazão e, portanto, da pressão, tendo assim faixas de produção nula.

As pesquisas mais recentes sobre comportamento de BCS com fluidos bifásicos que tem sido realizada na Universidade de *Tulsa* (Prado, Gamboa e Pessoa) e na Universidade Estadual de Campinas baseiam os estudos nos resultados experimentais Lea & Bearden (1982), Schaveda (1990), Estevam (2001) entre outros, com objetivo de prever a degradação e o comportamento em geral das BCS operando com gás livre.

Do mencionado anteriormente, pode-se ressaltar que o desempenho da BCS com misturas bifásicas se classifica em quatro tipos de comportamentos: operação sem mudança ao comportamento com líquido monofásico, operação levemente afetada pela presença de gás, ocorrência de *gas-locking* intermitente e ocorrência de bloqueio total do fluxo. Essa classificação é determinada pela fração de gás na sucção da bomba e pela velocidade de rotação.

3.2 Desempenho de BCS com Escoamento Viscoso.

As curvas características das BCS estão baseadas em dados obtidos por testes usando água a temperatura ambiente. Se o fluido de trabalho for diferente o comportamento das curvas mudará e, portanto, tem que ser corrigidas. Assim, os testes com esses fluidos requererão introduzir fatores como a viscosidade. As relações entre os testes com fluidos viscosos com os testes com água são apresentadas nas seguintes equações.

$$q_{vis} = C_q * q_w \quad (3.6)$$

$$H_{vis} = C_H * H_w \quad (3.7)$$

$$\eta_{vis} = C_\eta * \eta_w \quad (3.8)$$

$$P_{m_{vis}} = C_{P_m} * P_{m_w} \quad (3.9)$$

Os fatores q_{vis} , H_{vis} e $P_{m_{vis}}$, devem ser determinados empiricamente e desenvolvidos para uma faixa de temperaturas. O subíndice w indica os valores obtidos da BCS operando com água.

O aumento da viscosidade do fluido pode reduzir drasticamente o desempenho de uma bomba centrífuga. Resultados de testes experimentais comparando desempenho de bombeamento de água com bombeamento de fluido viscoso mostraram que o fluido viscoso causa os seguintes fenômenos:

- Redução da elevação (H) produzida pela bomba.
- Redução da capacidade de vazão.
- Aumento da potência de alimentação requerida pela bomba.
- Queda acentuada na eficiência da bomba para todas as vazões.

Na Figura 3-2 apresenta-se um ábaco desenvolvido pela HI (*Hidraulic Institute*) o qual é utilizado para determinar o desempenho de bombas centrífugas convencionais operando com um fluido viscoso quando o seu desempenho com água apenas é conhecido. O gráfico é resultado de uma serie de experimentos, realizados numa faixa de viscosidades determinada, sobre um conjunto de bombas centrífugas convencionais de dois a oito polegadas de diâmetro operando com fluidos newtonianos (KENNETH, 1998).

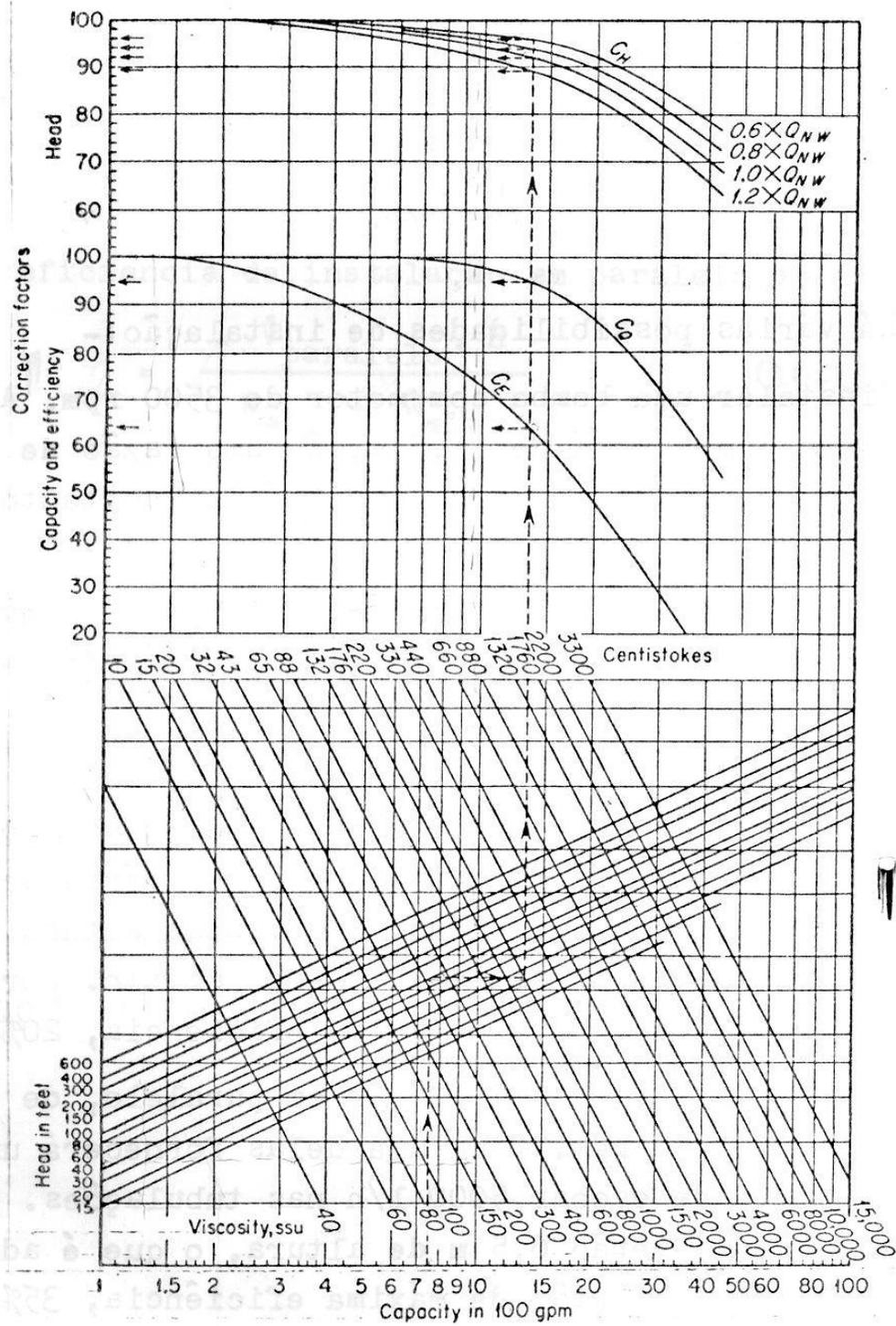


Figura 3-2. Ábaco da HI de fatores de correção de desempenho de bombas centrífugas com fluidos viscosos (KENNETH, 1998).

Se a informação requerida tivesse que ser muito acurada, o ábaco só deve ser usado como guia e, portanto realizar testes com o fluido específico. No entanto, a utilização do ábaco pode ser feito sob os seguintes critérios:

- Projetos com bombas centrífugas convencionais.
- Bombas operando cerca do seu PME.
- Pressão suficiente na sucção para evitar cavitação.
- Fluidos newtonianos. Os fluidos não newtonianos podem mudar de viscosidade por causa da agitação.

Este ábaco só é valido para vazões entre 100 a 10000 GPM (22,71 – 2271,24 m³/h), a uma elevação de 6 a 600 pés (1,83 – 183 m) e viscosidade cinemática de 4 a 3300 cSt.

Da pesquisa realizada por (Amaral, 2007) e (Estevam, 2001) obtiveram-se resultados experimentais da diminuição do desempenho da BCS conforme a viscosidade aumenta. O foco da análise forneceu informação do desvio das relações de semelhança na bomba causadas pelas mudanças na rotação, e informação sobre condições de operação limite devido ao baixo numero de Reynolds causado pela alta viscosidade.

Na Figura 3-3 pode-se observar o descolamento da curva da elevação conforme a viscosidade aumenta mostrando, também, um descolamento uniforme do PME da BCS.

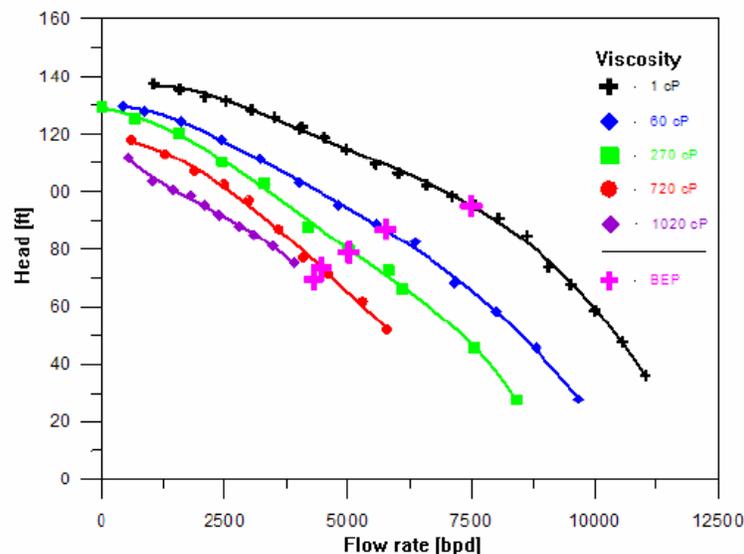


Figura 3-3. Mudança do desempenho de uma BCS (AMARAL, 2007)

3.3 Revisão do caso de sucesso da Statoil no campo Peregrino em Brasil. (OLSEN, 2012)

O campo Peregrino está localizado na bacia de Campos, no litoral do estado de Rio de Janeiro a 80 km *offshore* de Cabo Frio no Brasil. Neste campo foi avaliado um método de estimação de vazão utilizando variáveis medidas pela instrumentação do equipamento de BCS em três poços. A avaliação foi realizada pela Statoil junto com a Backer Hughes.

A metodologia de estimação da vazão que produz uma BCS se baseia num modelo do sistema BCS e a viscosidade do fluido. Dado que o ponto de bolha do reservatório nesse campo é baixo (740 psi) se admitiu que as BCS estivessem instaladas acima desse ponto e, portanto nunca teria gás livre na sucção da bomba. Por outro lado, para levantar o modelo do sistema BCS foram mapeadas três BCS (de baixa, meia e alta capacidade) em diferentes pontos de operação para abranger uma ampla faixa de vazões (500 – 22000 BPD). Este procedimento foi efetuado na base da Baker Hughes (*Centrilift*) em Clearmore Oklahoma, Estados Unidos tendo como testemunha à operadora Statoil. Ai foi montado um circuito de testes que permitiu operar as BCS a diversas rotações (40 – 60 Hz) e com fluidos de viscosidade até 360 cP.

O objetivo dos testes era criar um conjunto de dados que relacionassem parâmetros como a viscosidade do fluido, elevação, potência mecânica e velocidade rotacional da BCS sobre a faixa de operação esperada no campo Peregrino. A medida da vazão foi tomada utilizando dois medidores coriolis para as diferentes faixas com uma incerteza menor que 0,10%. Essas informações permitiram desenvolver um estimador da vazão dentro de uma faixa de incerteza de 2,50%.

Os testes também buscaram calcular fatores de correção para ajuste de desempenho da BCS. Esses fatores foram aplicados à elevação, potência mecânica e vazão para duas rotações (2333 RPM é a mínima permitida no campo e 3617 RPM é a máxima possível no circuito de testes). As curvas foram levantadas na sua faixa completa para vazão e elevação tomando tipicamente entre 8 e 10 pontos. Posteriormente, os resultados foram ingressados num simulador de BCS (*AutographPC*) para calcular os fatores de correção.

Um algoritmo foi desenvolvido pela Statoil como ferramenta de monitoração. Basicamente, o algoritmo é alimentado com parâmetros medidos em tempo real durante a operação em campo além de considerar o modelo do sistema BCS (o motor, o cabo e a bomba) previamente determinado. Este algoritmo se compõe de quatro módulos para a estimativa da vazão.

- O primeiro realiza cálculos preliminares relacionados ao fluido e ao sistema BCS. Isto abrange viscosidade do óleo, capacidade de elevação, potência mecânica e rotação da bomba.
- A partir das informações obtidas no primeiro módulo, no segundo é calculada a vazão a traves de interpolação dos dados crus sem considerar fatores de correção.
- No terceiro módulo, baseado na mesma informação do segundo módulo, o calculo da vazão está programado para considerar presença de água na produção. Essa situação faz com que incerteza da vazão calculada seja significativamente maior.
- O quarto módulo esta preparado para operar numa situação de perdas de sinal do sensor de fundo, calculando a vazão baseado no modelo do sistema BCS junto com as curvas do desempenho e a capacidade de elevação da tubulação instalada no poço e a pressão de cabeça de poço.

4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Circuito de teste de BCS.

Os experimentos foram realizados no laboratório de pesquisa LABPETRO no Centro de Estudos do Petróleo (CEPETRO) da Universidade Estadual de Campinas. A bancada experimental foi montada com objetivo de realizar pesquisa em desempenho de BCS e foi projetada para poder realizar experimentos com diversos tipos de BCS, fluidos e para realizar visualização. Na Figura 4-1 é apresentado o esquema do circuito completo e na Tabela 4-1 é mostrada a lista de equipamentos que compõe a montagem.

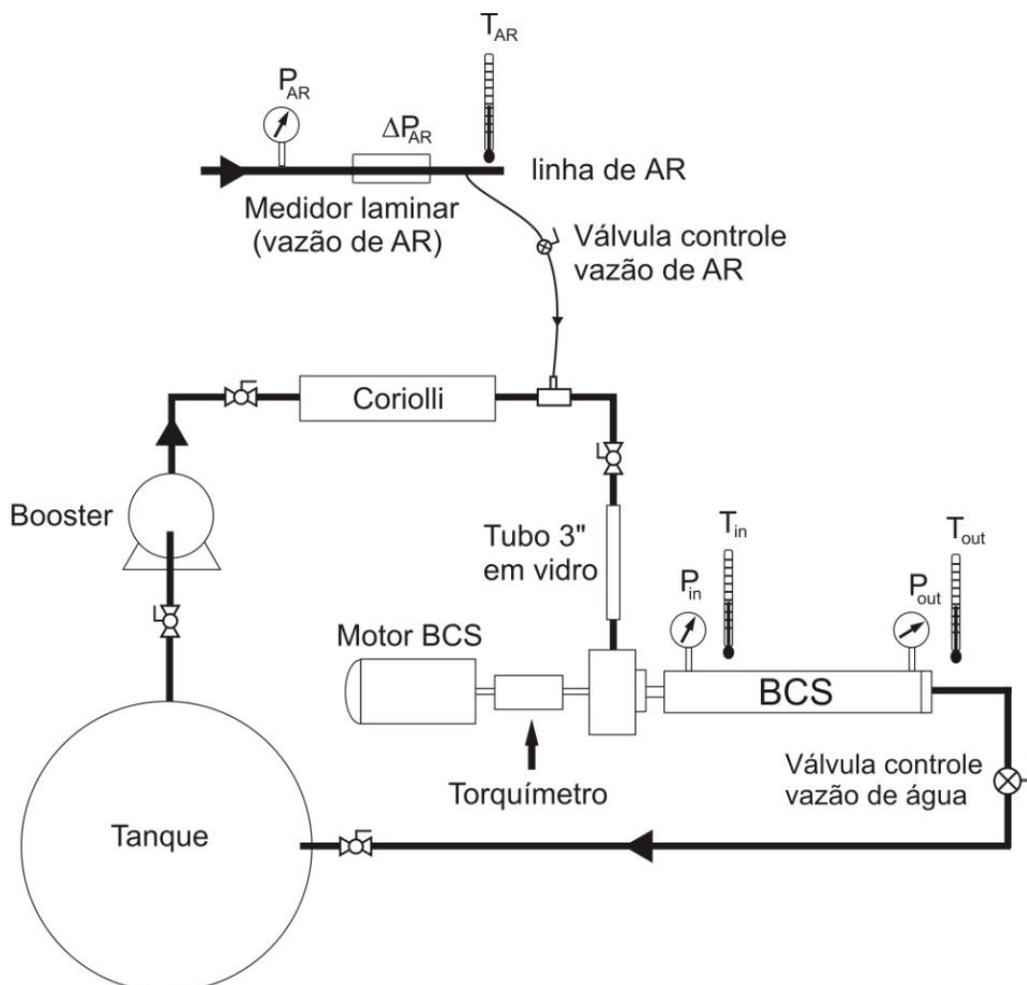


Figura 4-1. Esquema geral do circuito experimental para BCS.

Tabela 4-1. Equipamentos do circuito de teste para BCS.

Equipamento	Modelo	Características
Motor elétrico (<i>booster</i>)	WEG	Trifásico 380 V/41.7A, 60 Hz, 22 kW (30 HP), 3530 RPM.
Bomba Centrífuga	Schneider – Série ME-3 (C156)	<i>Booster</i> de 30 c.v. com 3 estágios. PME 62% (33 – 51 m ³ /h), (1294 – 981 kPa)
Motor elétrico (BCS)	WEG	Trifásico 380 V/69.5A, 60 Hz, 37 kW (50 HP), 3555 RPM.
BCS	<i>Centrilift</i>	P47 série 538 de três estágios. Tipo compressão. 65% no PME.
Inversor de frequência	WEG GFW-09	Trifásico de 56 KVA, 380V/103A, 60 Hz, micro processado com <i>display</i> digital. Version software V 4.03
Inversor de frequência	WEG GFW-09	Trifásico de 36 KVA, 380V/64.8A, 60 Hz, micro processado com <i>display</i> digital. Version software V 3.11
Tanque TQ-1	-	Tanque cilíndrico em aço carbono com capacidade de 6 m ³ .
Tanque TQ-2	-	Tanque cilíndrico em fibra de vidro com capacidade de 1 m ³ .
Trocador de calor	FYTERM Ø 254x1200	Tipo casco/tubos, capacidade térmica 37000 kcal/h e área de troca de 7,18 m ² .
Válvula globo	-	Controle manual de vazão de líquido.
Válvula elétrica	-	Controle remoto de vazão de gás.
Microcomputador	DELL	Dell, Intel Core 2 Duo E7400 2,8GHz, 4Gb de memória RAM.

O skid da BCS esta esquematizado com os principais componentes na Figura 4-2.

1. Sucção da BCS (*Intake*)
2. BCS
3. Descarga da BCS
4. Base
5. Torquímetro
6. Motor elétrico

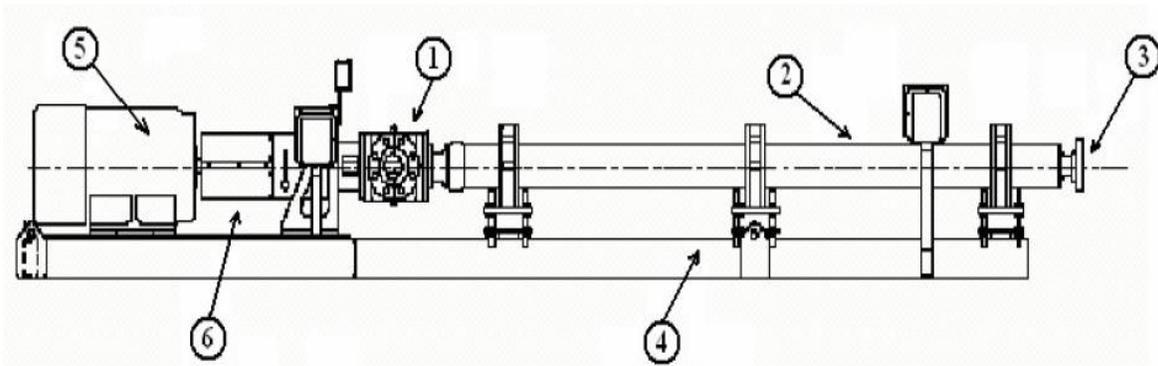


Figura 4-2. Perfil da bancada experimental de BCS.

4.2 BCS P47 serie 538.

No Anexo I apresentam-se as curvas do fabricante da P47 em dois sistemas de unidades e para diversas rotações. Na Tabela 4-2 se resume as principais características.

Tabela 4-2. Especificações do fabricante da P47 série 538 com um estágio.

BEP (3500 RPM)	Vazão	4770 BPD (~ 31,6 m ³ /h)
	Elevação	52,5 pés (~ 16 m)
	Eficiência	65,0%
	Potência	2,8 HP
Bloqueio	Elevação	71 pés (~ 21,65 m)
Fluxo aberto	Vazão	8120 BPD (~ 53,79 m ³ /h)

4.3 Instrumentação e Aquisição de dados.

Na Tabela 4-3 estão especificadas as características dos instrumentos de medida utilizados na bancada da BCS indicando o nível de precisão que estes possuem já calibrados. No apêndice A estão apresentadas as curvas de calibração dos instrumentos de medição utilizados na bancada experimental do BCS.

A aquisição dos dados dos experimentos é feita através da ligação dos instrumentos com fios elétricos até o módulo de aquisição de sinais. Neste módulo os fios são distribuídos aos respectivos módulos de aquisição internos de entrada dependendo do tipo de sinal analógico (+10/-10V ou 4 – 20 mA). Também há um módulo interno de saída que

permite a operação remota do inversor de frequência da bomba *booster* e da válvula de controle de vazão de gás.

O módulo de aquisição de sinais funciona com um programa desenvolvido no software *LabView 2011*. Este programa possui uma interface gráfica amigável para visualizar o estado dos sinais analógicos enviados pela instrumentação, operar os equipamentos remotos (inversor da *booster* e válvula de gás) e pode armazenar os dados num arquivo digital de forma ordenada e eficiente.

Tabela 4-3. Características e precisão dos instrumentos de medida.

Instrumento	Modelo do instrumento	Características	Precisão
Vazão mássica de líquido	Micro Motion DS300H	Sinal de 4 – 20 mA, operação 0 – 190680 kg/h, tipo coriolis de 3”	±0,36% (valor lido)
Vazão mássica de gás	Meriam Instruments Modelo 50MJ10-9	Medidor de vazão mássica de fluxo laminar, faixa de operação 0 – 30 lb/h (0 – 13,61 kg/h).	±0,28% (valor lido)
Computador de vazão	Meriam Instruments Series 1900	Computador de vazão mássica e volumétrica com saída analógica 4-20 mA e display digital.	±0,05% (fundo de escala)
Transdutor de pressão	Rosemount Smart 1151	Medidores diferenciais de pressão com faixas de operação 0 – 54.82 psi, saída analógica de 4 – 20 mA.	±0,25% (fundo de escala)
Transdutor de pressão	One Series	Medidor de pressão com faixa de operação até 125 psi e saída analógica de 4 – 20 mA.	±1,0% (fundo de escala)
Sensor de temperatura	PT-100	Sensor de temperatura RTD com faixa de operação 0-100 °C	±0,01% (fundo de escala)
Transdutor de temperatura	ECIL APAQ-LR	Transmissor analógico (4 – 20 mA)	±0,05% (fundo de escala)
Torquímetro	Lebow Modelo 1805-5k	Sensor de torque e rotação com condicionador de sinais modelo DP-41S, capacidade de 565 N.m e rotação máxima de 22000 RPM.	±0,05% (fundo de escala)
Condicionador de sinais	Lebow Modelo 7541	Condicionador de sinais com display digital indicador de torque, potência e rotação e saída analógica 0-10 V.	±0,05% (valor lido)
Tacômetro	MDT – 2238A	Digital <i>foto/contato</i> , operação de 2.4 – 99999 RPM (<i>foto</i>).	±0,05% (valor lido)
Aquisição de sinais	National Instruments NI USB 9162/9172	Chassis para módulo de aquisição de sinais com saída USB.	-
Módulo de aquisição de sinais	National Instruments NI 9201	8 canais de entrada para sinais de [-]10V – [+]10V	-
Módulo de aquisição de sinais	National Instruments NI 9203	8 canais de entrada para sinais de 4 – 20 mA	-
Modulo de aquisição de sinais	National Instruments NI 9263	8 canais de saída para sinais de [-]10V – [+]10V	-

No programa o usuário pode operar a aquisição de dados à taxa de amostragem e o número de amostras desejadas. Além disso, cada ponto experimental gravado é imediatamente desenhado num gráfico que permite observar a qualidade dos dados que estão sendo obtidos (elevação e eficiência em função da vazão). Na Figura 4-3 pode-se observar a interface do programa e na Tabela 4-4 estão as variáveis monitoradas.

Além disso, o programa tem um filtro passa baixas de 15 Hz, o que significa que todo sinal por cima desse valor de frequência é desprezado eliminando assim, todo ruído elétrico da instrumentação. Desta forma, garante-se considerar o sinal próprio da variável em observação com as suas variações naturais, já que do contrário os dados de desvio padrão seriam afetados.

A frequência de 15 Hz foi escolhida porque foi o valor que conseguiu reduzir a magnitude do ruído elétrico significativamente sem filtrar as oscilações próprias dos experimentos e que são do nosso interesse.

A vazão de gás é medida através de um instrumento que utiliza o escoamento laminar como princípio para a determinação da vazão e outras variáveis a partir das medidas do diferencial de pressão e temperatura. A utilização deste princípio é desejável já que nessas condições existe uma relação linear da vazão do fluido com o diferencial de pressão nos extremos do duto. O instrumento garante o escoamento laminar dentro de uma faixa de pressão especificada com um conjunto de dutos de diâmetros pequenos. Desta forma, a vazão é calculada com a somatória de todas as vazões de cada duto e a montagem é realizada da forma que apresenta a Figura 4-4.

Visto que o gás é um fluido compressível, uma correção foi feita para a determinação da vazão volumétrica nas condições da sucção da bomba (T_s e p_s). Esta correção é obtida através das equações (4.1) a (4.3).

$$q_{G,s} = \frac{W_G R_{ar} T_s}{P_{s_{abs}}} \quad (4.1)$$

$$P_{s_{abs}} = p_s + 101325 \text{ [Pa]} \quad (4.2)$$

$$R_{ar} = 287 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°K}} \right] \quad (4.3)$$

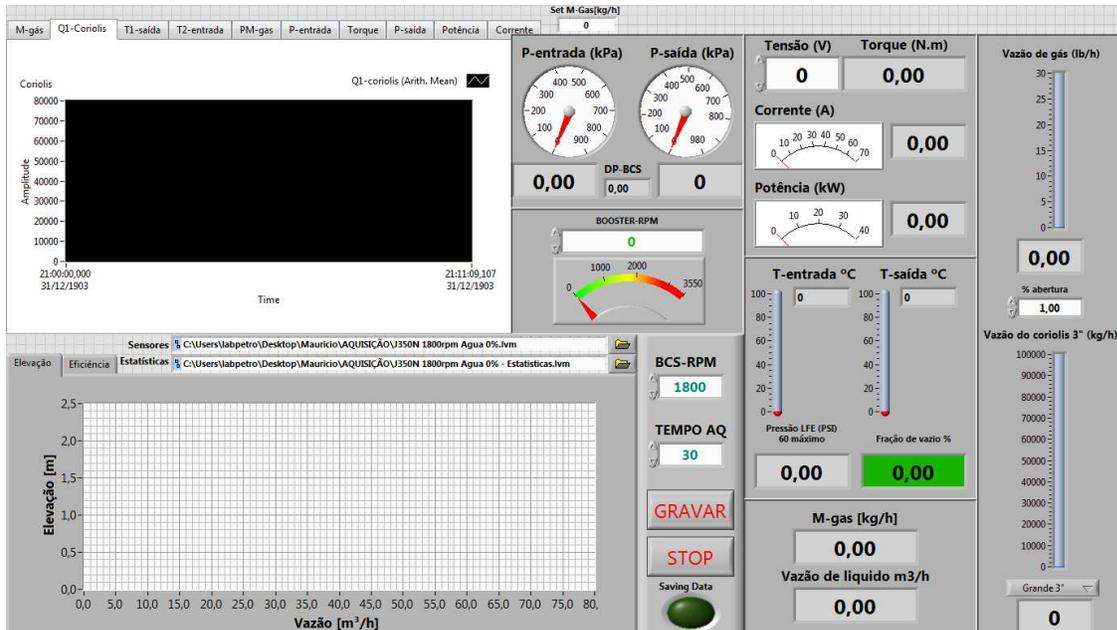


Figura 4-3. Interface gráfica do sistema de aquisição de dados em *LabView 2011*.

Tabela 4-4. Lista de variáveis a medir nos testes da BCS.

Variável	Definição	Unidade
p_s	Pressão na sucção	[Pa]
p_d	Pressão na descarga	[Pa]
p_{LFE}	Pressão no elemento de fluxo laminar	[Pa]
T_{LFE}	Temperatura no elemento de fluxo laminar	[°C]
T_s	Temperatura na sucção	[°C]
T_d	Temperatura na descarga	[°C]
W_L	Vazão mássica de líquido	[kg/s]
W_G	Vazão mássica de gás	[kg/s]
ω	Velocidade rotacional	[RPM]
T_{eixo}	Torque do motor	[N.m]
P_e	Potência elétrica do motor	[W]
I	Corrente elétrica	[A]

A injeção do ar na entrada da BCS se realiza utilizando um carretel como mostrado na Figura 4-5 montado entre a BCS e o *intake* onde tem ligado quatro pontos de injeção para mangueiras de 8 mm de diâmetro.

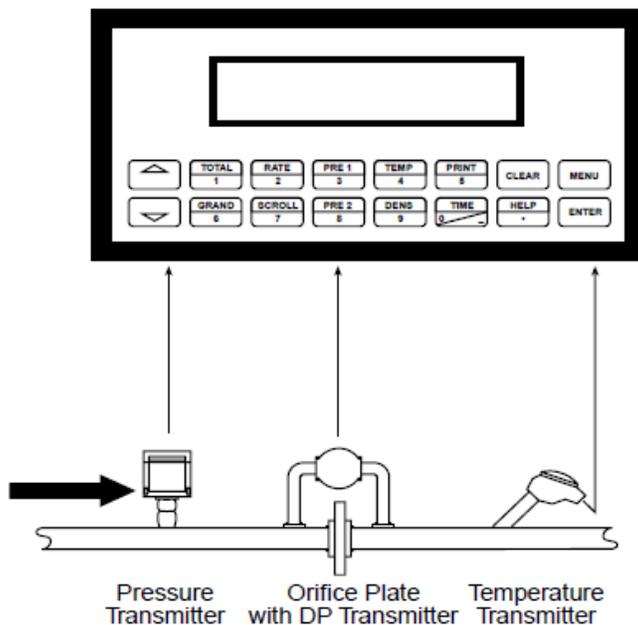


Figura 4-4. Esquema do elemento laminar para medição da vazão de gás.



Figura 4-5. Carretel para injeção de ar na sucção da BCS.

Com base na informação dada na Tabela 4-3, algumas das variáveis a medir dependem da medida de outras pelo que a incerteza delas propaga-se nos resultados do nosso interesse. No apêndice B é apresentado o procedimento do cálculo dessas incertezas resultantes nas variáveis medidas e são confrontadas com os parâmetros mínimos de precisão estabelecidos pela norma API com respeito à instrumentação. Portanto, na Tabela 4-5 são mostrados esses resultados.

Tabela 4-5. Avaliação da precisão dos instrumentos com a norma API RP11S2.

Grandeza	Tolerância (% no fundo de escala)	Tolerância (% fundo de escala)
q_L	$\pm 1.0\%$	$\pm 0.36\%$
Δp	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.79\%$
P_e	$\pm 2.0\%$	$\pm 0.05\%$
ω	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.05\%$
P_m	$\pm 3.0\%$	$\pm 0,07\%$
η	$< \pm 5.0\%$	$\pm 1,83\%$

Observa-se que para o Δp o valor marcado com vermelho indica que a precisão requerida nesta variável não é atendida, porém, dado que a instrumentação é a única disponível, os experimentos são realizados tendo em consideração que nos resultados finais deve ser associada uma incerteza adicional.

4.4 Procedimento Experimental.

O objetivo dos testes foi levantar as curvas de desempenho da BCS em diversas condições de operação. Esse conjunto de curvas está composto pelo ganho de pressão Δp , a eficiência η , a potência mecânica P_m e a potência elétrica do motor P_e , todas em função da vazão de líquido.

No caso do escoamento monofásico foram levantados 10 pontos experimentais em cada rotação. Para cada ponto é necessário garantir uma estabilidade razoável para obter dados mais confiáveis. Contrariamente, para o caso bifásico mais pontos foram necessários (10 – 15 pontos), pois o efeito do ar no desempenho causa instabilidades que requer de um detalhamento maior para registrar corretamente o comportamento da BCS. Neste caso, buscou-se manter uma injeção de ar a uma vazão volumétrica constante para cada curva, o que tecnicamente se traduziu em manter constante tanto a pressão na sucção da bomba quanto à vazão mássica, o que fez que a fração de gás aumentasse ao longo de cada curva partindo da vazão máxima até o ponto de bloqueio.

Os testes com fluido viscoso foram realizados com viscosidade constante para cada curva. Para isto, foi necessário controlar manualmente a temperatura na sucção, mantendo-a

constante para cada ponto da curva. A faixa de viscosidades testadas foi determinada pela capacidade do trocador do laboratório.

A seguir apresenta-se o procedimento realizado nos ensaios com a BCS P47:

- O inversor da bomba *booster* é ligado para operá-la a uma rotação determinada para obter uma pressão suficiente que evite cavitação na entrada da BCS. Logo, no inversor da BCS é fixada uma rotação desejada a qual não vai mudar durante o teste.
- Para tomar o ponto de máxima vazão da BCS, com a válvula globo completamente aberta é ajustada a rotação da *booster* até conseguir um diferencial de pressão nulo.
- Para o caso bifásico é necessário manter a pressão da entrada da BCS constante sendo necessário controlar a rotação da *booster* e a abertura da válvula globo.
- Para o caso em que o teste é feito com fração de gás constante ou vazão mássica constante, além do controle da pressão na sucção da BCS, a vazão de gás deve ser controlada ajustando a abertura da válvula de ar conforme a vazão de líquido varia.
- Para tomar os pontos posteriores, regula-se a vazão com a válvula globo até obter a vazão desejada. Isso é feito consecutivamente até fechar totalmente a válvula globo, ou seja, o ponto de bloqueio.
- Cada ponto é tomado a uma taxa de amostragem de 4000 Hz durante 30 segundos para um total de 120000 amostras, sendo então calculada a média dessas amostras que será representada por um ponto na curva.

5. RESULTADOS

Lembrando que o objetivo deste trabalho é observar o comportamento da incerteza da vazão de líquido calculada a partir das curvas de desempenho da bomba para avaliar a viabilidade da utilização da BCS como instrumento de medição, neste capítulo são apresentadas de forma separada as curvas do ganho de pressão, a potência elétrica e mecânica dos casos testados vistos como métodos de estimação independentes. Posteriormente, é apresentada a abordagem do cálculo da propagação da incerteza de cada método (Δp , P_e ou P_m).

Com isto, obtêm-se resultados da influência da rotação, fração de vazio na sucção e a viscosidade do fluido na incerteza da vazão de líquido calculada de forma separada. Portanto, esses resultados darão uma boa aproximação das condições operacionais nas quais a BCS pode ser operada como instrumento e nas quais não.

Nesse contexto, os experimentos foram realizados com água – ar e óleo mineral lubrificante e para cada fluido foi variada a rotação (2400 e 3500 RPM). No entanto, unicamente com água foram testadas quatro rotações com o objetivo de avaliar afinidade da bomba.

Para escoamento bifásico foram testadas três vazões mássicas de ar a três pressões diferentes na sucção da bomba, obtendo assim nove curvas de vazões volumétricas constantes para cada rotação. E para escoamento viscoso foram testadas quatro viscosidades diferente, obtendo assim cinco curvas de viscosidade constante cada incluindo o teste com água que representa o valor de 1 cP.

Cada ponto experimental foi determinado pela média de uma população de 120000 amostras tomadas em 30 segundos numa taxa de 4000 amostras/segundo depois de um período de estabilização razoável que foi controlado por observação dos sinais. A partir dessa mesma população também foi determinado o desvio padrão de cada ponto.

5.1 Curvas do Ganho de pressão Δp da P47.com três estágios

5.1.1 Δp da P47 operando com água – ar.

Como já tinha sido dito, a P47 foi testada utilizando água com injeção de ar na sua sucção a fim de levantar curvas de calibração para diversas condições de operação com gás livre. Os experimentos foram focados para obter diferentes curvas com vazão volumétrica constante numa faixa determinada pela variação da pressão na sucção e vazão mássica de ar em cada curva. Na Tabela 5-1 são listadas as condições de escoamento bifásico ensaiadas.

Tabela 5-1. Lista de condições de escoamento bifásico ensaiadas.

ω [RPM]	W_G [kg/h]	p_s [kpa]	q_G [m ³ /h]
3500	3	100	1.29
		300	0.66
	5	100	2.19
		300	1.11
		500	0.71
	7	100	3.08
		300	1.56
		500	1.01
	9	500	1.32
	2400	3	100
300			0.66
500			0.44
5		100	2.18
		300	1.11
		500	0.74
7		300	1.55
		500	1.03

Na Figura 5-1 são mostradas as curvas do Δp a 3500 RPM com diferentes vazões volumétricas de ar injetadas indicados na legenda. Da mesma forma é apresentado o conjunto de curvas a 2400 RPM na Figura 5-2.

Como esperado, em ambos os gráficos observar-se a redução da capacidade de elevação da bomba conforme o a vazão de ar injetada é maior. Para cada curva o ponto de *Surging* pode ser identificado como a primeira queda do valor do Δp , a partir do qual se inicia um bombeio instável. Portanto, a porção da curva que representa a operação estável da bomba será posteriormente invertida nos seus eixos e determinada a sua equação por meio de regressão polinomial para determinação da vazão de líquido e observação da quantificação da incerteza resultante.

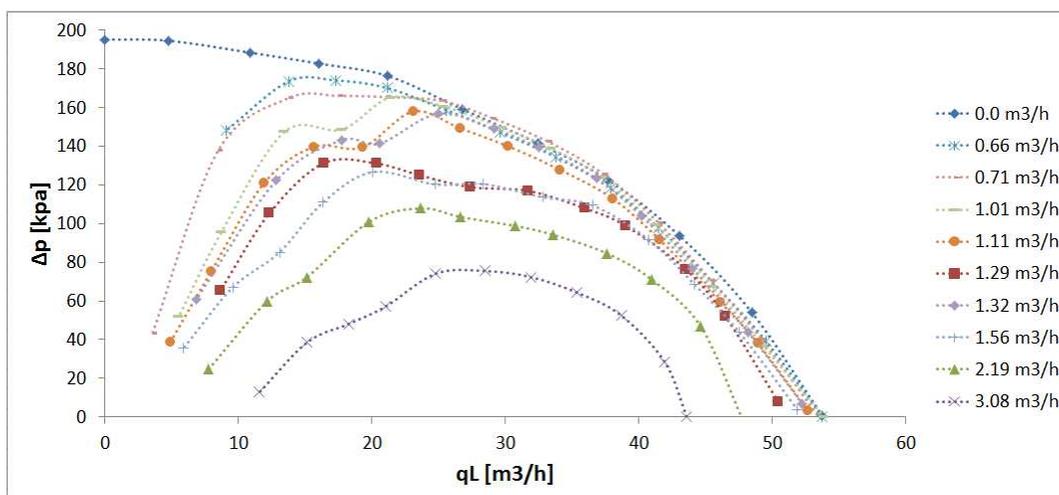


Figura 5-1. Δp da P47 operando com água – ar a 3500 RPM.

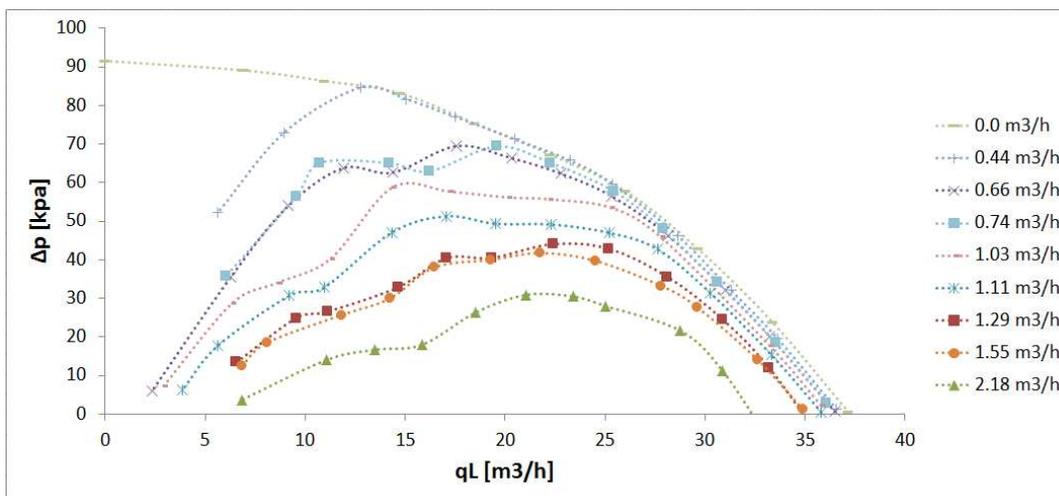


Figura 5-2. Δp da P47 operando com água – ar a 2400 RPM.

5.1.2 Eficiência da P47 operando água – ar.

A seguir apresentam-se as curvas da eficiência da P47 nas condições testadas nas Figuras 5-3 e 5-4 para 3500 e 2400 RPM, respectivamente. Essa eficiência foi calculada como a relação estabelecida pela equação (2.4) entre a potência hidráulica e a potência mecânica entregue à bomba. Com base no observado, a redução na capacidade de elevação vista nas figuras anteriores, se vê refletido na redução da eficiência no bombeio.

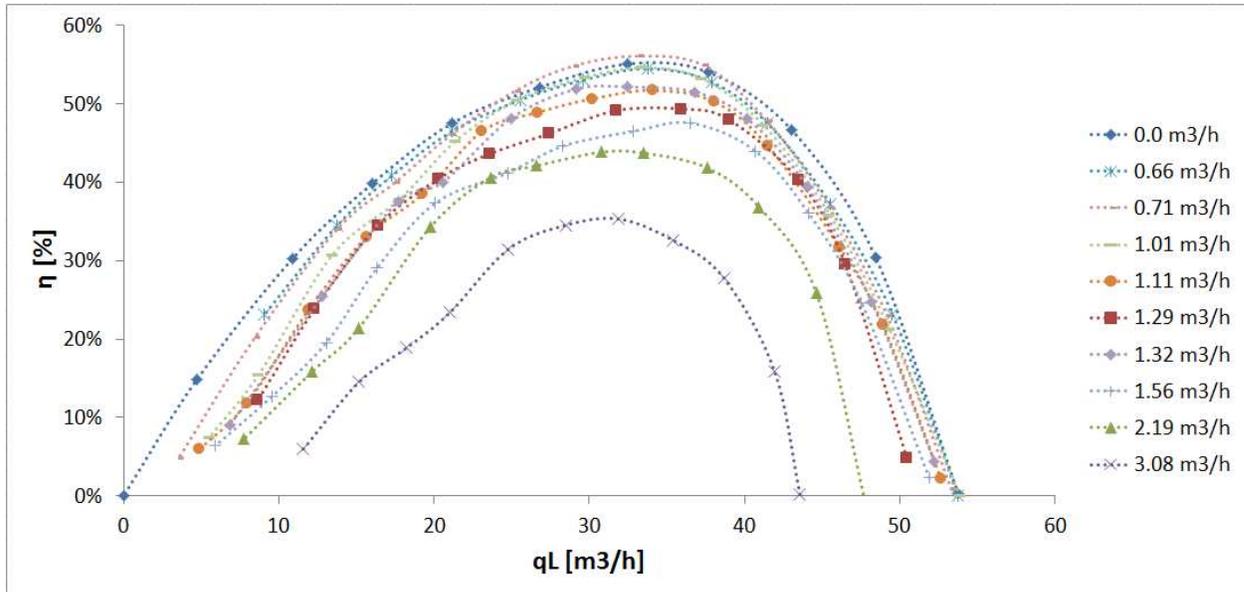


Figura 5-3. Eficiência da P47 operando com água – ar a 3500 RPM.

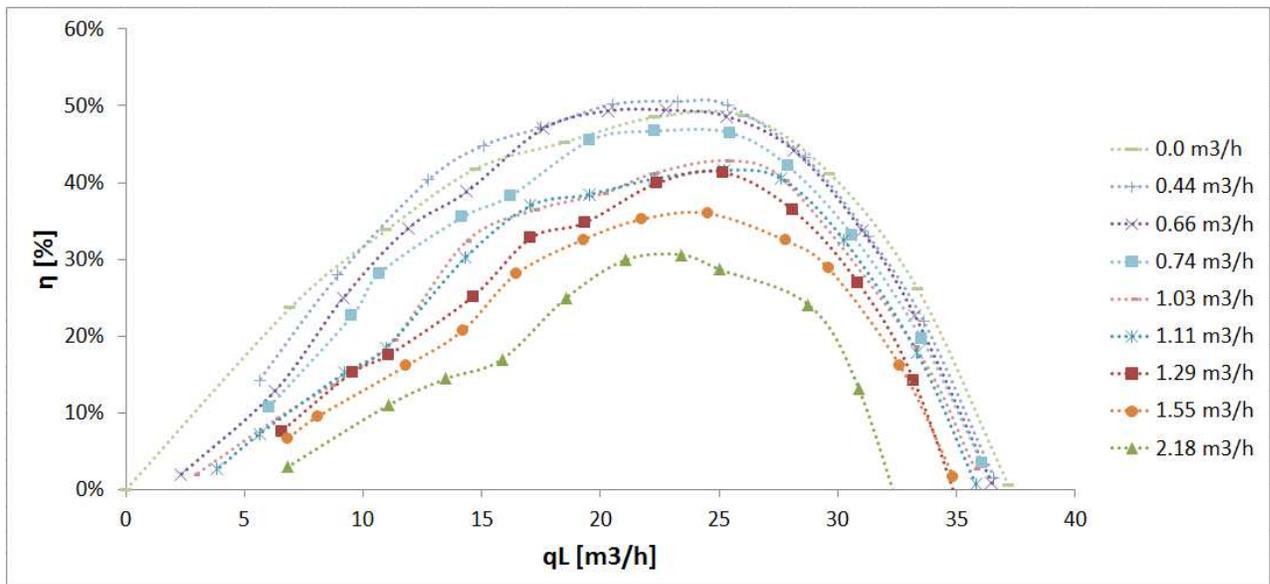


Figura 5-4. Eficiência da P47 operando com água – ar a 2400 RPM.

A partir das curvas de eficiência se determinam os pontos de melhor eficiência (PME) de cada condição testada e cuja análise de incerteza será efetuada principalmente. Portanto, na Figura 5-5 observam-se as curvas do Δp em função da vazão volumétrica de ar dos PME nas duas rotações testadas. A linha tracejada indica a tendência do comportamento da bomba em relação à vazão de ar injetada.

Da mesma forma, a Figura 5-6 apresenta o mesmo comportamento em relação à fração de vazio homogênea.

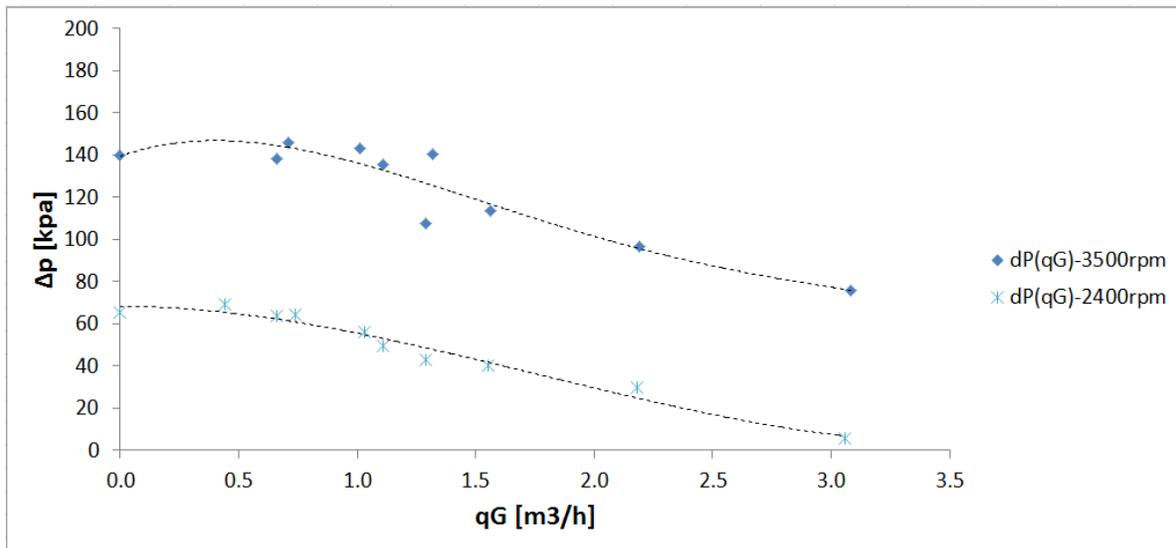


Figura 5-5. Comportamento do Δp em função da vazão volumétrica do ar no PME.

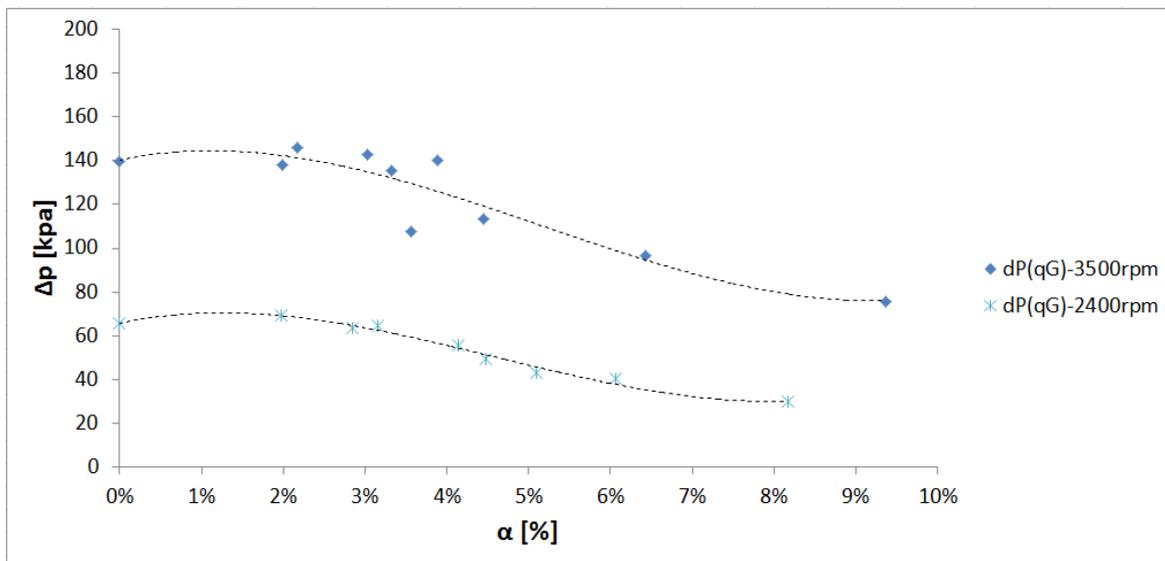


Figura 5-6. Comportamento do Δp em função da fração de vazio homogênea de ar α nos PME.

5.1.3 Δp da P47 operando com óleo mineral.

Nesta parte, os experimentos foram realizados utilizando óleo mineral lubrificante cuja viscosidade é variável em função da temperatura. Em princípio, à temperatura ambiente o óleo tinha uma viscosidade de aproximadamente 300 cP, porém após utilização em testes anteriores na tubulação que não foi secada adequadamente, foi misturado com quantidade de água suficientes como para emulsionar o óleo com aproximadamente 180 cP a 21°C (ver Anexo III).

Por outro lado, houve grande dificuldade na adaptação da bancada na tentativa de trabalhar com mistura bifásica óleo – ar. Primeiramente, era necessário induzir uma separação do líquido – gás em curto intervalo de tempo, quando a mistura retornasse ao tanque de armazenamento, pois este processo demanda um tempo maior que o tempo de repouso do fluido no tanque antes de voltar à bomba novamente. Isto com o objetivo de que o óleo entrasse na bomba *booster* sem ar e não reduzir sua capacidade de bombeio. Portanto, por motivos do cronograma de atividades não foi possível realizar dita adaptação e optou-se por fazer os ensaios com óleo, unicamente variando a viscosidade.

As viscosidades ensaiadas foram determinadas pela capacidade do trocador de calor disponível no laboratório de manter a temperatura mínima e máxima estáveis do óleo nas condições de operação. Portanto, o óleo foi testado a partir de 52°C até 21°C aproximadamente; o que equivale a 23 cP e 180 cP, respectivamente. Dada que a faixa ficou um pouco estreita entre a viscosidade máxima e mínima, foram escolhidas mais duas viscosidades, sendo 77 cP e 120 cP. Ver Tabela 5-1.

Nas Figuras 5-7 e 5-8 estão apresentadas as curvas do Δp ensaiadas com as viscosidades da Tabela 5-1 para 3500 e 2400 RPM, respectivamente. Também, a curva do teste com água é mostrada como referência do fluido com 1 cP de viscosidade. Então, como pode ser observada, a capacidade de elevação é afetada pelo aumento da viscosidade do fluido bombeado.

Como já explicado na seção anterior, essas curvas também são invertidas com o objetivo de determinar a equação que permita o cálculo da vazão de líquido através de

regressões polinomiais e, portanto, a magnitude da incerteza resultante nos PME de cada condição ensaiada.

Tabela 5-2. Características do óleo nas condições ensaiadas.

Temperatura	Viscosidade	Massa específica
(água) 25°C	1.0 cP	998.0 kg/m ³
21°C	180 cP	911.4 kg/m ³
26°C	120 cP	907.7 kg/m ³
33°C	77 cP	904.0 kg/m ³
52°C	23 cP	892.6 kg/m ³

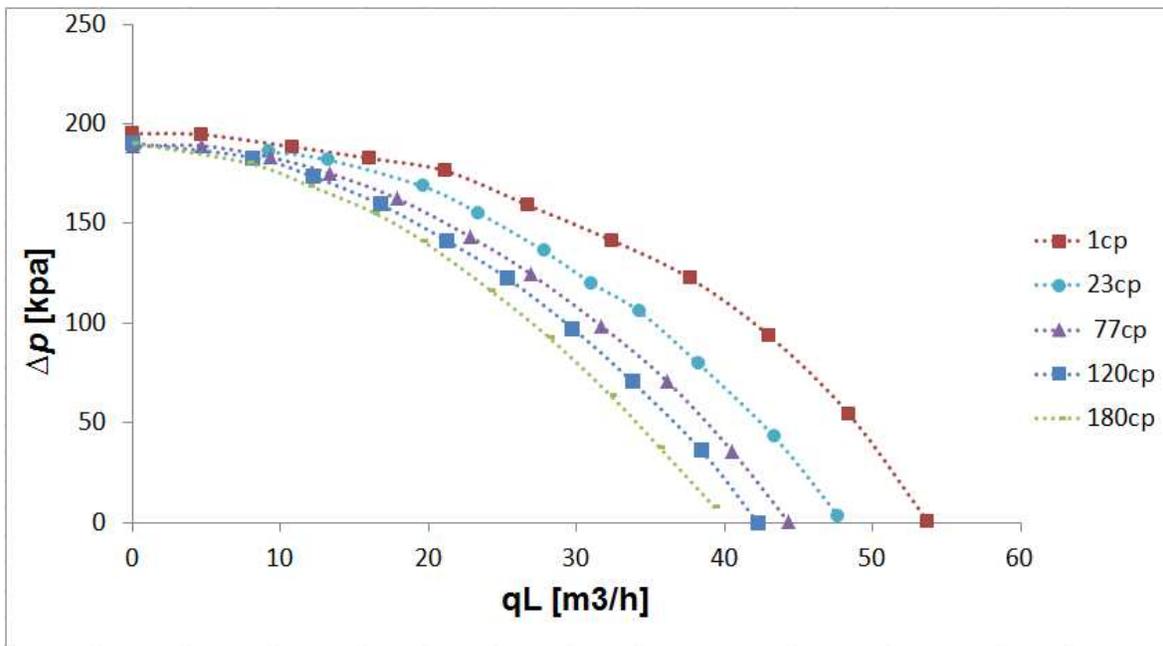


Figura 5-7. Δp da P47 operando com óleo mineral a 3500RPM.

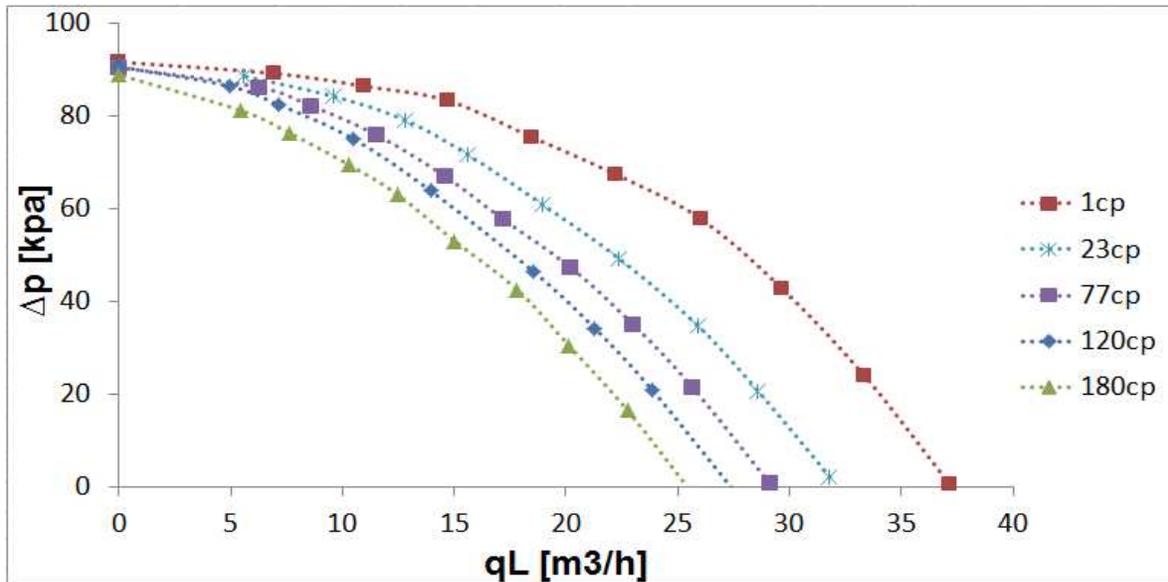


Figura 5-8. . Δp da P47 operando com óleo mineral a 2400RPM

5.1.4 Eficiência da P47 operando com óleo mineral.

A seguir são apresentadas as curvas da eficiência da P47 operando com óleo mineral nas Figuras 5-9 e 5-10 para 3500 e 2400 RPM, respectivamente. Com base no observado, a redução na capacidade de elevação vista nas figuras anteriores, também se vê refletido na redução da eficiência no bombeio.

Da mesma forma, a partir dessas curvas são determinados os PME os quais serão objeto da análise da incerteza na vazão de líquido propagada.

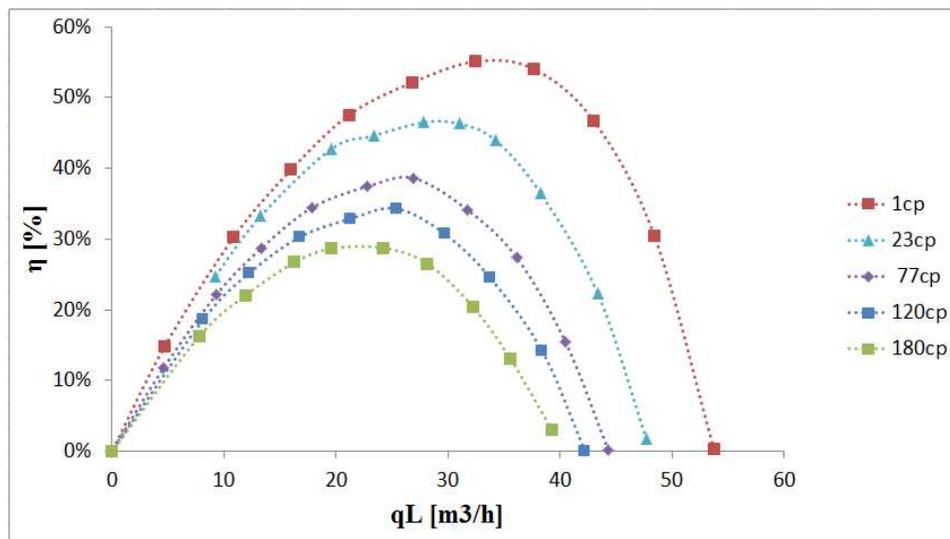


Figura 5-9. Eficiência da P47 operando com óleo mineral a 3500 RPM.

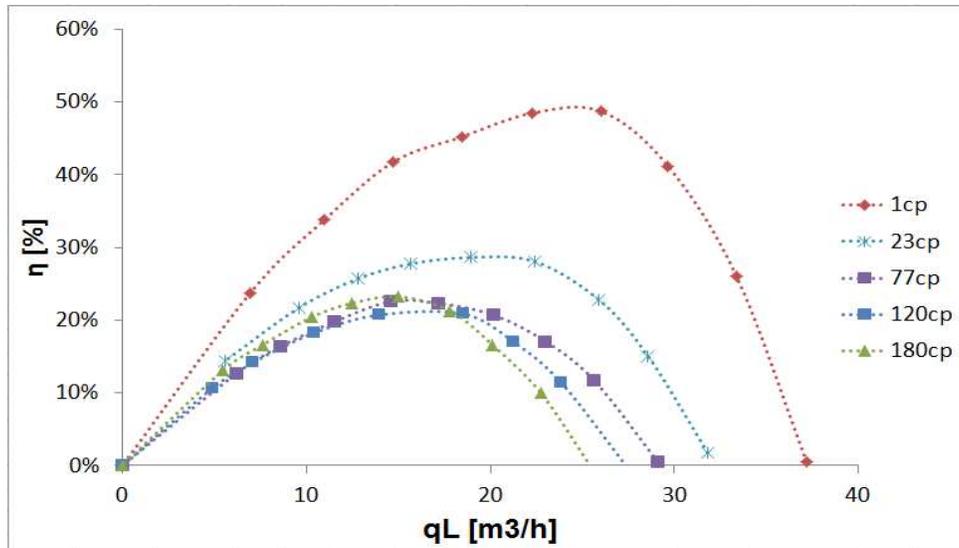


Figura 5-10. Eficiência da P47 operando com óleo mineral a 2400 RPM.

5.2 Curvas de Potência P da P47 com três estágios.

5.2.1 Potência elétrica P_e consumida pelo motor operando a P47.

Na Figura 5-11 e 5-12 estão apresentadas as curvas da potência elétrica P_e consumida pelo motor operando a P47 com água – ar com velocidades de rotação de 3500 e 2400 RPM, respectivamente. Cada curva representa as mesmas condições de vazão de ar mostradas na seção anterior.

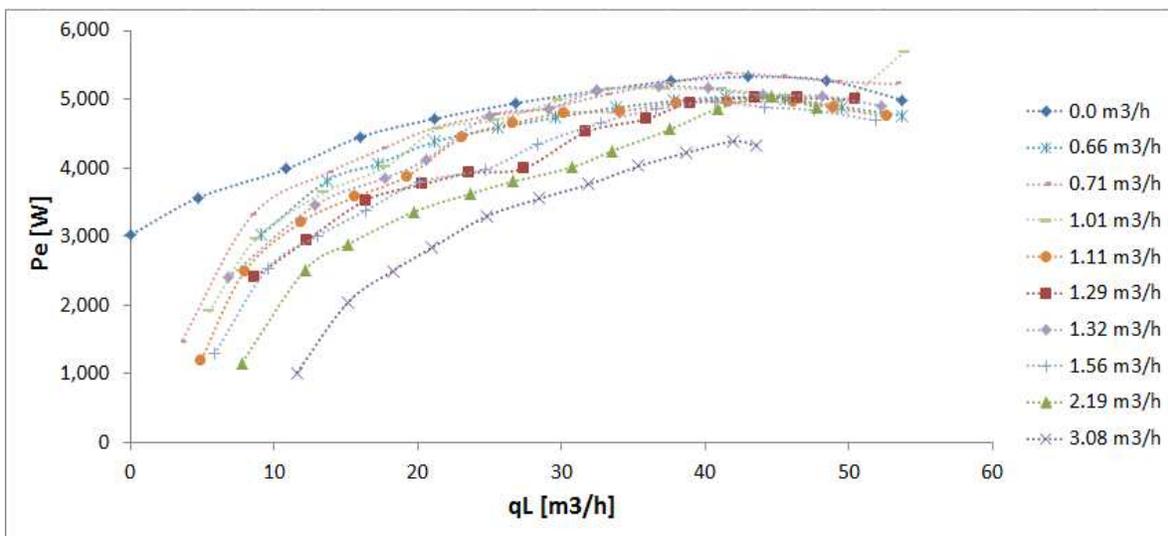


Figura 5-11. P_e consumida pelo motor com a P47 (3 estágios) a 3500 RPM com água – ar.

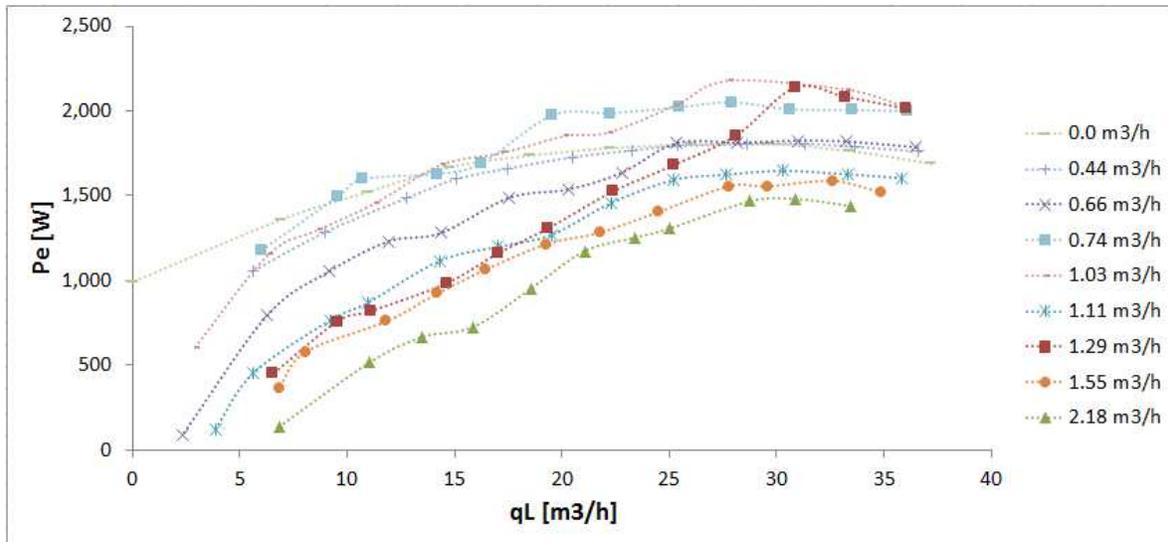


Figura 5-12. P_e consumida pelo motor com a P47 (3 estágios) a 2400 RPM com água – ar.

Como esperado, nas Figuras 5-11 e 5-12 se observa a diminuição do consumo de potência conforme aumenta o a vazão em volume de ar na sucção. No entanto, no gráfico de 2400 RPM observa-se uma região da curva de monofásico que é ultrapassada por curvas com maior volume de ar. Este comportamento alterado e imprevisível pode ser explicado pela presença de harmônicos de corrente induzidos pelo inversor de frequência, além da possível necessidade de manutenção ou troca do motor elétrico da bancada, pois sua operação afastada tanto da sua carga quanto da sua rotação nominal provoca uma eficiência significativamente baixa. Isto é, para uma carga baixa requerida se consome uma carga mais alta do normal.

Nas Figuras 5-13 e 5-14 se apresentam as curvas da P_e consumida pelo motor operando a P47 com óleo viscoso a diferentes temperaturas para 3500 e 2400 RPM, respectivamente. Também, como esperado o consumo de carga aumenta com o aumento da viscosidade do fluido que está sendo bombeado.

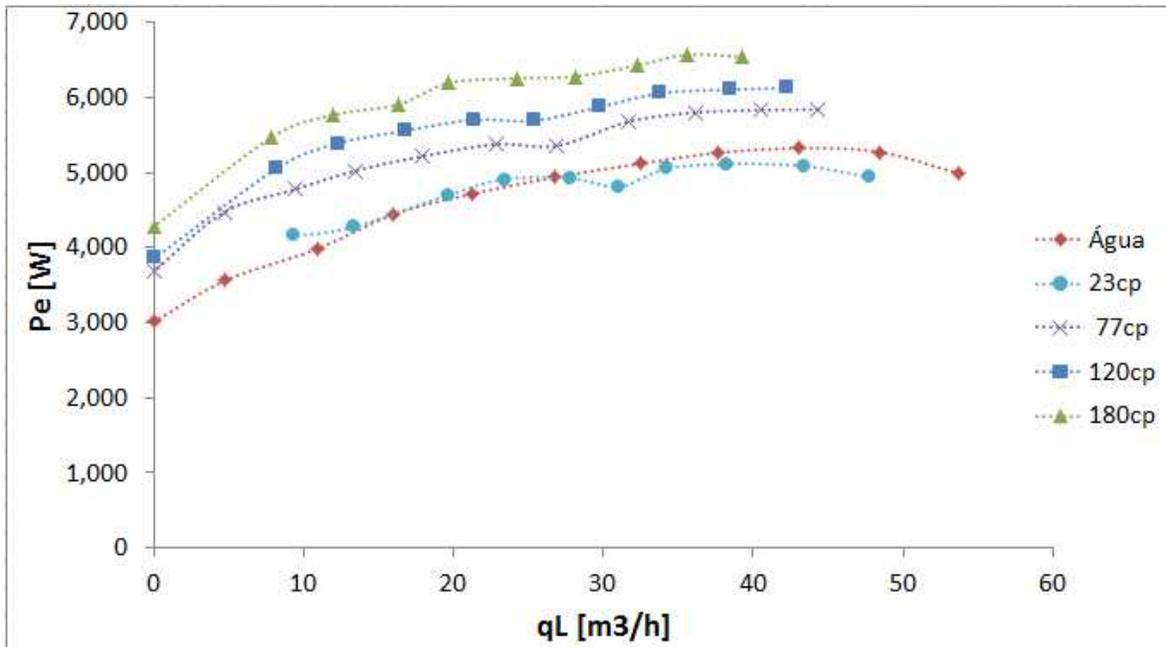


Figura 5-13. P_e consumida pelo motor com a P47 (3 estágios) a 3500 RPM com óleo.

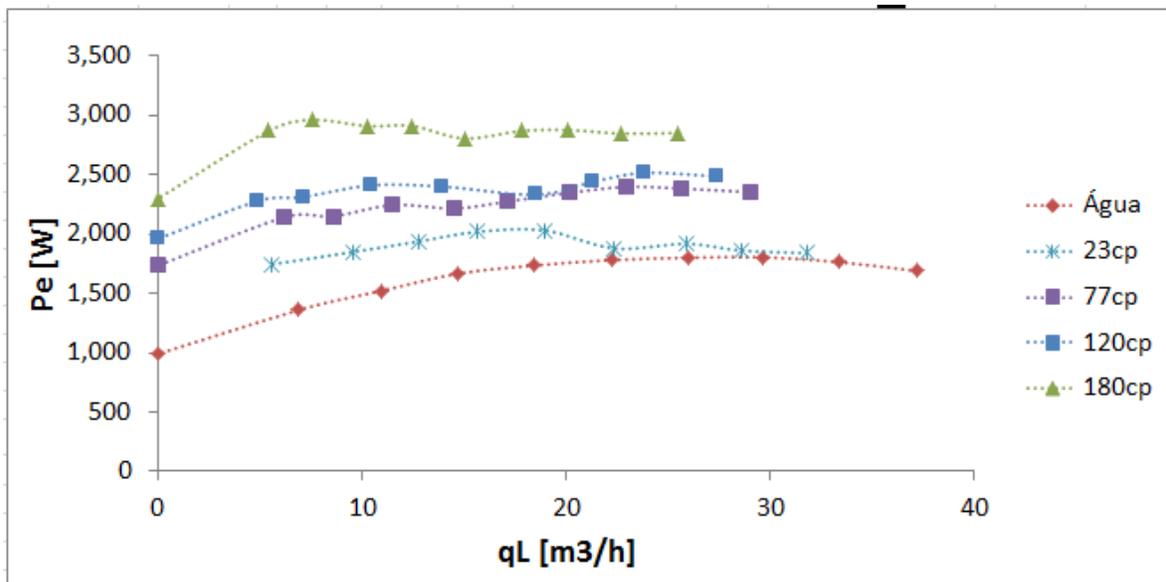


Figura 5-14. P_e consumida pelo motor com a P47 (3 estágios) a 2400 RPM com óleo.

5.2.2 Medições da P_m exercida pela P47 operando com água – ar.

Esta seção do trabalho pretende apresentar a forma das curvas da potência exercida pelo eixo porque é o que vá afetar diretamente a propagação da incerteza através do fator de sensibilidade entre as variáveis. Então, nas Figuras 5-15 e 5-16 mostra o comportamento da P_m medida com escoamento bifásico água – ar a 3500 e 2400 RPM, respectivamente.

Adicionalmente, cabe lembrar que essa potência foi determinada como função da medição do torque da velocidade rotacional determinada pela equação (2.3) e não através de alguns parâmetros do motor utilizados na equação (2.15), pois isto precisa de um motor calibrado que não é o caso.

Em comparação com as curvas da potência elétrica, mesmo que o comportamento seja praticamente igual, se observam diferenças nas medidas as quais são explicadas pelas perdas causadas pelo rolamento interno do motor e pela resistência natural à rotação própria do torquímetro.

Nas curvas com escoamento bifásico apresenta a mesma região alterada que podem ser causadas pelas mesmas razões anteriormente mencionadas.

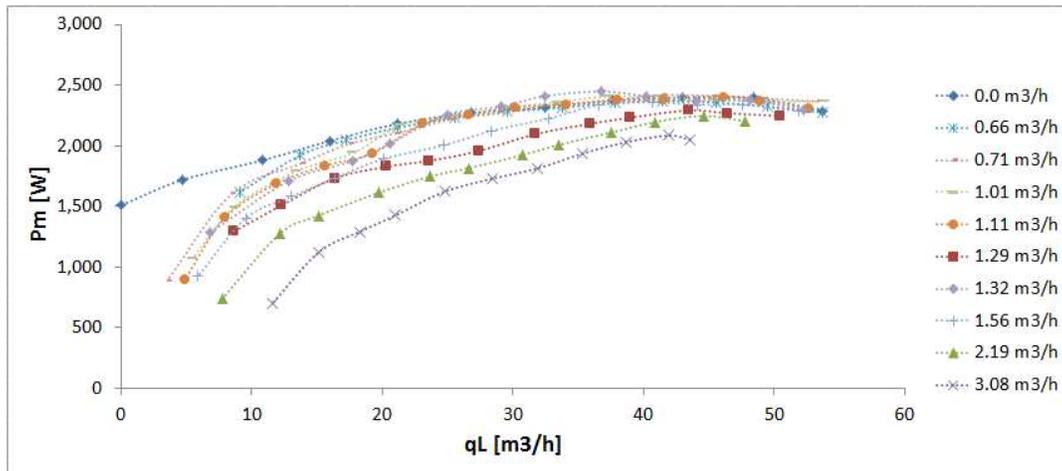


Figura 5-15. P_m entregue à P47 (3 estágios) a 3500 RPM com água.

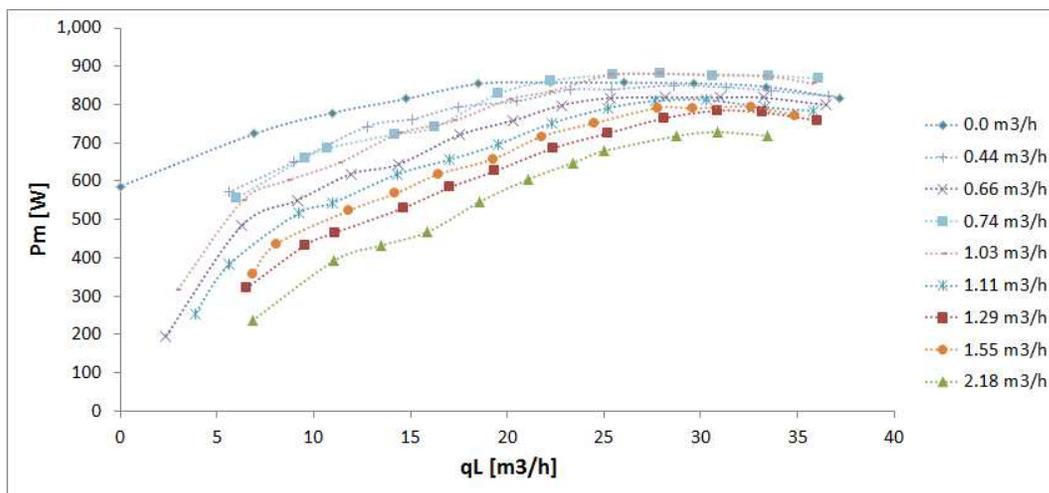


Figura 5-16. P_m entregue à P47 (3 estágios) a 2400 RPM com óleo.

5.3 Determinação e Análise das Incertezas na Determinação da Vazão de Líquido

O presente trabalho é focado na determinação da incerteza no cálculo da vazão de líquido a partir de curvas de desempenho previamente levantadas caracterizando algumas condições comuns de operação de BCS. A abordagem desses resultados é estatística e, portanto, cada ponto experimental é resultado de uma média pela equação (2.11) de uma população num tempo determinado em regime permanente. Além disso, o desvio padrão de cada medida foi determinado pela equação (2.12) com o objetivo de obter um valor representativo da incerteza de cada ponto experimental. Isto permite observar a relação da incerteza na medida com as outras variáveis que são controladas na criação de uma condição de operação específica. Posteriormente, os PME de cada condição são identificados e seu desvio padrão resultante é avaliado na regressão polinomial correspondente. Com isto é calculada a sensibilidade de cada curva e, portanto se determina a incerteza propagada do desvio padrão da variável medida.

Em resumo, espera-se obter um conjunto de regressões polinomiais para condição ensaiada e, umas faixas, em tabelas e gráficos, que indiquem em que condições a BCS pode ser utilizada como instrumento para medir vazão e em quais não. No caso dos testes água – ar se espera conhecer como a fração de vazio afeta o desvio padrão do Δp e, portanto como isso é propagado no cálculo da vazão de líquido. Da mesma forma, nos testes com óleo mineral se espera conhecer como a viscosidade afeta o desvio padrão do Δp . Alternativamente, pretende-se avaliar como o desvio padrão da potência (elétrica ou mecânica) afeta a incerteza resultante da vazão de líquido.

As condições ensaiadas neste trabalho foram escolhidas com base nas limitações da bancada e de algumas práticas comuns encontradas no campo. Em primeiro lugar, os testes com água são realizados com o objetivo de verificar a instrumentação e obter dados como pontos referência. No caso água – ar, as vazões de ar escolhidas para abranger uma faixa de 1% a aproximadamente 15% de fração volumétrica de vazio ao longo das curvas. Essa faixa já é conhecida na literatura como a range de tolerância de uma bomba centrífuga operando com gás livre. Finalmente, mesmo que os testes com óleo – ar não foram possíveis de realizar, testes com óleo monofásico variando a sua viscosidade foram feitos.

Então, sendo a viscosidade do óleo sensível com a temperatura, a faixa escolhida foi determinada pela capacidade do equipamento do trocador de calor em controlar a temperatura do óleo na entrada da BCS nos seus pontos máximos e mínimos. Também, fatores ambientais dificultaram o controle da temperatura.

5.3.1 $q_L = f(\Delta p)$ da P47 operando com água – ar.

O conjunto de curvas invertidas no sentido $q_L = f(\Delta p)$ nos ensaios com água – ar é mostrado nas Figuras 5-17 e 5-18 para 3500 e 2400 RPM, respectivamente. Nestes gráficos a região do *Surging* de cada curva já foi descartada e com base nessas curvas são calculadas as regressões polinomiais.

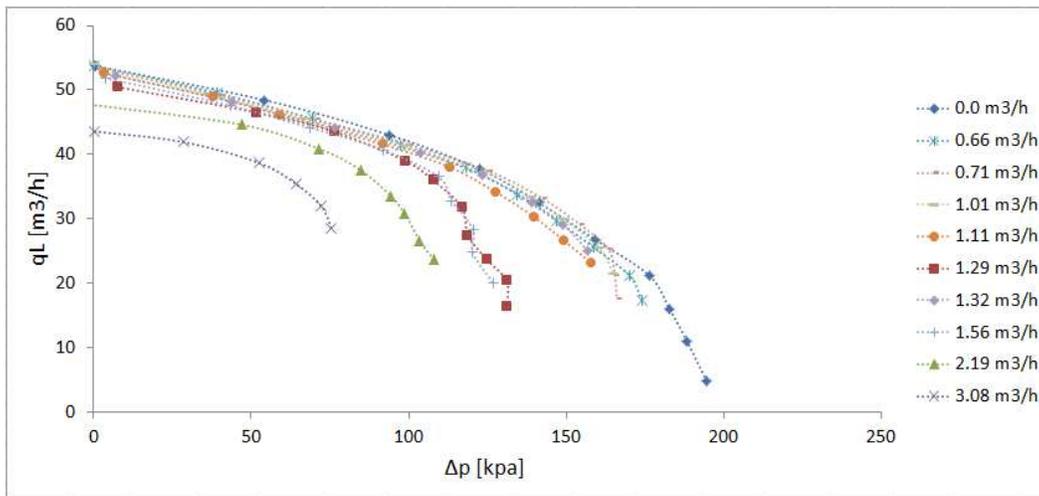


Figura 5-17. Vazão de líquido em função do Δp para 3500 RPM com água – ar.

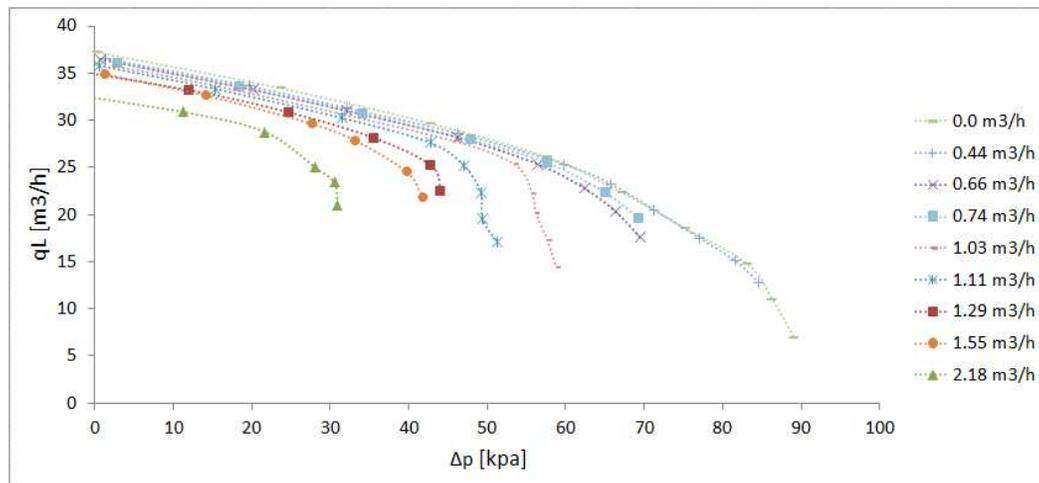


Figura 5-18. Vazão de líquido em função do Δp para 2400 RPM com água – ar.

Nas Figuras 5-19 e 5-20 estão apresentadas as incertezas do Δp a 3500 e 2400 RPM, respectivamente, em função da fração de vazio α equivalente em cada ponto experimental.

Observa-se que em cada gráfico está marcado o limite API de 5% estabelecido para o Δp com uma linha tracejada preta. Com base nisso, note-se que a 3500 RPM a quantidade de pontos dentro do limite é superior que a 2400 RPM. Além disso, pode-se ver uma leve tendência crescente no aumento da incerteza conforme aumenta o α .

Isto é, quando a bomba se aproxima do ponto de início de *surging*, as oscilações nas medições das pressões fazem com que o desvio padrão do Δp aumente significativamente. No entanto, existem pontos onde o α é baixo e mesmo assim, o desvio também é grande, pois esses pontos correspondem a valores de Δp muito baixos pelo que a proporção da medição com o desvio padrão é grande.

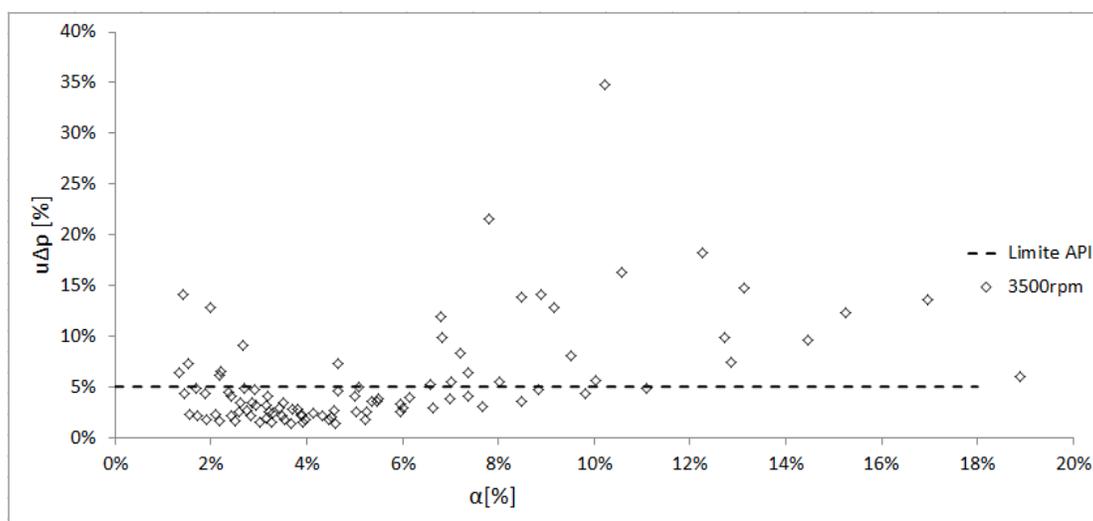


Figura 5-19. Incerteza do Δp em função da fração de vazio a 3500 RPM.

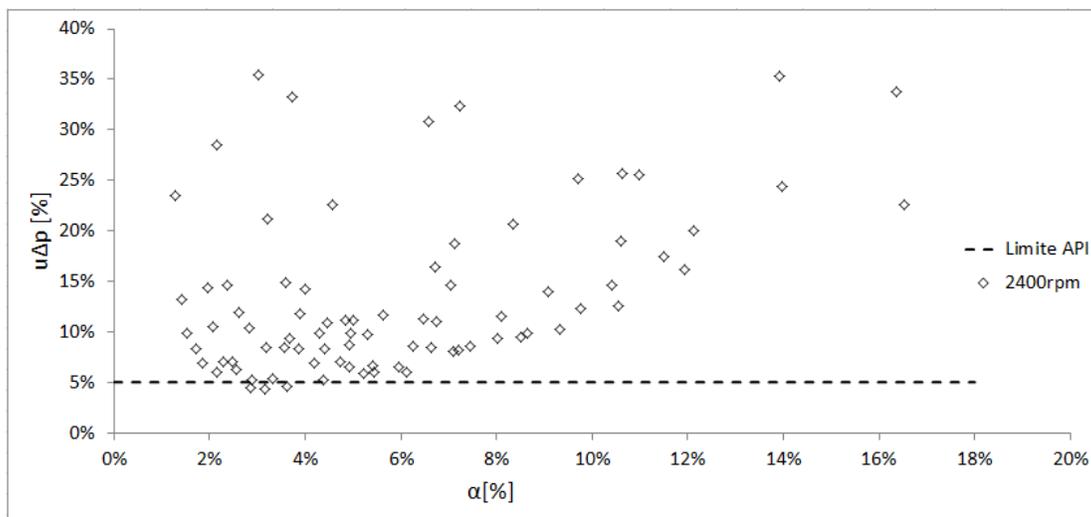


Figura 5-20. Incerteza do Δp em função da fração de vazio a 2400 RPM.

Com base no observado na Figura 5-19, se obtém a Tabela 5-2 com algumas estatísticas de interesse. Isto é, do total de pontos tomados o 90% foram medidos com o α entre 2 e 10%. A partir dessa porcentagem os pontos estão distribuídos nos pontos tomados nas três pressões de sucção. Adicionalmente, do total de pontos o 66% obtiveram incertezas menores ou iguais a 5% estabelecido pela API. Da mesma forma, desse conjunto se distribuem os pontos de cada pressão de sucção testada. Por outro lado, a faixa do α até 10% é considerada, pois no gráfico se observa que não existem pontos com α maiores e ao mesmo tempo com incertezas menores ao limite.

Tabela 5-3. Estatísticas gerais dos ensaios da P47 com água – ar.

ω [RPM]	$\alpha < 10\%$	$u_{\Delta p} < 5\%$
3500	90%	66%
2400	86.6%	3.7%

Nas Figuras 5-21 e 5-22 se apresentam as incertezas resultantes da determinação da vazão de líquido q_L a partir do conjunto de curvas do Δp com escoamento água – ar a 3500 e 2400 RPM, respectivamente, como função da incerteza do Δp . Nesses gráficos está indicado o limite de aceitação API de 5% para estabelecido para o q_L com uma linha tracejada preta. Também, são ressaltados os PME de cada condição ensaiada e pode-se observar que comparando as duas rotações, a 2400 RPM não se obtiveram resultados favoráveis com o método, pois apenas um desses pontos ficou dentro de 5%.

Adicionalmente, não se observa uma relação clara entre as duas variáveis, porém os PME sim apresentam uma tendência diretamente proporcional nas duas rotações.

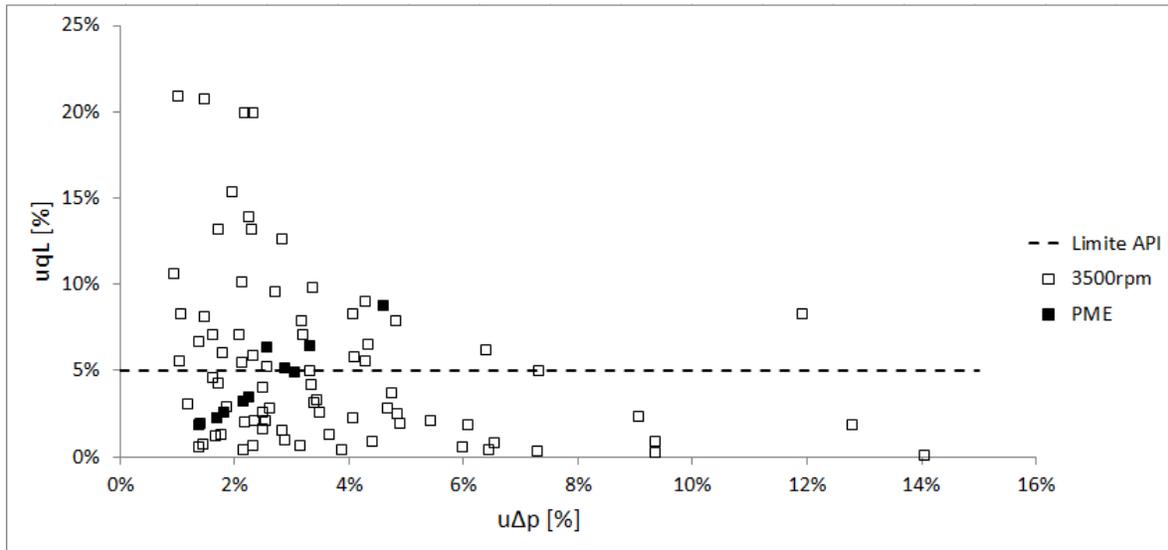


Figura 5-21. Incerteza de q_L calculado a partir do Δp com água – ar a 3500 RPM.

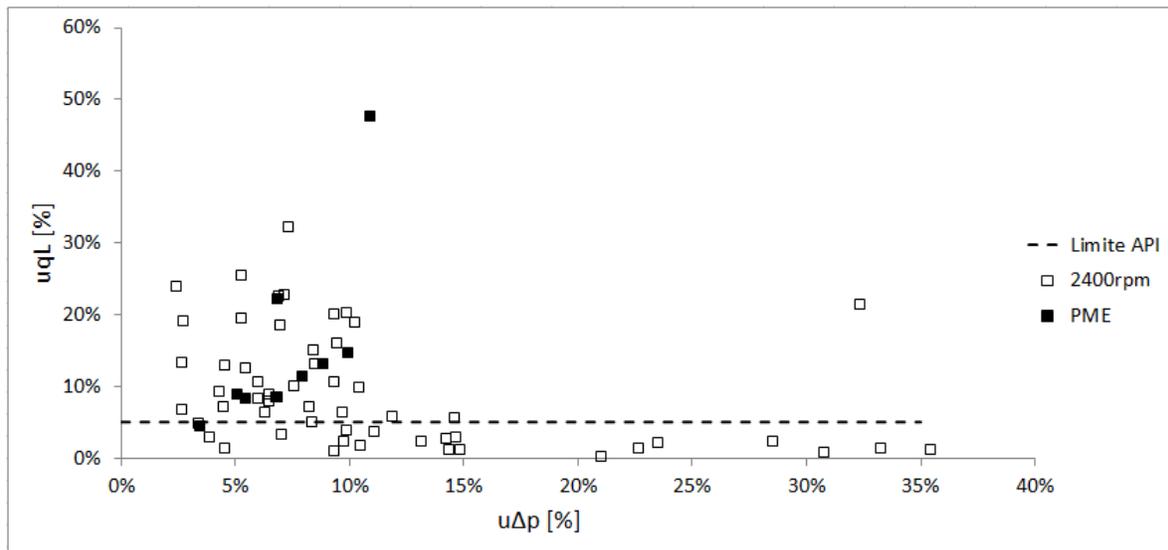


Figura 5-22. Incerteza do q_L calculado a partir do Δp com água – ar a 2400 RPM.

Nas Figuras 5-23 e 5-24 se observam os PME de cada vazão de ar ensaiada dos testes a 3500 e 2400 RPM, respectivamente. Note-se a clara tendência no aumento da incerteza do q_L conforme aumenta a incerteza do Δp curvas, o qual é principalmente afetado pelo aumento do desvio padrão do Δp quando a vazão de ar q_G também aumenta. Portanto, se observa, com base na Tabela 5-1 anteriormente apresentada, que para valores q_G de 1.56,

2.19 e 3.08 m³/h a 3500 RPM correspondem a condições de baixa pressão na sucção (1 bar), evidenciando assim a influencia na incerteza resultante no calculo do q_L . Isto é, o aumento da pressão na sucção, além de melhorar o desempenho da bomba, também faz com que o desvio padrão no Δp também se reduza.

Por outro lado, no caso de 2400 RPM, nenhum dos PME com $q_G > 0$ atendeu a norma API, tendo assim também uma clara influencia da rotação na precisão dos resultados do q_L .

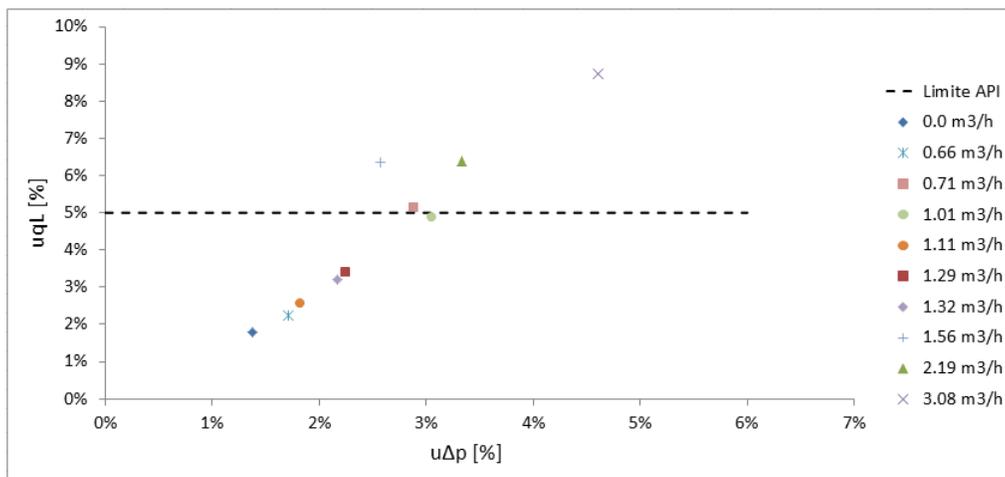


Figura 5-23. Incerteza do q_L nos PME em cada q_G a 3500 RPM.

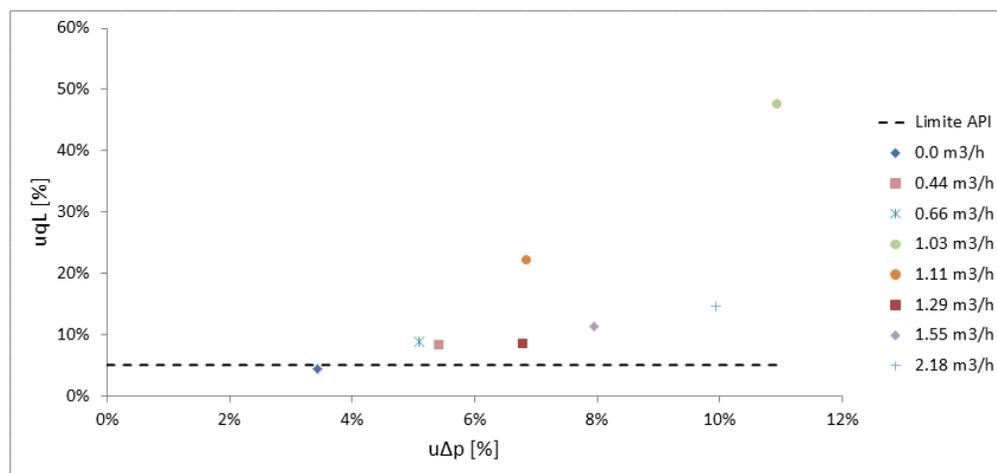


Figura 5-24. Incerteza da vazão de líquido em função do Δp para 2400 RPM.

Na Tabela 5-4 se apresentam os valores numéricos das incertezas na determinação do $q_L(\Delta p)$ da P47 operando com água sendo $u_{\Delta p}$ a incerteza do ganho de pressão e u_{q_L} a incerteza propagada da vazão de líquido na faixa dos PME do teste com água. .

Tabela 5-4. Incertezas de $q_L(\Delta p)$ da P47 operando com água (monofásico) nos PME.

ω [rpm]	Ponto	$q_L(\Delta p)$ [m^3/h]	$\delta q_L(\Delta p)$ [m^3/h]	$u_{q_L(\Delta p)}$ [%]	Δp [kpa]	$u_{\Delta p}$ [%]	$\delta \Delta p$ [kpa]
3500	PME	34.06	0.60	1.77	139.49	1.38	1.93
	PME+20%	41.57	0.37	0.88	106.78	2.05	2.19
	PME-20%	25.73	0.82	3.19	161.79	1.12	1.82
2400	PME	23.40	1.00	4.28	65.56	3.44	2.25
	PME+20%	28.45	0.51	1.80	50.07	4.10	2.05
	PME-20%	17.84	1.40	7.84	76.32	2.89	2.20

Da mesma forma, a Tabela 5-5 mostra os resultados numéricos do caso bifásico na faixa dos PME, onde se observa em vermelho todos os valores das incertezas que estão por acima limite de aceitação API. A 2400 RPM as incertezas u_{q_L} apresentaram as maiores magnitudes, de 11.4%, 14.64% e 22.19%. A 3500 RPM somente nas vazões de ar de 7 kg/h a 1 e 3 bar e de 5 kg/h a 1 bar mostraram incertezas fora do limite de aceitação. Os valores respectivamente foram 8.72%, 6.36% e 6.39%. De forma geral, os dados confirmam o notável efeito da pressão de sucção sobre a incerteza, o que é uma boa notícia para a aplicação em campo do BCS – medidor, já que as pressões mínimas esperadas, nesse caso, são muito superiores a 5 bar.

Tabela 5-5. Incertezas de $q_L(\Delta p)$ da P47 operando com água – ar nos PME.

ω [RPM]	p_s [bar]	W_G [kg/h]	q_G [m^3/h]	$q_L(\Delta p)$ [m^3/h]	$u_{q_L(\Delta p)}$ [%]	Δp [kpa]	$u_{\Delta p}$ [%]	η [%]
2400	-	0	0	23.40	4.28%	65.56	3.44%	49.08%
	1.0	3	1.29	24.10	8.36%	42.93	6.80%	41.19%
	3.0		0.66	21.80	8.74%	63.43	5.10%	50.53%
	5.0		0.44	21.62	8.15%	69.05	5.43%	51.90%
	1.0	5	2.16	23.37	14.64%	29.65	9.94%	30.96%
	3.0		1.11	20.81	22.19%	49.36	6.85%	42.83%
	5.0		0.72	22.39	13.01%	64.36	8.84%	47.18%
	3.0	7	1.55	23.40	11.40%	40.13	7.94%	36.41%
	5.0		1.03	24.10	47.66%	55.80	10.93%	43.11%
3500	-	0	0	33.93	1.79%	139.92	1.38%	55.57%
	1.0	3	1.29	35.20	3.39%	107.78	2.24%	49.82%
	3.0		0.66	32.60	2.25%	138.05	1.71%	55.37%
	5.0		0.71	32.82	5.12%	146.08	2.89%	56.70%
	1.0	5	2.19	31.58	6.39%	96.77	3.33%	43.54%
	3.0		1.11	31.63	2.56%	135.45	1.83%	52.87%
	5.0		1.01	31.69	4.89%	142.92	3.05%	55.24%
	1.0	7	3.08	28.94	8.72%	75.74	4.61%	34.76%
	3.0		1.56	31.88	6.36%	113.48	2.57%	48.88%
	5.0		1.32	31.78	3.21%	140.28	2.17%	53.97%

5.3.2 $q_L = f(\Delta p)$ da P47 operando óleo mineral.

Nas Figuras 5-25 e 5-26 se apresentam as curvas do Δp da P47 a 3500 e 2400 RPM, respectivamente, operando com óleo mineral a quatro temperaturas diferentes e com água (1cP). Com base nestas curvas foram realizadas as regressões polinomiais (ver Apêndice C).

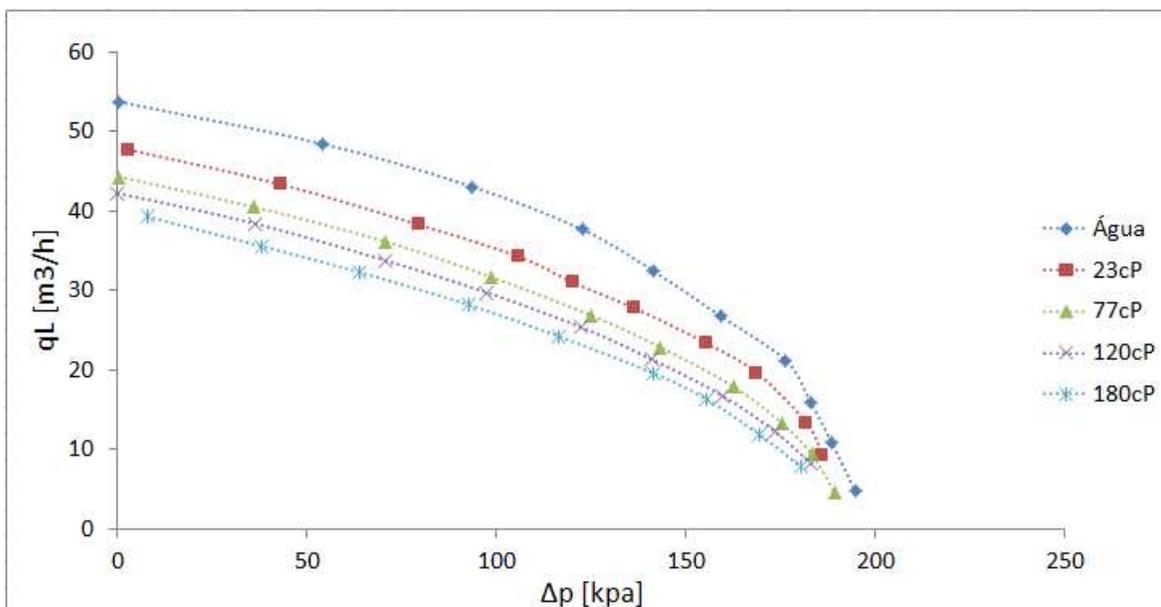


Figura 5-25. Vazão de líquido em função do Δp para bombeio viscoso a 3500 RPM.

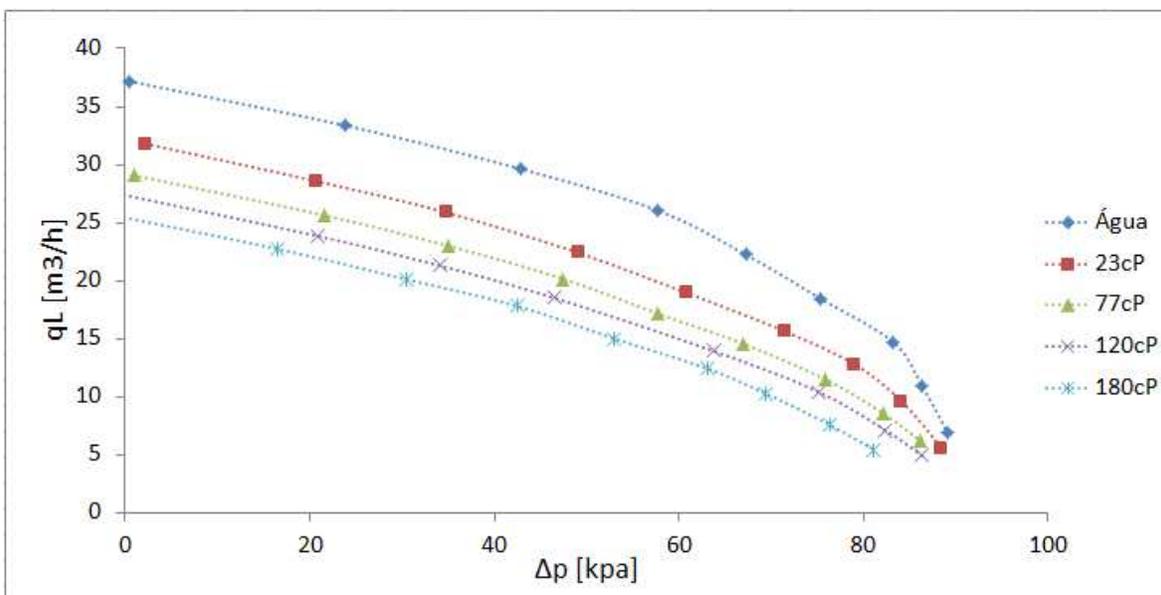


Figura 5-26. Vazão de líquido em função do Δp para bombeio viscoso a 2400 RPM.

Nas Figuras 5-27 e 5-28 se apresentam as incertezas do Δp para 3500 e 2400 RPM, respectivamente. Observa-se que o bombeio com água apresenta a menor incerteza e aumenta conforme aumenta a viscosidade. Isto não era esperado dado que o efeito da viscosidade deveria amortecer as oscilações de pressão e velocidade, e assim reduzir o desvio padrão de cada ponto. Uma possível explicação para esse resultado é que a viscosidade atua como um filtro passa-baixa amortecendo apenas as oscilações de alta frequência próprias do escoamento turbulento, aproximando-o do regime laminar, porém não consegue amortecer as oscilações de baixa frequência, as quais são geradas pela dinâmica e rotação da bomba e cuja maior amplitude se traduz em uma maior incerteza na medição tanto da pressão quanto da vazão.

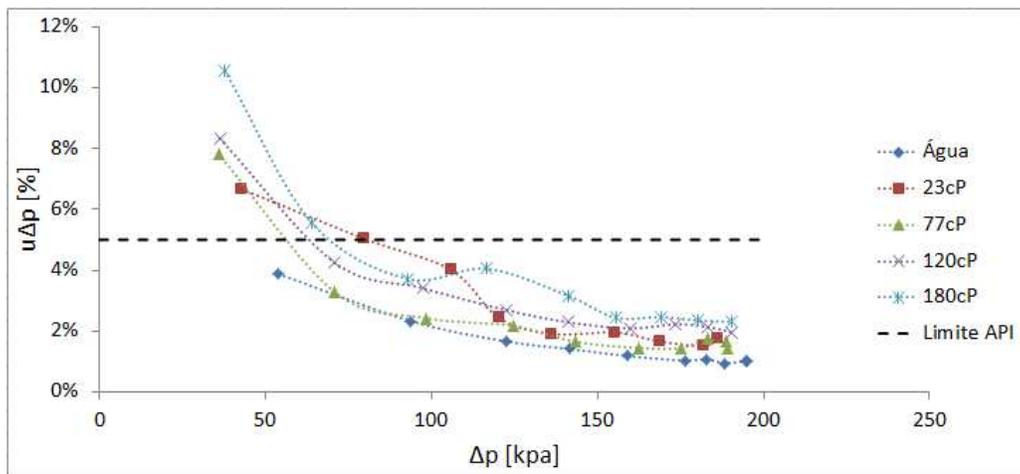


Figura 5-27. Desvio padrão do Δp em função da vazão de líquido para bombeio viscoso a 3500 RPM.

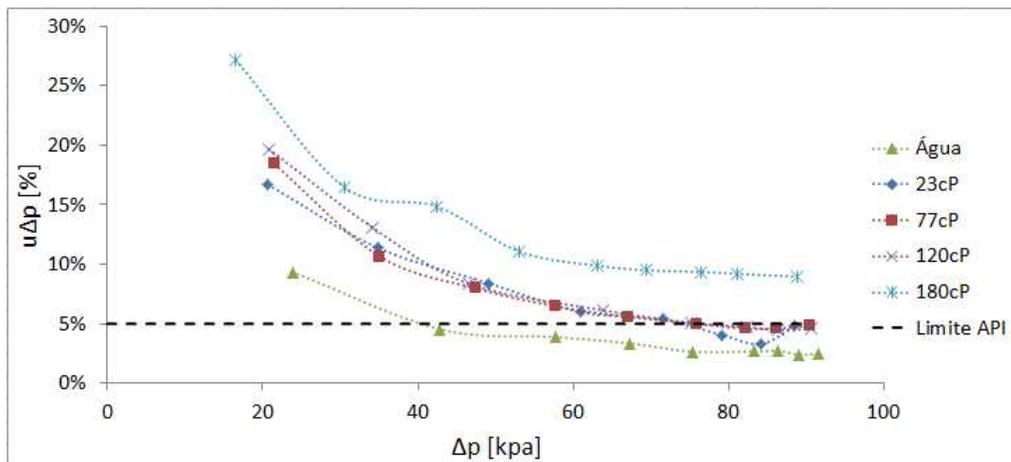


Figura 5-28. Desvio padrão do Δp em função da vazão de líquido para bombeio viscoso a 2400 RPM.

Na Figura 5-29 se apresentam os PME das curvas levantadas com óleo mostrando a relação da incerteza no cálculo da vazão de líquido u_{q_L} em função do q_L calculado nas duas rotações. A linha tracejada preta indica o limite de aceitação API e os pontos estrelas indicam os PME dos ensaios com água para ambas as rotações.

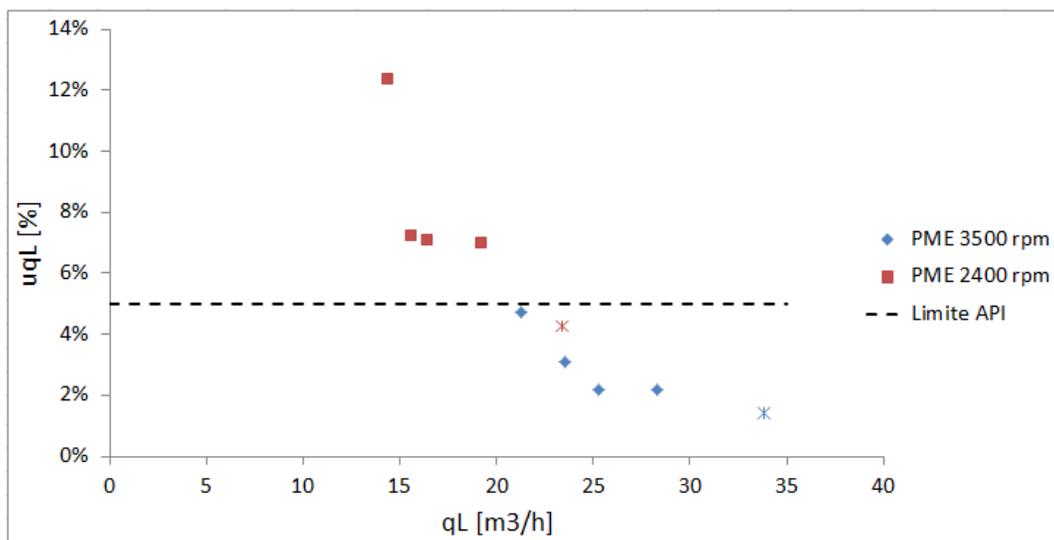


Figura 5-29. Incerteza propagada do q_L em função de q_L calculado nos PME da P47.

Na Tabela 5-6 estão apresentados os resultados numéricos para os PME de cada curva levantada. Em vermelho estão marcados os valores que ultrapassaram o limite estabelecido pela norma API tanto para o Δp quanto para a vazão de líquido q_L . Na tabela observa-se que os PME de todas as curvas a 3500 RPM os resultados atendem a norma satisfatoriamente. Contrariamente, para 2400 RPM não tem pontos dentro do limite excetuando o teste com água. Da mesma como foi evidenciado na seção do bombeio de água – ar, a rotação afeta em grande medida na precisão da medida da vazão de líquido.

Tabela 5-6. Incertezas de $q_L(\Delta p)$ da P47 operando com óleo mineral no PME.

ω [RPM]	μ [cP]	$q_L(\Delta p)$ [m ³ /h]	$u_{q_L(\Delta p)}$ [%]	Δp [kpa]	$u_{\Delta p}$ [%]	η [%]
2400	1	23.20	4.28%	65.56	3.44%	49.08%
	23	18.97	6.98%	61.70	6.25%	29.41%
	77	16.44	7.07%	61.30	5.86%	22.54%
	120	15.53	7.22%	58.74	6.48%	21.52%
	180	14.31	12.34%	56.14	10.74%	22.90%
3500	1	33.64	1.79%	139.92	1.38%	55.57%
	23	28.07	2.21%	136.61	2.11%	47.28%
	77	24.95	2.18%	134.81	1.92%	38.60%
	120	23.52	3.11%	131.66	2.45%	34.06%
	180	21.08	4.71%	133.46	3.41%	29.11%

Na Figura 5-30 se observa uma aproximação do comportamento da incerteza do q_L com a variação da viscosidade. Além da influencia evidente da rotação nos resultados, note-se o aumento dos valores da incerteza quando a viscosidade aumenta. Observa-se que para valores próximos de 200 cP a tendência mostra que é a viscosidade máxima de operação da BCS como medidor a 3500 RPM para o caso específico da P47.

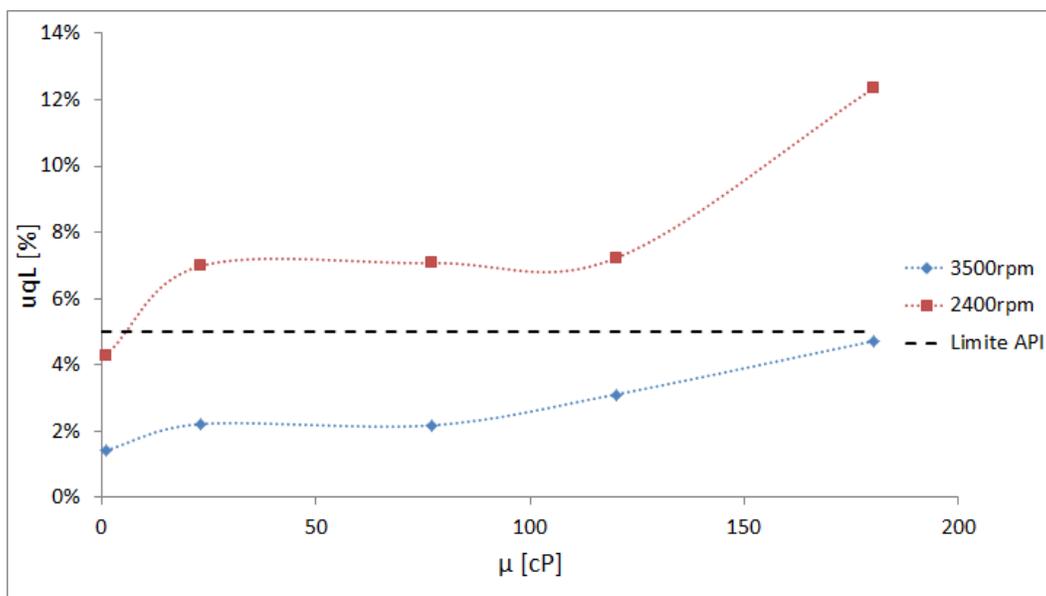


Figura 5-30. Relação da incerteza do q_L com as viscosidades testadas na P47.

5.3.3 $q_L = f(P_e)$ e $q_L = f(P_m)$ da P47 operando com água.

Na Figura 5-31 é mostrado o conjunto de curvas de desempenho do motor utilizado na bancada de BCS fornecido pelo fabricante. Mesmo que estas curvas correspondem ao modelo do motor utilizado no experimento elas ainda são ideais e não representam o desempenho real do motor específico. No entanto, dele pode-se ter uma noção da região na qual o motor está operando e assim conseguir explicar alguns comportamentos vistos nos resultados.

As curvas estão em função da relação entre a carga consumida pela nominal do motor específico abrangendo desde o motor desligado (0%) até uma carga superior à nominal (130%). Há quatro curvas desenhadas no gráfico sendo a vermelha (A) o desempenho ou eficiência do motor, a verde (B) o fator de potência que é a razão entre a potência real utilizada pelo motor e a total fornecida pela fonte elétrica, a azul (C) é o escorregamento

que é a diferença entre a velocidade campo girante e velocidade de rotação do rotor e o roxo (D) é o consumo de corrente quando operando com fonte de 220 V (não aplica neste caso).

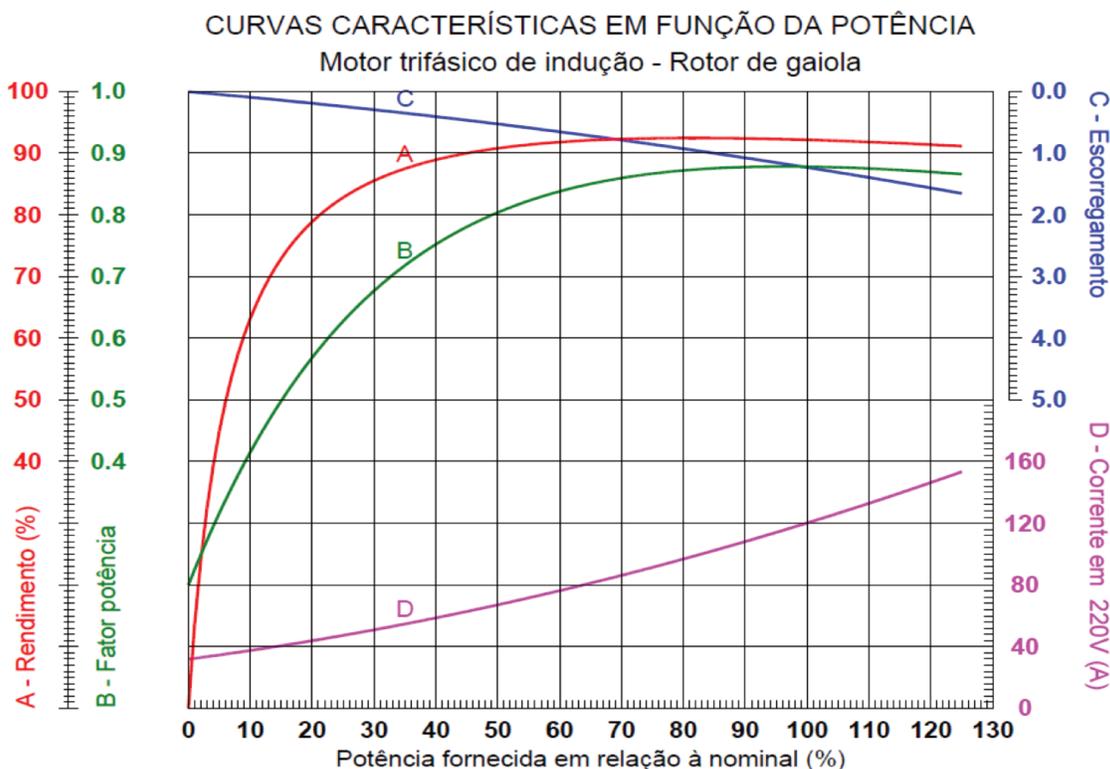


Figura 5-31. Curvas características do modelo do motor elétrico WEG utilizado nos experimentos com a P47.

Durante a realização dos experimentos a relação de cargas máxima atingida foi aproximadamente de 37% que foi no caso do teste a 3500 RPM com óleo mineral com viscosidade máxima atingida de 180 cP.

Nas Figuras 5-32 e 5-33 se apresentam as curvas da potência elétrica P_e e mecânica P_m , respectivamente, para os testes unicamente com água. Mesmo que a diferença entre os tipos de gráficos se observe em um *off-set* nos valores da potência, a forma é aproximadamente igual, a qual é o fator principal que afeta a sensibilidade da variável q_L em relação ao desvio padrão registrado das potências.

Esta avaliação preliminar é feita porque a operação com escoamento monofásico de água corresponde à condição ideal e de referência para operação das bombas centrífugas em geral, e da BCS em especial. Portanto, a análise desses resultados pode sugerir a

viabilidade do método, pois já ficou demonstrado pelos resultados, anteriormente apresentados, que a variação do tipo de fluido, sendo uma mistura de duas fases ou fluido viscoso, influencia negativamente a precisão dos dados determinados do q_L a partir das curvas de desempenho.

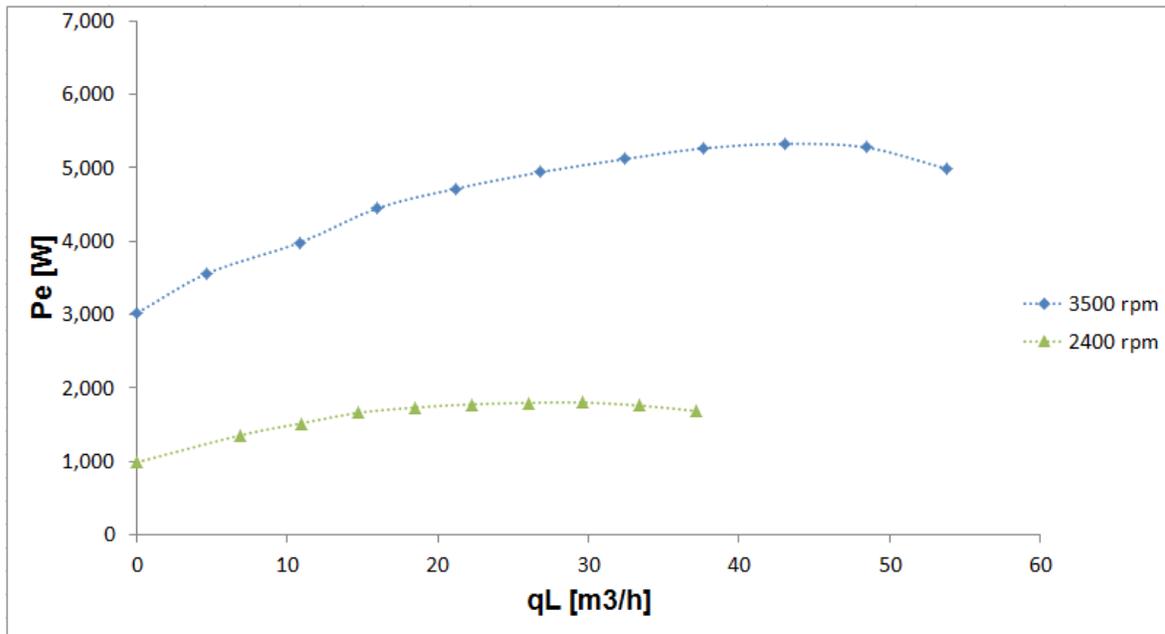


Figura 5-32. Potência elétrica por estágio da P47 a várias rotações com água.

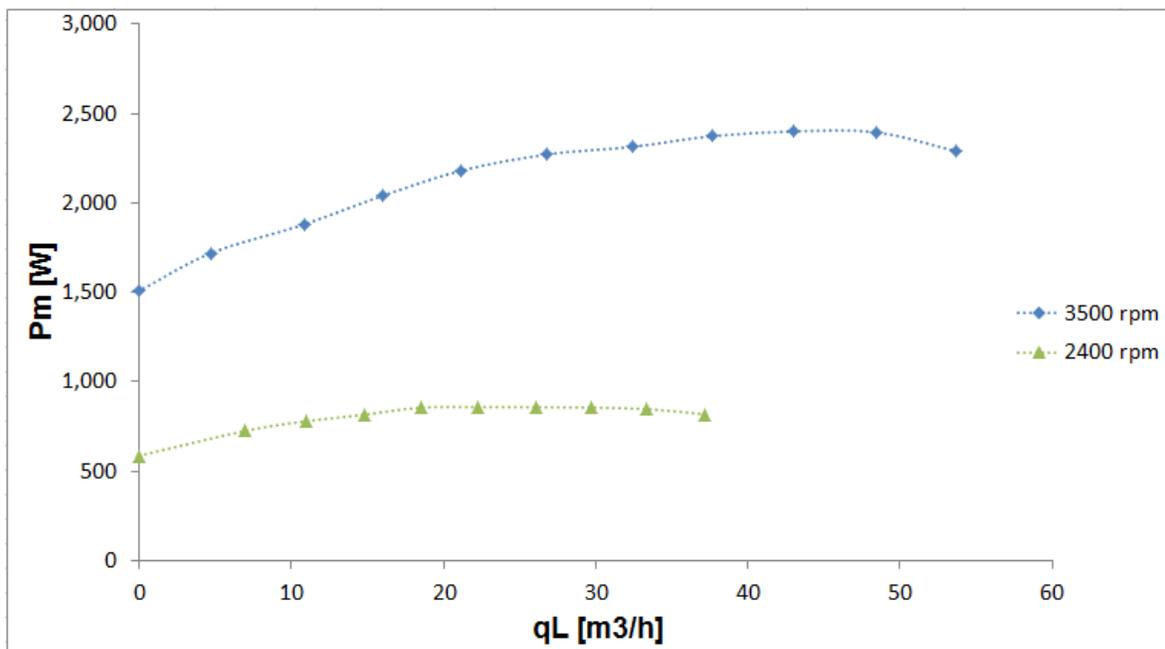


Figura 5-33. Potência do eixo por estágio da P47 a várias rotações com água.

Nas Figuras 5-34 e 5-35 são apresentadas as incertezas da potência mecânica e elétrica fornecida e consumida pelo motor, respectivamente, ao longo do teste com água. O limite de aceitação estabelecida pela API para a potência é 8% e, com base no observado, a incerteza da P_m é menor que a P_e atendendo a norma nas duas rotações. Por outro lado, a incerteza da P_e unicamente atendeu a norma a 3500 RPM na maioria dos pontos da curva. Contrariamente, a 2400 RPM todos os pontos da curva não tiveram incertezas menores que 15%.

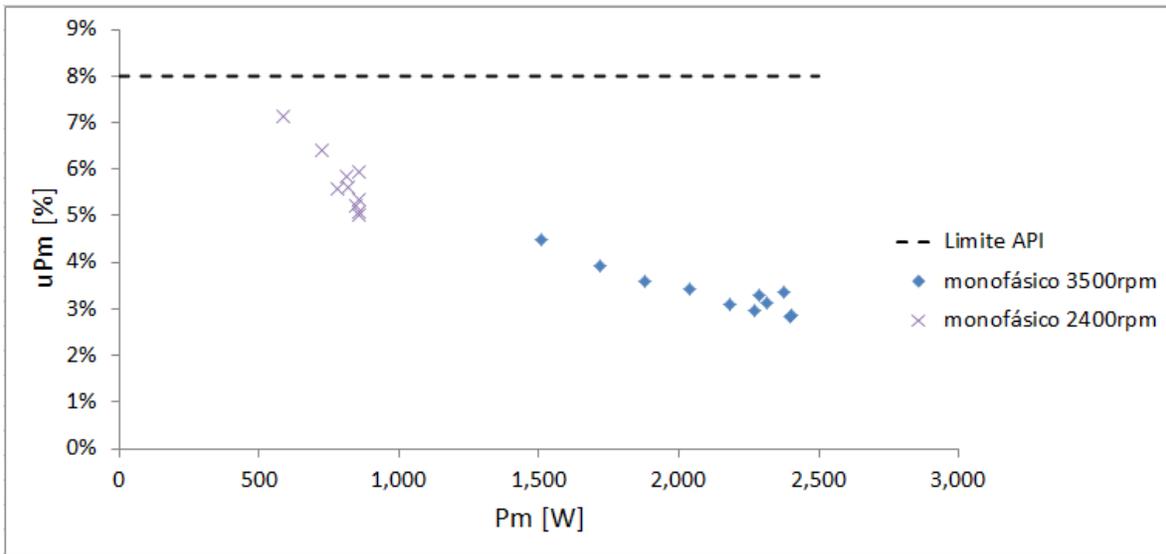


Figura 5-34. Incerteza da P_m entregue à P47 operando com água.

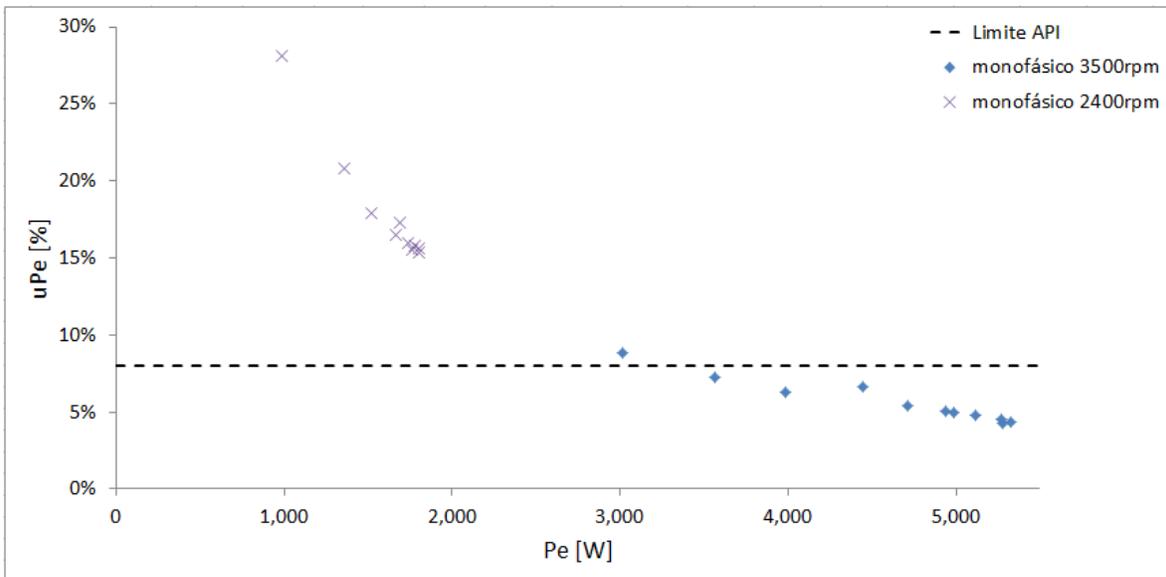


Figura 5-35. Incerteza da P_e consumida pelo motor operando a P47 com água.

Devido à alta sensibilidade das regressões determinadas para as curvas das potências quando invertidas, nas Figuras 5-37 e 5-38 se observa redução da precisão dos valores da q_L calculada evidenciados no grande aumento da incerteza resultante. Para ambos os casos, P_m e P_e , o método não atendeu à norma sendo o segundo o que apresentou a maior diferença. Isto, logicamente era esperado, pois os desvios padrão da P_e foram significativamente maiores. O método com P_e mostrou incertezas em torno de 30% para 3500 RPM e 130% para 2400 RPM. Também, o método P_m mostrou incertezas em torno de 15 – 40 % para 3500 RPM e 60 – 85% para 2400 RPM.

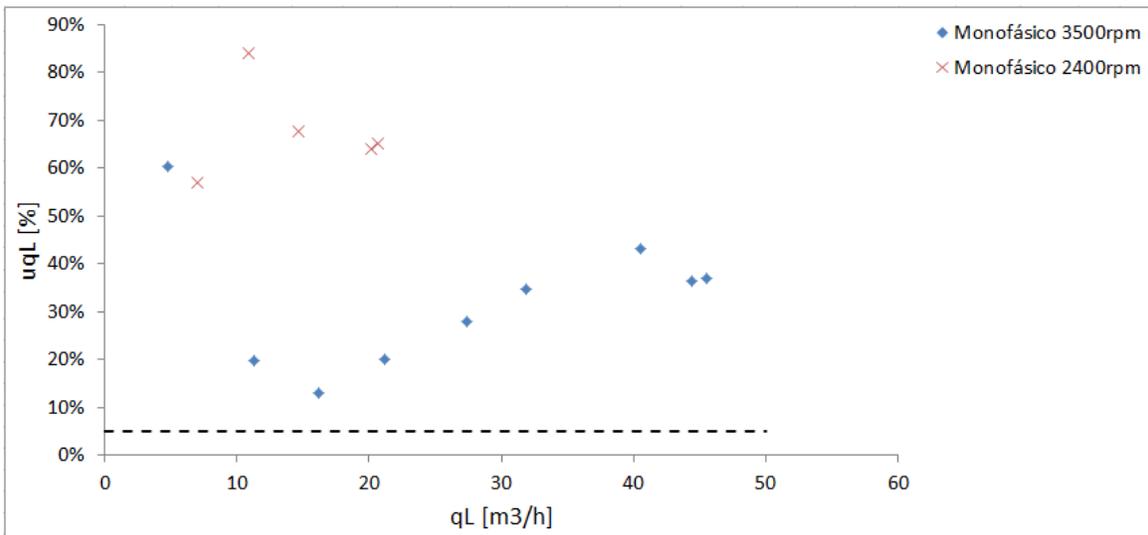


Figura 5-36. Incerteza u_{q_L} em função do q_L calculado a partir do P_m com água.

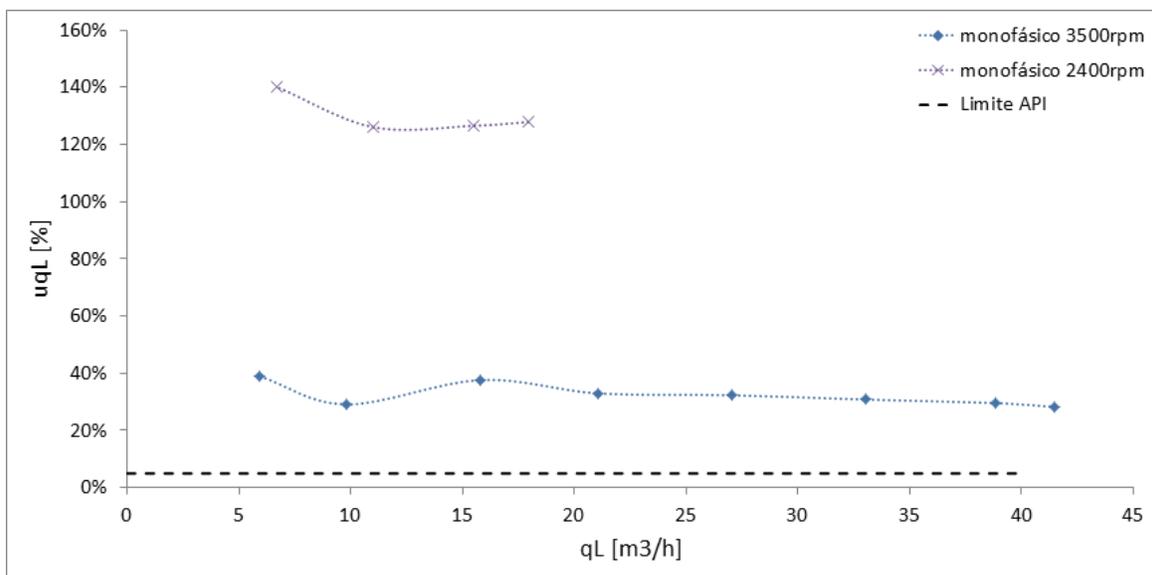


Figura 5-37. Incerteza u_{q_L} em função do q_L calculado a partir do P_e com água.

Nas Tabelas 5-7 e 5-8 se apresentam os resultados numéricos das incertezas da u_{q_L} calculada a partir da P_m e P_e , respectivamente, nos PME.

Tabela 5-7. Incertezas de $q_L(P_m)$ da P47 operando com água no PME.

ω [rpm]	Ponto	$q_L(P_m)$ [m^3/h]	$\delta q_L(P_m)$ [m^3/h]	$u_{q_L(P_m)}$ [%]	P_m [W]	u_{P_m} [%]	δP_m [W]
3500	PME	37.31	13.78	36.95	2354	3.05	239
	PME+20%	43.50	16.91	38.86	2390	3.02	229
	PME-20%	27.25	8.20	30.11	2270	3.14	256
2400	PME	21.79	9.41	43.16	864	5.27	280
	PME+20%	22.00	9.48	43.09	865	5.26	281
	PME-20%	18.70	8.25	38.86	845	5.41	279

Tabela 5-8. Incertezas de $q_L(P_e)$ da P47 operando com água no PME.

ω [rpm]	Ponto	$q_L(P_e)$ [m^3/h]	$\delta q_L(P_e)$ [m^3/h]	$u_{q_L(P_e)}$ [%]	P_e [W]	u_{P_e} [%]	δP_e [W]
3500	PME	36.25	10.78	29.73	5204	4.58	238
	PME+20%	39.76	11.16	28.06	5288	4.32	229
	PME-20%	28.59	9.38	32.82	4990	5.12	256
2400	PME	25.04	21.37	85.34	1799	15.57	280
	PME+20%	25.88	21.71	83.89	1812	15.49	281
	PME-20%	21.18	19.77	93.35	1736	16.05	279

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi investigada experimentalmente a possibilidade da utilização de uma bomba de BCS como medidor de vazão de líquido. A abordagem adotada foi estatística, visando a determinar a incerteza na determinação da vazão de líquido a partir de curvas de calibração previamente levantadas para o ganho de pressão e a potência (elétrica e mecânica). Para tal fim, foram realizados testes com água, óleo mineral e misturas água – ar com diferentes composições e condições, a duas rotações distintas.

Os resultados experimentais permitiram descrever as curvas de calibração do BCS – medidor a diferentes condições, por meio de regressões polinomiais de terceira, quarta e quinta ordem. Para cada condição de operação testada foi obtida uma correlação diferente, portanto, uma propagação diferente da incerteza no ganho de pressão ou potência elétrica sobre a vazão de líquido. Nos casos de escoamento bifásico a região da curva conhecida como *surging* foi identificada por observação e descartada para determinar as regressões.

Com base nisso, concluiu-se que o método de correlação da vazão de líquido com o ganho de pressão se mostrou, em geral, muito mais preciso do que o método baseado na potência. Isto é, para o equipamento disponível, o inversor de frequência gerou uma incerteza significativamente grande na medição da potência elétrica. Dado que o motor elétrico opera com uma carga muito baixa em relação à sua capacidade, a potência elétrica consumida pelo motor atingiu um máximo de 37% da potência nominal. Isto faz com que os dados correlacionados não apresentem um comportamento regular, somado ao fato de o coeficiente de correlação da curva ser mais baixo, e dessa forma gerando uma incerteza maior na vazão de líquido. Por outro lado, a condição atual do motor pode ter gerado variações no medidor de torque que se refletiram num desvio padrão na potência mecânica suficientemente grande, contribuindo para propagar uma incerteza acima do limite de aceitação.

A partir do método baseado na correlação $q_L(\Delta p)$ para a faixa de operação de melhor eficiência (PME), pode-se concluir o seguinte:

- Os desvios-padrão do ganho de pressão da bomba, vistos como variações aleatórias naturais durante os testes realizados sob condições estáveis, foram aproximadamente constantes, em aproximadamente 2 kPa, quando a bomba opera com fluido monofásico, independentemente da rotação e da vazão de líquido;
- O aumento da fração de vazio incrementa as oscilações de pressão nos extremos da bomba e, portanto os desvios padrão nessas condições tornam-se maiores. Adicionalmente, a P47 a 3500 RPM dá uma boa precisão no cálculo da q_L para frações de vazio próximas de 8% ou inferiores. Contrariamente, a 2400 RPM, a precisão no cálculo da q_L pode ser viável apenas para os cortes de água superiores.
- Quando operando com fluido viscoso a tendência do desvio padrão do Δp é aumentar com a viscosidade, para as quatro viscosidades testadas. É sugerido que a viscosidade alta pode atenuar apenas as oscilações de alta frequência das pressões e baixas amplitudes, próprias do escoamento turbulento. No entanto, as oscilações de baixa frequência, geradas pela rotação do eixo, não são amortecidas.
- Também, a 3500 RPM, a operação da P47 de três estágios mostrou uma precisão satisfatória na determinação da vazão de líquido bombeando água ou óleo mineral até valores próximos de 200 cP de viscosidade. Para viscosidades maiores, o método não é mais aceitável.
- A operação da BCS como medidor de vazão com óleo nas quatro viscosidades testadas não se mostrou satisfatória para rotação de 2400 RPM, pois as incertezas da vazão de líquido calculada não foram menores que 7%. Contrariamente, para 3500 RPM todos os pontos medidos obtiveram incertezas menores que 5% atendendo assim a norma API.
- Para ambas as rotações testadas, conforme a pressão na sucção da bomba é aumentada, observa-se uma redução no desvio padrão do ganho de pressão, sobretudo para pressões acima de 5 bar (man), o que se traduz em uma redução da incerteza na vazão de líquido;

- No que diz respeito à incerteza relativa na vazão de líquido, pode-se concluir que:
 - Em escoamento monofásico de água, a incerteza relativa da vazão de líquido diminui com o aumento da vazão e da rotação, ficando dentro do limite de 5% recomendado pela norma API para rotações acima de 2400 RPM na região em torno do PME;
 - Em escoamento bifásico água – ar, a incerteza relativa na vazão de líquido ficou dentro do limite de 5% para pressões de sucção acima de 5 bar para rotações altas e vazões de ar testadas.
 - Em escoamento monofásico de óleo viscoso, a incerteza relativa na vazão de líquido ficou dentro do limite de 5% para os pontos de melhor eficiência das condições testadas a 3500 RPM. O comportamento desta incerteza é aumentar conforme aumenta a viscosidade nas condições testadas.

Em síntese, com base nos testes até aqui realizados com água, a utilização de BCS como medidor de vazão de líquido é viável para vazões em torno do PME, pressões de sucção acima de 5 bar (man) e rotações altas, próximas à nominal. No caso dos testes realizados com fluido viscoso, o método de medição de vazão mostrou-se favorável para rotações altas em todas as viscosidades testadas.

Finalmente, a partir do método baseado na curva $q_L(P_m)$ (potência mecânica ou de eixo) para a faixa de operação de melhor eficiência (PME), pode-se concluir o seguinte:

- Segundo os resultados, observou-se que o desvio padrão da potência mecânica, que é afetada diretamente pelas medidas do torque e da rotação, é menor que o desvio padrão da potência elétrica que é unicamente afetada pela medida dada pelo inversor e atende à norma API de aceitação. No entanto, essa diferença pode ser explicada além do dito anteriormente, pelas condições operacionais do motor elétrico da bancada. Isto é, para experimentos com BCS além de um dimensionamento dos equipamentos mais precisos, é necessário que as peças internas e a manutenção deles estejam em bom estado.

- Apesar de obter desvios padrões menores nas medidas da potência do eixo, as incertezas propagadas na vazão de líquido calculada, mesmo sendo elas menores que as obtidas da potência elétrica, superam o limite API e não atende como método de medição de vazão.

No entanto, as incertezas propagadas na vazão de líquido calculada mostram que ainda o método de medição da vazão através da potência não é adequado, pois para todo ponto experimental obtido nas rotações 3500 e 2400 RPM bombeando fluido monofásico (água) a incerteza ficou acima do limite API de 5%.

Deste trabalho pode-se concluir que para a utilização do BCS como instrumento de medição de vazão de líquido é estritamente necessário o levantamento prévio das curvas de desempenho nas condições de operação esperadas no poço em que vai ser instalado. O conjunto de curvas obtido sempre vai ser exclusivo e específico para cada bomba. Características como o tipo de fluido, fração de gás na entrada do BCS e geometria do rotor devem ser conhecidas e testadas na bancada experimental, pois não existe um modelo geral ou definitivo que permita prever o comportamento do equipamento em função das variáveis de desempenho envolvidas neste estudo.

Com base nas conclusões anteriores são sugeridas algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Adaptar na montagem experimental existente a armazenagem de fluido, buscando aumentar o tempo de residência no tanque, com o objetivo de induzir uma adequada separação de fases quando a BCS operar com escoamento bifásico com óleo viscoso.
- Automatizar o controle do trocador de calor para facilitar a realização de experimentos que requeiram controle de temperatura dos fluidos. Além disso, poderia ser montado um instrumento de medida robusto da viscosidade *in situ* do líquido, que forneça dados mais confiáveis sobre esta variável.
- Realizar ensaios com outros tipos de BCS a fim de avaliar a influência dos diversos tipos de rotores e/ou do número de estágios na medição dos desvios padrão de ganho de pressão e vazão.

- Incrementar o número de experimentos para cobrir mais condições operacionais, em termos de rotações, frações de vazios e fluidos, abrangendo uma maior faixa de viscosidades, além de também de realizar ensaios de óleo e água a diversos cortes de água.
- Desenvolver um algoritmo de interpolação de pontos para realizar estimativas de condições não testadas a partir de resultados disponíveis, por exemplo, viscosidades, frações de vazio ou vazões de ar não ensaiadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOLIN, W. D. Using The Calibrated-Tested Pumping Instrument (Esp) For Continuous Fluid Measurement When Producing Heavy Oil Wells. Texas: SPE paper, 2007. 8 p.

PESSOA, Rui; PRADO, Mauricio. Experimental Investigation Of Two-Phase Flow Performance Of Electrical Submersible. In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE, 2001, **Paper**. New Orleans, Louisiana: Spe, 2001. p. 15 - 16.

BEARDEN, John. Electrical Submersible Pumps. In: CLEGG, Joe Dunn. Production Operations Engineering. Austin, Texas: Spe, 2007. p. 625-711.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PITCHARD, Philip J.. Introduction To The Fluid Mechanics. 6. ed. Perdue: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 787 p.

TAKACS, Gabor. Electrical Submersible Pump Manuals: Design, Operations and Maintenance. Burlington: Gulf Equipment Guides, 2009. 420 p.

CABRAL, Paulo. Erros E Incertezas Nas Medições. Porto: Instituto Eletrotécnico

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (Org.). Recommend Practice For Electric Submersible Pump Testing: API RP11S2. Washington D.C., 2008. 13 p.

J. Kenneth. Bombas: Selección, Uso Y Mantenimiento. Mexico: Mcgraw-hill, 1998. 379 p.

NICHOLAS, J.V.; WHITE, D.R.. Uncertainty In Measurement. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd., 2001. 58 p.

VERDE, William Monte. Estudo Experimental De Bombas De Bcs Operando Com Escoamento Bifásico Gás-Líquido. 2011. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Petróleos, Unicamp, Campinas, 2011.

AMARAL, Gilmar Dutra Leite do. Modelagem Do Escoamento Monofásico Em Bomba Centrífuga Submersa Operando Com Fluidos Viscosos. 2007. 260 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Petróleos, Unicamp, Campinas, 2007.

OLSEN, Helge et al. Successful Production Allocation Through Esp Performance In Peregrino Field. México City: Spe, 2012. 15 p.

ORLANDO, Alcir De Faro. Análise De Incerteza Na Medição De Vazão De Escoamentos Bifásicos Líquido-Gás. Rio de Janeiro: PUC, 2012. 63 p.

ESTEVAM, V. Uma Análise Fenomenológica Da Operação De Bomba Centrífuga Com Escoamento Bifásico. Teses de doutorado. Universidade Estadual de Campinas (2002).

GAMBOA, J. Prediction Of The Transition In Two – Phase Performance Of An Electrical Submersible Pump. PhD Dissertation (2009), Petroleum Engineering Department. The University of Tulsa.

DURAN, J. Pressure Effects On Esp Stages Air – Water Performance. MS. Thesis, the University of Tulsa (2003).

TREVISAN, F.E. Experimental Investigation On The Viscous Effect On Two – Phase Flow Patterns And Hydraulic Performance Of Electrical Submersible Pump. Paper from Canadian Society for Unconventional Gas, SPE (2010). The University of Tulsa.

BARATTO, A.C. Avaliação De Dados Experimentais – Guia Para Expressão Da Incerteza De Medição. Documento Técnico (2008). GUM, Inmetro.

BROWN, K. E. Technology Of Artificial Lift Methods. PennWell Books Volume 4. Tulsa, Oklahoma (1977).

HELFRICK, A.D, COOPER, W.D. Instrumentação Eletrônica Moderna e Técnicas de Medição. Prentice – Hall, Inc. A division of Simon & Schuster. New Jersey (1990).

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS.

Neste apêndice são apresentadas as curvas de calibração de alguns dos instrumentos utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. A seguir, se observa as curvas dos termopares e dos transdutores de pressão.

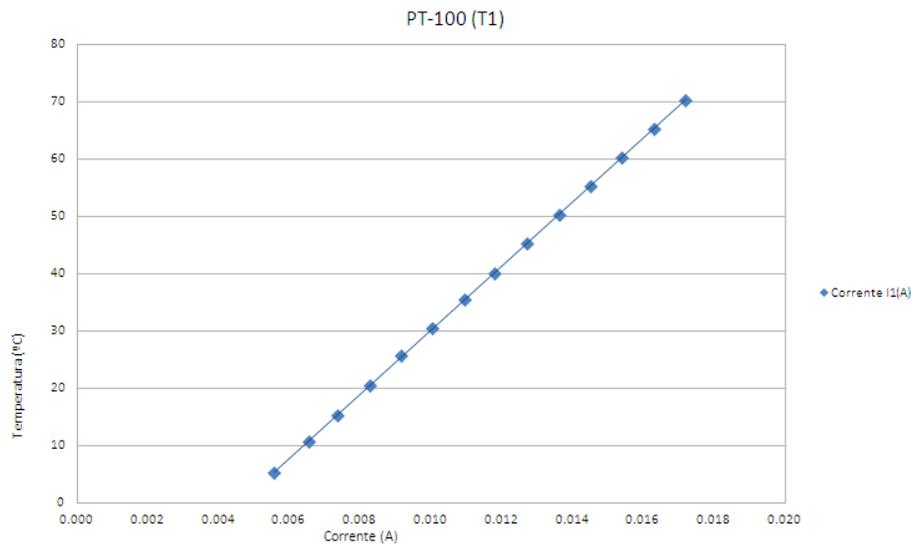


Figura A-1. Curva de calibração do PT-100 na sucção da BCS.

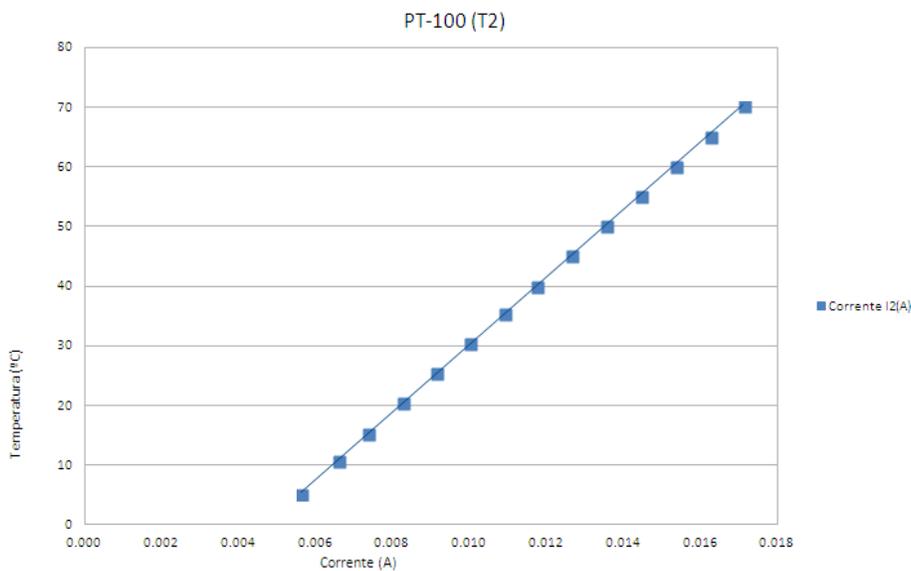


Figura A-2. Curva de calibração do PT-100 na descarga da BCS.

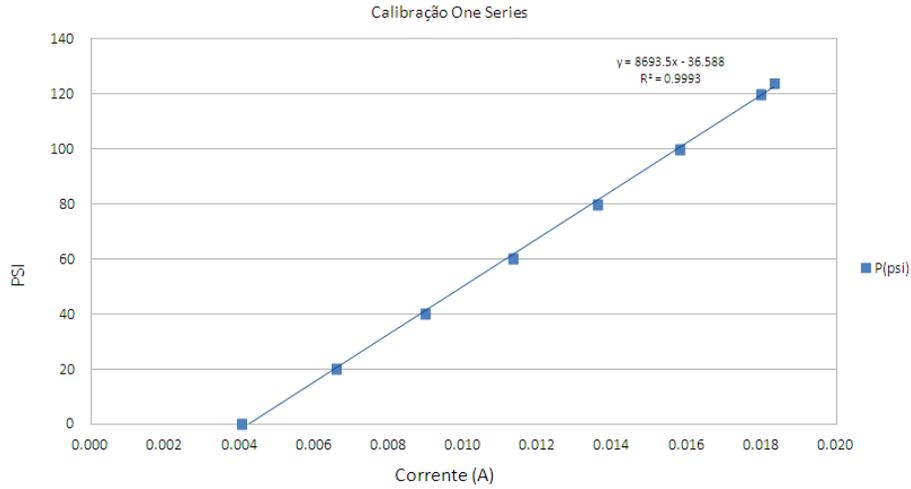


Figura A-3. Curva de calibração do transdutor de pressão de 125 psi utilizado na sucção da BCS.

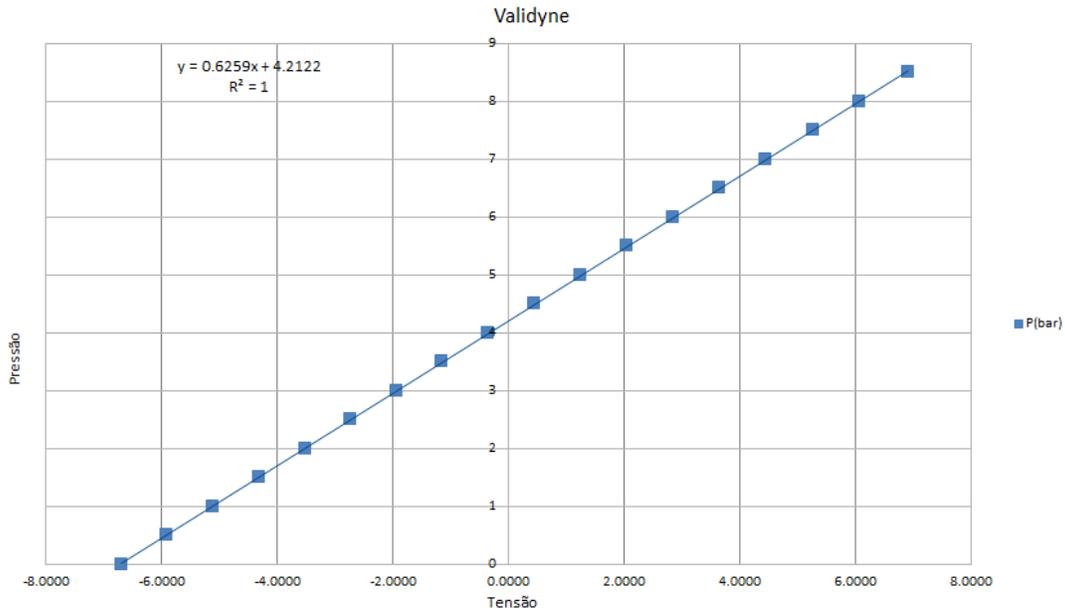


Figura A-4. Curva de calibração do transdutor de pressão *Validyne* utilizado na descarga da BCS.

APÊNDICE B – PRÁTICAS RECOMENDADAS PARA TESTES DE BCS – API RP11S2

A incerteza relativa da capacidade de elevação da BCS é afetada pelas incertezas das medições da pressão da sucção e da pressão da descarga pela equação (1), considerando massa específica constante do fluido constante. Portanto, usando unidades de pressão Pa e m para H , se tem:

$$u_{p_d} = \pm 1.0\% \quad u_{p_s} = \pm 0.25\%$$

$$\Delta p = p_d - p_s \rightarrow \frac{\partial \Delta p}{\partial p_d} = 1 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \Delta p}{\partial p_s} = -1$$

$$u_{\Delta p, p_d} = \frac{p_d}{\Delta p} \frac{\partial \Delta p}{\partial p_d} u_{p_d} = \frac{p_d}{\Delta p} u_{p_d} \quad \rightarrow \quad u_{\Delta p, p_s} = \frac{p_s}{\Delta p} \frac{\partial \Delta p}{\partial p_s} u_{p_s} = -\frac{p_s}{\Delta p} u_{p_s}$$

$$u_{\Delta p} = \left[\left(\frac{p_d}{\Delta p} u_{p_d} \right)^2 + \left(-\frac{p_s}{\Delta p} u_{p_s} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{\Delta p} = \frac{1}{483874,19} [(861844,89)^2 (0.01)^2 + (377970,69)^2 (0.0025)^2]^{1/2} = \pm 0.0179 = \pm 1.79\%$$

$$u_{\Delta p} = \pm 1,79\%$$

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial H}{\partial \Delta p} = \frac{1}{\rho g} \quad \rightarrow \quad u_{H, \Delta p} = \frac{\Delta p}{H} \frac{1}{\rho g} u_{\Delta p} = u_{\Delta p}$$

$$\mathbf{u_H = \pm 1,79\%}$$

A incerteza relativa da potência hidráulica entregue pela BCS ao fluido é afetada pelas incertezas das medições da vazão mássica de líquido e do diferencial de pressão gerado que foi determinado anteriormente; ver equação (2).

$$u_{q_L} = \pm 0.36\% \quad u_{\Delta p} = \pm 1.79\%$$

$$P_h = q_L \Delta p \quad \rightarrow \quad \frac{\partial P_h}{\partial q_L} = \Delta p \quad \rightarrow \quad \frac{\partial P_h}{\partial \Delta p} = q_L$$

$$u_{P_h, q_L} = \frac{q_L}{P_h} \frac{\partial P_h}{\partial q_L} u_{q_L} = \frac{q_L}{P_h} (\Delta p) u_{q_L} = u_{q_L} \quad \rightarrow \quad u_{P_h, \Delta p} = \frac{\Delta p}{P_h} \frac{\partial P_h}{\partial \Delta p} u_{\Delta p} = \frac{\Delta p}{P_h} q_L u_{\Delta p} = u_{\Delta p}$$

$$\mathbf{u}_{P_h} = \left[(\mathbf{u}_{q_L})^2 + (\mathbf{u}_{\Delta p})^2 \right]^{1/2} = \left[(0.0036)^2 + (0.0179)^2 \right]^{1/2} = \pm 0.0183 = \pm 1.83\%$$

A incerteza relativa da potência mecânica consumida pela BCS é afetada pelas incertezas das medições da velocidade de rotação e do torque gerado pelo eixo segundo a equação (3).

$$u_\omega = \pm 0.05\% \quad u_{T_{eixo}} = \pm 0.05\%$$

$$P_m = \omega T_{eixo} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial P_m}{\partial \omega} = T_{eixo} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial P_m}{\partial T_{eixo}} = \omega$$

$$u_{P_m, \omega} = \frac{\omega}{P_m} \frac{\partial P_m}{\partial \omega} u_\omega = \frac{\omega}{P_m} T_{eixo} u_\omega = u_\omega$$

$$u_{P_m, T_{eixo}} = \frac{T_{eixo}}{P_m} \frac{\partial P_m}{\partial T_{eixo}} u_{T_{eixo}} = \frac{T_{eixo}}{P_m} \omega u_{T_{eixo}} = u_{T_{eixo}}$$

$$\mathbf{u}_{P_m} = \pm \left[(\mathbf{u}_\omega)^2 + (\mathbf{u}_{T_{eixo}})^2 \right]^{1/2} = \pm 0.000707 = \pm 0.07\%$$

A incerteza relativa da eficiência da BCS é afetada pelas incertezas da potência mecânica e hidráulica segundo a equação (4).

$$u_{P_h} = \pm 1.83\% \quad u_{P_m} = \pm 0,0707\%$$

$$\eta = \frac{P_h}{P_m} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \eta}{\partial P_h} = \frac{1}{P_m} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \eta}{\partial P_m} = \frac{-P_h}{P_m^2}$$

$$u_{\eta, P_h} = \frac{P_h}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial P_h} u_{P_h} = \frac{P_h}{\eta} \frac{1}{P_m} u_{P_h} = u_{P_h} \quad u_{\eta, P_m} = \frac{P_m}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial P_m} u_{P_m} = \frac{P_m}{\eta} \left(\frac{-P_h}{P_m^2} \right) u_{P_m} = -u_{P_m}$$

$$\mathbf{u}_\eta = \left[(\mathbf{u}_{P_h})^2 + (-\mathbf{u}_{P_m})^2 \right]^{1/2} = \left[(0.0183)^2 + (0.000707)^2 \right]^{1/2} = \pm 0,0183 = \pm 1.83\%$$

APÊNDICE C – REGRESSÕES POLINOMIAIS.

Tabela C-1. Regressões polinomiais dos testes água – ar da P47 a 3500 RPM.

Regressão Polinomial – 3500 RPM (Δp, água – ar)	R²	q_G
$q_L = -(1.1228 \times 10^{-5})\Delta p^3 + (1.9621 \times 10^{-3})\Delta p^2 - (1.9912 \times 10^{-1})\Delta p + 54.135$	0.993	0.0
$q_L = -(8.0595 \times 10^{-6})\Delta p^3 + (1.1277 \times 10^{-3})\Delta p^2 - (1.5625 \times 10^{-1})\Delta p + 53.879$	0.998	0.66
$q_L = -(4.7132 \times 10^{-9})\Delta p^5 + (1.8261 \times 10^{-6})\Delta p^4 - (2.5363 \times 10^{-4})\Delta p^3 + (1.4533 \times 10^{-2})\Delta p^2 - (4.0081 \times 10^{-1})\Delta p + 53.8853$	0.988	0.71
$q_L = -(1.1458 \times 10^{-5})\Delta p^3 + (1.9803 \times 10^{-3})\Delta p^2 - (2.0587 \times 10^{-1})\Delta p + 54.109$	0.996	1.01
$q_L = -(8.4 \times 10^{-6})\Delta p^3 + (1.0833 \times 10^{-3})\Delta p^2 - (1.5207 \times 10^{-1})\Delta p + 53.235$	0.999	1.11
$q_L = -(3.8 \times 10^{-7})\Delta p^4 + (6.5743 \times 10^{-5})\Delta p^3 - (3.9692 \times 10^{-3})\Delta p^2 + (9.9748 \times 10^{-4})\Delta p + 50.665$	0.989	1.29
$q_L = -(1.0513 \times 10^{-5})\Delta p^3 + (1.7245 \times 10^{-3})\Delta p^2 - (1.9057 \times 10^{-1})\Delta p + 53.598$	0.998	1.32
$q_L = -(1.0755 \times 10^{-6})\Delta p^4 + (2.3998 \times 10^{-4})\Delta p^3 - (1.7670 \times 10^{-2})\Delta p^2 + (3.2789 \times 10^{-1})\Delta p + 50.882$	0.989	1.56
$q_L = -(5.0443 \times 10^{-5})\Delta p^3 + (5.3104 \times 10^{-3})\Delta p^2 - (2.0658 \times 10^{-1})\Delta p + 47.555$	0.997	2.19
$q_L = -(7.7886 \times 10^{-5})\Delta p^3 + (5.3924 \times 10^{-3})\Delta p^2 - (1.5551 \times 10^{-1})\Delta p + 43.631$	0.993	3.08

ANEXO I – CURVAS DO FABRICANTE DA BCS P47 SÉRIE

538

A seguir, estão apresentadas as curvas da P47 serie 538 de Centrilift fornecidas pelo fabricante nas unidades americanas e no SI. Além disso, também está o conjunto de curvas em diversas rotações. Essas curvas representa a condição de operação com água fresca com um estágio só.

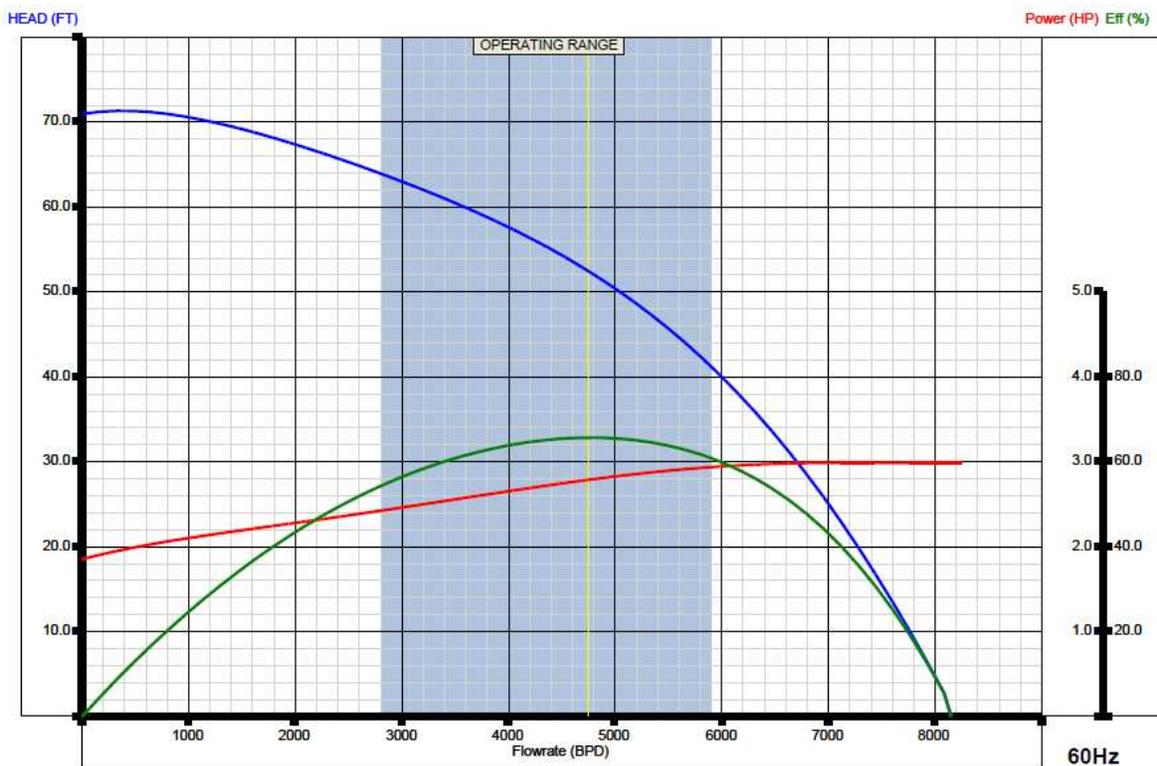


Figura A.I-1. Curvas de fábrica do desempenho da P47 com água a 3500 RPM.

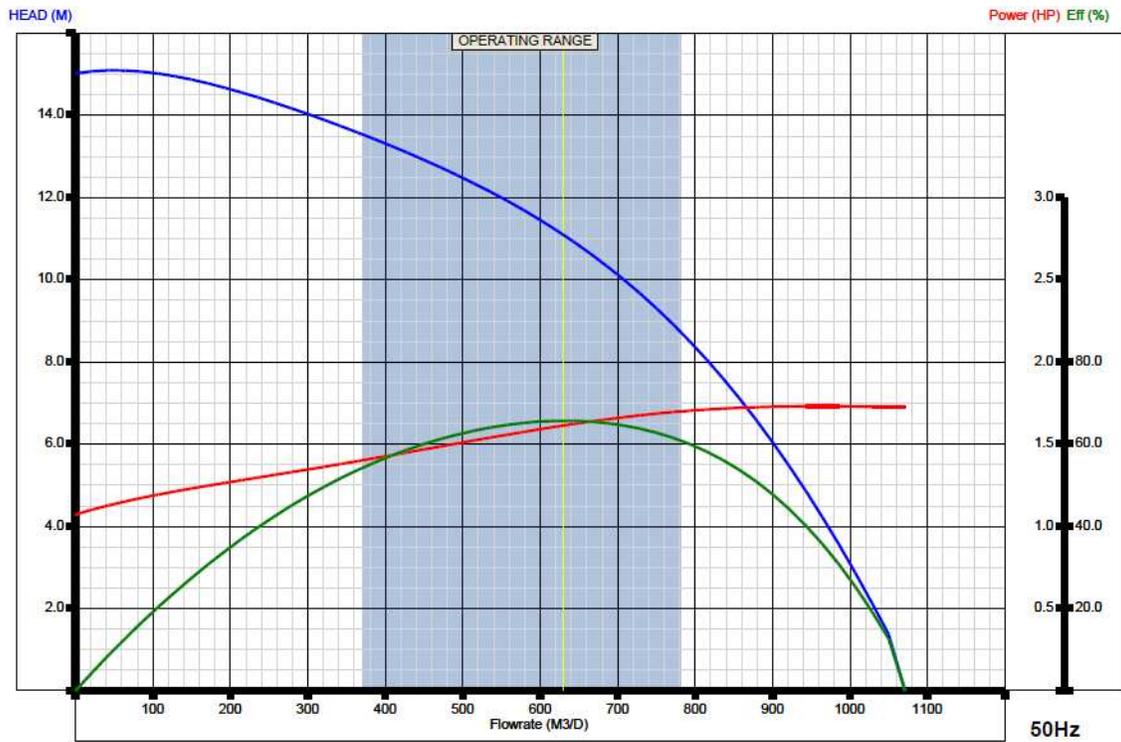


Figura A.I-2. Curvas de fábrica do desempenho da P47 com água a 2917 RPM.

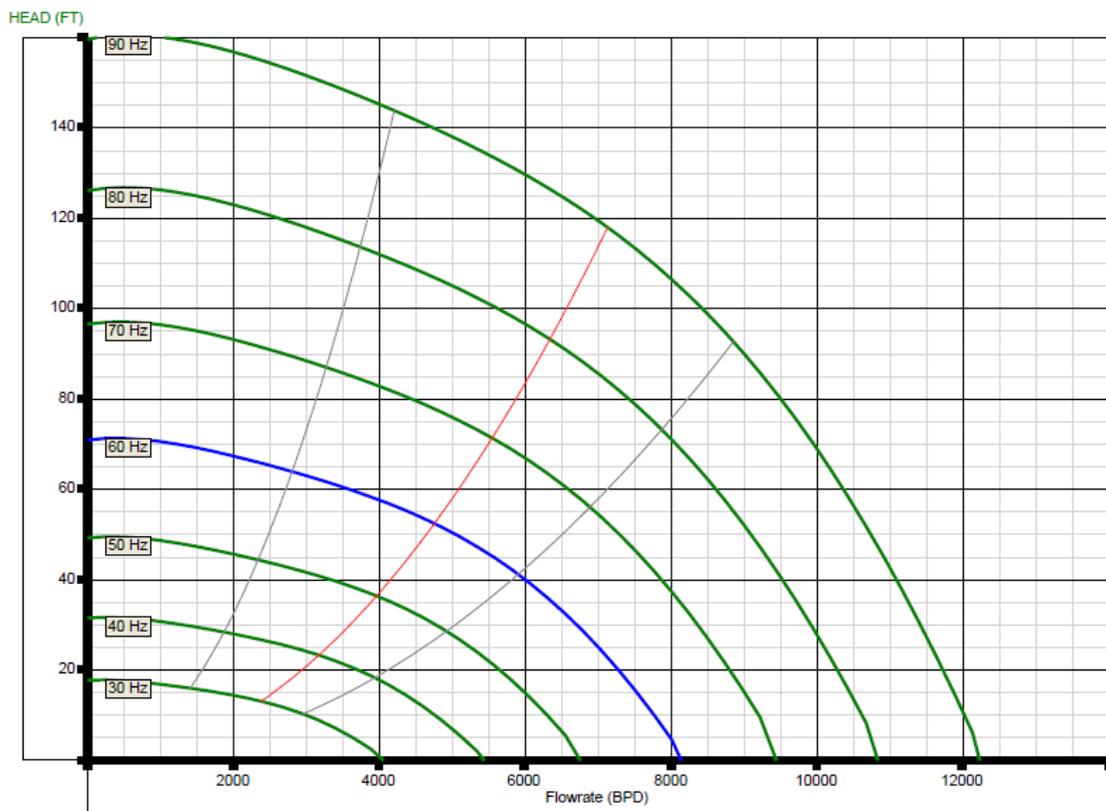


Figura A.I-3. Conjunto de curvas de elevação da P47 com água em diversas rotações.

ANEXO II – TESTES DE AFINIDADE E REPETIBILIDADE DA P47

Na Figura 5-1 apresentam-se quatro curvas de ganho de pressão para rotações entre 1800 e 3500 RPM para um estágio operando com água. Esses testes permitirem fazer o teste de afinidade entre rotações da bomba a qual é mostrada na Figura 5-2. Da mesma forma o teste de afinidade é realizado nas curvas de eficiência e potência nas Figuras 5-3 e 5-4, respectivamente.

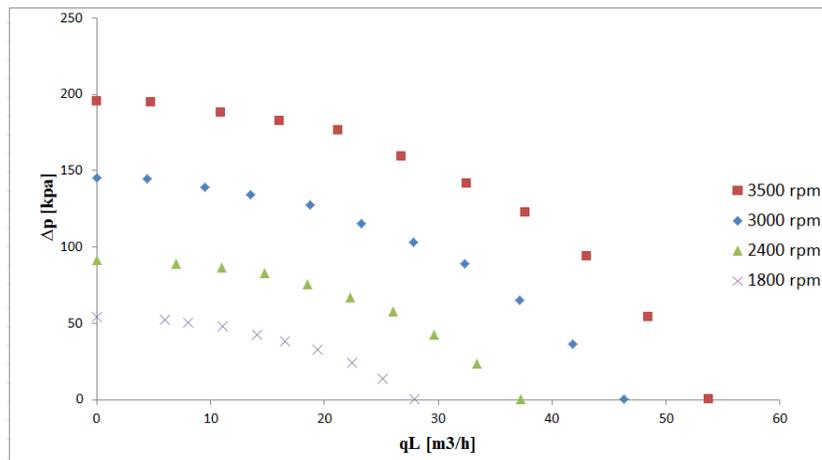


Figura A.II-1. Δp do P47 com três estágios com água.

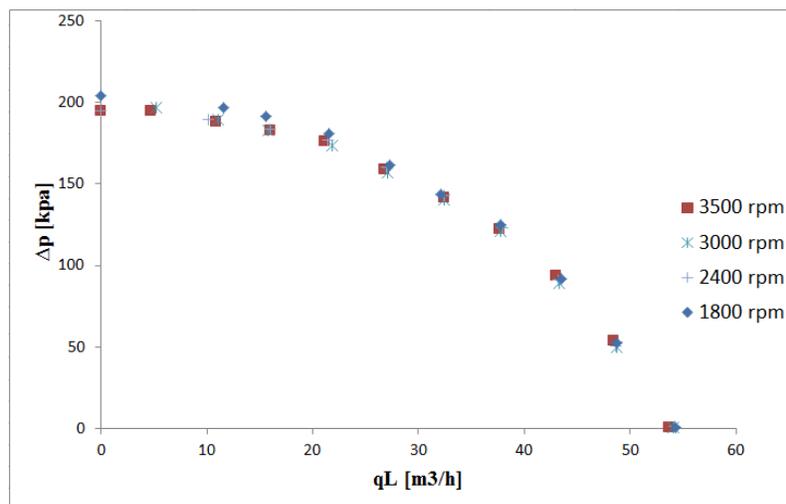


Figura A.II-2. Teste de afinidade do Δp da P47 com três estágios com água.

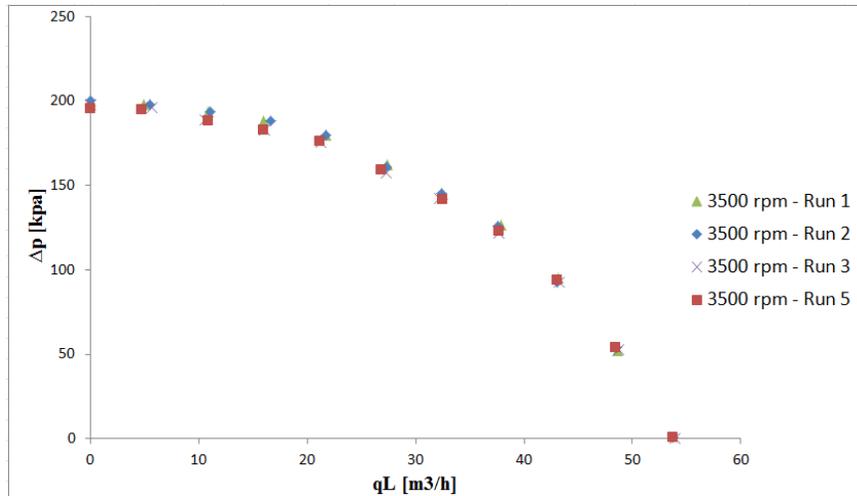


Figura A.II-3. Testes de repetibilidade do ganho de pressão da P47.

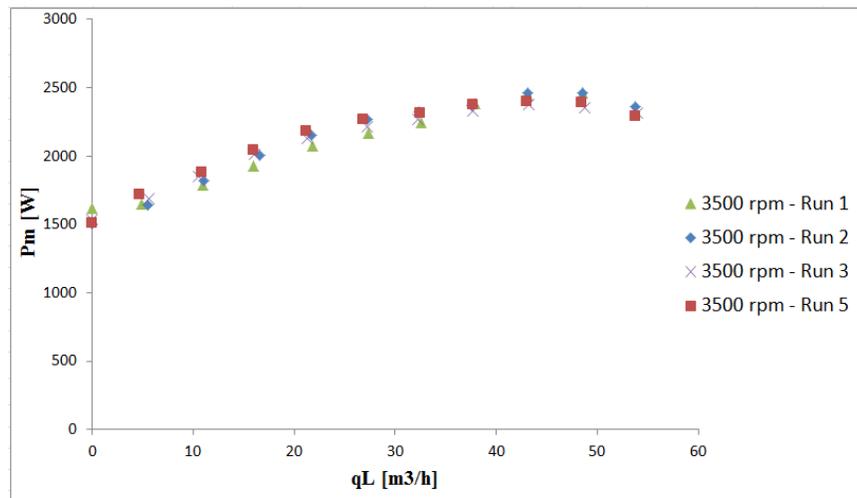


Figura A.II-4. Testes de repetibilidade da potência elétrica da P47

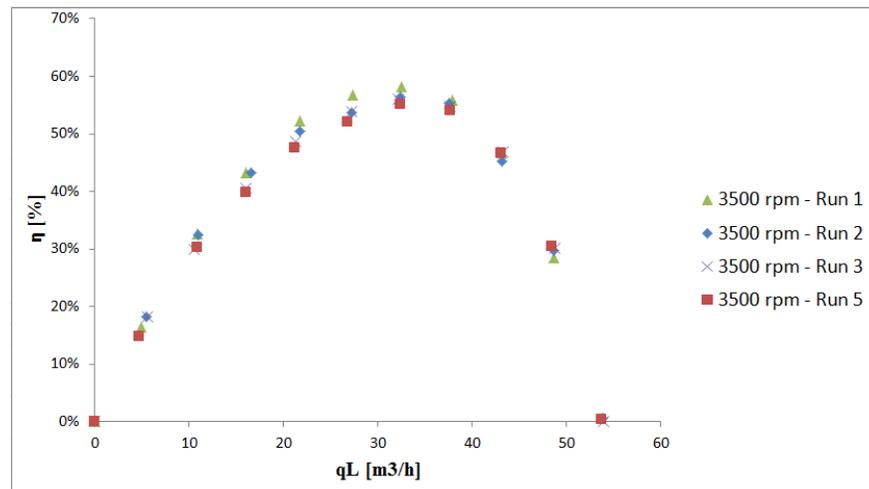


Figura A.II-5. Testes de repetibilidade da eficiência P47.

ANEXO III – DADOS REOLÓGICOS DO ÓLEO MINERAL LUBRIFICANTE

Os dados a seguis foram levantadas no laboratório de reologia do Centro de Estudos do Petróleo (CEPETRO) na Universidade Estadual de Campinas. Tanto os dados reológicos quanto os da tabela A-III.1 foram obtidos a partir de uma amostra tomada diretamente da bancada em condições estáveis de operação para garantir a homogeneidade do fluido.

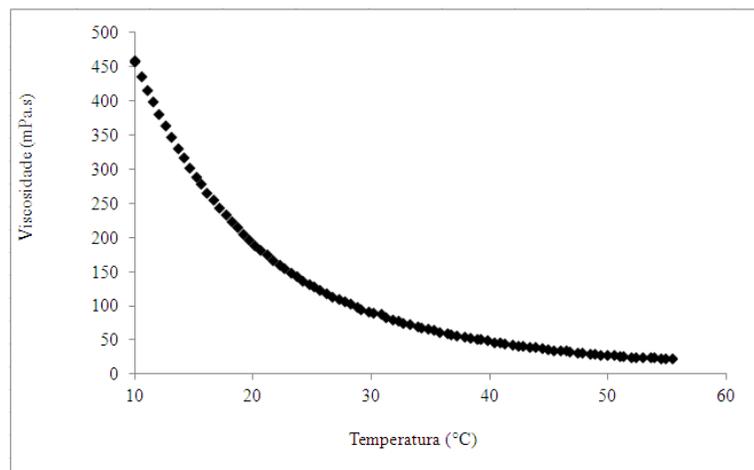


Figura A.III-5. Curva de viscosidade – tempo do óleo mineral utilizado nos testes.

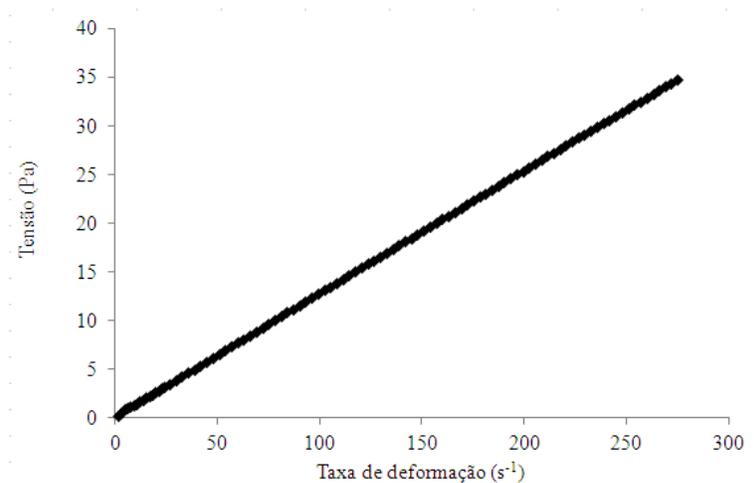


Figura A.III-2. Curva reológica do óleo mineral utilizado nos testes.

Tabela A-III.1. Dados da massa específica.

50°C			
mPa.s	30.110	30.101	30.143
mm ² /s	33.732	33.722	33.768
g/cm ³	0.8926	0.8926	0.8927
32°C			
mPa.s	84.502	83.314	83.375
mm ² /s		92.159	92.226
g/cm ³	0.9040	0.9040	0.9040
26°C			
mPa.s	126.35	127.10	126.27
mm ² /s	139.19	140.03	139.11
g/cm ³	0,9077	0.9077	0.9077
20°C			
mPa.s	199.88	200.02	200.09
mm ² /s	219.30	219.46	219.53
g/cm ³	0.9114	0.9114	0.9114

ANEXO IV – TABELAS DOS DADOS EXPERIMENTAIS

P47 – 3500 RPM – Monofásico (água)						
qL	Δp	H	Pm	Ph	Pe	η
[m³/h]	[kpa]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]
53.73	0.52	0.05	2289	8	4988	0.34%
48.44	54.07	5.53	2395	728	5278	30.38%
43.03	93.70	9.58	2400	1120	5327	46.66%
37.67	122.61	12.54	2374	1283	5267	54.04%
32.45	141.48	14.47	2314	1275	5120	55.10%
26.78	159.13	16.27	2272	1184	4940	52.11%
21.18	176.38	18.03	2181	1038	4715	47.58%
16.00	182.80	18.69	2041	812	4450	39.80%
10.87	188.47	19.27	1881	569	3984	30.26%
4.72	194.67	19.90	1720	255	3563	14.84%
0.00	195.26	19.96	1508	0	3018	0.00%

P47 – 2400 RPM – Monofásico (água)						
qL	Δp	H	Pm	Ph	Pe	η
[m³/h]	[kpa]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]
37.18	0.44	0.05	818	5	1690	0.56%
33.37	23.85	2.44	847	221	1764	26.10%
29.65	42.79	4.37	856	352	1806	41.20%
26.03	57.77	5.91	857	418	1801	48.73%
22.25	67.28	6.88	858	416	1781	48.49%
18.49	75.33	7.70	855	387	1736	45.26%
14.74	83.20	8.51	815	341	1667	41.81%
10.98	86.35	8.83	779	263	1523	33.82%
6.94	89.10	9.11	724	172	1360	23.72%
0.00	91.57	9.36	586	0	990	0.00%

P47 – 3500 RPM – bifásico (água-ar) – 1 bar (3kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
3.00	50.44	7.77	2.48%	2247	109	4996	4.84%
3.01	46.48	51.86	2.69%	2269	670	5019	29.51%
3.00	43.48	76.47	2.87%	2292	924	5026	40.29%
3.02	38.98	98.96	3.21%	2232	1071	4949	48.00%
3.02	35.91	107.95	3.47%	2181	1077	4709	49.36%
2.99	31.70	116.97	3.89%	2096	1030	4520	49.15%
3.02	27.39	118.84	4.51%	1957	904	3994	46.21%
3.03	23.58	124.97	5.23%	1876	819	3924	43.63%
2.99	20.31	131.13	5.95%	1827	740	3757	40.48%
3.03	16.36	131.30	7.37%	1732	597	3528	34.46%
3.00	12.31	105.49	9.52%	1510	361	2948	23.89%
3.03	8.64	65.50	13.14%	1292	157	2405	12.17%

P47 – 3500 RPM – bifásico (água-ar) – 1 bar (5kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
5.00	47.73	-0.96	4.34%	2204	-13	4881	-0.58%
5.02	44.61	47.01	4.66%	2246	583	5042	25.94%
5.02	40.92	71.23	5.08%	2196	810	4866	36.86%
4.99	37.58	84.66	5.49%	2112	884	4561	41.85%
5.01	33.52	94.30	6.14%	2008	878	4244	43.72%
5.02	30.75	98.76	6.63%	1924	844	4010	43.85%
5.04	26.61	103.46	7.67%	1816	765	3799	42.12%
5.01	23.64	107.95	8.47%	1745	709	3620	40.62%
5.02	19.77	100.92	10.02%	1614	554	3361	34.33%
5.04	15.12	72.35	12.72%	1424	304	2883	21.35%
5.02	12.15	59.90	15.25%	1274	202	2512	15.86%
5.01	7.75	24.83	22.38%	737	53	1157	7.26%

P47 – 3500 RPM – bifásico (água-ar) – 1 bar (7kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
6.98	43.56	0.32	6.54%	2051	4	4327	0.19%
6.96	41.93	28.38	6.79%	2084	331	4386	15.86%
6.99	38.67	52.46	7.37%	2030	563	4218	27.75%
7.01	35.37	64.29	8.02%	1937	632	4025	32.62%
7.04	31.89	72.33	8.83%	1814	641	3758	35.32%
7.04	28.47	75.50	9.82%	1729	597	3552	34.53%
7.05	24.78	74.18	11.08%	1622	511	3293	31.47%
7.04	21.02	57.14	12.85%	1426	334	2842	23.40%
7.02	18.25	48.13	14.47%	1290	244	2496	18.92%
7.03	15.15	38.66	16.96%	1122	163	2041	14.50%
7.01	11.56	12.85	21.07%	696	41	1010	5.93%

P47 – 2400 RPM – bifásico (água-ar) – 1 bar (3kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
3.00	36.05	-8.40	3.46%	758	-84	2014	-11.09%
2.98	33.20	11.99	3.73%	780	111	2084	14.19%
2.98	30.85	24.68	4.00%	784	211	2138	26.97%
2.98	28.11	35.61	4.40%	764	278	1856	36.38%
3.00	25.18	42.84	4.92%	725	300	1680	41.34%
2.99	22.38	44.09	5.45%	686	274	1526	39.93%
3.00	19.35	40.52	6.26%	626	218	1307	34.79%
3.00	17.05	40.42	7.10%	584	191	1164	32.77%
2.97	14.62	32.86	8.10%	530	133	984	25.18%
3.00	11.09	26.55	10.42%	465	82	820	17.59%
2.98	9.54	24.89	11.92%	432	66	759	15.26%
2.97	6.55	13.44	16.37%	322	24	450	7.60%

P47 – 2400 RPM – bifásico (água-ar) – 1 bar (5kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
5.02	33.44	-8.75	6.15%	719	-81	1439	-11.30%
4.99	30.87	11.20	6.57%	728	96	1482	13.19%
5.00	28.76	21.65	7.03%	718	173	1467	24.09%
4.99	25.01	28.04	8.01%	679	195	1307	28.70%
5.03	23.42	30.49	8.49%	648	198	1253	30.61%
4.99	21.06	30.93	9.33%	604	181	1174	29.92%
5.02	18.54	26.41	10.56%	545	136	951	24.95%
5.03	15.86	18.00	12.13%	467	79	726	16.99%
5.03	13.49	16.70	13.96%	433	63	667	14.46%
5.02	11.05	14.03	16.51%	392	43	517	10.98%
4.98	6.84	3.76	24.26%	236	7	139	3.02%

P47 – 2400 RPM – bifásico (água-ar) – 1 bar (7kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
7.01	25.12	-2.91	10.82%	583	-20	1015	-3.49%
7.01	23.02	4.35	11.71%	563	28	950	4.95%
7.02	20.96	5.85	12.75%	527	34	807	6.47%
7.00	19.09	4.74	13.84%	468	25	672	5.37%
7.02	17.04	4.96	15.25%	431	23	569	5.44%
6.99	14.94	6.11	16.94%	394	25	472	6.44%
7.07	13.21	5.94	18.94%	372	22	394	5.86%
7.00	10.99	4.60	21.74%	334	14	308	4.21%
7.01	9.16	2.49	25.05%	292	6	191	2.17%
7.03	7.21	1.01	29.91%	242	2	70	0.84%

P47 – 3500 RPM – bifásico (água-ar) – 3 bars (3kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
2.98	53.72	0.02	1.19%	2274	0	4762	0.01%
3.11	49.51	39.15	1.34%	2324	538	4887	23.17%
3.04	45.56	69.27	1.43%	2357	877	5001	37.19%
3.00	41.48	97.59	1.55%	2367	1124	5029	47.51%
3.02	37.86	118.35	1.70%	2356	1245	4974	52.83%
3.02	33.77	134.43	1.91%	2314	1261	4878	54.50%
3.02	29.62	147.14	2.17%	2282	1210	4733	53.04%
2.99	25.58	158.65	2.49%	2231	1127	4582	50.53%
3.02	21.13	170.18	3.03%	2148	999	4379	46.50%
3.01	17.27	174.14	3.67%	2046	836	4059	40.83%
3.06	13.74	173.62	4.65%	1923	663	3817	34.46%
3.04	9.08	148.32	6.82%	1615	374	3022	23.18%

P47 – 3500 RPM – bifásico (água-ar) – 3 bars (5kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
5.04	52.64	3.42	2.06%	2309	50	4750	2.17%
5.03	48.90	38.03	2.21%	2366	516	4876	21.83%
5.08	46.11	59.26	2.37%	2396	759	4957	31.68%
4.98	41.52	91.84	2.57%	2375	1059	4960	44.59%
5.02	38.02	112.98	2.83%	2373	1193	4951	50.28%
5.05	34.09	127.82	3.16%	2340	1210	4824	51.74%
5.00	30.19	140.04	3.53%	2319	1175	4800	50.65%
5.01	26.63	149.21	3.98%	2257	1104	4648	48.91%
5.04	23.08	158.01	4.60%	2179	1013	4442	46.50%
5.05	19.27	139.40	5.48%	1937	746	3880	38.51%
4.98	15.64	139.72	6.58%	1837	607	3574	33.04%
4.99	11.92	121.07	8.48%	1688	401	3214	23.74%
5.00	7.94	75.33	12.26%	1406	166	2490	11.82%
5.06	4.89	38.91	18.88%	895	53	1183	5.91%

P47 – 3500 RPM – bifásico (água-ar) – 3 bars (7kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m ³ /h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
7.01	51.87	3.71	2.92%	2286	53	4690	2.34%
7.00	47.53	43.57	3.16%	2339	575	4841	24.60%
7.01	44.12	68.71	3.42%	2337	842	4884	36.04%
7.01	40.71	91.77	3.68%	2361	1038	4966	43.96%
7.05	36.53	109.41	4.12%	2334	1110	4856	47.56%
7.04	32.79	113.67	4.56%	2227	1035	4659	46.49%
7.02	28.31	120.48	5.24%	2122	947	4337	44.64%
7.02	24.73	120.27	5.94%	2005	826	3978	41.21%
7.02	20.07	126.74	7.21%	1891	707	3792	37.37%
7.14	16.34	111.13	8.89%	1731	504	3372	29.14%
6.94	13.07	85.18	10.58%	1581	309	3010	19.56%
6.99	9.57	67.11	14.04%	1402	178	2537	12.72%
6.97	5.89	35.82	21.17%	922	59	1302	6.35%

P47 – 2400 RPM – bifásico (água-ar) – 3 bars (3kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m ³ /h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
2.97	36.48	0.67	1.76%	799	7	1787	0.85%
3.02	33.23	20.14	1.95%	818	186	1820	22.72%
2.97	31.01	32.10	2.05%	819	276	1825	33.77%
3.00	28.16	46.25	2.29%	819	362	1813	44.19%
3.01	25.32	56.50	2.54%	817	397	1810	48.63%
3.03	22.79	62.35	2.84%	798	395	1636	49.44%
3.00	20.33	66.33	3.15%	759	375	1539	49.36%
3.00	17.56	69.50	3.62%	721	339	1489	47.00%
2.99	14.37	62.62	4.37%	644	250	1281	38.82%
2.98	11.91	63.78	5.20%	619	211	1231	34.10%
2.99	9.15	54.03	6.71%	550	137	1053	24.97%
3.06	6.28	35.59	9.71%	484	62	796	12.83%
2.87	2.32	5.93	21.70%	193	4	89	1.98%

P47 – 2400 RPM – bifásico (água-ar) – 3 bars (5kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m ³ /h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
5.03	35.80	0.59	3.00%	784	6	1605	0.75%
5.00	33.33	15.30	3.20%	793	142	1626	17.85%
5.04	30.26	31.44	3.55%	813	264	1648	32.51%
5.02	27.62	42.74	3.86%	810	328	1624	40.50%
4.99	25.20	47.03	4.19%	791	329	1593	41.61%
5.01	22.28	49.19	4.73%	751	304	1457	40.52%
5.04	19.51	49.35	5.41%	696	267	1269	38.43%
5.04	17.05	51.30	6.13%	657	243	1200	36.99%
5.03	14.32	47.05	7.20%	619	187	1116	30.26%
4.96	10.96	32.88	9.08%	543	100	869	18.43%
4.93	9.22	30.73	10.60%	517	79	766	15.21%
4.99	5.62	17.72	16.48%	382	28	453	7.24%
5.02	3.85	6.25	22.76%	253	7	122	2.64%

P47 – 2400 RPM – bifásico (água-ar) – 3 bars (7kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m ³ /h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
7.00	34.87	1.33	4.25%	772	13	1520	1.67%
7.03	32.60	14.21	4.56%	794	129	1588	16.20%
7.03	29.60	27.71	5.00%	790	228	1556	28.83%
7.03	27.79	33.28	5.29%	792	257	1556	32.45%
7.00	24.52	39.74	5.96%	752	271	1406	35.99%
7.00	21.76	41.77	6.64%	716	252	1282	35.24%
7.00	19.28	40.02	7.46%	658	214	1215	32.58%
7.01	16.44	38.02	8.65%	618	174	1063	28.08%
6.93	14.21	29.91	9.75%	568	118	924	20.79%
6.93	11.83	25.72	11.49%	523	84	760	16.15%
7.04	8.07	18.50	16.25%	436	41	580	9.51%
7.06	6.82	12.57	18.77%	357	24	367	6.67%

P47 – 3500 RPM – bifásico (água-ar) – 5 bars (5kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
4.98	53.31	1.39	1.30%	2365	21	5220	0.87%
4.99	49.19	40.11	1.41%	2391	548	5260	22.93%
4.97	45.42	70.47	1.53%	2412	889	5326	36.86%
5.01	41.47	100.32	1.68%	2418	1156	5377	47.79%
5.00	37.38	125.46	1.86%	2373	1303	5234	54.90%
5.00	33.16	142.48	2.10%	2339	1312	5073	56.11%
5.04	29.03	154.51	2.41%	2270	1246	4865	54.89%
5.04	25.24	163.49	2.76%	2218	1146	4769	51.69%
4.99	21.08	165.50	3.26%	2104	969	4579	46.06%
5.02	17.50	166.08	3.93%	2018	808	4272	40.02%
5.09	13.77	165.04	5.01%	1853	631	3930	34.06%
5.01	8.47	137.87	7.80%	1601	324	3308	20.24%
4.48	3.54	43.28	15.36%	886	43	1458	4.80%

P47 – 3500 RPM – bifásico (água-ar) – 5 bars (7kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
7.05	53.87	0.08	1.83%	2371	1	5684	0.05%
6.96	49.34	36.52	1.98%	2361	500	4962	21.20%
7.09	45.48	67.59	2.19%	2382	854	5052	35.84%
7.07	41.21	99.41	2.41%	2405	1138	5141	47.31%
6.94	37.20	124.05	2.61%	2405	1282	5154	53.29%
7.02	33.38	139.03	2.94%	2361	1289	5155	54.61%
7.06	29.74	149.55	3.30%	2314	1236	4977	53.39%
6.95	25.36	160.69	3.80%	2241	1132	4687	50.51%
6.93	21.36	165.25	4.47%	2168	981	4566	45.24%
6.99	17.76	148.69	5.36%	1940	734	4010	37.81%
7.02	13.43	147.51	7.00%	1792	550	3636	30.72%
6.88	8.70	95.59	10.21%	1494	231	2960	15.46%
7.35	5.51	52.04	16.21%	1072	80	1904	7.44%

P47 – 3500 RPM – bifásico (água-ar) – 5 bars (9kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
9.05	52.22	6.87	2.46%	2296	100	4905	4.34%
9.00	48.18	43.82	2.65%	2373	586	5046	24.71%
9.06	44.03	76.54	2.91%	2373	936	5055	39.45%
9.01	40.20	103.82	3.18%	2411	1159	5160	48.08%
9.08	36.81	123.34	3.50%	2448	1261	5196	51.51%
8.97	32.49	139.31	3.89%	2410	1257	5120	52.17%
9.00	29.13	149.02	4.33%	2324	1206	4868	51.90%
9.02	24.95	156.91	5.04%	2258	1088	4756	48.17%
8.93	20.56	141.41	5.99%	2017	808	4119	40.04%
9.04	17.72	143.15	6.98%	1874	704	3853	37.59%
8.80	12.82	122.35	9.16%	1708	436	3451	25.52%
9.10	6.83	60.87	16.40%	1284	116	2403	9.00%

P47 – 2400 RPM – bifásico (água-ar) – 5 bars (3kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
3.00	36.57	1.27	1.19%	822	13	1763	1.57%
2.97	33.61	19.65	1.28%	837	184	1789	21.92%
3.04	31.30	32.09	1.40%	845	279	1806	33.01%
3.02	28.63	46.21	1.53%	850	368	1803	43.22%
3.01	25.37	59.69	1.71%	840	421	1793	50.09%
2.99	23.25	65.74	1.86%	840	425	1768	50.57%
3.04	20.51	71.26	2.14%	809	406	1727	50.18%
3.02	17.50	77.06	2.47%	794	375	1661	47.15%
3.03	15.07	81.63	2.87%	762	342	1598	44.84%
2.98	12.76	84.63	3.32%	743	300	1485	40.38%
3.17	8.94	73.01	4.95%	649	181	1284	27.93%
2.98	5.62	52.20	7.22%	572	81	1056	14.24%

P47 – 2400 RPM – bifásico (água-ar) – 5 bars (5kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
5.02	36.07	2.98	2.00%	868	30	1999	3.43%
5.01	33.54	18.41	2.15%	876	172	2006	19.59%
5.03	30.61	34.12	2.36%	875	290	2011	33.15%
5.08	27.88	47.97	2.61%	881	372	2052	42.19%
5.03	25.44	57.75	2.83%	878	408	2022	46.50%
5.00	22.26	65.14	3.19%	862	403	1988	46.72%
5.06	19.55	69.38	3.66%	829	377	1975	45.48%
4.95	16.22	62.94	4.29%	741	284	1690	38.29%
4.99	14.18	65.10	4.91%	722	256	1629	35.49%
5.03	10.70	65.10	6.47%	686	193	1598	28.20%
4.96	9.53	56.43	7.11%	660	149	1493	22.63%
5.06	6.02	35.69	10.99%	556	60	1179	10.73%

P47 – 2400 RPM – bifásico (água-ar) – 5 bars (7kg/h)							
mG	qL	Δp	α	Pm	Ph	Pe	η
[kg/h]	[m³/h]	[kpa]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
7.05	35.78	2.35	2.81%	855	23	2036	2.73%
7.01	33.24	17.65	3.01%	874	163	2126	18.64%
7.02	27.78	45.91	3.59%	881	354	2179	40.22%
6.96	25.29	53.52	3.90%	877	376	2034	42.86%
7.02	22.18	55.71	4.45%	834	343	1873	41.15%
6.95	20.14	56.19	4.83%	814	314	1853	38.60%
6.98	17.22	57.69	5.63%	758	276	1753	36.43%
7.05	14.35	58.77	6.73%	724	234	1681	32.38%
6.98	11.27	40.29	8.34%	647	126	1453	19.49%
6.94	8.62	34.08	10.61%	601	82	1297	13.57%
6.96	6.34	28.72	13.93%	549	51	1155	9.20%
7.20	2.91	7.33	26.80%	314	6	605	1.89%

P47 – 3500 RPM – Monofásico (óleo) – 23 cP						
qL	Δp	H	Pm	Ph	Pe	η
[m³/h]	[kpa]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]
47.71	3.05	0.35	2289	40	4939	1.76%
43.37	43.00	4.92	2318	518	5092	22.35%
38.24	79.79	9.12	2319	848	5115	36.54%
34.24	105.98	12.12	2293	1008	5057	43.97%
31.00	120.25	13.75	2235	1035	4814	46.32%
27.82	136.20	15.57	2263	1052	4926	46.50%
23.37	155.35	17.76	2261	1009	4912	44.62%
19.63	168.73	19.29	2149	920	4703	42.79%
13.28	181.90	20.79	2016	671	4274	33.27%
9.26	186.09	21.27	1931	478	4158	24.77%

P47 – 3500 RPM – Monofásico (óleo) – 77 cP						
qL	Δp	H	Pm	Ph	Pe	η
[m³/h]	[kpa]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]
44.30	0.50	0.06	2622	6	5844	0.23%
40.51	35.90	4.05	2624	404	5834	15.40%
36.14	70.85	8.00	2598	711	5802	27.38%
31.71	98.53	11.12	2540	868	5683	34.18%
26.89	124.84	14.09	2415	933	5359	38.62%
22.85	143.31	16.18	2429	910	5380	37.46%
17.89	162.62	18.36	2344	808	5220	34.48%
13.36	175.15	19.77	2261	650	5023	28.75%
9.37	183.25	20.68	2147	477	4776	22.23%
4.65	189.16	21.35	2056	244	4476	11.88%
0.00	188.71	21.30	1737	0	3693	0.00%

P47 – 3500 RPM – Monofásico (óleo) – 120 cP						
qL	Δp	H	Pm	Ph	Pe	η
[m³/h]	[kpa]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]
42.23	0.09	0.01	2732	1	6128	0.04%
38.42	36.35	4.09	2735	388	6106	14.18%
33.78	70.72	7.95	2707	664	6060	24.51%
29.74	97.41	10.95	2621	805	5876	30.71%
25.37	122.39	13.76	2512	863	5691	34.33%
21.28	141.20	15.87	2540	835	5706	32.87%
16.75	159.69	17.95	2453	743	5559	30.29%
12.23	173.51	19.51	2343	590	5389	25.16%
8.17	183.11	20.58	2228	415	5059	18.65%
0.00	190.49	21.41	1740	0	3861	0.00%

P47 – 3500 RPM – Monofásico (óleo) – 180 cP						
qL	Δp	H	Pm	Ph	Pe	η
[m³/h]	[kpa]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]
39.29	7.95	0.89	2875	87	6542	3.02%
35.59	37.90	4.24	2872	375	6573	13.05%
32.28	63.98	7.16	2820	574	6431	20.35%
28.16	92.81	10.39	2735	726	6284	26.55%
24.17	116.64	13.06	2722	783	6258	28.77%
19.61	141.28	15.82	2686	770	6195	28.66%
16.32	155.46	17.41	2637	705	5909	26.72%
11.92	169.23	18.95	2541	560	5770	22.04%
7.81	180.42	20.20	2404	392	5472	16.29%
0.00	190.41	21.32	1901	0	4290	0.00%

P47 – 2400 RPM – Monofásico (óleo) – 23 cP						
qL	Δp	H	Pm	Ph	Pe	η
[m³/h]	[kpa]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]
31.80	2.19	0.25	1064	19	1840	1.82%
28.58	20.70	2.37	1094	164	1861	15.02%
25.88	34.80	3.98	1095	250	1918	22.86%
22.39	49.15	5.62	1089	306	1879	28.08%
18.93	60.92	6.96	1118	320	2031	28.64%
15.64	71.51	8.17	1120	311	2018	27.74%
12.80	79.07	9.04	1094	281	1938	25.70%
9.61	84.14	9.62	1034	225	1851	21.73%
5.60	88.49	10.12	953	138	1745	14.45%

P47 – 2400 RPM – Monofásico (óleo) – 77 cP						
qL	Δp	H	Pm	Ph	Pe	η
[m³/h]	[kpa]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]
29.09	0.90	0.10	1285	7	2353	0.56%
25.64	21.53	2.43	1310	153	2383	11.70%
22.99	35.09	3.96	1311	224	2398	17.09%
20.16	47.46	5.36	1283	266	2348	20.72%
17.16	57.77	6.52	1233	275	2275	22.34%
14.57	67.00	7.56	1201	271	2216	22.57%
11.52	75.86	8.56	1226	243	2245	19.80%
8.60	82.13	9.27	1195	196	2148	16.41%
6.23	86.18	9.73	1172	149	2142	12.73%
0.00	90.41	10.21	965	0	1734	0.00%

P47 – 2400 RPM – Monofásico (óleo) – 120 cP						
qL	Δp	H	Pm	Ph	Pe	η
[m³/h]	[kpa]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]
27.39	-0.12	-0.01	1235	-1	2486	-0.07%
23.86	20.82	2.34	1214	138	2516	11.37%
21.29	34.19	3.84	1191	202	2439	16.97%
18.51	46.52	5.23	1145	239	2332	20.88%
13.95	63.78	7.17	1193	247	2400	20.72%
10.45	75.11	8.44	1193	218	2412	18.28%
7.12	82.41	9.26	1146	163	2312	14.21%
4.93	86.38	9.71	1104	118	2280	10.71%
0.00	90.58	10.18	965	0	1959	0.00%

P47 – 2400 RPM – Monofásico (óleo) – 180 cP						
qL	Δp	H	Pm	Ph	Pe	η
[m³/h]	[kpa]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]
25.45	-0.13	-0.01	1047	-1	2852	-0.09%
22.74	16.55	1.85	1046	105	2847	9.99%
20.13	30.44	3.41	1028	170	2877	16.56%
17.82	42.50	4.76	988	210	2870	21.28%
15.02	52.99	5.93	951	221	2806	23.24%
12.44	63.06	7.06	976	218	2913	22.32%
10.28	69.45	7.78	971	198	2910	20.41%
7.60	76.34	8.55	973	161	2963	16.56%
5.45	81.13	9.08	941	123	2870	13.06%
0.00	88.80	9.94	725	0	2296	0.00%

ANEXO V – FOTOS DO CIRCUITO DE TESTES

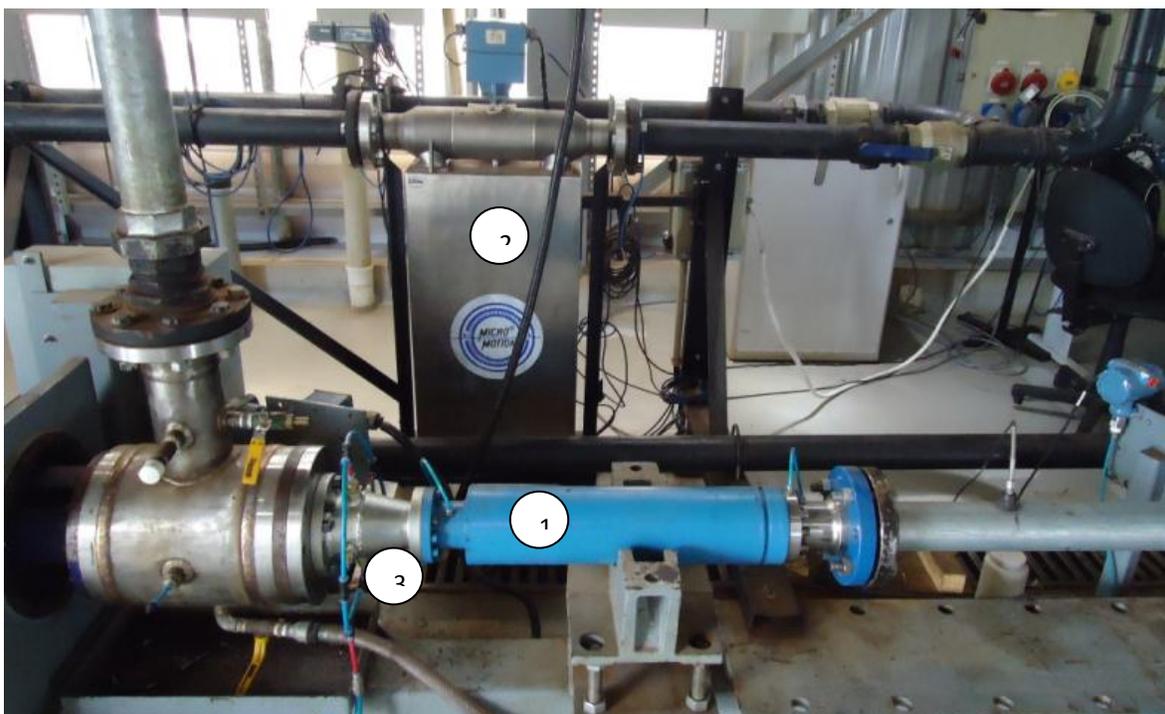


Figura A.V-6. (1) BCS P47, (2) Medidor mássico Coriolis e (3) Carretel de injeção de ar.



Figura A.V-2. Medidor de vazão de ar (LFE).



Figura A.V-3. Conjunto motor – torquímetro – mancal (selo).



Figura A.V-4. Tanques de armazenagem de água (verde) e óleo (cinza).



Figura A.V-5. Trocador de calor.



Figura A.V-6. Variadores de velocidades.



Figura A.V-7. Válvula de controle de vazão de ar.