

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS

**CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE REDES
DE ESCOAMENTO DE PETRÓLEO BASEADA
NO MONITORAMENTO EM TEMPO REAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CLEDSON WAGNER SOUTO SANTANA

Campina Grande – PB

Maio / 2006

CLEDSON WAGNER SOUTO SANTANA

**CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE REDES
DE ESCOAMENTO DE PETRÓLEO BASEADA
NO MONITORAMENTO EM TEMPO REAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do Título de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS

ORIENTADOR: Dsc. CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO

ORIENTADOR: Dsc. JOSÉ GOMES DA SILVA

Campina Grande – 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S232c Santana, Cledson Wagner Souto
2006 Calibração de um modelo de redes de escoamento de petróleo baseada no monitoramento em tempo real / Cledson Wagner Souto Santana. — Campina Grande, 2006.
107f. : il.

Referências.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Orientador: Carlos de Oliveira Galvão.

1— Hidráulica 2— Calibração de Redes 3— Petróleo I- Título

CDU 626.01

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por me dar as ferramentas das quais eu preciso, corpo e mente saudáveis, e por me fazer acreditar que é o homem o dono do seu próprio destino.

Mãe, sou grato ao seu apoio incondicional. Sem ele, eu não teria chegado aqui. Minhas vitórias também são suas.

Não gostaria de deixar marcado neste documento o meu sincero agradecimento a Carlos Galvão somente por sempre acreditar no meu potencial, mas também por me incentivar e guiar, e por me dar a oportunidade de trabalhar neste projeto, o qual me permitiu um grande amadurecimento profissional. Também gostaria de agradecer a meu co-orientador Zeca pela paciência e ensinamentos.

Um eterno “muito obrigado” a minha equipe de trabalho: Alan, Bárbara, Bruno, Érica, Esther, Euriclides, Fubica, Ivonaldo, Marcell, Thiago e Vinicius, aprendi muito com vocês também.

Aos engenheiros da PETROBRAS Fabiano Azevedo, Fábio Arbex e Vicente Moreira pelas discussões e pela contribuição ao meu trabalho.

Agradeço a todos do Laboratório de Sistemas Distribuídos, aos professores e amigos da Área de Recursos Hídricos, aos familiares e amigos. A todos que contribuíram, conscientemente ou não, de alguma forma com o meu trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo

Um modelo de simulação hidráulica é utilizado para reproduzir o comportamento hidráulico de redes de escoamento de petróleo por um Sistema de Apoio à Decisão (SAD). Mas, para que este possa realizar todos os seus objetivos com um mínimo de confiabilidade, o modelo de simulação deve representar satisfatoriamente a rede de escoamento de petróleo, que, diferentemente das redes de escoamento de água, não escoam apenas um único fluido, mas uma mistura de fluidos que variam espacial e temporalmente (refletindo em uma variação das perdas de pressão e, conseqüentemente, na distribuição de vazões pela rede), tornando operacionalmente impraticável poder identificar as propriedades do fluido em cada parte da rede a cada momento. Este trabalho se baseia na hipótese que esta variação não afeta significativamente a previsão do comportamento hidráulico da rede, de forma a impedir o uso de um modelo hidráulico baseado em um fator de atrito médio estimado com o mínimo de informação sobre os fluidos escoados. No entanto, as propriedades do fluido são dados de entrada necessários para os modelos hidráulicos, cujas funções, das quais são compostos, se constituem em simples representação matemática do processo real, bem mais complexo. Portanto, sempre é esperado que haja uma diferença entre os resultados apresentados pelo modelo e as medidas de campo. Para realizar a estimativa dos parâmetros do modelo, utilizou-se o monitoramento realizado em tempo real. A calibração realizada não teve como objetivo calibrar cada bomba da rede (e cada duto) para poder representar apenas seu comportamento, mas calibrar partes do sistema para poder representá-lo como um todo. Os resultados demonstraram que as bombas rotativas da rede de escoamento são insensíveis à variação do fluido bombeado, demonstrando possuir curvas características que podem ser utilizadas para prever comportamentos futuros. O mesmo não pode ser afirmado para os dutos, pois os fatores de atrito não apresentaram um comportamento robusto. As evidências indicam que este parâmetro é altamente dependente do conhecimento da massa específica ao longo de toda a rede, cuja medição é esporádica e pontual. O modelo hidráulico ainda não pode representar a realidade, já que os dutos não puderam ser calibrados adequadamente.

Abstract

The objective of a hydraulic model simulation is to reproduce the behavior of hydraulic networks to be used by a Decision Support System (DSS). A simulation model to be able to satisfactorily represent a petroleum hydraulic network needs to take into account that these networks do not flow one fluid each time but a fluid mixture that can vary spatially and temporally becoming operationally impracticable to be able to identify all the fluids properties in the network at same moment. The hypothesis of this work is that a variation in these fluids characteristics does not affect the prediction of the hydraulic network behavior that could not allow the use of a hydraulic model based on an average friction factor with minimum fluid information. However fluid properties are necessary inputs for simulation models whose functions are a simple mathematical representation of complex process therefore it is always expected a difference in the simulation results and the reality. The process of calibration used in these work did not have as objective to calibrate each pump and pipe of the network to be able to represent they behavior isolated, but to calibrate parts of the system to represent it as a whole. To validate the proposed process was used data collected in real time for a petroleum hydraulic network. The results demonstrate that the pumps for this network are insensitive to the variation of the pumped fluid and then their characteristic curves can be used to predict future behavior. However the same cannot be affirmed for the pipes because the friction factors had not presented a robust behavior. Evidences indicate that this parameter is highly dependent of the knowledge of the density through the network and these measurements are made sporadically and specific located. The hydraulic model cannot reproduce the behavior of hydraulic network yet, because the pipes couldn't be adequately calibrated.

Sumário

1. Introdução	1
Objetivo geral.....	3
Objetivos específicos	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Sistemas de monitoramento e controle	5
2.2. Modelos de escoamento de petróleo	8
2.3. Calibração de modelos hidráulicos	10
3. Caso de estudo	15
3.1. A rede de escoamento	15
3.2. O petróleo.....	18
3.3. A instrumentação	20
3.4. Obtenção dos dados	24
3.5. Tratamento dos dados	34
4. Metodologia	39
4.1. Modelo de simulação hidráulica	39
4.2. Curvas características das bombas	44
4.3. Fatores de atrito.....	47
4.4. Metodologia de calibração	50
5. Resultados e discussões	59
5.1. Resultados iniciais.....	59
5.2. Resultados para as bombas	63
5.3. Resultados para os dutos	69
5.4. Validação	72
6. Conclusões	75
6.1. Recomendações.....	77
7. Referências Bibliográficas	79
8. Anexos	87
8.1. Anexo A	87
8.2. Anexo B	96
8.3. Anexo C	102
9. Apêndices.....	107

Lista de figuras

Figura 1 - Localização geográfica da rede de escoamento terrestre de petróleo.....	15
Figura 2 - Esquema da malha calibrada.....	16
Figura 3 - Esquema interno de uma estação.....	17
Figura 4 - Esquema da instrumentação existente na malha piloto.....	20
Figura 5 - Medidor de nível tipo radar.....	21
Figura 6 - Medidor de pressão com diafragma.....	22
Figura 7 - Medidor de vazão tipo turbina.....	23
Figura 8 - Medidor de vazão tipo engrenagens ovais (DELMÉE, 2006).....	23
Figura 9 - Medidor de vazão tipo ultra-sônico.....	24
Figura 10 - Dados não em numéricos tipo " <i>I/O Timeout</i> ".....	29
Figura 11 - Dados não em numéricos tipo " <i>Shutdown</i> ".....	29
Figura 12 - Dados não numéricos tipo " <i>Failed</i> ".....	30
Figura 13 - Dados não numéricos tipo " <i>Intf Shut</i> ".....	30
Figura 14 - Dados nulos.....	30
Figura 15 - Dados "congelados".....	30
Figura 16 - Convenção "1" para ligada, "0" para desligada.....	31
Figura 17 - Nível do tanque para cálculo da vazão de entrada.....	36
Figura 18 - Arquitetura do SAD.....	39
Figura 19 - Seqüência na simulação hidráulica.....	43
Figura 20 - Princípio de funcionamento das bombas centrífuga e rotativa, respectivamente.....	45
Figura 21 - Curvas características das bombas centrífuga e rotativa, respectivamente.....	46
Figura 22 - Escorregamento no regime laminar e turbulento, respectivamente.....	46
Figura 23 - Válvula de reciclo na bomba rotativa.....	47
Figura 24 - Metodologia de calibração.....	50
Figura 25 - Cálculo do valor médio em torno de um instante.....	53
Figura 26 - Inversão dos eixos para ajuste da equação de 1º grau.....	55
Figura 27 - Linha piezométrica na malha piloto até dia 09/12/05.....	59

Lista de gráficos

Gráfico 1 - Produção de petróleo no Rio Grande do Norte.	16
Gráfico 2 - Erro na leitura do nível.	31
Gráfico 3 - Transientes na vazão.	31
Gráfico 4 - Descontinuidade na leitura dos níveis.	32
Gráfico 5 - Incompatibilidade entre leitura de nível e estado das bombas.	32
Gráfico 6 - Incompatibilidade entre leitura de vazão e estado das bombas.	33
Gráfico 7 - Oscilação excessiva na medição de vazão em LPX.	33
Gráfico 8 - Valor não esperado para o estado da bomba.	33
Gráfico 9 - Diferença entre os níveis dos tanques equalizados.	34
Gráfico 10 - Leitura não esperada de vazão em RFQ.	34
Gráfico 11 - Diagrama de Moody (PORTO, 2004).	48
Gráfico 12 - Número de Reynolds para D1.	62
Gráfico 13 - Número de Reynolds para D2.	62
Gráfico 14 - Número de Reynolds para D3.	62
Gráfico 15 - Velocidades nos dutos da malha piloto.	63
Gráfico 16 - Equações ajustadas para B1 em RFQ.	64
Gráfico 17 - Equações ajustadas para B2 em RFQ.	65
Gráfico 18 - Equações ajustadas para B3 em LPX.	65
Gráfico 19 - Equações ajustadas para B5 em LOR.	65
Gráfico 20 - Rotações encontradas para B1 em RFQ.	67
Gráfico 21 - Rotações encontradas para B2 em RFQ.	68
Gráfico 22 - Rotações encontradas para B3 em LPX.	68
Gráfico 23 - Rotações encontradas para B5 em LOR.	68
Gráfico 24 - Ajuste com pontos da parte 1 sem alterações, para B1 em RFQ.	87
Gráfico 25 - Ajuste com pontos da parte 1 sem alterações, para B2 em RFQ.	87
Gráfico 26 - Ajuste com pontos da parte 1 sem alterações, para B3 em LPX.	88
Gráfico 27 - Ajuste com pontos da parte 1 sem alterações, para B5 em LOR.	88
Gráfico 28 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 10 minutos, para B1 em RFQ.	88
Gráfico 29 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 10 minutos, para B2 em RFQ.	89
Gráfico 30 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 10 minutos, para B3 em LPX.	89
Gráfico 31 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 10 minutos, para B5 em LOR.	89
Gráfico 32 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 20 minutos, para B1 em RFQ.	90
Gráfico 33 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 20 minutos, para B2 em RFQ.	90
Gráfico 34 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 10 minutos, para B3 em LPX.	90
Gráfico 35 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 20 minutos, para B5 em LOR.	91
Gráfico 36 - Ajuste com pontos da parte 2 sem alterações, para B1 em RFQ.	91
Gráfico 37 - Ajuste com pontos da parte 2 sem alterações, para B2 em RFQ.	91
Gráfico 38 - Ajuste com pontos da parte 2 sem alterações, para B3 em LPX.	92
Gráfico 39 - Ajuste com pontos da parte 2 sem alterações, para B5 em LOR.	92
Gráfico 40 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 10 minutos, para B1 em RFQ.	92
Gráfico 41 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 10 minutos, para B2 em RFQ.	93
Gráfico 42 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 10 minutos, para B3 em LPX.	93
Gráfico 43 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 10 minutos, para B5 em LOR.	93
Gráfico 44 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 20 minutos, para B1 em RFQ.	94

Gráfico 45 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 20 minutos, para B2 em RFQ.	94
Gráfico 46 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 20 minutos, para B3 em LPX.....	94
Gráfico 47 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 20 minutos, para B5 em LOR.	95
Gráfico 48 - Ajuste com pontos da parte 3 sem alterações, para B1 em RFQ.	95
Gráfico 49 - Ajuste com pontos da parte 3 sem alterações, para B2 em RFQ.	95
Gráfico 50 - Ajuste com pontos da parte 3 sem alterações, para B3 em LPX.	96
Gráfico 51 - Ajuste com pontos da parte 3 sem alterações, para B5 em LOR.	96
Gráfico 52 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 sem alterações, para D1.	97
Gráfico 53 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 sem alterações, para D2.	97
Gráfico 54 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 sem alterações, para D3.	97
Gráfico 55 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 10 min, para D1.	98
Gráfico 56 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 10 min, para D2.	98
Gráfico 57 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 10 min, para D3.	98
Gráfico 58 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 20 min, para D1.	99
Gráfico 59 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 20 min, para D2.	99
Gráfico 60 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 20 min, para D3.	99
Gráfico 61 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 sem alterações, para D1.	100
Gráfico 62 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 sem alterações, para D2.	100
Gráfico 63 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 sem alterações, para D3.	100
Gráfico 64 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 com média até 10 min, para D1.	101
Gráfico 65 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 com média até 10 min, para D2.	101
Gráfico 66 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 com média até 10 min, para D3.	101
Gráfico 67 - Vazões em D1, com dados calibrados da parte 1.....	102
Gráfico 68 - Vazões em D2, com dados calibrados da parte 1.....	102
Gráfico 69 - Vazões em D3, com dados calibrados da parte 1.....	103
Gráfico 70 - Cotas piezométricas a montante de D1, com dados calibrados da parte 1.....	103
Gráfico 71 - Cotas piezométricas a montante de D2, com dados calibrados da parte 1.....	103
Gráfico 72 - Cotas piezométricas a montante de D3, com dados calibrados da parte 1.....	104
Gráfico 73 - Vazões em D1, com dados calibrados da parte 2.....	104
Gráfico 74 - Vazões em D2, com dados calibrados da parte 2.....	104
Gráfico 75 - Vazões em D3, com dados calibrados da parte 2.....	105
Gráfico 76 - Cotas piezométricas a montante de D1, com dados calibrados da parte 2.....	105
Gráfico 77 - Cotas piezométricas a montante de D2, com dados calibrados da parte 2.....	105
Gráfico 78 - Cotas piezométricas a montante de D3, com dados calibrados da parte 2.....	106

Lista de quadros

Quadro 1 - Dados físicos dos dutos.	25
Quadro 2 - Dados físicos das bombas.....	25
Quadro 3 - Dados físicos dos tanques.....	25
Quadro 4 - Dados físicos das estações.....	25
Quadro 5 - Lista de TAGs.....	28
Quadro 6 - Dias utilizados para calibração e validação.....	52
Quadro 7 - Lista de gráficos dos ajustes das bombas da malha piloto.....	64
Quadro 8 – Lista de gráficos da distribuição de frequências dos fatores de atrito.	70

Lista de tabelas

Tabela 1 - Amostras de petróleo da transferência.	26
Tabela 2 - Amostras de petróleo dos campos produtores.	26
Tabela 3 - BSW de fluidos transferidos.	27
Tabela 4 - Comparação das medidas de vazão em LOR.	60
Tabela 5 - Comparação das medidas de vazão em LPX.	60
Tabela 6 - Comparação das medidas de vazão em RFQ.	61
Tabela 7 - Números mínimos de Reynolds.	61
Tabela 8 - Pontos encontrados durante a calibração das bombas.	66
Tabela 9 - Coeficientes das equações das bombas calibradas.	67
Tabela 10 - Pontos para calibração da válvula de reciclo.	69
Tabela 11 - Equação da válvula de reciclo.	69
Tabela 12 - Fatores de atrito "observados".	70
Tabela 13 - Fatores de atrito "observados" para parte 1 do Supervisório.	71
Tabela 14 - Fatores de atrito "observados" para parte 2 do Supervisório.	72
Tabela 15 - Erro percentual entre as vazões observadas e calculadas com dados da parte 1.	72
Tabela 16 - Erro percentual entre as cotas piezométricas observadas e calculadas com dados da parte 1.	73
Tabela 17 - Erro percentual entre as vazões observadas e calculadas com dados da parte 2.	73
Tabela 18 - Erro percentual entre as cotas piezométricas observadas e calculadas com dados da parte 2.	73

1. Introdução

O nível de desenvolvimento tecnológico alcançado nas últimas décadas possibilitou à indústria do petróleo construir sistemas computacionais cada vez mais sofisticados que, além de realizarem o monitoramento em tempo real das redes de escoamento, auxiliam os operadores humanos a tomarem decisões em circunstâncias cada vez mais complexas. Muitas vezes, as decisões sugeridas por estes sistemas computacionais estão baseadas na simulação de modelos matemáticos, com os quais se podem realizar testes com o objetivo de prever o desempenho do processo real.

Assume-se como premissa que esses modelos representam todas as características, aspectos, reações e comportamentos do processo real e, portanto, precisam ser continuamente reavaliados. Assim, uma outra funcionalidade que pode ser acrescida a estes sistemas computacionais é a capacidade de atualizar os parâmetros dos modelos em função dos dados do monitoramento em tempo real.

Neste trabalho analisa-se um modelo de simulação hidráulica utilizado para reproduzir o comportamento de redes de escoamento de petróleo em regime de fluxo permanente. Ele é parte de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD), que auxilia na conciliação dos conflitos gerados na operação de redes de escoamento de petróleo, de forma a garantir a máxima eficiência do seu transporte com o menor custo de energia, a controlar as pressões e velocidades nos dutos, e a evitar os riscos de falhas operacionais que possam provocar poluição ambiental e perda de produção, considerando todas as restrições operacionais.

Para que este SAD possa realizar todos os seus objetivos com um mínimo de confiabilidade, o modelo de simulação deve representar satisfatoriamente a rede de escoamento de petróleo, que, diferentemente das redes de escoamento (distribuição) de água, não escoam apenas um único fluido, mas uma mistura de fluidos que variam espacial e temporalmente, tornando operacionalmente impraticável poder identificar as propriedades do fluido em cada parte da rede a cada momento. Esta variação se deve à própria natureza do petróleo nos reservatórios (meios porosos no subsolo onde o petróleo é encontrado) e à forma como é transportado (de várias origens para um único destino, misturando-se o petróleo de diferentes reservatórios).

As propriedades dos fluidos que estão sendo escoados são dados de entrada necessários para os modelos hidráulicos, cujas formulações são representações matemáticas simplificadas de um fenômeno ou processo real, bem mais complexo. Assim, sempre é esperado que haja uma diferença entre os resultados apresentados pelo modelo e os medidos em campo. Esta diferença advém de uma combinação da incerteza nos dados de entrada, na estrutura e nos parâmetros deste modelo, acrescentando-se, nas simulações, a incerteza nas condições iniciais e de contorno.

A representação do funcionamento de uma rede de escoamento de petróleo sem conhecer completamente o fluido que escoar em cada parte da rede a cada momento e todas as particularidades envolvidas com o seu escoamento é, portanto, um desafio. Parte-se das hipóteses, plausíveis, que o petróleo extraído nos campos produtores possui uma pequena variabilidade natural, e que o fluido na rede de escoamento é substituído gradativamente, restringindo seus efeitos hidráulicos (valores de vazão e pressão) a uma faixa de trabalho, a qual pode ser associada com a configuração (estado em que se encontram todas as bombas da rede no instante desejado) atual da rede.

Dados de medições da instrumentação existente, que disponibiliza informações em tempo real de níveis de fluido nos tanques, de vazões e pressões em pontos da rede e de estado das bombas, de parte da rede terrestre de escoamento de petróleo do Rio Grande do Norte foram utilizados para realizar os ajustes dos parâmetros do modelo hidráulico. A este ajuste se dá o nome de calibração. Assim, uma vez que o modelo da rede esteja calibrado, pode-se prever seu comportamento hidráulico para cada configuração que assumir, com um erro aceitável, que impacte o mínimo nas decisões apontadas pelo SAD.

Esta parte da rede é abastecida por vários campos produtores de petróleo que, pela própria natureza do produto, geram fluidos diferentes entre si, refletindo em uma variação do número de Reynolds e, conseqüentemente, do fator de atrito observado. A variabilidade do fluido produzido em campo e o comportamento da variação das suas propriedades desde a extração em campo até a estação receptora da rede de escoamento são desconhecidas. Este trabalho se baseia na hipótese que esta variação não afeta significativamente a previsão do comportamento hidráulico da rede, de forma a impedir o uso de um modelo hidráulico baseado em um fator de atrito médio estimado com poucas informações sobre os fluidos escoados.

Objetivo geral

Realizar ajustes nos parâmetros de um modelo de simulação hidráulica baseado no monitoramento em tempo real, para representar satisfatoriamente o comportamento uma rede terrestre de escoamento de petróleo.

Objetivos específicos

Estimar os parâmetros das curvas características das bombas da rede e avaliar a qualidade desta estimativa através da validação.

Estimar os fatores de atrito e avaliar a qualidade desta estimativa através da validação.

Analisar o impacto das propriedades dos fluidos na estimativa destes fatores.

Analisar o impacto da válvula de reciclo instalado junto às bombas na estimativa dos parâmetros das suas curvas características.

Analisar o impacto da mudança da série histórica de monitoramento na estimativa dos parâmetros.

Analisar o impacto da discretização temporal da série histórica de monitoramento na estimativa destes parâmetros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Sistemas de monitoramento e controle

Tomar decisões importantes na indústria de petróleo requer a incorporação da maioria das incertezas a respeito de um campo caracterizado por: (1) complexidade, (2) incertezas de diversas naturezas, (3) existência de conflitos, (4) investimentos de porte elevado, (5) necessidade de planejamento de longo prazo, (6) dinamismo ao longo da vida útil, (7) repercussões econômicas, sociais e ambientais significativas e, (8) participação de grupos heterogêneos no processo decisório (PORTO & AZEVEDO, 1997), envolvendo múltiplos objetivos conflitantes. Sob estas circunstâncias, tem-se uma crescente necessidade em empregar processos decisórios atualizados e sistemáticos que representem explicitamente os objetivos desejados e as restrições do problema (SUSLICK e SCHIOZER, 2004).

Especificamente, com relação ao desenvolvimento da gestão de redes hidráulicas, ao acompanhar o desenvolvimento tecnológico, passou por várias etapas, indo desde o controle local mais simples até chegar a atual automatização integral centralizada. Desde a introdução dos sistemas automáticos de controle centralizado, que as medidas realizadas à distância são utilizadas, fundamentalmente, só para verificar o estado do sistema em tempo real, assim como para guardar periodicamente alguns dados com o fim de realizar análises estatísticas e planejamentos (ALZAMORA et al., 1996).

Atualmente, estes sistemas participam dos processos decisórios auxiliando ou participando ativamente com os gestores, através dos SADs; construídos não para tomarem decisões por si só, mas para apoiarem ou assistirem um indivíduo ou grupo na execução desta tarefa. A experiência tem mostrado que uma das maiores qualidades de um SAD é exatamente tornar o processo decisório mais ordenado, objetivo e transparente. Em situações em que o conhecimento é impreciso, incompleto e inconsistente (em problemas não estruturados¹), o(s) tomador(es) de decisões escolhe(m) uma solução satisfatória em detrimento da uma solução hipotética ótima (PORTO, 1997).

¹ Um processo é estruturado quando pode ser formulado como um algoritmo (PORTO, 1997).

Os três principais componentes de um SAD são: (1) a base de dados, (2) a base de modelos e (3) a interface. Embora a base de dados seja o núcleo de um SAD, é a utilização de modelos que diferencia um SAD de um simples banco de dados. As características necessárias em uma base de modelos são: (1) capacidade de executar modelos em diversos níveis de decisão, (2) capacidade de integrar modelos para formar modelos compostos, (3) facilitar a atualização no código fonte, (4) facilitar trabalhos de manutenção dos modelos e, (5) capacidade de passar informações para a interface sobre as exigências dos modelos (PORTO, 1997).

A maioria dos modelos de simulação, capazes de prever o comportamento hidráulico das redes, o consumo de energia ou outras características, necessita de informações sobre os sistemas, que tipicamente incluem as condições de contorno, como níveis de fluido nos tanques, estado das bombas e válvulas. A maior parte destas informações pode ser obtida através dos sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), que se constitui em uma coleção de instrumentos em campo, sistemas de comunicação, sistemas computacionais que permitem monitorar e controlar o comportamento do sistema, tipicamente de um único lugar remoto (CHASE, 2000).

Os sistemas SCADA são utilizados onde há necessidade de monitoramento e controle de processos. Se há necessidade de informação em tempo real, como suporte à emergências, as informações podem ser obtidas fácil e rapidamente por este tipo de sistema. E como as informações de um período de tempo podem ser guardadas, seu histórico pode ser utilizado para calibrar modelos matemáticos que simulam o comportamento dos sistemas medidos. No futuro, mais e mais operadores das redes de escoamento irão usar modelos hidráulicos para monitorá-las no seu cotidiano operacional. A chave para incentivar o uso destes modelos pelos operadores está em disponibilizar junto ao modelo uma interface amigável, pois a troca de informações entre o sistema SCADA, o modelo de controle e a análise deve ser, para eles, transparente (CHASE, 2000).

Os sistemas de controle podem proteger as redes de escoamento através do monitoramento e ajuste das pressões e outras variáveis operacionais, enviando alarmes quando limites são excedidos, alocando a entrega de produtos, monitorando o desempenho dos equipamentos, controlando pressões, detectando vazamentos, e melhorando outras funções. Um sistema individual não pode suportar todas estas funções, mas estão disponíveis nos modernos sistemas de monitoramento e controle (KENNEDY, 1993).

Quando se trabalha com as informações do sistema SCADA, geralmente se tem acesso a mais informação do que pode ser facilmente processada. Contudo, ter bons dados desse conjunto de milhares de números, advindos de várias fontes completamente diferentes, é extremamente difícil, pois, usualmente, não há período sem que todos os instrumentos estejam funcionando perfeitamente. Outro desafio está no fato de que medidas incorretas, erros na aquisição e perda de informações inviabilizam parte da massa corrente de dados. Por isto, vários procedimentos de tratamento e organização de dados devem ser utilizados para deixar os dados em um formato utilizável, geralmente na forma de uma planilha (LOWRY, 2003).

As falhas encontradas nos dados obtidos do sistema SCADA podem ser causados por mau funcionamento e por paradas para manutenção do sistema, por atrasos na obtenção dos dados ou perda de um evento digital ou alarme. Todas estas falhas devem ser levadas em consideração quando da comparação dos resultados do modelo com os dados do sistema SCADA (LOWRY, 2003).

Falhas nos dados podem ocorrer devido à redução da quantidade de informações que são transferidas entre as medições em campo e servidor central, apesar de se fazer um bom uso dos meios de comunicação disponíveis. O efeito desta compressão é que a informação recebida pode não ser representativa para o comportamento atual da variável do campo. O importante é saber que a resolução da informação disponível no terminal do operador do sistema SCADA é de uma menor qualidade do que a variação atual da variável em campo e entender os mecanismos particulares pelos quais as informações foram coletadas e levar em consideração quando for analisar estas informações (LOWRY, 2003).

O sistema SCADA usa um mecanismo em que pode utilizar dados históricos para preencher lacunas de informações que ainda não chegaram. Geralmente, tem-se a impressão de que as informações ficam constantes até serem atualizadas. O período de tempo em que a informação precisa ficar disponível no sistema SCADA é configurável. O importante, neste caso, é tomar cuidado de quão distante no histórico este mecanismo pode atuar de forma a não afetar o dado atual (LOWRY, 2003).

A perda de dados pode ser causada por muitos fatores, como falta de energia, por exemplo. Quando o sistema não consegue mais utilizar o histórico para preencher as lacunas de informações que ainda não chegaram, então o sistema sinaliza que aquela informação não está mais disponível. Outros problemas podem comprometer a qualidade dos dados, como por exemplo, falhas e ruídos nos meios de comunicação, falhas não detectadas nos instrumentos

de medições, resolução insuficiente do medidor, entre outros. A maioria das inconsistências nos dados pode ser encontrada e os dados podem ser tratados para um formato em que possa ser utilizado pelos modelos hidráulicos (LOWRY, 2003).

2.2. Modelos de escoamento de petróleo

Antes de entender como funcionam os modelos de escoamento de petróleo é interessante observar a definição deste termo, o qual pode ser aplicado a um fluido genérico constituído de óleos (de várias naturezas), água, vapor, gases e partículas sólidas, podendo conter milhares de componentes químicos e estar nos três estados clássicos da matéria (sólido, líquido e gasoso). Os estudiosos, muito frequentemente, especificam o escopo para o qual o modelo irá funcionar, cujo uso, geralmente, não pode ser generalizado para outros contextos, como pode ser observado a seguir.

Fluxos com mais de um componente, imiscíveis entre si, possuem muitas aplicações em diversos tipos de processos industriais e particularmente na indústria do petróleo, onde o óleo e água são frequentemente produzidos e transportados juntos. Contudo, apesar de sua importância, este tipo de fluxo foi menos explorado do que o fluxo com mais de uma fase (gás-líquido). Como resultado disso, a maioria das teorias para o estudo do gradiente de pressão que é usada para o fluxo líquido-líquido (miscíveis) foi desenvolvida a partir dos modelos criados para o fluxo gás-líquido (não há uma única teoria válida para os dois temas simultaneamente, LOVICK et al., 2000) através de duas abordagens: (1) puramente empíricos e (2) considerando os padrões de escoamento específicos (ANGELI & HEWITT, 1998).

Para baixas velocidades, no fluxo bifásico (dois fluidos imiscíveis), o padrão de fluxo que geralmente se estabelece é o estratificado, com o fluxo menos denso escoando sobre o mais denso. Enquanto que o padrão de fluxo em que os dois fluidos estão totalmente dispersos um no outro se estabelece em altas velocidades. Entre um e outro há várias etapas de padrões, passando por dispersão de água em óleo e de óleo em água (OLIVEIRA & CARVALHO, 1998), *dual contínuos flow* (LOVICK & ANGELI, 2004), anular (PRADA & BANNWART, 2001), estratificado com mescla na interface, com bolhas, mesclado, dispersão de água em óleo e de óleo em água, estratificado com bolhas na interface, entre outros (MARCHENA & ORTEGA, sem data).

Além da velocidade do escoamento e do diâmetro interno do duto, a diferença entre as massas específicas dos fluidos, a viscosidade do petróleo e as propriedades “molhadas” da parede interna da tubulação também influenciam na determinação do padrão de escoamento que irá ocorrer (ANGELI & HEWITT, 2000). Um trabalho recente, de FARAH et al. (2005), mostra correlações entre medidas de viscosidade de emulsões e a temperatura e a fração de cada termo da mistura, para determinadas circunstâncias de laboratório.

NADLER & MEWES (1997) dizem, baseados em vários trabalhos correlatos, que o gradiente de pressão em um duto com dois fluidos imiscíveis depende fortemente do regime de fluxo e da sua distribuição na seção. Quando há gás, a interação entre as fases tem maior efeito do que a própria influência da rugosidade da tubulação. Mas tornar a previsão do gradiente em função dos padrões de escoamento pode não ser útil, já que não há como prever o comportamento da mistura dentro das tubulações em campo (GARCIA et al., 2003).

PICKERING et al. (sem data) afirmaram em seu artigo que a modelagem do fluxo multifásico, largamente fundamentada em formulações baseadas em dados advindos de experimentos com tubulações de pequenos diâmetros (tipicamente abaixo de 50 mm), é extremamente duvidosa se extrapolada para diâmetros maiores, pois é muito provável que as características do fluxo multifásico, nos dois casos, são notoriamente diferentes. Todos os trabalhos listados por LOVICK & ANGELI (2004) confirmam o uso de diâmetros até 100 mm neste campo de pesquisa.

NADLER & MEWES (1997), BRAUNER et al. (1998), HONG-BO et al. (2004) e KHODABANDEH (2005) também utilizaram tubulações com diâmetros pequenos em seus experimentos para determinar a distribuição da velocidade ou a forma da interface ou a queda de pressão, em um fluxo bifásico. E ODDIE et al. (2003) apesar de utilizar um duto de 150 mm, o mesmo tinha 11 m de comprimento! BONIZZI & ISSA (2003) apresentaram um modelo matemático para fluxo trifásico (líquido-líquido-gás) em tubulações horizontais de pequenos diâmetros para prever os padrões de escoamento, o gradiente de pressão e o *hold-up* (volume de líquido em um volume de controle) total de líquido.

Os trabalhos mostrados nos parágrafos anteriores corroboram com a afirmação de PICKERING et al. (sem data), de que as formulações encontradas em laboratório não devem ser aplicadas em campo, por causa da diferença de escala entre os dois contextos. TERNYIK et al. (1995a) afirmaram que o problema de prever o gradiente de pressão, na indústria de

petróleo, é um problema antigo e que foram desenvolvidas muitas correlações empíricas, algumas muito boas, mas que, em geral, com aplicabilidade questionável.

Em seus dois artigos, TERNYIK et al. (1995a e 1995b) apresentaram o uso de Redes Neurais Artificiais (RNA) para determinar a queda de pressão, o *hold-up* e os padrões de escoamento em um duto. Para prever a queda de pressão, utilizaram como entrada para a RNA, comprimento e diâmetro do duto, temperaturas de entrada e saída, razões entre as massas dos fluidos, massas específicas, pressão de entrada e ângulo de inclinação do duto. Para prever o *hold-up* utilizaram o ângulo de inclinação do duto, razões entre as massas dos fluidos, peso específico do óleo, pressões de entrada e saída, temperatura de entrada e quatro dados binários do modelo de Kohonen². E para classificar os padrões de escoamento, eles utilizaram as razões entre as massas dos fluidos, pressões de entrada e saída, pesos específicos, temperatura média, ângulo de inclinação do duto e o *hold-up*.

A previsão do gradiente de pressão em um sistema com fluxo multifásico é um problema muito complexo. Devido aos muitos padrões de escoamento com diferentes geometria e mecanismos, todas as forças que atuam no fluxo podem variar em magnitude, some-se a isso a dificuldade de determinar as propriedades dos fluidos, como a massa específica e a viscosidade, as perdas por fricção da mistura multifásica e a distribuição de velocidades. Portanto, um modelo genérico que represente todas as condições de inclinação dos dutos e mistura de fluidos não foi ainda desenvolvido (TERNYIK et al., 1995a).

O leitor vai observar, ao longo deste trabalho, que o caso de estudo se refere a uma rede de escoamento em que a água e o gás são separados antes do petróleo ser escoado, e que este escoamento é considerado monofásico. Assim, nenhum modelo acima foi utilizado em substituição ao modelo clássico de escoamento de água para representar o escoamento de petróleo, salvo alguns ajustes.

2.3. Calibração de modelos hidráulicos

Os modelos matemáticos hidráulicos são compostos por funções que sofreram alguma simplificação ou aproximação devido às considerações tomadas durante suas formulações, tornando-os uma simples representação matemática de um fenômeno ou processo real, bem

² TERNYIK et al. (1995b) não apresentaram referências com relação a este termo.

mais complexo. IZQUIERDO et al. (2004) afirmaram que a incerteza é uma propriedade inerente à modelagem e que advém de uma combinação da incerteza nos dados de entrada, na estrutura e nos parâmetros deste modelo, acrescentando-se, nas simulações, a incerteza nas condições iniciais e de contorno.

A precisão de um modelo hidráulico depende da qualidade de seu ajuste, então este processo, chamado de calibração, deve ser sempre realizado antes de o modelo ser utilizado, em dois passos (WALSKI, 1983 e WALSKI et al., 2003): o primeiro consiste na comparação das variáveis de estado (vazões e pressões) simuladas com as observadas, para condições operacionais conhecidas, e o segundo, consiste no ajuste dos parâmetros do modelo para minimizar as diferenças entre estas variáveis. Enquanto que ORMSBEE & LINGIREDDY (1997) afirmaram que este processo pode ser dividido em sete etapas: (1) identificação do uso do modelo, (2) determinação das estimativas iniciais dos parâmetros de entrada, (3) coleta dos dados, (4) avaliação dos resultados, (5) desenvolvimento da macrocalibração, (6) desenvolvimento de uma análise de sensibilidades e (7) desenvolvimento da microcalibração.

O processo de calibração é uma operação necessária e importante por três razões: (1) demonstra a habilidade do modelo em reproduzir condições reais, aumentando a confiança do modelo na previsão de comportamentos futuros, (2) familiariza o usuário do modelo com o comportamento do sistema real pelas alterações dos diferentes componentes e (3) auxilia no preenchimento das informações faltosas ou perdidas do sistema (HERRIN, 1997).

Desde os primeiros trabalhos sobre o tema da calibração de redes hidráulicas (de distribuição de água), como os de SHAMIR & HOWARD (1977) apud CHEUNG (2001), de WALSKI (1983 e 1986), CESÁRIO & DAVIS (1984) e BHAVE (1988) que a rugosidade dos trechos (dutos) é o parâmetro mais utilizado para realizar o ajuste dos modelos, seguido pela demanda nos nós (entroncamentos). Estabeleceram parâmetros para avaliação da qualidade da calibração, definiram onde e como captar os dados em campo e quais os cuidados que se devem tomar durante os ensaios para gerá-los, de forma a garantir, também, que cubram o máximo de condições operacionais possíveis.

O processo de calibração pode ser abordado de três formas (WALSKI et al., 2003):

1. através de procedimentos iterativos, no qual os parâmetros do modelo são ajustados iterativamente usando comparações entre as variáveis de estado medidas e calculadas. Os principais trabalhos foram de WALSKI (1983 e 1986) e BHAVE (1988);

2. através do método explícito, também chamado de analítico ou direto, no qual os parâmetros são ajustados em função da resolução numérica de um sistema de equações que descrevem o comportamento hidráulico da rede. O número de parâmetros a ser calibrado é limitado pelo número de medidas disponíveis, quando isto não acontece, o número de parâmetros é reduzido através do zoneamento. Os principais trabalhos foram de ORMSBEE & WOOD (1986a e 1986b) e BOULOS & WOOD (1990);
3. através do método implícito, ou inverso, os parâmetros são ajustados através da minimização dos desvios entre os valores simulados e observados. Os pioneiros são ORMSBEE (1989), DATTA & SRIDHARAN (1994), LIGGETT & CHEN (1994) e GRECO & DEL GIUDICE (1999).

Vários estudiosos propuseram abordagens diferenciadas ou incluíram nas abordagens tradicionais outros aspectos, como nos trabalhos listados adiante: LANSEY et al. (2001) propuseram um método heurístico que considera as incertezas na medição e estimativa de dados e mensura a qualidade da calibração. BUSH & UBER (1998) adotaram uma amostragem estatística para garantir a qualidade dos modelos de calibração. CHEUNG et al. (2000) propuseram um método iterativo baseado nos trabalhos clássicos dessa abordagem. BASCIA & TUCCIARELLI (2003) aplicaram um zoneamento nas redes de escoamento para facilitar a calibração do modelo. SOARES et al. (2003), SILVA (2003), SOARES (2003) e SILVA et al. (2004) incluíram a formulação de vazamentos em redes de água no processo de calibração. ARAÚJO & CHAUDHRY (2004) e SILVA & REIS (2002) realizaram calibração de redes utilizando dados de transientes.

Os últimos trabalhos de calibração de redes de água mostram uma tendência pelo uso do método implícito (inverso) com utilização de métodos de busca de soluções, especialmente com o uso de algoritmos genéticos (SILVA & REIS, 2002), (SOARES et al., 2003), (ARAÚJO & CHAUDHRY, 2004), (RIGHETTO, 2001), (LINGIREDDY & ORMSBEE, 2002), (SOARES, 2003), (SILVA & REIS, 2002) e (SILVA et al., 2004).

Há diversas dificuldades envolvidas com o processo de calibração, tais como: (1) a representação do sistema físico real e a identificação dos parâmetros a serem calibrados, (2) a identificação dos locais de medição de dados mais adequados, (3) a coleta de dados e análise de consistência destas informações, (4) a formulação do problema de calibração, (5) a escolha da técnica de otimização mais adequada aos propósitos da calibração e (6) a calibração propriamente dita (SILVA, 2003).

A *American Water Works Association* – AWWA (1999) cita várias fontes de erros que provocam diferenças entre as medidas em campo e os resultados apresentados pelos modelos hidráulicos. São elas: (1) erros nos dados de entrada, geralmente nos dados topográficos e nas medidas, (2) rugosidade interna da tubulação, pois várias combinações de rugosidades dos trechos podem resultar nas mesmas perdas de carga, (3) nas redes de distribuição de água, o desconhecimento das verdadeiras demandas, (4) erros nos mapas dos sistemas, (5) diferença nas cotas dos medidores e da superfície, (6) período de amostragem dos dados, um período muito longo pode esconder informações importantes, (7) detalhamento da rede, a simplificação da rede (*skeletalization*) pode esconder informações importantes, (8) anomalias geométricas na rede, (9) curvas características das bombas desatualizadas e (10) baixa densidade de equipamentos de medição.

3. Caso de estudo

3.1. A rede de escoamento

A rede de escoamento destacada em cinza na Figura 1, que inclui as estações de coleta e transferência de petróleo Riacho da Forquilha (RFQ), Leste Poço Xavier (LPX), Lorena (LOR) e Upanema (UPN), faz parte de uma rede muito maior localizada na região oeste do estado do Rio Grande do Norte, cuja participação na produção total de petróleo no país (marítima e terrestre) é, atualmente, de 3,8 % (Agência Nacional do Petróleo – ANP, 2006).

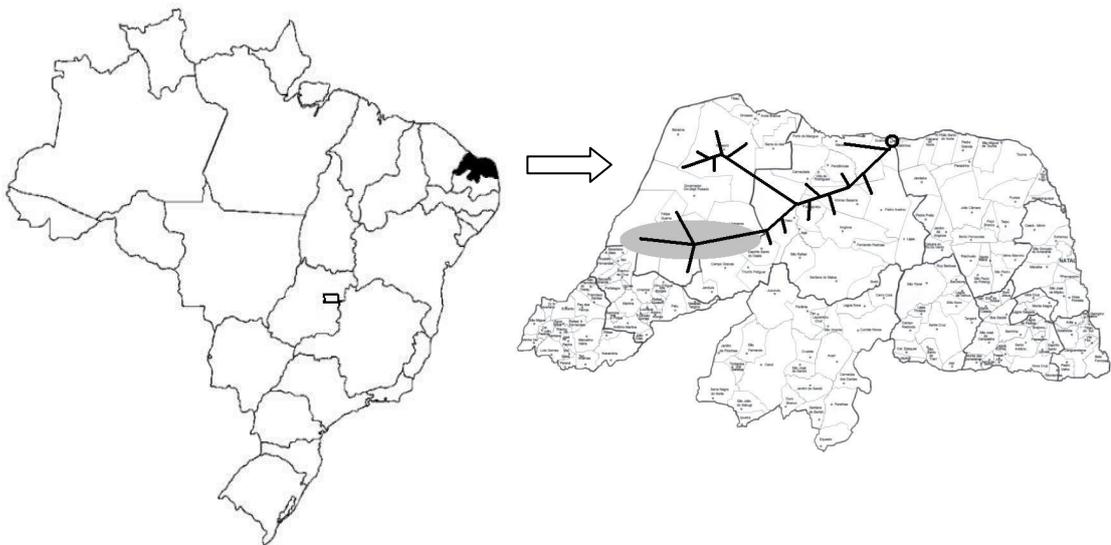


Figura 1 - Localização geográfica da rede de escoamento terrestre de petróleo.

A produção terrestre de petróleo no Rio Grande do Norte corresponde, hoje, a 30,7 % da produção terrestre no Brasil, cuja participação no total produzido no país é de 12,6 %. O Gráfico 1 mostra a evolução da produção terrestre no Brasil (BR) e no Rio Grande do Norte (RN) relativo à produção total no país e a evolução da produção terrestre nesse estado em relação à produção terrestre nacional, para os últimos anos (ANP, 2006).

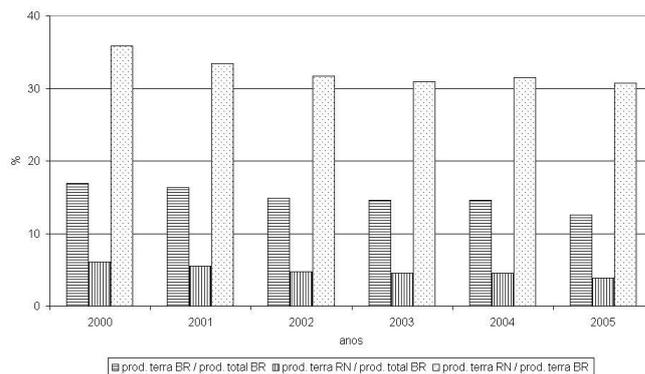


Gráfico 1 - Produção de petróleo no Rio Grande do Norte.

A malha piloto, definida assim por se tratar de uma parte da rede de escoamento escolhida para fornecer informações para o presente trabalho, é composta de quatro estações de coleta e de transferência de petróleo. Do ponto de vista do fluxo na malha, há três estações produtoras, ou seja, que fornecem fluido à malha (RFQ, LPX e LOR) e há uma estação receptora, ou seja, que recebe todo o fluido da malha (UPN), como mostra a (Figura 2).

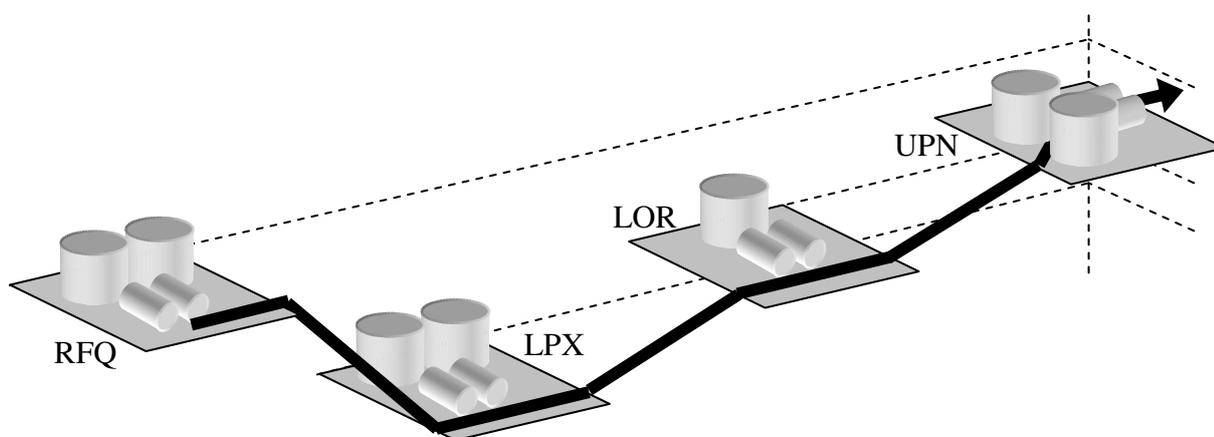


Figura 2 - Esquema da malha calibrada.

A malha piloto foi escolhida por se tratar de uma rede relativamente bem instrumentada em relação ao restante da rede de escoamento e por escoar praticamente só petróleo (contendo volumes desprezíveis de água e/ou gás). Esta última característica é importante porque delimita o grau de complexidade do problema a ser estudado, pois como este trabalho se constitui em um estudo preliminar sobre a calibração de modelos deste tipo de rede de escoamento de petróleo, então é boa prática começar pelo problema mais simples

encontrado em campo. Portanto, este estudo não abordará as redes que escoam petróleo com água e/ou gás simultaneamente.

A água e o gás que chegam às estações produtoras da malha piloto, dos campos de petróleo ou de outras estações menores instaladas a montante, são separados e seguem por outras redes de escoamento. O petróleo é bombeado e escoam para a estação receptora UPN, de onde segue pelo restante da rede de escoamento, misturando-se com os petróleos transferidos por outras estações até a estação final localizada próxima ao litoral norte do estado (Figura 1).

Apesar das estações de coleta e transferência de toda a rede de escoamento possuírem portes bastante diferenciados, elas apresentam o mesmo esquema (*lay-out*), como mostra a Figura 3. O fluido, quando chega à estação, segue para um tanque receptor chamado de “tanque de drenagem ou de lavagem”, no qual se faz a separação da água e/ou do gás. Deste tanque, o óleo é geralmente bombeado para outro(s) chamado(s) de “tanque(s) de transferência(s)”. O conjunto de bombas “de transferência”, auxiliado pelo conjunto de “*boosters*”, o qual garante uma pressão mínima na sucção do primeiro conjunto, bombeia o petróleo para a rede. Em algumas estações a água não é separada e segue pela mesma rede junto com o petróleo.

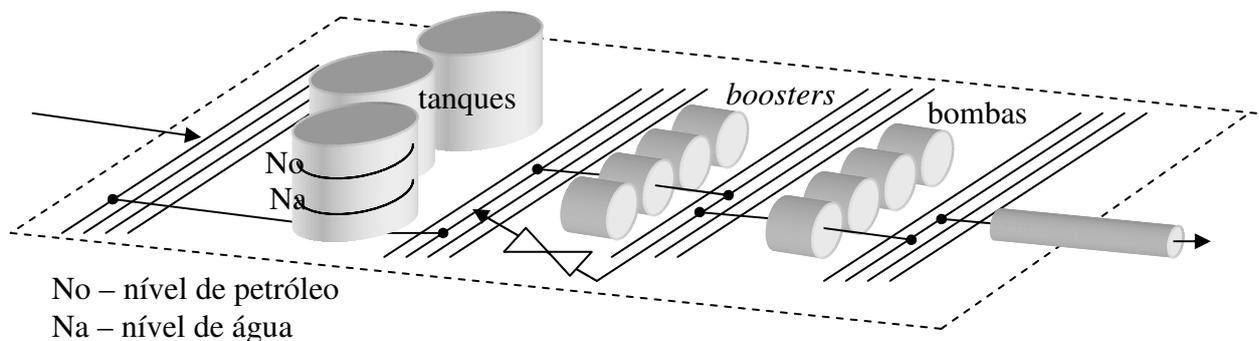


Figura 3 - Esquema interno de uma estação.

A maioria das estações da malha piloto possui dois tanques e duas bombas de transferência. Na estação LPX, estes tanques estão equalizados, ou seja, funcionam como um só através do princípio dos vasos comunicantes, e podem receber e transferir fluido simultaneamente, assim como o tanque em LOR. Em RFQ e UPN, os dois tanques recebem e

transferem fluido alternadamente. Não há *boosters* e as bombas são rotativas de deslocamento positivo do tipo que utiliza parafuso como rotor.

A operação das bombas é realizada de forma independente entre as estações, pois, normalmente, seus acionamentos e desligamentos automáticos estão relacionados aos níveis de controle (máximos e mínimos) nos tanques, dentro de cada estação, sob monitoramento contínuo. Caso haja alguma programação de acionamentos atípica ou alarme, a operação passa a ser feita manualmente, após acordo entre os operadores de todas as estações ou através de ações pré-definidas, sugeridas pelos programas de segurança ou adquiridas pela experiência, para contornar as circunstâncias indesejadas.

3.2. O petróleo

O petróleo consiste em uma mistura não homogênea de fluidos, em especial formados por átomos de carbono e hidrogênio (podendo conter milhares de componentes químicos), e partículas que, dependendo da pressão e da temperatura (que podem ser alteradas artificialmente através das técnicas de extração) do campo produtor onde se encontra e do tamanho de suas cadeias moleculares, pode surgir com o gás livre ou dissolvido da/na fase líquida. Entende-se por fase líquida a mistura de petróleo com água.

Uma característica marcante das redes de escoamento de petróleo é que o fluido escoar de várias origens para um único destino, ao contrário do que normalmente ocorre com relação à topologia das redes de escoamento (distribuição) de água. Assim, os fluidos produzidos por vários campos vão sendo misturados ao longo da rede, nos tanques e nos entroncamentos das tubulações, até o seu destino final. Como as propriedades do petróleo variam de campo para campo, e até mesmo em um mesmo campo ao longo do tempo, é de se esperar que, ao longo da rede, haja também uma variação de suas propriedades físicas e químicas.

As propriedades do fluido que influenciam o comportamento hidráulico da rede de escoamento são a massa específica, a viscosidade absoluta, a temperatura (já que as duas anteriores variam em função desta), e no caso do petróleo, incluem-se o BSW (*Basic Sediments and Water*), parâmetro que representa a razão entre o volume de líquido que não é petróleo e o volume de controle, e o RGO (razão gás-óleo), parâmetro que representa a razão entre o volume de gás e o volume de controle.

Estas duas últimas propriedades estão envolvidas com a definição de fluxo multifásico, o qual é utilizado tanto para se referir ao fluxo de um fluido com mais de um componente (imiscíveis) ou com mais de uma fase (líquido e gasoso). Na malha piloto, tanto o gás como a água que chegam às estações produtoras são separados do petróleo, até valores máximos aceitáveis, e seguem por redes diferentes. Assim, pode-se considerar que o BSW e o RGO são tais que o fluxo na rede de estudo pode ser considerado monofásico.

A previsão do gradiente de pressão em um sistema com fluxo multifásico é um problema complicado, devido aos muitos padrões de escoamento com diferentes geometrias e mecanismos, e todas as forças que atuam no fluxo poderiam variar em magnitude. Some-se a isso a dificuldade de determinar as propriedades dos fluidos, como a massa específica e a viscosidade, as perdas por fricção da mistura multifásica e a distribuição de velocidades. Portanto, um modelo genérico que represente todas as condições de inclinação dos dutos e mistura de fluidos não foi ainda desenvolvido (TERNYIK et al., 1995a).

O fato da frequência de análises físico-químicas dos fluidos produzidos nos campos de petróleo ser tão baixa indica que:

1. ou as variações das propriedades dos fluidos não são significantes para os objetivos destas análises, pelos menos, até quando novos objetivos que requeiram frequências maiores não forem acrescentados;
2. ou as variações não são tão significantes entre duas análises (mais uma vez, para os objetivos correntes até então);
3. ou as variações verificadas em campo perdem seu valor devido à separação do gás e da água, ao envelhecimento do petróleo quando em repouso (RAMALHO, 2000), à adição de produtos químicos (para facilitar o escoamento), à mistura com os petróleos provenientes de outros campos ao longo da rede e à influência da temperatura ambiente (TOPALLAR & BAYRAK, 1998).

As únicas informações que são continuamente verificadas do fluido bombeado são o BSW e o RGO, devido ao controle gerencial realizado nesta rede, que requer o bombeio de um petróleo com BSW e RGO o mais próximo de zero, ou seja, com o mínimo de água e gás. A temperatura, a massa específica e a viscosidade cinemática são verificadas com baixíssima frequência tanto na malha quanto no poço. Os ensaios dos óleos bombeados descritos na Tabela 1 da página 26 foram realizados a pedido do autor e se constituem em uma exceção. Assim, pode-se afirmar que o fluido em qualquer recanto da malha piloto na maior parte do

tempo é, com relação às propriedades temperatura, massa específica e viscosidade cinemática, desconhecido, e a mensuração de sua influência no comportamento das bombas, dos dutos e de alguns instrumentos de medição não é factível.

Diante desta constatação, a calibração do modelo de simulação hidráulica foi concebida de forma a ser a mais independente possível das informações dos fluidos escoados, contando praticamente só com os dados da instrumentação existente. O leitor irá perceber que a única informação do fluido utilizada para o cálculo da perda de pressão foi a massa específica. E como não há medição distribuída e em tempo real desta propriedade, consideraram-se os valores, descritos na Tabela 1 da página 26, válidos para todo o período de dados utilizado para a calibração e validação.

3.3. A instrumentação

As informações colhidas, a partir dos medidores instalados em campo, para formar o banco de dados utilizados para a calibração da malha piloto consiste na reunião das medições dos níveis dos tanques, dos estados das bombas e das vazões e cotas piezométricas nas saídas das estações RFQ, LPX e LOR e de chegada na estação UPN, localizados como indica a Figura 4.

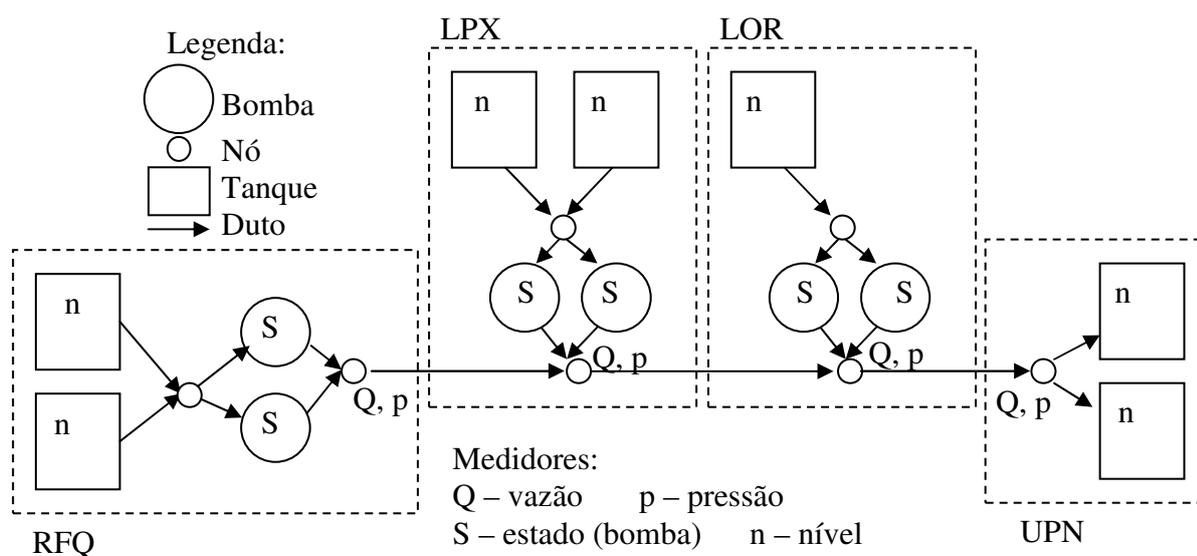


Figura 4 - Esquema da instrumentação existente na malha piloto.

3.3.1. Medição de nível

A medição de nível é definida como a determinação da posição de uma interface entre dois meios, sendo que, normalmente, um destes meios é líquido. Existe uma grande variedade de sistemas de medição de nível, cada um com suas vantagens e limitações, classificados em instrumentos de medida direta e inferencial. A seleção do sistema de medição a ser utilizado deverá considerar as características específicas da aplicação, o tipo de produto, a existência de ondas, deposições ou espuma, a possibilidade de entupimento, a precisão desejada, a faixa de medição, a confiabilidade, custos (de instalação, de manutenção, de calibração, de operação e provocados por panes) e demais restrições existentes (BEGA, 2006b).

Há vários dispositivos (ou métodos) para medição de nível: visor, bóia, pressão diferencial, borbulhamento, deslocador, radiação nuclear, ultra-sônico, capacitivo, laser e radar (tipo utilizado na malha piloto, Figura 5). Este dispositivo é instalado no topo do tanque e emite ondas eletromagnéticas, as quais são refletidas ao incidir, perpendicularmente, sobre a superfície do petróleo. Este sinal refletido é captado pela própria antena emissora e é convertido no valor desejado de nível.

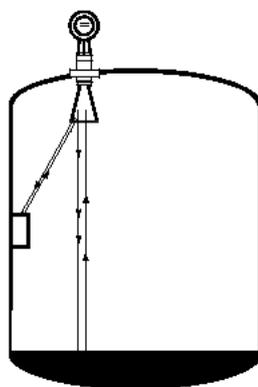


Figura 5 - Medidor de nível tipo radar.

3.3.2. Medição de pressão

A pressão é definida como sendo a ação de uma força contra uma outra oposta à primeira. Os elementos ou dispositivos mecânicos para medição de pressão se dividem em dois grupos básicos: os que permitem medição direta e indireta. Neste segundo grupo, estão aqueles medidores que utilizam dispositivos (diafragma, fole, tubo Bourbon, espiral,

helicoidal, etc.) que se deformam em função da pressão exercida sobre eles pelo fluido que está sendo medido (BEGA, 2006a).

Estes dispositivos, utilizados na medição indireta, baseiam seu funcionamento na Lei de Hooke, cujo enunciado diz: “Dentro de um limite definido de elasticidade, a deformação provocada em um corpo sólido é proporcional ao esforço aplicado sobre ele”. A Figura 6 mostra um medidor de pressão utilizando diafragma, tipo utilizado na malha piloto.

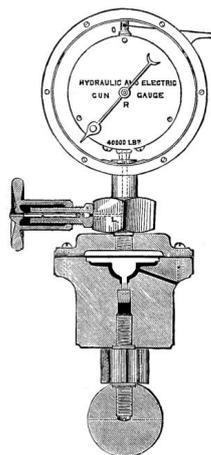


Figura 6 - Medidor de pressão com diafragma.

3.3.3. Medição de vazão

A vazão é definida como a quantidade de fluido que passa por uma seção transversal de um duto por unidade de tempo. A maioria dos medidores de vazão é prevista para a medição de fluidos homogêneos e em uma única fase. Geralmente, a medição é feita aproveitando o efeito da interação entre o fluido e o medidor. Assim, as propriedades dos fluidos precisam ser conhecidas, seja para entender o princípio de funcionamento do medidor, seja para justificar os limites de sua aplicação. A quantidade de fluido pode ser medida em volume ou em massa (DELMÉE, 2006).

Na malha piloto, há três tipos de medidores de vazão instalados. O primeiro deles é o medidor tipo turbina (instalado em RFQ), o qual possui um princípio de funcionamento bastante simples: o rotor, provido de palhetas, é posto a girar quando há vazão, e um sistema mecânico ou eletrônico detecta a rotação e a converte no valor desejado de vazão. As turbinas são medidores bastante precisos, porém sua precisão é influenciada pelo aumento da viscosidade do fluido escoado. Necessita de trechos retilíneos e horizontais para sua

instalação e de um sentido fixo de fluxo. A Figura 7 mostra um exemplar de medidor de vazão com o uso de uma turbina.

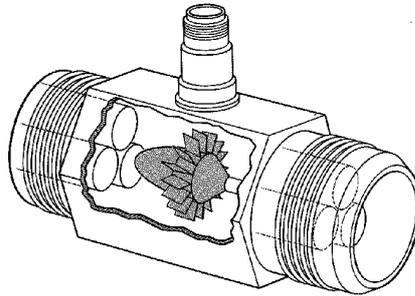


Figura 7 - Medidor de vazão tipo turbina.

O segundo tipo utiliza rotores construídos com engrenagens ovais (instalado em LPX) (Figura 8). Seu princípio de funcionamento também é bastante simples: o medidor separa o líquido em volumes conhecidos, transporta-os de sua entrada para a saída, conta-os e os totaliza. Na realidade este tipo de medidor é um totalizador de volumes, os quais são calculados através do número de rotações que ocorreram no intervalo de tempo considerado, que depois podem ser convertidos para vazão. Durante sua construção, procura-se minimizar as fugas e atrito entre as engrenagens e a carcaça.

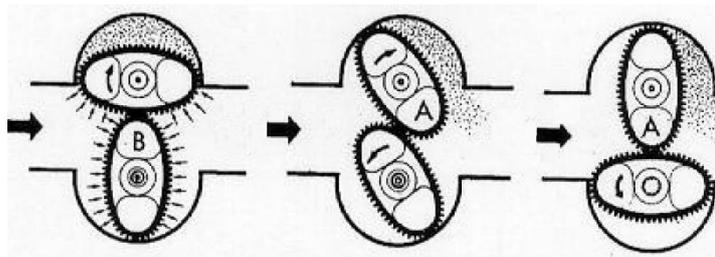


Figura 8 - Medidor de vazão tipo engrenagens ovais (DELMÉE, 2006).

Este tipo de medidor é preciso e robusto, desde que não possua folgas, nem desgastes das peças móveis. É imune às variações de viscosidade e não necessita de grandes trechos retos antes de sua montagem, por medir volume e não vazão, mas só pode medir fluidos limpos e lubrificantes. Sua precisão é pouco afetada pela turbulência, mas apresenta alta perda de carga e pode se danificar quando mede altas velocidades. Deve-se evitar seu uso para

fluidos abrasivos, sujos, corrosivos e que deixam rastro, lodo, resíduos, e sujeiras nas peças em contato com o processo (DELMÉE, 2006).

O terceiro tipo de medidor de vazão, instalado na malha piloto (em LOR e na chegada em UPN), é o ultra-sônico com verificação do tempo médio de trânsito (Figura 9). Este tipo de medidor cria uma frequência que é transmitida para o fluido em movimento. Quando a onda viaja contra a vazão, a sua velocidade é levemente diminuída e quando viaja a favor, a sua velocidade é levemente aumentada. A diferença no tempo de trânsito das ondas, a favor e contrária à vazão, é proporcional a vazão do fluido.

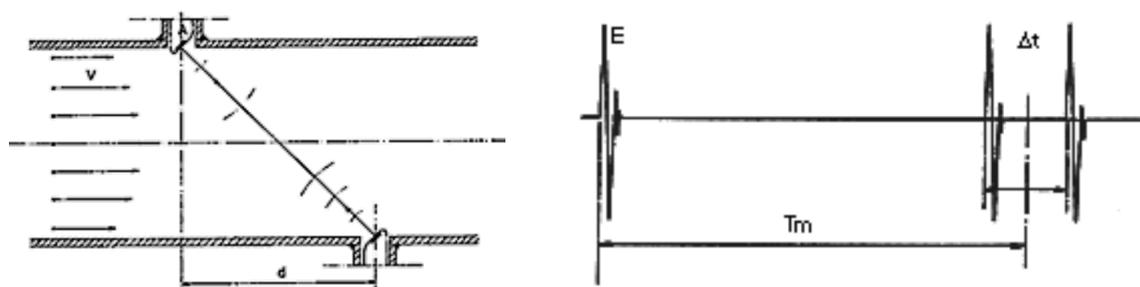


Figura 9 - Medidor de vazão tipo ultra-sônico.

Este medidor é dependente do perfil de velocidades do fluido, que deve ser estável. Por este motivo, são necessários trechos retos de tubulação para eliminar a distorção e os redemoinhos, os quais podem espalhar as ondas de ultra-som, causando dificuldades na medição. As variações da temperatura do processo podem alterar a velocidade do som no fluido, piorando o desempenho do medidor (DELMÉE, 2006).

3.4. Obtenção dos dados

Os dados reunidos sobre a rede de escoamento podem ser separados nos grupos:

1. aqueles referentes às informações invariáveis da malha (dados físicos), como diâmetros, cotas, etc.;
2. aqueles referentes às variáveis de estado do sistema (medições de campo), como pressões, vazões e níveis;
3. aqueles referentes às análises realizadas nas amostras de petróleo.

No apêndice A, é apresentada a curva característica das bombas volumétricas encontradas no catálogo do fabricante, instaladas nas estações RFQ e LPX, enquanto que no apêndice B, encontra-se a curva do catálogo para as bombas instaladas em LOR. E nos Quadros 1 a 4, encontram-se os dados físicos dos dutos, das bombas, dos tanques e das estações da malha piloto.

Quadro 1 - Dados físicos dos dutos.

Trecho	RFQ-LPX	LPX-LOR	LOR-UPN
Duto	D1	D2	D3
Comprimento [Km]	14,000	17,000	28,000
Diâmetro interno [mm]	154,000	261,880	261,880
Rugosidade [mm]	desconhecida	desconhecida	desconhecida
Especificação do material	API 5L GR.B	API 5L X60	API 5L X60
Classe de pressão [libras]	600,000	300,000	300,000
Fabricantes	Confab e Manesmann Demag		

Fonte: PETROBRAS/UN-RNCE.

Quadro 2 - Dados físicos das bombas.

Estação	RFQ	LPX	LOR
Bomba	B1 e B2	B3 e B4	B5 e B6
Tipo	Rotativa	Rotativa	Rotativa
Marca	Netzsch	Netzsch	Netzsch
Modelo	8N100	8N100	2N89
Vazão nominal [m ³ /h]	50,000	50,000	50,000

Bombas em UPN não fazem parte do estudo.

Quadro 3 - Dados físicos dos tanques.

Estação	RFQ	LPX	LOR	UPN
Tanque	T1 e T2	T3 e T4	T5	T6 e T7
Diâmetro [m]	7,637	5,000	7,637	11,000
Área [m ²]	45,807	19,635	45,807	95,033
Altura [m]	7,612	8,200	7,310	9,112

Quadro 4 - Dados físicos das estações.

Estação	RFQ	LPX	LOR	UPN
Cota [m]	89,000	54,500	79,500	83,500

Na Tabela 1, estão relacionados os valores encontrados, para a massa específica, a viscosidade cinemática, a temperatura e o BSW das amostras retiradas, a pedido do autor, quando dos momentos de transferência de petróleo das estações produtoras para a receptora nas datas indicadas. Verifica-se que os petróleos possuem propriedades diferentes de uma estação para a outra e, dentro de uma mesma estação, variam ao longo do tempo.

Tabela 1 - Amostras de petróleo da transferência.

amostra	data e hora	estação	ρ	ν [cP]			T	BSW	ver apêndice
			kg/m ³	40°C	45°C	50°C	°C	%	
1	22/11/05 15:15	LOR	859,500	12,000	10,300	9,200	37,000	1,200	C
2	28/12/05 10:00	LPX	828,800	10,000	9,000	8,100	24,000	4,000	D
3	02/01/06 10:00	LOR	831,600	10,900	10,300	9,800	40,000	1,200	E
4	02/01/06 10:00	RFQ	833,200	10,600	10,100	9,600	40,000	0,200	F
5	04/01/06 10:00	RFQ	802,000	15,700	13,600	12,200	36,000	0,800	G

ρ : massa específica; ν : viscosidade cinemática; T: temperatura.

Na Tabela 2, estão listados os valores encontrados, para a massa específica, a viscosidade cinemática, a temperatura e o BSW das amostras retiradas dos petróleos produzidos nos campos que fornecem fluido à malha piloto nas datas indicadas. Verifica-se que os petróleos possuem propriedades bastante diferentes de um campo para o outro.

Tabela 2 - Amostras de petróleo dos campos produtores.

amostra	data	campo	ρ	ν [cP] a T [°C]			BSW
			kg/m ³	ν 1 a T1	ν 2 a T2	ν 3 a T3	%
1	22/11/2005	LOR	859,500	12,00 a 30,0	10,30 a 40,0	9,15 a 50,0	1,200
2	02/06/2004	BAL	842,000	21,40 a 37,8	13,70 a 47,8	12,00 a 57,5	0,500
3	06/05/2004	BE	931,500	221,70 a 43,5	151,80 a 50,0	101,00 a 58,0	2,400
4	01/03/2004	FMQ	854,100	35,40 a 31,8	12,00 a 37,8	9,80 a 40,0	0,700
5	09/02/2004	JZ	836,900	8,80 a 31,0	7,70 a 37,8	7,10 a 41,4	0,300
6	28/01/2004	PX	815,400	5,34 a 30,0	3,73 a 40,0	3,41 a 50,0	2,000
7	28/01/2004	LPX	825,800	7,83 a 30,0	4,57 a 40,0	3,64 a 50,0	0,500
8	01/01/2004	TM	860,300	30,00 a 32,0	21,00 a 37,8	17,30 a 41,5	0,100
9	17/02/2004	RFQ	841,000	3,10 a 33,8	10,10 a 37,8	7,80 a 43,8	0,500
10	28/01/2004	VR/BR	875,600	31,30 a 30,0	20,20 a 40,4	14,40 a 50,0	0,000
11	09/02/2004	LV	833,700	6,60 a 33,3	6,30 a 37,8	5,30 a 40,3	0,000

ρ : massa específica a 20°C; ν : viscosidade cinemática; T: temperatura; BAL: Baixa do Algodão; BE: Boa Esperança; FMQ: Fazenda Malaquias; JZ: Juazeirinho; PX: Poço Xavier; TM: Três Marias; VR/BR: Várzea Redonda/Brejinho e LV: Livramento.

Na Tabela 3, encontram-se os valores médios diários das medições de BSW, realizadas nas amostras retiradas dos petróleos bombeados. Pode-se notar que para as estações LOR e RFQ o valor do BSW quase sempre está abaixo dos 5% e para a estação LPX abaixo dos 10%. Como o controle é manual, pode ocorrer de o fluido escoar com BSW acima dos padrões desejados.

Tabela 3 - BSW de fluidos transferidos.

Dia	Outubro de 2005			Novembro de 2005		
	RFQ	LPX	LOR	RFQ	LPX	LOR
1	0,6	10,0	1,2	0,3	9,0	1,7
2	1,1	7,3	2,2	0,4	9,5	1,5
3	4,0	8,7	2,3	1,3	9,3	1,3
4	0,6	8,3	1,6	1,1	7,3	1,2
5	0,8	7,7	4,8	0,8	8,7	1,0
6	0,8	9,3	2,7	1,1	7,7	1,1
7	0,9	8,7	3,6	0,8	6,7	1,5
8	0,5	10,7	3,5	0,4	5,8	1,0
9	1,1	10,0	2,8	1,1	6,1	1,1
10	0,8	11,0	2,8	1,1	7,7	1,0
11	0,8	8,7	9,0	8,7	5,5	1,1
12	1,4	8,7	4,1	1,4	4,9	0,9
13	0,7	5,3	1,5	0,6	5,5	1,3
14	7,6	8,7	2,2	2,8	5,7	0,7
15	2,6	8,3	3,5	0,4	6,0	0,9
16	20,8	9,3	1,6	0,2	7,5	1,0
17	0,9	8,3	4,0	0,3	6,5	1,4
18	2,6	8,0	1,9	0,2	9,0	1,2
19	1,3	6,3	0,8	0,3	7,3	0,9
20	0,8	5,8	0,5	0,2	5,9	0,7
21	0,9	6,1	1,6	0,2	5,9	1,2
22	0,6	4,5	1,1	3,9	4,9	1,1
23	0,5	6,0	2,0	8,3	4,4	0,9
24	0,7	6,3	1,2	0,3	3,9	1,2
25	0,7	5,7	1,3	1,9	3,9	1,9
26	0,8	7,7	1,0	9,5	2,6	1,1
27	0,7	7,0	2,2	0,3	3,1	1,0
28	0,9	6,5	1,9	0,2	3,7	1,2
29	0,4	6,3	1,9	-	5,1	1,4
30	0,4	6,3	2,4	-	3,5	1,0
31	0,2	9,8	1,5			

As variáveis de estado do sistema são obtidas através do Supervisório, ferramenta com a qual é possível realizar o monitoramento e o armazenamento das informações medidas em toda a rede de escoamento de petróleo de forma remota, ou seja, é um sistema SCADA, mas ainda sem as habilidades de atuação (intervenção). O SAD, comentado na introdução deste trabalho, tem como objetivo dotar o Supervisório de inteligência, a fim de que, no futuro, a atuação na rede seja uma habilidade factível, sob muitos aspectos, dentre eles a segurança, a confiabilidade e o econômico.

No Supervisório, é possível selecionar informações e organizá-las na forma de uma grande matriz, onde cada célula de informação está relacionada a uma data (linha) e a um medidor (coluna) e possui uma unidade. Cada medidor instalado no campo possui uma TAG (*the adjutant general*), que é um atributo usado para especificar um elemento da rede, permitindo a localização, no Supervisório, da informação relacionada àquele medidor desejado.

Quadro 5 - Lista de TAGs.

Estação	TAG	Descrição	Unidade
LOR	SB_LOR_CBAL	Estado da bomba	-
	SB_LOR_CBCL	Estado da bomba	-
	SLT_LOR_TQA	Nível do tanque	m
	SFI_ODLE_LOR_02	Vazão de saída	m ³ /h
	SPT_LOR_DESB	Pressão de saída	kgf/m ²
LPX	XI_101A_LD	Estado da bomba	-
	XI_101B_LD	Estado da bomba	-
	LI_031	Nível do tanque	m
	LI_032	Nível do tanque	m
	FI_001	Vazão de saída	m ³ /h
	PI_002	Pressão de saída	kgf/m ²
RFQ	SBL_RFQ_BB	Estado da bomba	-
	SBL_RFQ_BC	Estado da bomba	-
	SLT_RFQ_TQB	Nível do tanque	m
	SLT_RFQ_TQC	Nível do tanque	m
	FQI_OLEO_INSTANTANEO	Vazão de saída	m ³ /h
	SPT_RFQ_015	Pressão de saída	kgf/m ²
UPN	SLT_UPN_TQA	Nível do tanque	m
	SLT_UPN_TQB	Nível do tanque	m
	SFI_ODLE_UPN_03	Vazão de chegada	m ³ /h
	SPI_ODLE_UPN_08	Pressão de chegada	kgf/m ²

Todos os medidores (de vazão, de pressão, de nível e de estado das bombas) instalados nos equipamentos (bombas, dutos e tanques) envolvidos com a transferência de petróleo da malha piloto estão listados no Quadro 5, distribuídos segundo a Figura 4. Foram reunidos dados desde o dia 01/10/2005 até o dia 07/12/2005, de 2 em 2 segundos e desde o dia 08/12/2005 até o dia 12/03/2006, de 5 em 5 segundos, com algumas lacunas.

Vários problemas podem ocorrer durante a aquisição, a conversão, a transmissão e o armazenamento da informação. Os mais comuns são devido à má especificação, instalação, operação e manutenção do equipamento de medição, aos problemas na conversão da informação mecânica em elétrica ou eletrônica e às falhas nos meios de transmissão, recepção e armazenamento dos dados. Há também o problema da falta de informação, quando esta não é medida, mesmo sendo necessária (ou desejada).

Todos estes problemas se refletem na má qualidade dos dados disponíveis no Supervisório, criando uma informação corrompida, que pode ser pontual (em uma só TAG em um instante) ou distribuída (em várias TAGs e/ou em um intervalo). A seguir, todos os problemas identificados no período estão listados:

1. Por uma série de motivos, o Supervisório pode retornar valores não em numéricos. Em alguns casos, este problema é pontual e pode ser facilmente reparado, noutros duram horas e até dias, impossibilitando a utilização do período por completo (Figura 10 a Figura 13).

	A	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
22	08-10-05 00:00:30	1,090	0,000	0,946	2,100	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout
23	08-10-05 00:00:32	1,094	0,000	0,946	2,100	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout
24	08-10-05 00:00:34	1,098	0,000	0,946	2,100	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout
25	08-10-05 00:00:36	1,100	0,000	0,946	2,100	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout
26	08-10-05 00:00:38	1,100	0,000	0,946	2,100	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout
27	08-10-05 00:00:40	1,100	0,000	0,946	2,100	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout
28	08-10-05 00:00:42	1,100	0,000	0,946	2,100	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout
29	08-10-05 00:00:44	1,100	0,000	0,946	2,100	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout
30	08-10-05 00:00:46	1,100	0,000	0,946	2,100	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout
31	08-10-05 00:00:48	1,100	0,000	0,946	2,100	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout	I/O Timeout

Figura 10 - Dados não em numéricos tipo "I/O Timeout".

	A	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
27963	12-11-05 15:31:52	1,546	4,300	0,000	100,908	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27964	12-11-05 15:31:54	1,550	4,300	0,000	100,908	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27965	12-11-05 15:31:56	1,542	4,296	0,000	100,908	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27966	12-11-05 15:31:58	1,534	4,292	0,000	100,908	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27967	12-11-05 15:32:00	1,530	4,290	0,000	100,908	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27968	12-11-05 15:32:02	1,530	4,290	0,000	100,908	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27969	12-11-05 15:32:04	1,530	4,290	0,000	100,908	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27970	12-11-05 15:32:06	1,534	4,286	0,000	100,914	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27971	12-11-05 15:32:08	1,538	4,282	0,000	100,920	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27972	12-11-05 15:32:10	1,540	4,280	0,000	100,923	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27973	12-11-05 15:32:12	1,540	4,280	0,000	100,923	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27974	12-11-05 15:32:14	1,540	4,280	0,000	100,923	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27975	12-11-05 15:32:16	1,544	4,280	0,000	100,917	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown
27976	12-11-05 15:32:18	1,548	4,280	0,000	100,911	23,100	Shutdown	Shutdown	Shutdown	Shutdown

Figura 11 - Dados não em numéricos tipo "Shutdown".

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
10891	04-01-06 15:07:25	0,000	0,000	1,730	0,246	0,030	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10892	04-01-06 15:07:30	0,000	0,000	1,740	0,245	0,030	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10893	04-01-06 15:07:35	0,000	0,000	1,740	0,244	0,030	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10894	04-01-06 15:07:40	0,000	0,000	1,730	0,242	0,030	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10895	04-01-06 15:07:45	0,000	0,000	1,730	0,241	0,030	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10896	04-01-06 15:07:50	0,000	0,000	1,730	0,240	0,030	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10897	04-01-06 15:07:55	0,000	0,000	1,730	0,238	0,030	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10898	04-01-06 15:08:00	0,000	0,000	1,730	0,237	0,030	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10899	04-01-06 15:08:05	0,000	0,000	1,740	0,236	0,040	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10900	04-01-06 15:08:10	0,000	0,000	1,740	0,234	0,040	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10901	04-01-06 15:08:15	0,000	0,000	1,740	0,233	0,040	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed
10902	04-01-06 15:08:20	0,000	0,000	1,740	0,232	0,030	Failed	Failed	Failed	Failed	Failed

Figura 12 - Dados não numéricos tipo "Failed".

	A	L	M	N	O	P	Q	R	S
14435	20-01-06 20:02:50	1,393	1,400	0,000	2,132	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut
14436	20-01-06 20:02:55	1,366	1,400	0,000	2,100	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut
14437	20-01-06 20:03:00	1,347	1,405	0,000	2,069	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut
14438	20-01-06 20:03:05	1,296	1,407	0,000	2,069	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut
14439	20-01-06 20:03:10	1,318	1,405	0,000	2,082	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut
14440	20-01-06 20:03:15	1,377	1,404	0,000	2,093	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut
14441	20-01-06 20:03:20	1,410	1,408	0,000	2,082	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut
14442	20-01-06 20:03:25	1,455	1,415	0,000	2,075	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut
14443	20-01-06 20:03:30	1,483	1,413	0,000	2,053	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut	Intf Shut

Figura 13 - Dados não numéricos tipo "Intf Shut".

2. Exceto para estado das bombas, o valor nulo nunca é esperado, para os períodos em que as bombas da estação estão em pleno funcionamento (Figura 14).

	A	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
34913	28-10-05 19:23:32	5,070	1,090	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34914	28-10-05 19:23:34	5,070	1,090	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34915	28-10-05 19:23:36	5,070	1,090	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34916	28-10-05 19:23:38	5,070	1,090	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34917	28-10-05 19:23:40	5,070	1,090	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34918	28-10-05 19:23:42	5,070	1,090	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34919	28-10-05 19:23:44	5,070	1,090	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34920	28-10-05 19:23:46	5,070	1,086	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34921	28-10-05 19:23:48	5,070	1,082	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34922	28-10-05 19:23:50	5,070	1,080	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34923	28-10-05 19:23:52	5,070	1,080	0,000	0,778	0	0	0	0	0
34924	28-10-05 19:23:54	5,070	1,080	0,000	0,778	0	0	0	0	0

Figura 14 - Dados nulos.

3. Dados "congelados", ou seja, os valores medidos se encontram fixados indefinidamente em um valor. Este tipo de erro normalmente ocorre por horas seguidas, inutilizando o período em questão (Figura 15).

	A	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
35119	20-11-05 19:30:24	3,920	3,040	0,800	0,000	0,977	0,000	1,201	1,068	0,060	0,834
35120	20-11-05 19:30:26	3,928	3,044	0,792	0,000	0,977	0,000	1,201	1,068	0,060	0,834
35121	20-11-05 19:30:28	3,936	3,048	0,784	0,000	0,977	0,000	1,202	1,068	0,060	0,834
35122	20-11-05 19:30:30	3,940	3,050	0,780	0,000	0,974	0,000	1,202	1,068	0,060	0,834
35123	20-11-05 19:30:32	3,940	3,050	0,780	0,000	0,967	0,000	1,202	1,068	0,060	0,834
35124	20-11-05 19:30:34	3,940	3,050	0,780	0,000	0,961	0,000	1,202	1,067	0,060	0,834
35125	20-11-05 19:30:36	3,936	3,054	0,788	0,000	0,961	0,000	1,202	1,067	0,060	0,834
35126	20-11-05 19:30:38	3,932	3,058	0,796	0,000	0,961	0,000	1,202	1,067	0,060	0,834
35127	20-11-05 19:30:40	3,930	3,060	0,800	0,000	0,961	0,000	1,202	1,067	0,060	0,834
35128	20-11-05 19:30:42	3,930	3,060	0,800	0,000	0,961	0,000	1,202	1,067	0,060	0,834
35129	20-11-05 19:30:44	3,930	3,060	0,800	0,000	0,961	0,000	1,202	1,067	0,060	0,834
35130	20-11-05 19:30:46	3,930	3,048	0,796	0,000	0,961	0,000	1,203	1,067	0,060	0,834
35131	20-11-05 19:30:48	3,930	3,036	0,792	0,000	0,961	0,000	1,203	1,067	0,060	0,834

Figura 15 - Dados "congelados".

4. A convenção para o estado das bombas em RFQ está invertida, com relação às outras bombas da malha piloto, neste exemplo todas as bombas estão desligadas (Figura 16).

	A	B	C	I	J	P	Q
6420	14-12-05 08:54:25	0	0	0	0	1	1
6421	14-12-05 08:54:30	0	0	0	0	1	1
6422	14-12-05 08:54:35	0	0	0	0	1	1
6423	14-12-05 08:54:40	0	0	0	0	1	1
6424	14-12-05 08:54:45	0	0	0	0	1	1
6425	14-12-05 08:54:50	0	0	0	0	1	1
6426	14-12-05 08:54:55	0	0	0	0	1	1
6427	14-12-05 08:55:00	0	0	0	0	1	1
6428	14-12-05 08:55:05	0	0	0	0	1	1
6429	14-12-05 08:55:10	0	0	0	0	1	1
6430	14-12-05 08:55:15	0	0	0	0	1	1

Figura 16 - Convenção "1" para ligada, "0" para desligada.

5. Estes três problemas foram identificados com uma frequência muito grande (praticamente todo dia) na leitura do nível em RFQ, como mostra o Gráfico 2.

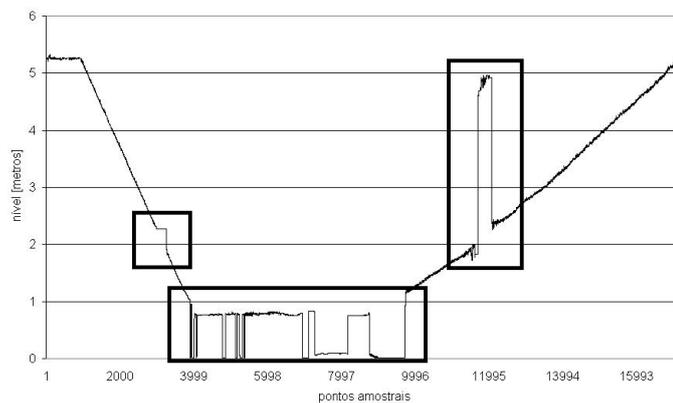


Gráfico 2 - Erro na leitura do nível.

6. Normalmente, nas mudanças de configuração da rede, nota-se, nas medidas de vazão e pressão variações devido aos transientes (Gráfico 3).

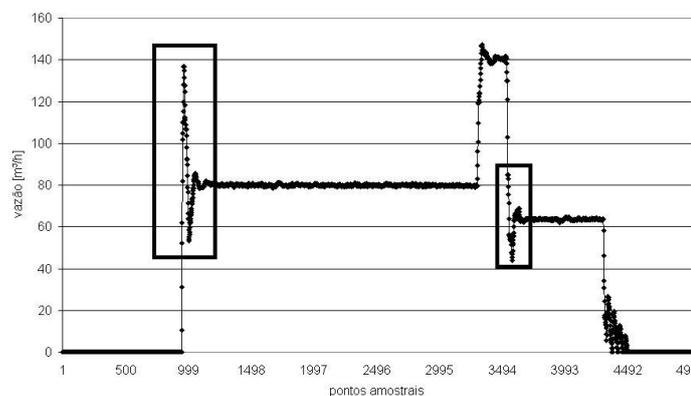


Gráfico 3 - Transientes na vazão.

7. A causa e sua gravidade não foram identificadas. Possivelmente, um dos períodos, anterior ou posterior à falha, está com os valores medidos alterados (Gráfico 4).

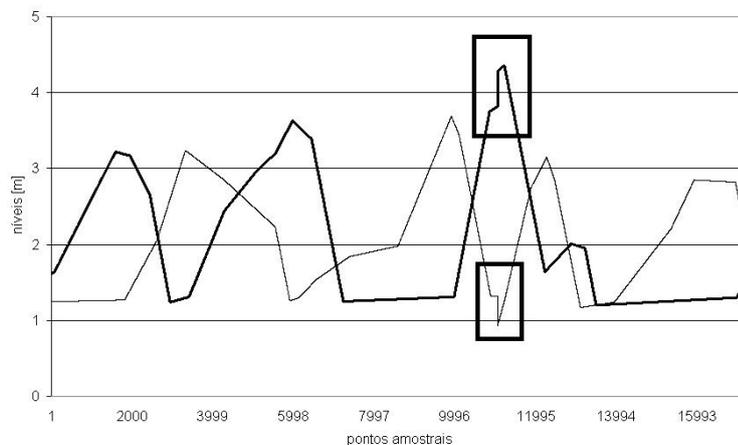


Gráfico 4 - Descontinuidade na leitura dos níveis.

8. Pode ocorrer da tendência medida do nível discordar das medidas de vazão e de estado das bombas na estação. Por exemplo, o nível permanece quase constante enquanto a bomba está ligada (Gráfico 5).

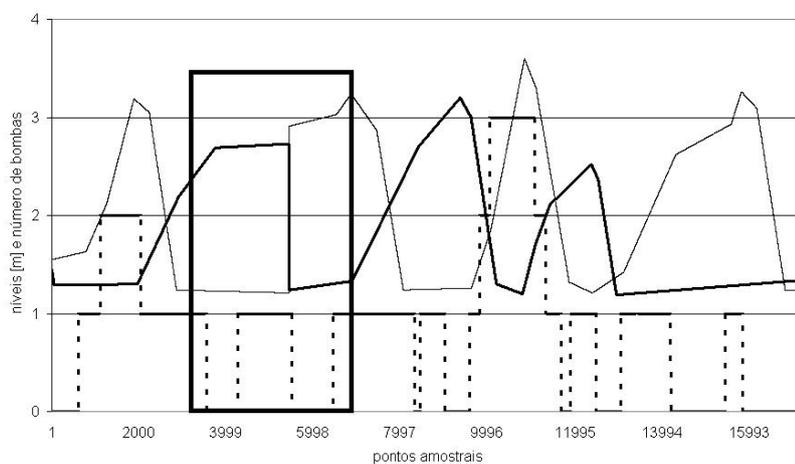


Gráfico 5 - Incompatibilidade entre leitura de nível e estado das bombas.

9. Medição de vazão visivelmente incompatível com o número de bombas ligadas na malha (Gráfico 6).

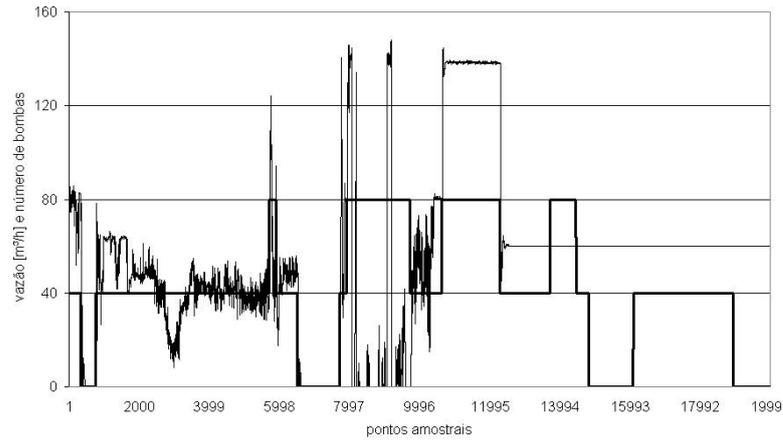


Gráfico 6 - Incompatibilidade entre leitura de vazão e estado das bombas.

10. Oscilação excessiva na medição de vazão em LPX em relação às oscilações nas outras duas estações, consideradas “normais” (Gráfico 7).

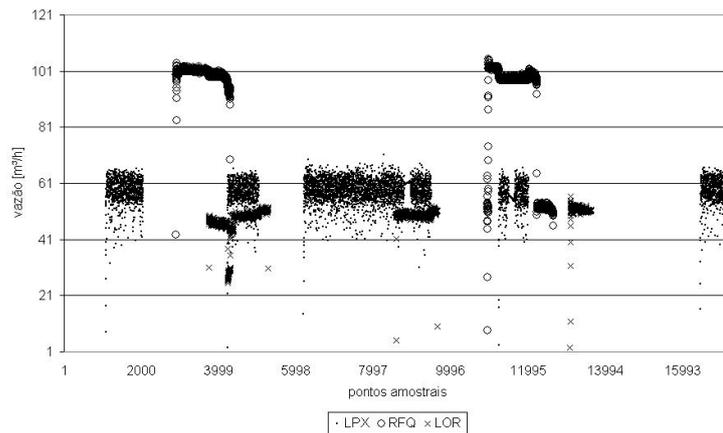


Gráfico 7 - Oscilação excessiva na medição de vazão em LPX.

11. Estado da bomba diferente de “0” e “1” (Gráfico 8).

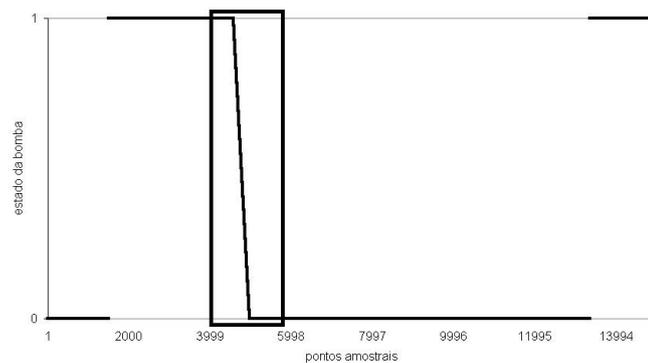


Gráfico 8 - Valor não esperado para o estado da bomba.

12. Diferença na leitura entre os níveis dos tanques equalizados em LPX, esperava-se que as duas medições fossem exatamente iguais (Gráfico 9).

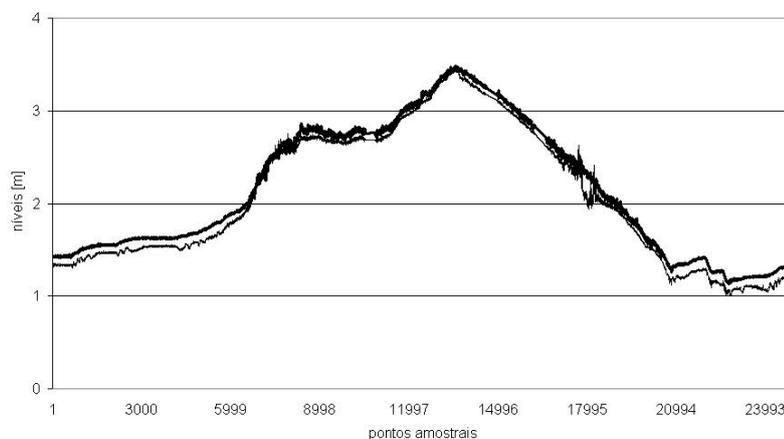


Gráfico 9 - Diferença entre os níveis dos tanques equalizados.

13. Observou-se que ocorre, com certa frequência, na leitura de vazão em RFQ, uma diminuição, simultânea, de vazão e pressão. A causa ainda não foi identificada (Gráfico 10).

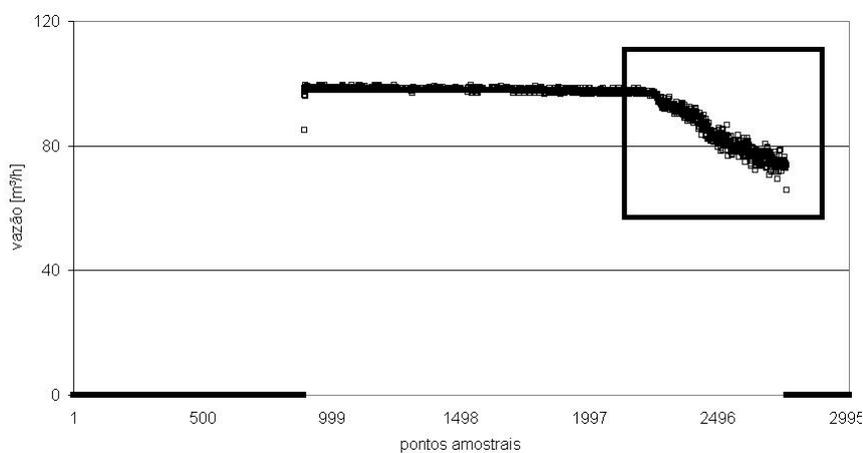


Gráfico 10 - Leitura não esperada de vazão em RFQ.

3.5. Tratamento dos dados

As falhas, na matriz de dados obtidos no Supervisório, podem ser pontuais (ocorrem somente em uma célula) ou distribuídas (ocorrem em um conjunto de medidores de uma mesma estação – várias colunas – ou em um determinado intervalo de tempo – várias linhas).

Quando não é possível reparar a informação com ou sem o auxílio de outra(s) TAG(s) ou substituir sua informação por outra, resta somente a opção do descarte, ou do grupo de linhas e/ou do grupo de colunas, dependendo de onde a(s) falha(s) ocorra(m).

Na falta de alguma informação necessária que não é medida ou quando, apesar de medida, está totalmente corrompida, pode-se recorrer aos casos de substituição. São eles:

1. vazão de saída da estação para indicar estado das bombas. Para isto é necessário ter o conhecimento prévio da faixa de vazão de trabalho (para bombas volumétricas) para todas as configurações possíveis dentro da estação, a qual indicará a quantidade de bombas ligadas;
2. queda do nível do tanque para indicar vazão de saída. Para isto é necessário ter a certeza de que o tanque está somente transferindo (vazão de entrada nula, $Q_e = 0$) e conhecer a sua área da base. Faz-se a conversão através da Equação 1.

$$Q_s = Q_e + \frac{(N_i - N_{i-1}) \cdot A_b}{t} \quad [1]$$

Em que: Q_s é a vazão de saída [m^3/s];

N é o nível do tanque [m];

A_b é a área da base do tanque [m^2];

i é o passo de cálculo;

t é o intervalo de tempo considerado [s].

3. queda do nível do tanque para indicar estado das bombas. As relações encontradas nos dois itens anteriores são utilizadas;
4. valor do nível para indicar pressão. Para isto é necessário conhecer a(s) massa(s) específica(s) do(s) fluido(s) que preenchem o tanque e calculá-la(s) através da Equação 2.

$$p = \sum \lambda_i \cdot d_i \quad [2]$$

Em que: p é a pressão [metro coluna de água – mca];

λ é a camada de fluido [m];

d é a densidade do fluido [adimensional].

5. somatório de vazões para indicar vazão não medida. Isto geralmente ocorre para dutos no meio da malha, onde não há medição de vazão. Então, considera-se que a vazão que passa por este duto é igual ao somatório das medições de vazões realizadas a sua montante, para o mesmo instante.

A conservação da massa entre as vazões medidas nas saídas das estações e as vazões necessárias para esvaziar os tanques que estão transferindo deve ser verificada, indicando um valor para correção do valor da vazão medida. Para isto, utiliza-se a Equação 1. A vazão de entrada do tanque (Q_e) é encontrada em um intervalo em que ele não esteja transferindo, quando pontos do nível ascendente do tanque são selecionados. Ajusta-se uma equação a estes pontos e, calcula-se a vazão de entrada necessária para sair do nível mais baixo para o mais alto.

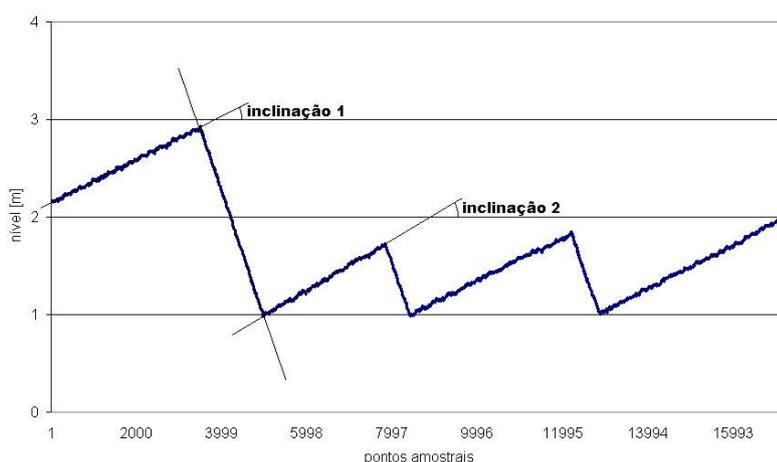


Figura 17 - Nível do tanque para cálculo da vazão de entrada.

Partindo-se da hipótese de que a vazão de entrada no tanque é praticamente a mesma para os períodos anterior (ver “inclinação 1” na Figura 17), durante e posterior (ver “inclinação 2” na Figura 17) de uma transferência, considera-se que a vazão de entrada durante a transferência (quando o nível é descendente) é igual a média das duas vazões calculadas anteriores. Este cálculo é necessário para os tanques que podem assumir o estado “recebendo e transferindo” simultaneamente, como ocorre em LPX e LOR. Para a estação RFQ, onde o tanque só recebe ou transfere fluido alternadamente, não é necessário calcular a vazão de enchimento, ou seja, para este caso $Q_e = 0$.

Calcula-se o erro percentual (*Erro* [%]) entre a diferença das vazões encontradas em relação à vazão necessária para esvaziar o tanque de transferência (Q_m [m³/s]) segundo a Equação 3 e, utiliza-se a média deste erro percentual para corrigir o valor medido a ser utilizado da vazão na saída de cada estação.

$$Erro = \frac{100.(Q_s - Q_m)}{Q_m} \quad [3]$$

Em que: Q_s é a vazão de saída medida da estação [m³/s].

São descartados os instantes em que se identificam dados não numéricos (com algumas exceções, quando se pode reparar), “congelamento” de dados, dados nulos ou não esperados (como estado de bomba diferente de “0” para desligada e “1” para ligada), os instantes em que todas as bombas da malha estão desligadas e aqueles em que a linha piezométrica do sistema não está decrescendo na direção do fluxo.

O estado das bombas em RFQ foi encontrado através do caso de substituição número um (vazão de saída da estação para indicar estado das bombas). A vazão em RFQ foi filtrada de forma a evitar os valores encontrados devido ao fenômeno que provoca a diminuição simultânea de vazão e pressão nessa estação (Gráfico 10), os quais estavam dificultando a calibração das bombas.

Em LPX, devido à altíssima frequência de ocorrência de dados não numéricos, tentou-se repará-lo da seguinte forma, para evitar a escassez de dados consecutivos (dificultando o cálculo da média em torno de um instante):

1. quando o erro ocorre em um instante (uma linha) e os estados das duas bombas nos instantes anterior e posterior são iguais, então, o valor das medidas no instante é igual à média aritmética das medidas anterior e posterior, respectivamente;
2. quando o erro ocorre em dois instantes consecutivos (duas linhas) e os estados das duas bombas nos instantes anterior ao primeiro instante com erro e posterior ao segundo instante com erro são iguais, então, o valor das medidas no primeiro instante com erro é igual às medidas no instante anterior e o valor das medidas no segundo instante com erro é igual às medidas do instante posterior, respectivamente;
3. quando o erro ocorre em três instantes consecutivos (três linhas) e os estados das duas bombas nos instantes anterior ao primeiro instante com erro e posterior ao terceiro instante com erro são iguais, então, o valor das medidas no primeiro instante com erro

é igual às medidas no instante anterior, o valor das medidas no segundo instante com erro é igual à média das medidas dos instantes anterior ao primeiro com erro e posterior ao terceiro com erro e o valor das medidas no terceiro instante com erro é igual às medidas do instante posterior, respectivamente;

4. quando há mais de três instantes consecutivos com erro, descartam-se estes instantes.

4. Metodologia

4.1. Modelo de simulação hidráulica

O SAD utilizado para otimizar a operação da rede de escoamento de petróleo (*SmartPumping*, 2005) se constitui em um programa computacional implementado na linguagem de programação Java, cuja arquitetura se apresenta de forma modular com seis componentes (Figura 18), dos quais um contém o modelo hidráulico – o módulo de simulação. Este módulo, quando dados o desenho (bombas, dutos, tanques e conexões), as características de cada elemento da rede de escoamento, a previsão da produção de petróleo na entrada das estações e a estratégia de controle de todas as bombas, calcula o comportamento hidráulico da rede.

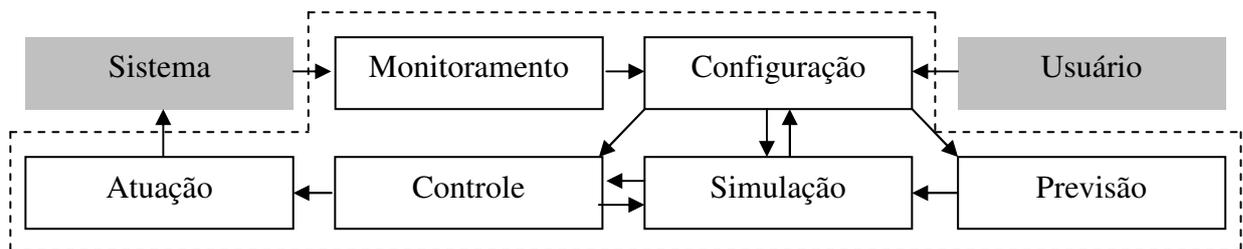


Figura 18 - Arquitetura do SAD.

4.1.1. Formulação para os dutos

O modelo hidráulico foi implementado para simular o escoamento monofásico de petróleo em regime de fluxo permanente. Ele utiliza a Equação 4, derivada da equação universal da perda de carga (equação de Darcy-Weisbach) (Equação 5) e a massa específica de um fluido equivalente dos fluidos que preenchem todo o duto para representar o escoamento. ASSY (2004) diz que a fórmula universal da perda de carga pode ser aplicada a qualquer fluido de compressibilidade desprezível, a condutos de qualquer material, desde que cilíndricos e de rugosidade uniforme e uniformemente distribuída e aos regimes laminar e turbulento.

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \rho V^2 \quad [4]$$

$$\Delta h = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad [5]$$

Em que: Δh é a perda de carga [m];

f é o fator de atrito [adimensional];

L é o comprimento do duto [m];

D é o diâmetro interno do duto [m];

V é a velocidade média do escoamento [m/s];

ρ é a massa específica equivalente dos fluidos que preenchem o duto [kg/m³];

Δp é a perda de pressão [Pa];

g é a aceleração da gravidade [m/s²].

O fator de atrito é calculado através da equação de Shacham1 (Equação 6), a qual foi utilizada em substituição à equação de Colebrook-White (Equação 7) por evitar cálculos iterativos sem perda significativa de precisão para o escoamento turbulento (OLUJIC, 1981 apud KOIDE, 1998), ou seja, quando o número de Reynolds é maior ou igual a 2300. Para o regime laminar ($Rey < 2300$), utiliza-se a Equação 8 (PORTO, 2004).

$$f = \left\{ -2 \log_{10} \left[\frac{\varepsilon}{3,7D} - \frac{5,02}{Rey} \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{14,5}{Rey} \right) \right] \right\}^{-2} \quad [6]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Rey \sqrt{f}} \right) \quad [7]$$

$$f = \frac{64}{Rey} \quad [8]$$

Em que: ε é a rugosidade absoluta [m];

Rey é o número de Reynolds [adimensional].

A Equação 9, equivalente da equação da perda de pressão (Equação 4), e a Equação 10, equivalente da equação para cálculo do número de Reynolds (Equação 11), são

efetivamente utilizadas no modelo hidráulico, devido à inclusão da relação encontrada na Equação 12.

$$\Delta p = \frac{8\rho f L Q^2}{\pi^2 D^5} \quad [9]$$

$$Rey = \frac{4Q}{\pi \nu D} \quad [10]$$

$$Rey = \frac{VD\rho}{\mu} \quad [11]$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [12]$$

Em que: Q é a vazão média do escoamento [m^3/s];

ν é a viscosidade cinemática equivalente dos fluidos que preenchem o duto [m^2/s];

μ é a viscosidade absoluta equivalente dos fluidos que preenchem o duto [Ns/m^2].

4.1.2. Formulação para o fluido

Optou-se por utilizar a Equação 13 por representar bem toda a faixa de viscosidade cinemática do petróleo em função da temperatura segundo a Norma 11A4.5 da American Petroleum Institute (API, 1992) e por que se verificou que esta equação também representa a água, com uma correlação superior a 0,99 para as faixas de temperatura encontradas em campo (SANTANA, TÔRRES & LACERDA, 2005).

$$\nu = \exp(\exp(b + m \ln(1,8.(273,15 + T)))) - 0,7 \quad [13]$$

Em que: T é temperatura do fluido [$^{\circ}C$];

b, m são parâmetros da Equação 13.

4.1.3. Formulação para as bombas

Tanto as bombas centrífugas quanto as bombas volumétricas ou de deslocamento positivo (rotativas e alternativas) são utilizadas na rede de escoamento. Às vezes, encontradas até juntas na mesma estação de coleta e transferência. Isto se deve ao fato de que nestas estações podem escoar desde fluidos pouco até muito viscosos, já que esta característica também contribui para a escolha da bomba a ser instalada, assim como as características do sistema (diâmetro, cotas, distâncias, etc.), do processo (vazão e pressão requeridas) e operacionais (flexibilidade, manuseio, manutenção, etc.) (FALCO & MATTOS, 1989).

Para representar o funcionamento das bombas, optou-se pela Equação 14, pois descreve bem os dois tipos encontrados na rede de escoamento. Para as bombas volumétricas, o valor do parâmetro a da Equação 14 é nulo.

$$H_{man} = aQ^2 + bQ + c \quad [14]$$

Em que: H_{man} é a altura manométrica da bomba [m];

Q é a vazão bombeada [l/s];

a, b, c são os parâmetros.

4.1.4. Formulação para os tanques

Para representar o balanço hídrico nos tanques foi utilizada a Equação 15, na qual o nível deverá respeitar os limites físicos do tanque, ou seja, $0 \leq N_i \leq \text{altura do tanque}$. Se o passo de simulação for relativamente grande, as vazões de entrada e de saída podem ser tais que o tanque pode transbordar ou ficar com um nível negativo, neste último caso, o nível é corrigido para 0 (zero) e a diferença de volume é considerada como um erro no modelo, devido à discretização do tempo.

$$N_i = \begin{cases} N_{ini}, & \text{se } i = 1 \\ N_{i-1} + \frac{(Q_{e_{i-1}} - Q_{s_{i-1}})t}{Ab}, & \text{se } i > 1 \end{cases} \quad [15]$$

Em que: N_i é o nível atual de fluido no tanque [m];

N_{i-1} é o nível anterior de fluido no tanque [m];

Ab é a área da base do tanque [m²];

Q_e, Q_s são as vazões de entrada e de saída do tanque, respectivamente [m³/s];

N_{ini} é o nível inicial de fluido no tanque [m];

t é o intervalo de tempo correspondente a um passo da simulação [s];

i é o número de passos de simulação [adimensional].

4.1.5. Simulação hidráulica

A simulação hidráulica é feita em dois passos, após um estado inicial do sistema. Primeiro, realiza-se a distribuição de vazões (Q) nos dutos e bombas e de pressões (p) nos entroncamentos da rede de escoamento. E segundo, faz-se o balanço hídrico nos tanques, quando seus níveis (N) são atualizados, iniciando-se um novo passo da simulação, como mostrado na Figura 19.

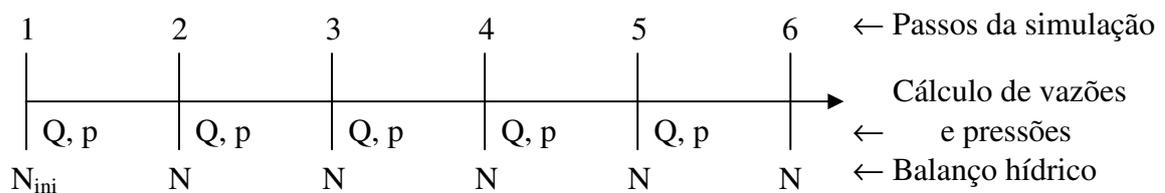


Figura 19 - Seqüência na simulação hidráulica.

Para resolver simultaneamente o conjunto de equações que representam o sistema (uma equação da continuidade para cada entroncamento e uma da conservação da energia para cada duto ou bomba da rede), foi utilizado o Método do Gradiente, para obter a distribuição de vazões e pressões em um determinado instante. Este método foi originalmente proposto por Todini e Pilati e melhorado por Salgado, Todini e O'Connell, incorporando bombas na formulação original (SALGADO et al., 1988). Este método foi escolhido porque

mostrou um comportamento mais robusto em resolver o conjunto de equações (SALGADO et al., 1988) e pelo fato de sua convergência não ser afetada pela solução estimada inicial nem pela complexidade do sistema (TODINI & PILATI, 1989). Foram realizadas algumas modificações no método, originalmente proposto para equilibrar cargas, para realizar o equilíbrio das pressões na rede de escoamento.

4.2. Curvas características das bombas

Denomina-se curva característica de uma máquina hidráulica, bomba ou turbina a representação gráfica ou em forma de tabela das funções que relacionam os diversos parâmetros envolvidos em seu funcionamento. Normalmente, os fabricantes de bombas apresentam, nos catálogos, curvas dimensionais da altura de elevação ($H = f(Q)$), da potência necessária ($Pot = f(Q)$) e do rendimento ($\eta = f(Q)$), em função da vazão, obtidas experimentalmente. Para cada vazão recalçada, geralmente de água, são medidas a vazão, a altura de elevação, a rotação e o torque no eixo da máquina (PORTO, 2004).

Dentre os vários tipos de fatores que modificam as curvas características das bombas estão aqueles que são efeito da natureza do fluido que está sendo bombeado, ou seja, da influência das alterações nas propriedades do fluido: massa específica, viscosidade absoluta, temperatura (já que as duas anteriores variam em função desta), e no caso do petróleo, inclui-se o BSW e o RGO. Ao observar os outros fatores que modificam as curvas características das bombas (mudança no diâmetro externo e na geometria do impelidor, mudança na rotação e o tempo de serviço), conclui-se que, a curto prazo, seus efeitos são irrelevantes e que apenas a natureza do fluido bombeado é que promoverá implicações significativas.

Considerando a natureza do fluido escoado, FALCO & MATTOS (1989) e MACINTYRE (1997), descrevem o efeito no comportamento das bombas centrífugas e sugerem correções das curvas características, baseados nos procedimentos descritos na nota técnica ISO/TR 17766:2005 da *American National Standards Institute* (ANSI, 2005). Estes procedimentos somente são aplicáveis aos sistemas em que a operação da bomba centrífuga estiver dentro das escalas dos gráficos de ajustes (não extrapolar), em faixa de operação normal e se o fluido bombeado for uniforme e newtoniano. Há restrições para alguns tipos de bombas e o fluido que será escoado deve ser previamente conhecido, para ser possível realizar

as correções. Não foi encontrado na literatura nenhuma referência quanto à correção das curvas características das bombas volumétricas de deslocamento positivo.

Aplicar os procedimentos de ajuste, descritos na nota técnica da ANSI apresentada acima, para corrigir qualquer curva característica das bombas centrífugas nas mais variadas topologias de conexão (instalação) e sujeitas às variações na operação devido ao funcionamento simultâneo de outros elementos da rede de escoamento de petróleo, com possibilidade de bombear fluidos não uniformes (variação de BSW) e não newtonianos (inexistência de gás dissolvido, NADLER & MEWES, 1995 apud NADLER & MEWES, 1997) é, no mínimo, impraticável, devido às restrições para sua aplicação e à impossibilidade de controlar todos os outros elementos do sistema por causa da sua complexidade. Acrescenta-se a isto o fato de que, normalmente, os fluidos que estão sendo bombeados não são conhecidos com uma frequência muito alta a ponto de permitir uma correção da curva característica em tempo real.

As bombas centrífugas e as rotativas possuem princípio de funcionamento (Figura 20) e curvas características (Figura 21) antagônicos. As primeiras trabalham transferindo energia cinética para o fluido, o qual entra pelo eixo e, através das pás (rotor), é impulsionado radialmente para a carcaça até encontrar a saída. Enquanto que, nas segundas, o fluido entra perpendicularmente às engrenagens (que neste tipo de bomba equivale às pás da bomba centrífuga) e é impulsionado longitudinalmente (ao longo do eixo) para a saída, pela energia de pressão.

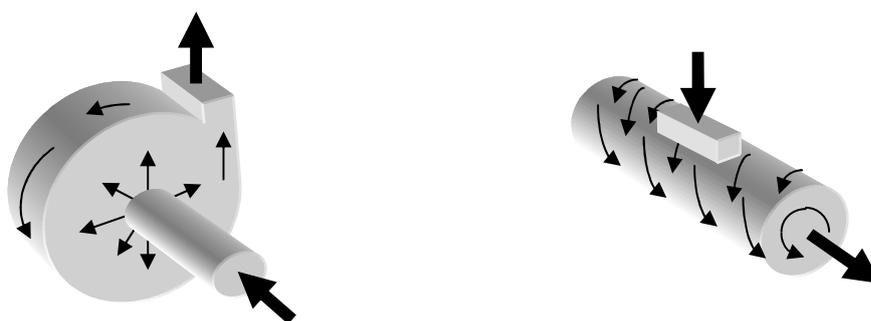


Figura 20 - Princípio de funcionamento das bombas centrífuga e rotativa, respectivamente.

Para FALCO & MATTOS (1989) e MACINTYRE (1997) a diferença entre as curvas teórica e real de uma bomba centrífuga se deve às perdas de energia devido aos choques (mudanças bruscas na direção do escoamento na entrada e na saída do rotor), ao atrito do líquido no rotor e aos escorregamentos do líquido nos interstícios entre o rotor e a carcaça.

LIMA (2003) explica que, para as bombas rotativas, a diferença entre as curvas características teórica e real se deve, basicamente, ao escorregamento de fluido, intensificado por maiores pressões na sua saída e pela baixa viscosidade do fluido bombeado (Figura 21).

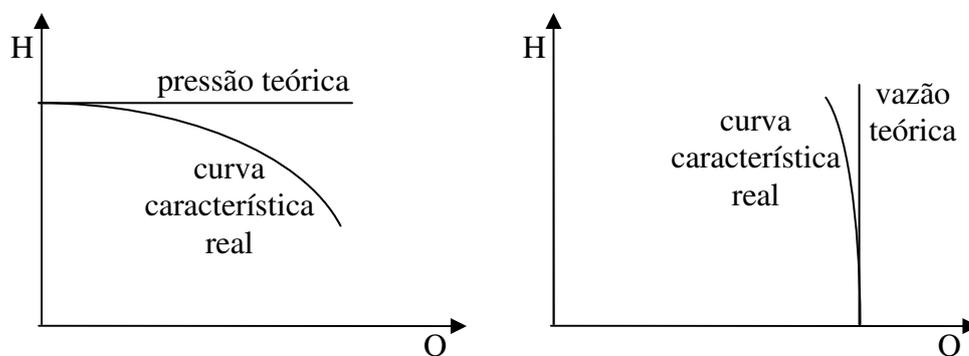


Figura 21 - Curvas características das bombas centrífuga e rotativa, respectivamente.

Na malha piloto, todas as bombas instaladas são rotativas e trabalham bombeando petróleo com quase ausência de água e gás. Então, pode-se concluir que a flexão esperada na curva característica seja menor do que a encontrada na curva do catálogo, já que esta foi encontrada com bombeamento de água, que é menos viscosa.

No regime laminar, as velocidades ao longo do perfil, relativas à máxima do fluxo, são bem menores do que no regime turbulento, especialmente junto à parede interna da tubulação, provocando uma menor resistência ao escorregamento nesta região, como mostra a Figura 22, refletindo em uma maior flexão da curva característica da bomba rotativa.

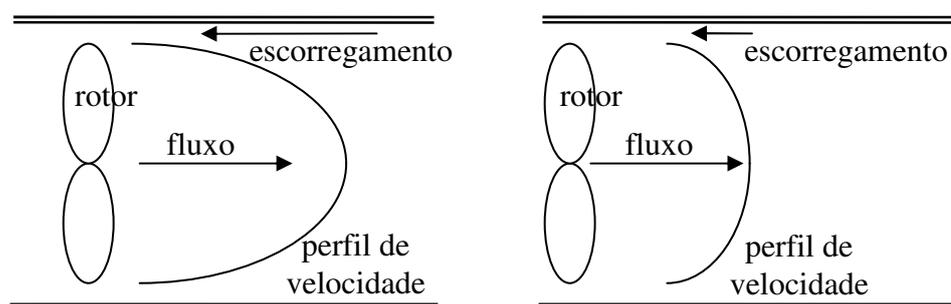


Figura 22 - Escorregamento no regime laminar e turbulento, respectivamente.

Com relação às bombas rotativas, existe um equipamento de segurança instalado junto à bomba, chamado de válvula de reciclo ou refluxo (Figura 23), o qual após certo valor de pressão começa a abrir e faz com que parte da vazão bombeada retorne para a entrada da

bomba, reduzindo a vazão de saída do conjunto bomba-válvula, que se reflete na medição de vazão. Este comportamento será também calibrado.

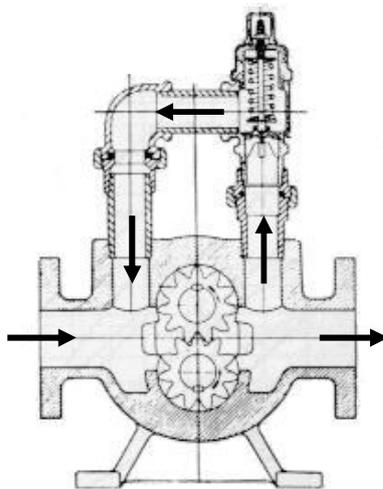


Figura 23 - Válvula de reciclo na bomba rotativa.

4.3. Fatores de atrito

O cálculo da perda de carga em tubulações tem como marco a experiência de Nikuradse com tubos circulares de rugosidade uniforme e artificial para determinação do fator de atrito da fórmula universal da perda de carga (Equação 5). A partir destes estudos, Colebrook e White desenvolveram os experimentos com tubos comerciais, que levaram à proposição da fórmula implícita para determinação do fator de atrito (Equação 7) a partir dos valores do número de Reynolds e da rugosidade.

Posteriormente, Moody estendeu o trabalho e representou esta equação em um gráfico, na forma do diagrama de Stanton, que apresenta os eixos coordenados em gradação logarítmica, com o fator de atrito em ordenadas e o número de Reynolds em abscissas, para vários valores da rugosidade relativa, conforme o Gráfico 11. O diagrama reproduz para os tubos de rugosidade comercial os mesmos aspectos mostrados no gráfico de Nikuradse (PORTO, 2004).

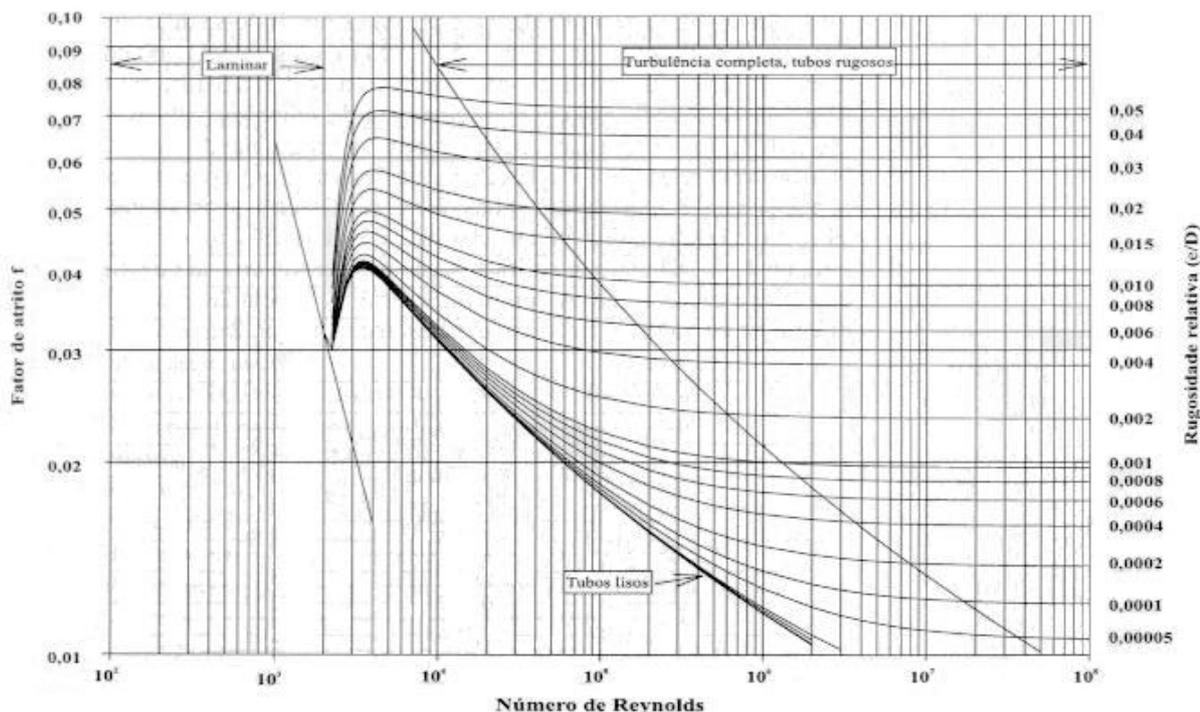


Gráfico 11 - Diagrama de Moody (PORTO, 2004).

O fator de atrito depende do valor da velocidade média do escoamento, do diâmetro interno da tubulação, da massa específica e da viscosidade absoluta, e conseqüentemente da temperatura, do fluido que está sendo escoado, do tamanho médio da projeção da rugosidade, do arranjo (espaçamento, distribuição) dos elementos da rugosidade e da forma (fator de forma) dos elementos individuais da rugosidade. Portanto, o fator de atrito depende de muitas grandezas, que podem ser arranjadas de forma que o mesmo permaneça adimensional, convergindo para a relação descrita abaixo (STREETER & WYLIE, 1980).

$$f = \text{função} \left(Re, \frac{\varepsilon}{D} \right) \quad [16]$$

Em que: ε é a rugosidade absoluta da parede interna da tubulação [m].

O atrito entre o líquido e a parede da tubulação reflete o processo irreversível de transformação de parte da energia de escoamento em calor. Neste processo, pelo princípio da aderência, as partículas imediatamente adjacentes às fronteiras sólidas estão imóveis, resultando em um diferencial de velocidade entre elas e as vizinhanças, que se propaga para toda a massa fluida em movimento. Este diferencial de velocidade cria tensões tangenciais e

dissipa energia por atrito de escorregamento, quando o escoamento é laminar, ou pela geração de turbulência, quando é turbulento (PORTO, 2004).

O escoamento laminar permite um tratamento analítico da tensão de cisalhamento, e consequentemente, do fator de atrito, o qual (neste caso) só depende do número de Reynolds. Enquanto que no escoamento turbulento, a tensão tangencial depende de uma viscosidade equivalente, que é uma propriedade do escoamento e não somente do fluido, e depende, predominantemente, da intensidade da agitação turbulenta, variando de ponto a ponto no escoamento. Para grandes números de Reynolds, a viscosidade não afeta mais as perdas de energia, como é evidenciado pelo fato de que o fator de atrito não varia nesta zona, sendo somente função da rugosidade relativa da tubulação (PORTO, 2004).

Um outro fator que pode alterar o fator de atrito, mas desta vez através da alteração da rugosidade relativa, é a utilização do *pig*, que consiste em um dispositivo que percorre a tubulação e mede uma série de parâmetros que indicam se o duto em questão sofreu corrosão ou está trincado, amassado e até perfurado, bem como pode identificar antecipadamente as diversas formas de deterioração que possam comprometer a tubulação, de maneira a impedir vazamentos e acidentes.

Os *pigs* deixaram de ser usados somente para limpeza interna das tubulações. Atualmente, eles também são usados para monitorar as condições das tubulações e detectar problemas. Diferentes tipos de escovas e outros acessórios podem ser conectados ao corpo dos *pigs*. A força requerida para movimentá-lo depende da inclinação da tubulação, da fricção entre o *pig* e a parede interna e da quantidade de lubrificação realizada pelo próprio fluido. Ele viaja pela tubulação com a mesma velocidade do fluido (KENNEDY, 1993).

Na malha piloto, este dispositivo é utilizado com uma frequência bastante alta (semanal) para limpeza da tubulação. Por um lado, sabe-se que esta limpeza pode alterar a rugosidade relativa, mas por outro sua frequência pode tornar esta variação insignificante. O autor desconhece trabalhos específicos sobre este tema e não estudou os impactos do uso do *pig* no comportamento hidráulico da rede, mas pode-se deduzir que se o *pig* realiza uma limpeza, evitando incrustações e certo aumento da rugosidade, fatalmente, as perdas por atrito não terão aumento significativo no período entre as limpezas.

4.4. Metodologia de calibração

A figura Figura 24 é uma ilustração dos procedimentos adotados para realização deste trabalho, na qual, pode-se ver três das quatro partes em que o Supervisório foi dividido. Para cada uma destas partes, calibraram-se as bombas e os dutos em três resoluções (discretizações temporais) diferentes, como será explicado adiante.

parte →	Supervisório										
	1			2			3				
resolução →	sem alt.	10 min	20 min	sem alt.	10 min	20 min	sem alt.	10 min	20 min		
B1	x	x	x	x	x	x	x	-	-	→ curva única	
B2	x	x	x	x	x	x	x	-	-	→ curva única	
B3	x	x	x	x	x	x	x	-	-	→ curva única	
B4	i	i	i	i	i	i	i	i	i	copia B3	
B5	x	x	x	x	x	x	x	-	-	→ curva única	
B6	i	i	i	i	i	i	i	i	i	copia B5	
D1	o	o	o	o	o	-	n	-	-		
D2	o	o	o	o	o	-	n	-	-		
D3	o	o	o	o	o	-	n	-	-		
	fatores 1			fatores 2							
	x	bombas calibradas									
	i	bombas sem dados, não podem ser calibradas									
	o	dutos calibrados									
	-	dados que geraram pouca informação, e não foram utilizadas									
	n	dado não utilizado									

Figura 24 - Metodologia de calibração.

Não foi possível utilizar a parte 3 sem alterações para calibrar os dutos (caixinha com letra n). Não foi possível calibrar as bombas B3 e B6, pois as mesmas não possuíam dados no Supervisório para isto (indicado com a letra “i”), como são idênticas aos seus pares nas estações, serão consideradas iguais a eles. O sinal “-“ indica os dados que não geraram informações suficientes para serem tratados estatisticamente (nas regressões e nas análises de frequências), então não foram utilizados.

Calibraram-se as bombas B1, B2, B3 e B5 para os dados indicados com a letra “x”, cujos resultados levaram a uma curva característica única para cada bomba. Calibraram-se os dutos D1, D2 e D3 para os dados indicados com a letra “o”, cujos dados foram agrupados por

configuração, gerando dois conjuntos (“fatores 1” e “fatores 2”) correspondentes às duas primeiras partes do Supervisório.

Procurou-se na quarta parte do Supervisório (separada para realizar a validação dos dados) as configurações listadas durante a calibração dos dutos (para parte 1 e 2, separadamente) e, utilizando-se as curvas características das bombas calibradas, simularam-se os instantes correspondentes. Em seguida, as vazões dos dutos e as cotas piezométricas nas saídas das estações observadas e calculadas foram comparadas.

A medição de nível, que é realizada nos tanques, e a medição de vazão e pressão foram realizadas na saída das estações de coleta e transferência de fluido. Por esta razão, os valores medidos para calibrar as bombas consideraram o comportamento de todos os equipamentos instalados entre a medição de nível no tanque (a montante da bomba) e as medições de vazão e pressão na saída da estação (a jusante da bomba). Assim, percebe-se que a calibração realizada não teve como objetivo calibrar cada bomba da rede de escoamento (e cada duto também) para poder representar apenas seu comportamento, mas calibrar partes do sistema para poder representá-lo como um todo.

4.4.1. Calibração

Os seguintes passos foram adotados para encontrar os fatores de atrito para cada configuração e os parâmetros “b” e “c” das equações que representam as curvas características das bombas da malha piloto. Primeiro, o período de dados entre os dias 16/12/2005 e 12/03/2006 foi dividido em quatro partes, como mostra o Quadro 6. Alguns dias foram descartados por que apresentavam erros contínuos que impediam seu uso (como “congelamento”, por exemplo).

Esta divisão foi realizada por que se pretendia observar a influência da mudança dos dados nas equações encontradas para as bombas e nos fatores de atrito. O tamanho do período deveria garantir um número mínimo de configurações observadas na malha piloto (a divisão em quatro partes foi arbitrária), para que fosse possível calibrar as bombas e dutos com os dados de cada período independentemente.

Quadro 6 - Dias utilizados para calibração e validação.

calibração			validação
Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4
16/12/05	14/01/06	01/02/06	20/02/06
17/12/05	15/01/06	02/02/06	21/02/06
18/12/05	16/01/06	03/02/06	23/02/06
19/12/05	17/01/06	04/02/06	24/02/06
20/12/05	18/01/06	05/02/06	26/02/06
21/12/05	19/01/06	06/02/06	28/02/06
22/12/05	20/01/06	07/02/06	01/03/06
23/12/05	21/01/06	09/02/06	03/03/06
24/12/05	22/01/06	11/02/06	05/03/06
25/12/05	23/01/06	12/02/06	06/03/06
26/12/05	24/01/06	13/02/06	07/03/06
27/12/05	25/01/06	14/02/06	08/03/06
28/12/05	26/01/06	15/02/06	09/03/06
29/12/05	27/01/06	16/02/06	10/03/06
30/12/05	28/01/06	18/02/06	11/03/06
31/12/05	29/01/06	19/02/06	
	30/01/06		
	31/01/06		

As três primeiras partes foram reservadas para calibrar os parâmetros, e a quarta e última parte foi reservada para realizar a sua validação, ordenadas cronologicamente. Para cada uma das partes utilizadas para a calibração, cada dia passou por um tratamento, no qual os dados ou foram reparados ou descartados. Depois, os dados de todos os dias de cada parte foram reunidos em um só conjunto.

Para verificar o efeito da mudança na discretização temporal da série histórica de monitoramento nos parâmetros calibrados, decidiu-se por, além de utilizá-los sem modificações, utilizar os valores médios de um intervalo com até 10 e 20 minutos em torno de um ponto amostral, como mostra a Figura 25. Podia-se ter utilizado o valor encontrado no intervalo de 10 em 10 ou de 20 em 20 minutos (sem calcular a média em torno destes instantes), mas se optou por utilizar a média para reduzir o efeito do ruído na medição. Estes valores de 10 e 20 minutos foram escolhidos por garantir a geração de um conjunto de dados de tamanho razoável para cada configuração observada, já que uma bomba passa normalmente somente algumas horas ligada.

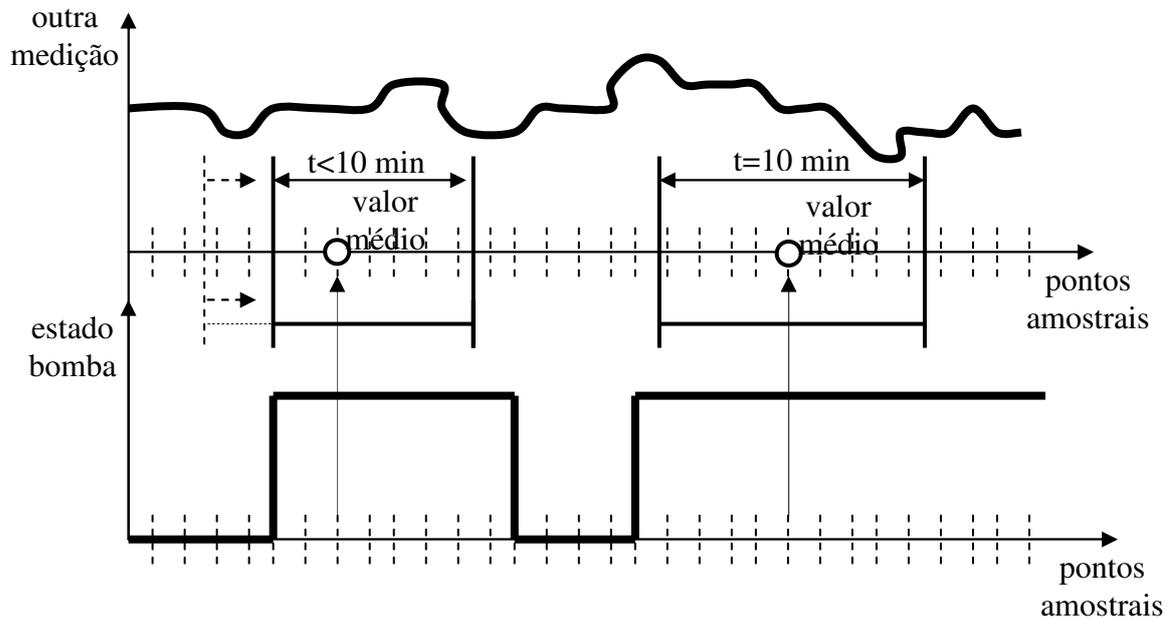


Figura 25 - Cálculo do valor médio em torno de um instante.

Em seguida, as unidades das medições de vazões foram convertidas de m^3/h para m^3/s , para facilitar a comparação com os dados de catálogo. Neste momento, realizou-se a correção das vazões medidas na saída das estações com os valores obtidos da comparação destas medições com o balanço hídrico nos tanques de transferência das respectivas estações.

Calculou-se o valor das cargas nos tanques (Equação 17) e nos pontos de medição de pressão (Equação 18 e Equação 19) para permitir o cálculo dos fatores de atrito e da altura manométrica das bombas.

$$E_t = cota + \frac{\rho_t \cdot N}{\rho_a} \quad [17]$$

$$E_{p1} = cota \cdot \rho_t \cdot g + 10000 \cdot p_{kgf} \cdot g_c \quad [18]$$

$$E_{p2} = cota + \frac{10000 p_{kgf}}{\rho_a} \quad [19]$$

Em que: E_t é a carga no tanque [mca];

ρ_t é a massa específica equivalente dos fluidos que preenchem o tanque [kg/m^3];

ρ_a é a massa específica da água a 20°C [kg/m^3];

p_{kgf} é a pressão medida [kgf/cm²];

E_{p1}, E_{p2} são as cotas piezométricas nos pontos de medição [Pa e mca, respectivamente];

g_c é a constante de gravidade que assume o valor da aceleração da gravidade nas condições de 45° de latitude, ao nível do mar (FALCO & MATTOS, 1989) [$\frac{kg}{kgf} \frac{m}{s^2}$].

Há quatro pontos de medição de pressão na malha piloto, localizados nas saídas das estações produtoras e na chegada da estação receptora, que coincidem com os extremos dos três trechos de dutos entre RFQ e UPN. Uma vez que se calculou a pressão total nestes pontos, pode-se compará-los. Assim, descartaram-se os instantes em que a linha piezométrica não decrescia, ou seja:

1. a cota piezométrica na saída de RFQ era menor que qualquer outra quando havia bombas funcionando nesta estação;
2. a cota piezométrica na saída de LPX era menor do que a cota nas estações a sua jusante quando havia bombas funcionando nesta estação;
3. a cota piezométrica na saída de LOR era menor do que a cota em UPN quando havia bombas funcionando nesta estação.

A partir deste ponto, os dados tratados tanto poderiam ser utilizados para calibração das bombas quanto dos dutos, independentemente. Para calibrar as bombas, calculou-se altura manométrica ($Hman$ [mca]) através da Equação 20. Considerou-se a vazão da bomba igual à vazão medida na saída da estação onde está instalada, dividida pelo número de bombas ligadas.

$$Hman = E_{p2} - E_t \quad [20]$$

De posse do par de dados de vazão [l/s] e altura manométrica [mca] de cada bomba, aplicou-se o ajuste de uma equação de primeiro grau, utilizando o método dos mínimos quadrados, para a vazão no eixo das ordenadas e a altura manométrica no eixo das abscissas. Isto foi realizado para promover um melhor ajuste da equação de primeiro grau aos pontos encontrados. Depois, com esta equação calculada, encontraram-se dois pontos, um localizado no eixo das ordenadas $P_1(0, y_1)$ e outro no eixo das abscissas $P_2(x_1, 0)$.

Trocaram-se os eixos, de forma a encontrar os pontos $P_3(0, x_1)$ e $P_4(y_1, 0)$ (Figura 26). Realizou-se este processo para cada uma das três partes do Supervisor, para cada uma das resoluções adotadas (sem alterações e média com até 10 e 20 minutos), e que geraram mais de 29 pares de dados (29 pontos) para realizar a regressão (SPIEGEL, 1977). Calculou-se a média de todos os pontos P_3 e P_4 , encontrando-se dois pontos, com os quais se calculou a equação de primeiro grau que representa o conjunto de dados, ou seja, o comportamento da bomba volumétrica.

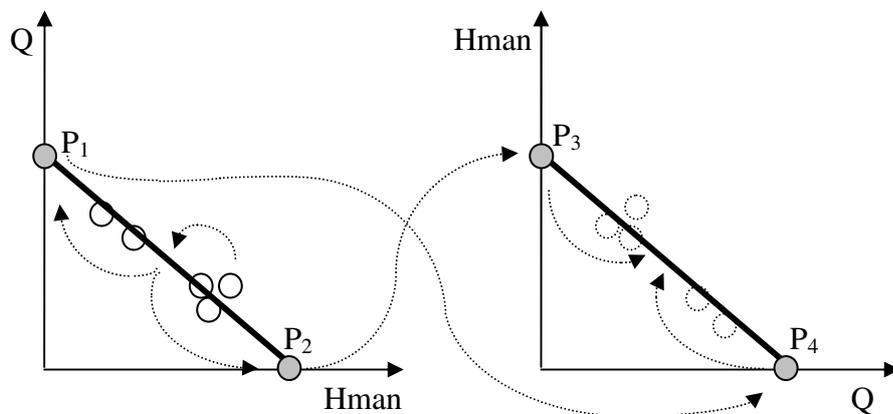


Figura 26 - Inversão dos eixos para ajuste da equação de 1º grau.

As curvas do catálogo das bombas volumétricas oferecem quatro informações principais (apêndices A e B): (1) acima do gráfico, está indicado o fluido utilizado para construir as curvas, que normalmente é a água; (2) os valores das rotações para as quais ela pode trabalhar estão no eixo das abscissas; (3) as possíveis vazões de trabalho estão indicadas no eixo das ordenadas; (4) nas retas diagonais, uma para cada valor de pressão manométrica, estão os possíveis pontos de trabalho. Então, dada a rotação, é possível encontrar três pares de pontos (vazão versus pressão) de trabalho, com os quais se pode construir uma equação que representa seu funcionamento.

Capturaram-se dois pontos de cada uma das três diagonais, converteram-se as unidades de vazão (de m^3/h para l/s) e pressão (de bar para mca), e formulou-se de forma a retornar três pontos de trabalho da bomba rotativa em função de sua rotação. Assim, considerando o ponto de menor pressão o que mais se aproxima dos valores observados, por causa da menor possibilidade de escorregamento de fluido, ajustou-se seu valor à equação

ajustada aos pontos observados variando o valor da rotação. Fez-se isto por que a rotação pode ser um bom indicativo da qualidade de calibração das bombas.

A maior viscosidade cinemática encontrada para os fluidos ensaiados na malha piloto (amostra 5), mostrados na Tabela 1, considerando uma temperatura de 20°C, foi utilizada para calcular o número de Reynolds, utilizando a Equação 10 e os valores de vazão observados para parte 4 do Supervisório (Quadro 6) com média até 10 minutos. Também, calcularam-se as velocidades do escoamento nos três dutos (Quadro 1). Estes valores servirão para avaliar o fenômeno de escorregamento de fluido através das bombas rotativas.

Para os dutos, com os mesmos conjuntos de dados (partes e resoluções) do Supervisório, calcularam-se os fatores de atrito, utilizando a Equação 21, que necessita do valor da massa específica equivalente dos fluidos que os preenchem (ρ_{eq} [kg/m³]), encontrado através da Equação 22.

$$f = \frac{(E_{p1\ mont} - E_{p1\ jus}) \cdot \pi^2 \cdot D^5}{8 \rho_{eq} \cdot L \cdot Q^2} \quad [21]$$

$$\rho_{eq} = \frac{\sum Q_i \cdot \rho_i}{\sum Q_i} \quad [22]$$

Em que: $E_{p1\ mont}$, $E_{p1\ jus}$ são as cotas piezométricas calculadas para os extremos a montante e a jusante de cada duto [Pa];

Q_i é a vazão de contribuição de cada estação na vazão que passa pelo duto [m³/s];

ρ_i é a massa específica de contribuição de cada estação na massa específica do fluido que passa pelo duto [kg/m³].

Foram selecionadas as configurações que ocorreram mais de 29 vezes (SPIEGEL, 1977) (dentro de cada parte e discretização do Supervisório) para poder realizar o cálculo da frequência do valor do fator de atrito para cada uma. Selecionou-se o conjunto que mais se repetiu e, retirou-se o valor médio do fator de atrito que foi considerado representativo para a respectiva configuração. Em seguida, calculou-se a média do fator de atrito por configuração. Assim, para cada parte do Supevisório se obteve um conjunto de configurações e os respectivos fatores de atrito em D1, D2 e D3.

4.4.2. Validação

Neste momento, tendo-se em mãos as equações de todas as bombas calibradas, os fatores de atrito válidos para suas respectivas configurações da malha piloto, para a parte 1 e 2 do Supervisório (a parte 3 não gerou dados para os fatores de atrito), uma lista de configurações calibradas (configurações para as quais os dutos foram calibrados) e a parte 4 do Supervisório que servirá de referência para os dados calibrados.

Procurou-se na parte 4 do Supevisório (com média até 10 minutos), por todas as configurações encontradas na lista de configurações calibradas, leram-se os valores dos níveis e, simulou-se cada um destes instantes com as equações das bombas e os fatores de atrito. Calcularam-se os erros percentuais entre as vazões (dutos) e cotas piezométricas (na saída das estações produtoras) observadas e calculadas, através das Equações 23 e 24.

$$Eq = \frac{100.(Q_{calc} - Q_{obs})}{Q_{obs}} \quad [23]$$

$$Ep = \frac{100.(p_{calc} - p_{obs})}{p_{obs}} \quad [24]$$

Em que: Eq, Ep são os erros percentuais da diferença entre a vazão calculada e observada e a vazão observada e da diferença entre a pressão calculada e observada e a pressão observada [%];

Q_{calc}, p_{calc} são as vazões e as cotas piezométricas calculadas [l/s, Pa, respectivamente];

Q_{obs}, p_{obs} são as vazões e as cotas piezométricas observadas na parte 4 do Supervisório [l/s e Pa, respectivamente].

Nas simulações com os dados calibrados, utilizaram-se valores das massas específicas das amostras 2, 3 e 4 encontradas na Tabela 1 para se converter as unidades de pressão, e estimaram-se as massas específicas que passam pelos dutos através da Equação 22. Em seguida, calculou-se o erro percentual médio encontrado (para vazões e cotas piezométricas) para cada uma das configurações calibradas.

5. Resultados e discussões

5.1. Resultados iniciais

Os dados do Supervisório anteriores ao dia 10/12/2005 foram descartados porque se identificou que o medidor de pressão na estação LPX estava trabalhando erroneamente, gerando valores de pressão abaixo do esperado e linha piezométrica crescente, como mostra a Figura 27, e não havia possibilidade de corrigir ou substituir o valor medido. Os dados anteriores ao dia 16/12/2005 também foram descartados, porque no dia 15/12/2005 foi instalado o medidor de vazão na saída da estação LPX e, preferiu-se não corrigir ou substituir os dados dentro deste período.

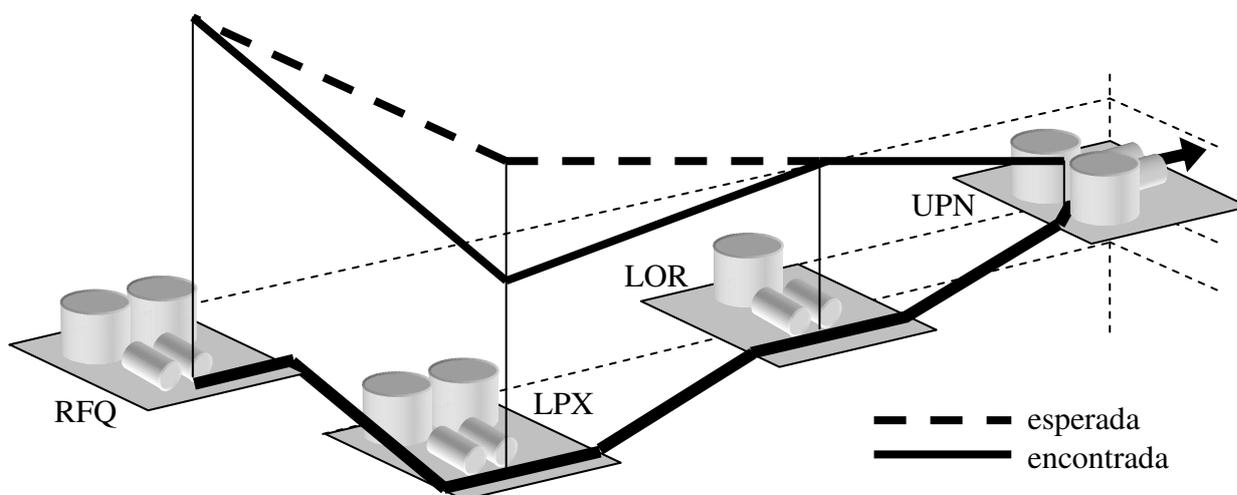


Figura 27 - Linha piezométrica na malha piloto até dia 09/12/05.

A partir da comparação do valor da medição de vazão na estação de LOR com o balanço hídrico no tanque de transferência, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4, no que resultou na indicação de que a vazão medida na saída desta estação deveria diminuir 3,122 %.

Tabela 4 - Comparação das medidas de vazão em LOR.

Data	LOR						Erro [%]
	Anterior		Durante		Posterior		
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	
16/12/05	00:20:45	03:28:15	04:09:55	05:49:55	06:14:55	08:28:15	2,287
21/12/05	18:28:15	20:49:55	20:58:15	21:23:15	21:35:45	23:36:35	1,835
26/12/05	11:41:35	13:53:15	13:57:25	14:21:35	14:37:25	16:56:35	3,576
31/12/05	12:17:25	16:38:15	17:04:55	17:46:35	18:14:05	22:13:15	0,377
15/01/06	15:44:55	17:38:15	17:56:35	18:11:35	18:28:15	20:58:15	2,598
20/01/06	08:36:35	11:10:45	11:30:45	11:58:15	12:12:25	16:14:55	1,739
25/01/06	14:01:35	18:03:15	18:15:45	18:53:15	19:09:55	23:19:55	0,524
30/01/06	15:44:05	17:45:35	17:54:55	18:10:45	18:29:55	21:23:15	4,832
04/02/06	01:31:35	05:18:15	05:36:35	07:31:35	07:51:35	11:18:15	0,690
09/02/06	12:24:05	16:02:50	16:29:05	17:03:15	17:21:35	19:26:35	7,091
01/03/06	09:18:15	11:29:05	11:49:05	12:22:25	12:32:25	13:51:35	5,304
06/03/06	05:07:25	06:11:35	06:19:05	06:28:15	06:44:05	08:19:55	6,615
						média =	3,122

A partir da comparação do valor da medição de vazão na estação de LPX com o balanço hídrico no tanque de transferência, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5, no que resultou na indicação de que a vazão medida na saída desta estação deveria aumentar 23,863 %.

Tabela 5 - Comparação das medidas de vazão em LPX.

Data	LPX						Erro [%]
	Anterior		Durante		Posterior		
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	
24/12/05	02:43:15	03:18:15	03:40:45	04:46:35	05:05:45	05:34:55	26,356
30/12/05	19:26:35	20:24:55	21:48:15	22:18:15	22:36:35	23:09:55	28,727
05/01/06	19:58:15	20:46:35	21:00:45	22:24:55	22:39:55	23:16:35	25,172
15/01/06	17:21:35	18:22:25	18:36:35	19:47:25	20:09:55	17:04:05	25,346
29/01/06	17:04:05	18:21:35	20:07:25	20:41:35	21:00:45	22:04:55	17,772
24/02/06	17:57:25	18:25:45	20:56:35	21:31:35	22:05:45	22:39:05	23,489
26/02/06	02:57:25	04:24:55	04:55:45	06:10:45	06:32:25	07:09:55	21,900
06/03/06	19:59:55	21:11:35	21:34:05	22:46:35	23:10:45	23:41:35	22,143
						média =	23,863

A partir da comparação do valor da medição de vazão na estação de RFQ com o balanço hídrico no tanque de transferência, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela

6, no que resultou na indicação de que a vazão medida na saída desta estação deveria aumentar 7,379 %.

Tabela 6 - Comparação das medidas de vazão em RFQ.

Data	RFQ		Erro [%]
	Durante		
	Início	Fim	
16/12/05	03:36:35	04:30:45	8,735
21/12/05	14:21:35	15:44:55	7,099
26/12/05	02:37:25	03:00:45	8,926
31/12/05	01:43:15	02:29:55	6,669
15/01/06	02:39:05	03:57:25	7,682
20/01/06	02:34:05	03:49:05	7,691
25/01/06	04:05:45	05:14:05	7,449
30/01/06	14:48:15	15:54:55	7,913
04/02/06	15:54:05	16:09:55	5,880
09/02/06	03:01:36	03:16:50	3,692
01/03/06	05:24:05	06:46:35	8,884
06/03/06	01:39:55	02:42:25	7,923
média =			7,379

A maior viscosidade cinemática encontrada para os fluidos ensaiados na malha piloto (amostra 5), mostrados na Tabela 1, considerando uma temperatura de 20°C ($\nu = 28,587 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, coeficientes: $m = -2,854$ e $b = 19,109$), foi utilizada para calcular o número de Reynolds. Os valores mínimos estão mostrados na Tabela 7, onde é possível observar que, para os dutos D2 e D3, os valores estão abaixo do limite de referência 2300 para consideração do regime como laminar (PORTO, 2004). Seus valores foram utilizados para verificar o regime de escoamento que ocorre na malha piloto.

Tabela 7 - Números mínimos de Reynolds.

	D1	D2	D3
mínimo	3575,600	2142,700	2171,400

No entanto, ao observar os Gráficos 12, 13 e 14, pode-se notar que, para a maioria das configurações, o regime é turbulento, considerando o fluido adotado (o observado mais viscoso). Sendo um indicativo de que, na maior parte do tempo, o fenômeno de escorregamento de fluido na bomba volumétrica devido ao regime de fluxo, que é predominantemente turbulento, é desprezível. O fato de só haver escoamento de petróleo (sem água e gás) na malha contribui para esta afirmação.

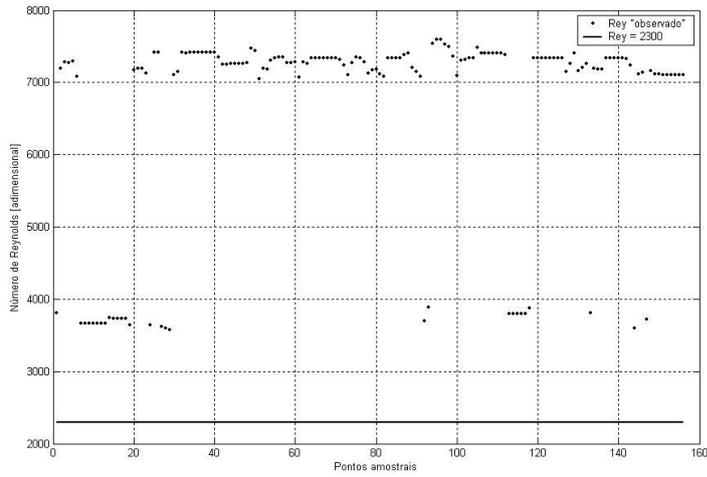


Gráfico 12 - Número de Reynolds para D1.

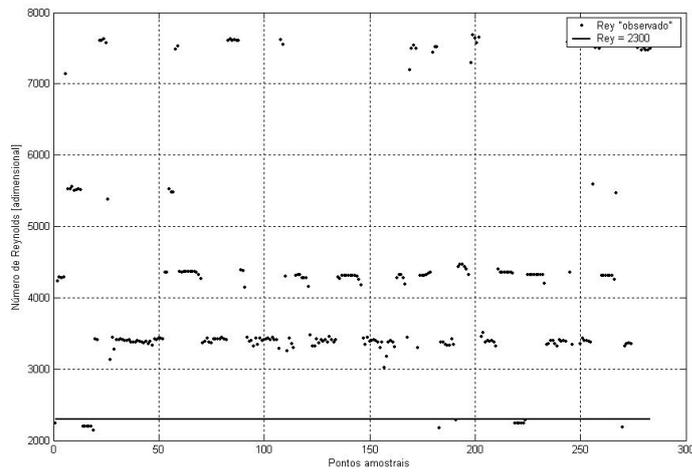


Gráfico 13 - Número de Reynolds para D2.

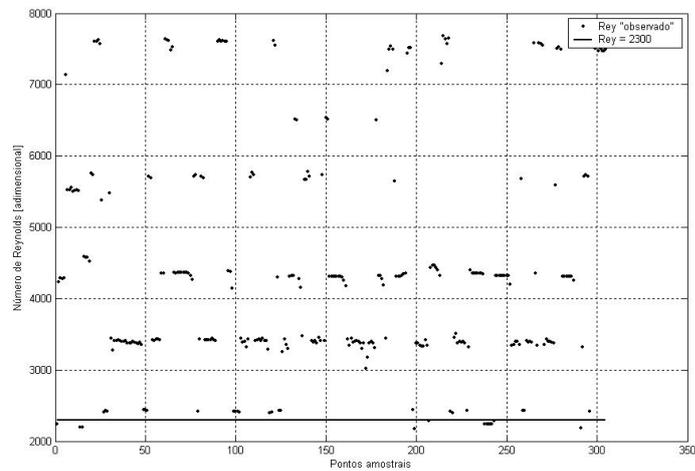


Gráfico 14 - Número de Reynolds para D3.

Calcularam-se as velocidades do escoamento nos três dutos da malha piloto, utilizando-se as vazões observadas na parte 4 do Supervisório (Quadro 6) com discretização de 10 em 10 minutos. Observou-se que as velocidades nunca ultrapassaram os valores clássicos observados nas redes de escoamento (de água), 1,5 m/s, isto é um indicativo que a rede está trabalhando adequadamente dentro dos padrões aceitáveis de velocidade do escoamento. O duto entre RFQ e LPX (D1) apresenta um patamar de velocidade maior que os outros dois dutos por que seu diâmetro é menor.

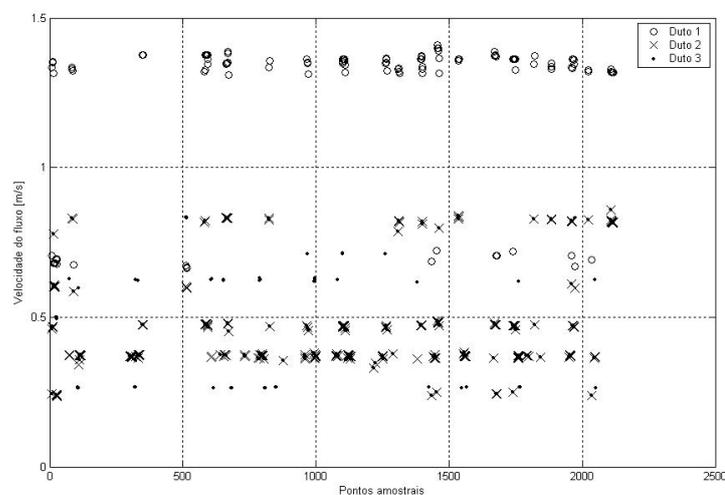


Gráfico 15 - Velocidades nos dutos da malha piloto.

5.2. Resultados para as bombas

Observou-se, enquanto se comparavam as equações obtidas da calibração para as bombas da malha piloto (Quadro 7), que para quaisquer parte do Supervisório e para quaisquer das três resoluções adotadas, as curvas das bombas não mudavam significativamente, indicando que se pode adotar uma única curva característica para cada uma. Não foi possível calibrar as bombas para a parte 3 do Supervisório com média até 10 e 20 minutos porque não se obtiveram o mínimo de 30 pontos (SPIEGEL, 1977) necessários para realizar a regressão.

Quadro 7 - Lista de gráficos dos ajustes das bombas da malha piloto.

Supervisório		Ordem	Bombas			
			B1	B2	B3	B5
parte 1	sem alterações	1	Gráfico 24	Gráfico 25	Gráfico 26	Gráfico 27
	média de 10 min	2	Gráfico 28	Gráfico 29	Gráfico 30	Gráfico 31
	média de 20 min	3	Gráfico 32	Gráfico 33	Gráfico 34	Gráfico 35
parte 2	sem alterações	4	Gráfico 36	Gráfico 37	Gráfico 38	Gráfico 39
	média de 10 min	5	Gráfico 40	Gráfico 41	Gráfico 42	Gráfico 43
	média de 20 min	6	Gráfico 44	Gráfico 45	Gráfico 46	Gráfico 47
parte 3	sem alterações	7	Gráfico 48	Gráfico 49	Gráfico 50	Gráfico 51
	média de 10 min	8	x	x	x	x
	média de 20 min	9	x	x	x	x

Figuras localizadas na seção 8.1. Anexo A.

Ao se reunir em um só gráfico as equações encontradas para cada bomba, verificou-se que a mudança nos dados devido à adoção de períodos com resoluções diferentes para realizar a calibração não afetou significativamente o comportamento das equações calibradas, como mostram os Gráficos 16 a 19, para as bombas B1 em RFQ, B2 em RFQ, B3 em LPX e B5 em LOR, respectivamente.

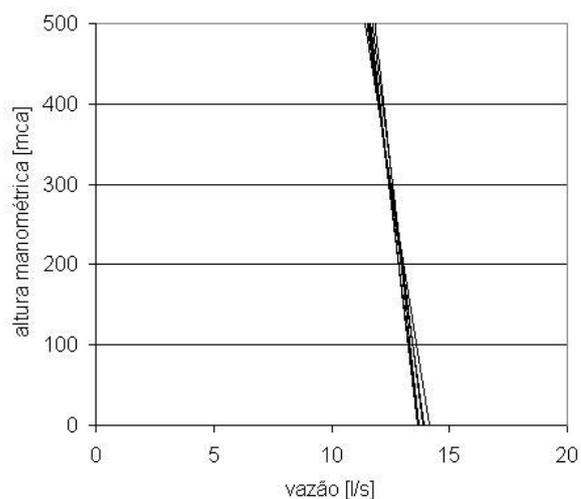


Gráfico 16 - Equações ajustadas para B1 em RFQ.

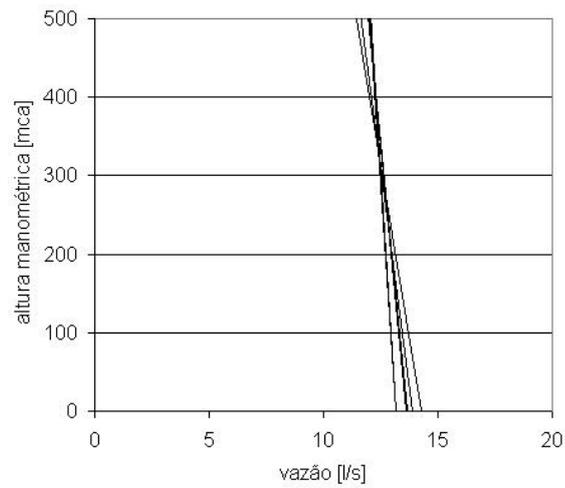


Gráfico 17 - Equações ajustadas para B2 em RFQ.

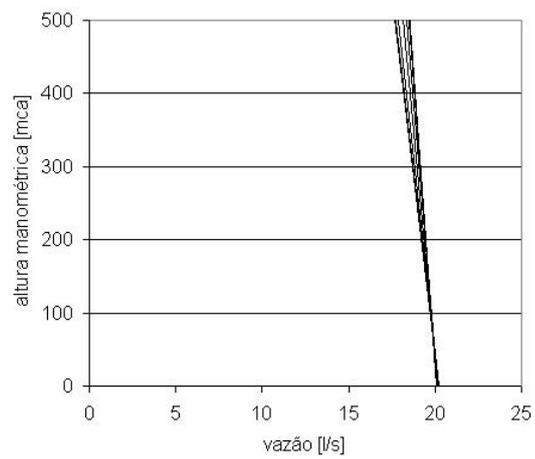


Gráfico 18 - Equações ajustadas para B3 em LPX.

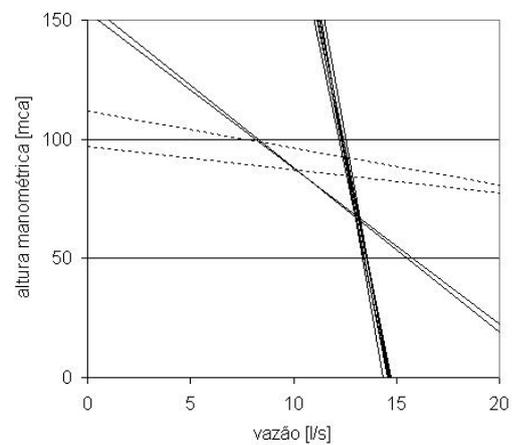


Gráfico 19 - Equações ajustadas para B5 em LOR.

Pode-se observar no Gráfico 19, que há quatro retas bem mais inclinadas (duas contínuas e duas tracejadas) do que o conjunto de retas que saem próximo do valor 15 l/s no eixo das abscissas. Estas retas foram ajustadas aos pontos localizados acima do valor 80 mca, para representar a influência da válvula de alívio no comportamento da bomba. Verificou-se que a discretização (sem alterações, com média até 10 e 20 minutos) adotada tem grande influência na inclinação da equação encontrada.

Tabela 8 - Pontos encontrados durante a calibração das bombas.

	Ordem	$P_1(0, y_1)$		$P_2(x_1, 0)$		$P_3(0, x_1)$		$P_4(y_1, 0)$	
		mca	l/s	mca	l/s	l/s	mca	l/s	mca
B1 em RFQ	1	0,000	13,644	3425,138	0,000	0,000	3425,138	13,644	0,000
	2	0,000	13,703	3206,785	0,000	0,000	3206,785	13,703	0,000
	3	0,000	13,642	3370,487	0,000	0,000	3370,487	13,642	0,000
	4	0,000	13,872	3242,158	0,000	0,000	3242,158	13,872	0,000
	5	0,000	13,712	3673,625	0,000	0,000	3673,625	13,712	0,000
	6	0,000	14,146	2591,892	0,000	0,000	2591,892	14,146	0,000
	7	0,000	13,936	2876,831	0,000	0,000	2876,831	13,936	0,000
			média →				0,000	3198,131	13,808
B2 em RFQ	1	0,000	13,178	5903,126	0,000	0,000	5903,126	13,178	0,000
	2	0,000	13,182	5690,520	0,000	0,000	5690,520	13,182	0,000
	3	0,000	13,149	6004,406	0,000	0,000	6004,406	13,149	0,000
	4	0,000	13,644	4003,059	0,000	0,000	4003,059	13,644	0,000
	5	0,000	13,600	4118,130	0,000	0,000	4118,130	13,600	0,000
	6	0,000	13,887	3093,468	0,000	0,000	3093,468	13,887	0,000
	7	0,000	14,259	2514,846	0,000	0,000	2514,846	14,259	0,000
			média →				0,000	4475,365	13,557
B3 em LPX	1	0,000	20,165	5042,531	0,000	0,000	5042,531	20,165	0,000
	2	0,000	20,224	4036,693	0,000	0,000	4036,693	20,224	0,000
	3	0,000	20,249	3962,133	0,000	0,000	3962,133	20,249	0,000
	4	0,000	20,107	6291,283	0,000	0,000	6291,283	20,107	0,000
	5	0,000	20,149	5595,172	0,000	0,000	5595,172	20,149	0,000
	6	0,000	20,091	6480,879	0,000	0,000	6480,879	20,091	0,000
	7	0,000	20,233	4293,713	0,000	0,000	4293,713	20,233	0,000
			média →				0,000	5100,344	20,174
B5 em LOR	1	0,000	14,623	701,457	0,000	0,000	701,457	14,623	0,000
	2	0,000	14,710	635,105	0,000	0,000	635,105	14,710	0,000
	3	0,000	14,702	644,737	0,000	0,000	644,737	14,702	0,000
	4	0,000	14,559	642,828	0,000	0,000	642,828	14,559	0,000
	5	0,000	14,359	642,828	0,000	0,000	642,828	14,359	0,000
	6	0,000	14,605	605,251	0,000	0,000	605,251	14,605	0,000
	7	0,000	14,733	614,899	0,000	0,000	614,899	14,733	0,000
			média →				0,000	641,015	14,613

Assim, decidiu-se adotar uma única equação para cada bomba, encontrada a partir da média dos pontos calculados durante a análise de cada parte e discretização do Supervisório, conforme indicado no Quadro 7 e na Tabela 8, porque se verificou que não havia variação significativa.

Ao ajustar uma equação de primeiro grau aos pontos em negrito da Tabela 8, pode-se encontrar para cada bomba uma equação (conforme Equação 14), cujos coeficientes foram listadas na Tabela 9, para a vazão em l/s e altura manométrica em mca. Apesar de teoricamente a bomba poder suportar pressões (em mca) na faixa indicada pelo coeficiente “c” de sua curva característica, na prática, a rede não requer pressões tão elevadas, e mesmo que isto pudesse ocorrer, equipamentos de proteção iriam evitar tal problema.

Tabela 9 - Coeficientes das equações das bombas calibradas.

	a	b	c
B1	0,000	-231,616	3198,131
B2	0,000	-330,117	4475,365
B3	0,000	-252,818	5100,344
B5	0,000	-43,866	641,015

A mudança de dados também não afetou significativamente o ajuste da rotação da curva do catálogo à reta ajustada aos pontos observados. Pode-se notar isto através da observação dos Gráficos 20 a 23, onde a numeração corresponde à “ordem” no Quadro 7.

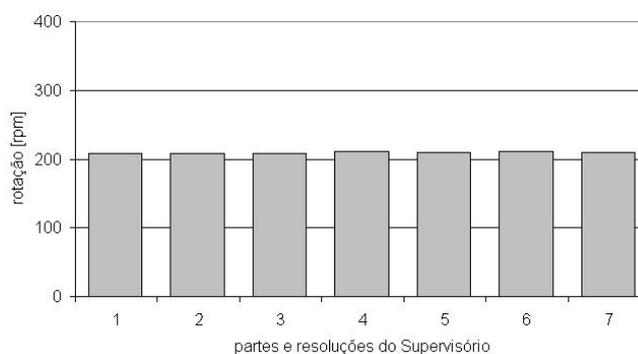


Gráfico 20 - Rotações encontradas para B1 em RFQ.

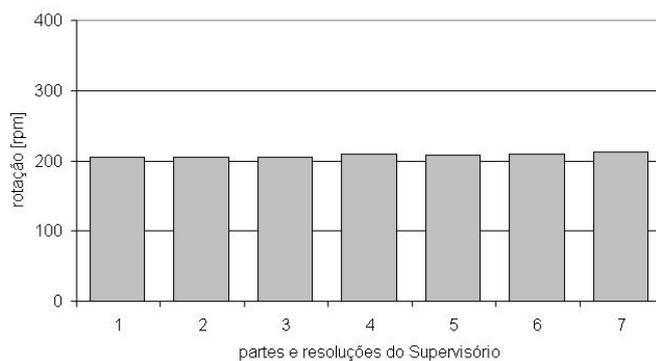


Gráfico 21 - Rotações encontradas para B2 em RFQ.

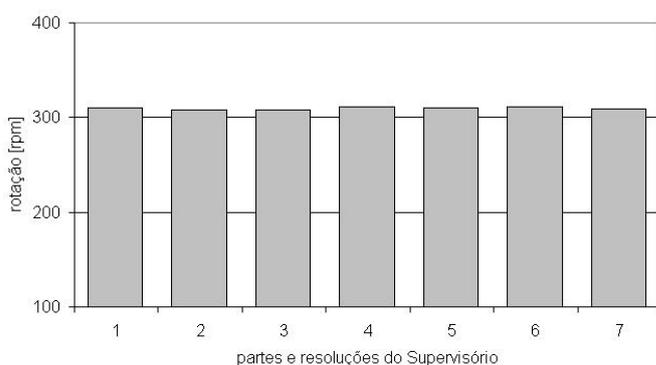


Gráfico 22 - Rotações encontradas para B3 em LPX.

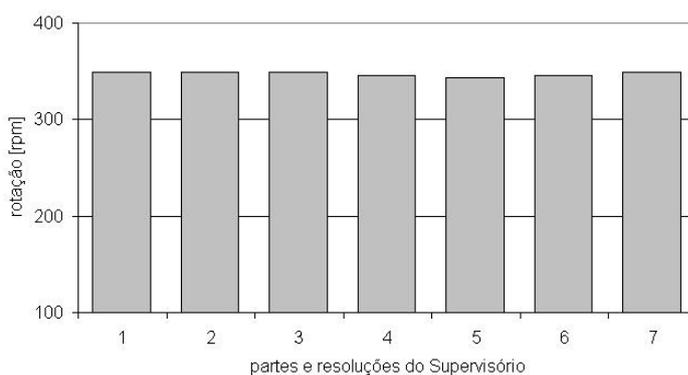


Gráfico 23 - Rotações encontradas para B5 em LOR.

Ao se observar os Gráficos 27 e 39 (na seção 8.1. Anexo A), notou-se que parte os pontos relacionados à válvula não estavam sendo representados pela reta ajustada. No Gráfico 27, nota-se uma grande dispersão deste conjunto de pontos, o que pode ter causado um ajuste ruim, enquanto que, no Gráfico 39, percebe-se que há uma única grande aglomeração que

pode gerar uma equação com qualquer inclinação. Problema não verificado nos outros dois ajustes (Gráficos 43 e 47, na seção 8.1. Anexo A), pois alguns dos pontos pertencentes à curva da bomba também contribuíram para o ajuste da curva da válvula, deixando com uma inclinação mais adequada a representação de todos os pontos observados.

Por esta razão, os resultados dos ajustes mostrados (Gráficos 27 e 39, na seção 8.1. Anexo A) não foram considerados (linhas tracejadas no Gráfico 19, na seção 8.1. Anexo A). Calculou-se a equação que representa o funcionamento da válvula através da média dos valores obtidos com os últimos dois ajustes (Gráficos 43 e 47). Para isto, a inversão dos eixos não foi utilizada para poder ajustar as equações aos pontos. Os resultados estão mostrados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Pontos para calibração da válvula de reciclo.

Ordem	$P_3(0, x_1)$		$P_4(y_1, 0)$	
5	0,000	153,562	23,437	0,000
6	0,000	157,310	22,742	0,000
média →	0,000	155,436	23,090	0,000

Unidades: (l/s, mca).

Tabela 11 - Equação da válvula de reciclo.

	a	b	c
válvula	0,000	-6,732	155,436

5.3. Resultados para os dutos

Calcularam-se os fatores de atrito para todas as resoluções e partes do Supervisório (exceto para a discretização “sem alterações” para a Parte 3). Selecionaram-se as configurações que ocorreram mais 29 vezes e, calculou-se a distribuição de frequência do valor do fator de atrito para cada uma, com um intervalo de 0,0025, como mostram os gráficos indicados no Quadro 8.

Quadro 8 – Lista de gráficos da distribuição de frequências dos fatores de atrito.

Parte	Discretização	D1	D2	D3
1	sem alterações	Gráfico 52	Gráfico 53	Gráfico 54
1	10 min	Gráfico 55	Gráfico 56	Gráfico 57
1	20 min	Gráfico 58	Gráfico 59	Gráfico 60
2	sem alterações	Gráfico 61	Gráfico 62	Gráfico 63
2	10 min	Gráfico 64	Gráfico 65	Gráfico 66

Figuras localizadas na seção 8.2. Anexo B.

Tabela 12 - Fatores de atrito "observados".

Parte	Res.	configuração					D3			D2			D1			
		LOR	LPX	RFQ	f	dp	cv	f	dp	cv	f	dp	cv			
1	sem alterações	1	0	1	0	1	1	0,020	0,0013	6,362	0,025	0,0015	5,883	0,024	0,0009	3,582
		1	0	1	0	0	1	0,021	0,0008	3,641	0,030	0,0012	4,135	0,029	0,0004	1,423
		0	0	0	1	0	0	0,020	0,0013	6,426	0,090	0,0013	1,428			
		1	0	0	0	0	1	0,031	0,0007	2,262	0,088	0,0010	1,183	0,034	0,0005	1,468
		1	0	0	0	1	1	0,025	0,0008	3,416	0,045	0,0013	3,010	0,029	0,0005	1,698
		0	0	1	0	0	1	0,003	0,0007	21,598	0,070	0,0014	2,015	0,034	0,0004	1,234
		0	0	0	0	0	1	0,029	0,0009	3,133	0,160	0,0013	0,817	0,029	0,0016	5,468
		1	0	0	0	0	0	0,031	0,0012	3,907						
		1	0	1	0	0	0	0,021	0,0010	4,518	0,040	0,0015	3,618			
		0	0	1	0	1	1	0,003	0,0011	31,950	0,055	0,0014	2,561	0,026	0,0009	3,473
		0	0	0	0	1	1	0,009	0,0008	9,688	0,070	0,0013	1,900	0,026	0,0008	2,895
		0	0	1	0	0	0	0,015	0,0014	9,284	0,080	0,0014	1,792			
1	10 min	0	0	1	0	1	1	0,003	0,0009	29,561	0,056	0,0009	1,632	0,025	0,0012	4,573
		0	0	0	0	1	1	0,009	0,0010	11,856	0,070	0,0015	2,177	0,026	0,0008	3,115
		0	0	1	0	0	0	0,015	0,0012	7,611	0,080	0,0015	1,873			
1	20 min	0	0	0	0	1	1	0,009	0,0010	11,677	0,071	0,0016	2,215	0,026	0,0011	3,995
		0	0	1	0	0	0	0,015	0,0014	9,273	0,080	0,0017	2,083			
2	sem alterações	1	0	0	1	0	1	0,021	0,0009	4,182	0,025	0,0011	4,508	0,026	0,0011	4,199
		0	0	0	0	0	1	0,003	0,0009	25,673	0,295	0,0016	0,556	0,014	0,0009	6,719
		1	0	1	0	0	1	0,021	0,0011	5,142	0,029	0,0013	4,259	0,026	0,0009	3,372
		1	0	1	0	0	0	0,021	0,0010	4,775	0,045	0,0014	3,138			
		1	0	1	0	1	1	0,020	0,0010	4,967	0,024	0,0013	5,217	0,024	0,0005	2,054
		0	0	1	0	1	1	0,005	0,0012	23,294	0,050	0,0015	2,938	0,025	0,0012	4,912
		1	0	0	0	1	1	0,025	0,0010	4,041	0,030	0,0010	3,520	0,025	0,0010	3,928
		0	0	0	0	1	1	0,020	0,0013	6,524	0,039	0,0013	3,286	0,025	0,0011	4,305
		0	0	1	0	0	0	0,010	0,0015	14,901	0,065	0,0015	2,240			
2	10 min	1	0	0	0	0	0	0,031	0,0014	4,526						
		0	0	0	0	1	1	0,020	0,0015	7,723	0,055	0,0017	3,065	0,025	0,0010	3,941
		0	0	1	0	0	0	0,015	0,0018	12,350	0,075	0,0013	1,715			
		1	0	0	0	0	0,030	0,0015	4,939							

f: fator de atrito; dp: desvio padrão; cv: coeficiente de variação.

Calculou-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos valores encontrados dentro do intervalo com maior ocorrência para cada configuração listada, como mostra a Tabela 12. Nota-se que o coeficiente de variação se apresentou bastante alto para D3 (entre LOR e UPN) (destacado na Tabela 12), sendo reflexo do baixo valor do fator de atrito e não de uma dispersão maior, como comprovam os Gráficos 54, 57, 60, 63 e 66 (localizados na seção 8.2. Anexo B). As maiores dispersões foram encontradas para D2, como mostram os Gráficos 53, 56, 59, 62 e 65 (seção 8.2. Anexo B). Destacou-se a configuração que demonstrou as maiores diferenças entre as partes 1 e 2.

Calculou-se a média dos fatores de atrito encontrados nas configurações repetidas dentro de cada parte do Supervisório, obtendo-se os valores indicados nas Tabelas 13 e 14. As células em branco correspondem às configurações que não geram fluxo em alguns dutos, ou seja, os dutos não são utilizados nestas configurações.

Tabela 13 - Fatores de atrito "observados" para parte 1 do Supervisório.

configuração						D1			D2			D3		
RFQ	LPX		LOR			f	dp	cv	f	dp	cv	f	dp	cv
1	1	1	0	1	0	0,024	0,001	3,582	0,025	0,001	5,883	0,020	0,001	6,362
0	1	1	0	1	0	0,029	0,000	1,423	0,030	0,001	4,135	0,021	0,001	3,641
0	0	0	1	0	0				0,090	0,001	1,428	0,020	0,001	6,426
0	1	0	0	1	0	0,034	0,000	1,468	0,088	0,001	1,183	0,031	0,001	2,262
1	1	0	0	1	0	0,029	0,000	1,698	0,045	0,001	3,010	0,025	0,001	3,416
0	1	1	0	0	0	0,034	0,000	1,234	0,070	0,001	2,015	0,003	0,001	21,598
0	1	0	0	0	0	0,029	0,002	5,468	0,160	0,001	0,817	0,029	0,001	3,133
0	0	0	0	1	0							0,031	0,001	3,907
0	0	1	0	1	0				0,040	0,001	3,618	0,021	0,001	4,518
1	1	1	0	0	0	0,026	0,001	4,020	0,056	0,001	2,093	0,003	0,001	30,783
1	1	0	0	0	0	0,026	0,001	3,333	0,070	0,001	2,097	0,009	0,001	11,080
0	0	1	0	0	0				0,080	0,002	1,916	0,015	0,001	8,720

A partir dos valores “observados” dos fatores de atrito encontrados nas Tabelas 13 e 14 e das equações das bombas encontradas nas Tabelas 9 e 11, procurou-se pelas configurações listadas nas Tabelas 13 e 14 na parte 4 do Supervisório (Quadro 6), assim, uma vez identificada a configuração, liam-se os valores dos níveis dos tanques (com média até 10 minutos) e, simulou-se cada instante com o modelo.

Tabela 14 - Fatores de atrito "observados" para parte 2 do Supervisório.

configurações						D1			D2			D3		
RFQ	LPX	LOR		f	dp	cv	f	dp	cv	f	dp	cv		
0	1	0	1	1	0	0,026	0,001	4,199	0,025	0,001	4,508	0,021	0,001	4,182
0	1	0	0	0	0	0,014	0,001	6,719	0,029	0,002	0,556	0,003	0,001	25,673
0	1	1	0	1	0	0,026	0,001	3,372	0,029	0,001	4,259	0,021	0,001	5,142
0	0	1	0	1	0				0,045	0,001	3,138	0,021	0,001	4,775
1	1	1	0	1	0	0,024	0,001	2,054	0,024	0,001	5,217	0,020	0,001	4,967
1	1	1	0	0	0	0,025	0,001	4,912	0,050	0,001	2,938	0,005	0,001	23,294
1	1	0	0	1	0	0,025	0,001	3,928	0,030	0,001	3,520	0,025	0,001	4,041
1	1	0	0	0	0	0,025	0,001	4,123	0,047	0,001	3,157	0,020	0,001	7,115
0	0	1	0	0	0				0,070	0,001	1,958	0,012	0,002	13,374
0	0	0	0	1	0							0,031	0,001	4,732

5.4. Validação

Simularam-se todos os instantes encontrados na parte 4 que continham as configurações listadas nas Tabelas 13 e 14 com os dados de fatores de atrito e equações das bombas calibradas. A partir disto foi possível comparar as vazões nos dutos e cotas piezométricas nas saídas das estações calculadas com as observadas na parte 4 do Supervisório.

Calculou-se o erro percentual entre a diferença entre os valores calculado e observado e o valor observado, para cada instante. Os erros percentuais calculados foram separados por configuração e, calculou-se a média aritmética de cada um, obtendo-se os valores que estão mostrados nas tabelas 15, 16, 17 e 18. As lacunas nas tabelas ocorrem porque a informação é inexistente, ou seja, a bomba ou o duto não foram utilizados na respectiva configuração.

Tabela 15 - Erro percentual entre as vazões observadas e calculadas com dados da parte 1.

configuração						erro percentual [%]		
RFQ	LPX	LOR		D1	D2	D3		
0	0	1	0	0	0		-0,554	-0,554
0	0	0	0	1	0			-12,624
1	1	0	0	1	0	-2,531	-2,531	-2,181
1	1	0	0	0	0	-7,331	-7,331	-7,331
0	0	1	0	1	0		1,132	-2,143
0	1	1	0	1	0	-2,163	1,221	2,331
1	1	1	0	0	0	-7,808	-5,324	-5,324
0	1	1	0	0	0	-0,153	-0,339	-0,339

Tabela 16 - Erro percentual entre as cotas piezométricas observadas e calculadas com dados da parte 1.

configuração						erro percentual [%]		
RFQ	LPX	LOR	D1	D2	D3			
0	0	1	0	0	0		-15,971	
0	0	0	0	1	0			-7,639
1	1	0	0	1	0	24,283		-49,549
1	1	0	0	0	0	63,848		
0	0	1	0	1	0		-43,870	-23,951
0	1	1	0	1	0	-39,514	-56,531	-72,263
1	1	1	0	0	0	62,005	25,302	
0	1	1	0	0	0	36,919	7,707	

Erro entre as cotas piezométricas a montante do duto indicado.

Tabela 17 - Erro percentual entre as vazões observadas e calculadas com dados da parte 2.

configuração						erro percentual [%]		
RFQ	LPX	LOR	D1	D2	D3			
0	0	1	0	0	0		-0,686	-0,686
0	0	0	0	1	0			-12,660
1	1	0	0	1	0	-2,695	-2,695	-1,924
1	1	0	0	0	0	-6,379	-6,379	-6,379
0	0	1	0	1	0		1,272	-2,068
0	1	1	0	1	0	-3,367	0,369	-0,290
1	1	1	0	0	0	-7,426	-4,991	-4,991

Tabela 18 - Erro percentual entre as cotas piezométricas observadas e calculadas com dados da parte 2.

configuração						erro percentual [%]		
RFQ	LPX	LOR	D1	D2	D3			
0	0	1	0	0	0		-10,894	
0	0	0	0	1	0			-7,422
1	1	0	0	1	0	25,683		-53,556
1	1	0	0	0	0	54,983		
0	0	1	0	1	0		-48,319	-23,860
0	1	1	0	1	0	-40,787	-43,536	-51,687
1	1	1	0	0	0	59,071	19,511	

Erro entre as cotas piezométricas a montante do duto indicado.

Observando-se os gráficos da seção 8.3. Anexo C, nota-se que o modelo consegue repetir o comportamento da malha piloto, especialmente, com relação às vazões. As Tabelas 15, 16, 17 e 18 comprovam que os erros entre os vazões apresentadas pelo modelo e as medidas em campo são menores que os erros entre as cotas piezométricas. Nestas tabelas é possível ver para cada configuração o erro percentual entre as vazões nos dutos e entre as cotas piezométricas nas saídas das estações observadas e calculadas com os dados das partes 1 e 2 e validadas com os dados da parte 4 do Supervisório.

Os erros percentuais encontrados para as vazões são considerados satisfatórios e indicam que as bombas volumétricas foram calibradas satisfatoriamente. Enquanto que os elevados erros percentuais encontrados na comparação das cotas piezométricas calculadas e observadas são um indicativo de que os dutos não foram calibrados satisfatoriamente.

6. Conclusões

Este trabalho se constitui em uma primeira tentativa para calibrar um modelo de redes de escoamento de petróleo baseado no monitoramento em tempo real existente. Por isto nenhuma das abordagens clássicas para calibração foi adotada, apesar dos procedimentos adotados serem parecidos com o método iterativo, no qual a calibração é realizada através de tentativa e erro, porém, sem realizar as repetições (iterações). Outra razão para isto se deve ao fato do autor desconhecer previamente o comportamento real da rede de escoamento de petróleo e não ter encontrado na literatura trabalhos correlatos que lidam com calibração deste tipo de rede (exceto em laboratório).

Optou-se por estudar o comportamento dos parâmetros das curvas características das bombas e dos fatores de atrito, estes últimos associados às configurações de bombeamento que ocorrem na rede de escoamento. Uma vez identificados (estimados), estes parâmetros foram testados com outro período de dados. As conclusões são relatadas a seguir.

A qualidade dos dados do monitoramento impacta diretamente a calibração, pois as inconsistências podem até inviabilizar seu uso, como no caso em que a cota piezométrica em um ponto, observada no monitoramento, era menor do que em outro ponto a jusante. Ao se utilizar estes valores, sem tratamento, podem-se encontrar valores negativos para as perdas de pressão, inviabilizando seu uso na estimativa do fator de atrito.

Os valores das vazões também são dados que merecem cuidados, pois um erro sistemático pode falsificar as verdadeiras equações das bombas rotativas e, ao se adotar estas equações, as bombas sempre apresentarão vazões fora da realidade, que irão impactar o balanço hídrico dos tanques e as decisões do SAD, conseqüentemente.

A má qualidade dos dados disponíveis (no monitoramento) de níveis dos tanques e do estado de bombas é menos grave do que dos dados de vazão e pressão, pois a primeira variável não é tão significativa no cálculo das equações das bombas, e a segunda pode ser facilmente reparada. Em outras palavras, o reparo da informação corrompida do estado da bomba é mais simples do que das outras variáveis.

As curvas características das bombas volumétricas da malha piloto podem ser representadas sem problemas por equações de primeiro grau, já que o escorregamento de

fluido nas bombas, devido às altas pressões, ao regime predominantemente turbulento e ao não escoamento de água (o que provocaria uma flexão maior na curva), não ocorre para as bombas em RFQ e LPX. Isto é um indício de que bombas volumétricas netas mesmas condições podem ser representadas sem hesitações por equações de primeiro grau.

Em LOR, o regime é também turbulento e pode-se dizer que também não há escoamento de água, mas seu comportamento apresenta uma flexão acentuada. Esta flexão, contudo, não ocorre por causa do escorregamento de fluido, mas devido à ação de uma válvula de reciclo de fluido da saída para a entrada da bomba. Seu comportamento também foi representado por uma equação de primeiro grau, que representa os pontos de trabalho acima de um valor de pressão indicado pelos operadores e confirmado pela observação dos dados.

Verificou-se, variando a série histórica de dados e sua discretização, que as equações das curvas características das bombas são bastante estáveis (robustas), ou seja, não mudam significativamente com a alteração daquelas informações, indicando que a calibração das bombas pode ser realizada com uma frequência muito baixa em relação à calibração dos dutos. As incertezas ou erros, entre duas calibrações temporalmente distantes das bombas, podem ser absorvidos pelas calibrações mais frequentes dos dutos.

No caso dos dutos, partiu-se da hipótese que o fluido não mudaria tanto a ponto de que houvesse uma variação tão significativa assim nos valores dos fatores de atrito que impedissem sua estimativa e uso no modelo, contudo os resultados obtidos não confirmaram isto.

Verificou-se que a variação do fator de atrito em D1, que é o duto que sai da estação RFQ, e só recebe fluido desta estação, mostra os melhores resultados e as menores dispersões e erros percentuais. Isto é uma indicação que a pequena variação do fluido no duto entre os períodos utilizados para calibrar e validar não é significante, permitindo o uso do fator de atrito para estimar seu comportamento futuro.

Contudo, nos outros dois dutos, os quais podem receber fluido das outras estações, especialmente o segundo duto que recebe de LPX, cujos fluidos chegam de vários campos produtores diferentes e que, provavelmente, bombeia fluidos variáveis em curtos espaços de tempo (dias), verificou-se uma maior variabilidade no valor do fator de atrito. Isto causou erros maiores na validação dos dados.

Apesar do grande erro encontrado na comparação das cotas piezométricas nas saídas das estações (sensível à calibração dos dutos), verificou-se que há certa repetição do comportamento, indicando que o modelo pode representar o processo real, desde que passe por um processo de calibração mais profundo (metuculoso, minucioso).

Concluiu-se que as bombas rotativas podem ser calibradas satisfatoriamente sem uso de qualquer informação do fluido bombeado. Mas, para estimar os fatores de atrito, é necessário conhecer a massa específica (ou peso específico) dos fluidos ao longo dos seus comprimentos.

6.1. Recomendações

Recomenda-se em estudo futuros:

1. Analisar o comportamento do fator de atrito em um duto em campo com a massa específica monitorada em tempo real, porque se verificou que sua influência é bastante significativa;
2. Aplicar uma abordagem mais sofisticada à calibração deste tipo de rede que utilize modelos de otimização que possam aproximar o modelo ao processo real;
3. Possibilitar que a calibração possa aproveitar a característica “em tempo real” do monitoramento, tornando-se “em tempo real” também.

7. Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP (2006). **Dados estatísticos**. Disponível em: http://sigep.anp.gov.br/petro/dados_estatisticos.asp. Acessado em: 04/05/2006 às 16:20h.

ALZAMORA, F. M., IZQUIERDO, A. G. & LEONARDO, J. L. C. G. (1996). El control centralizado de los sistemas de distribución. In: CABRERA et al, **Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua**. 2ª edición, Imprenta Sichert, Espanha, 1168p.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – ANSI (2005). **Centrifugal pumps handling viscous liquids – performance corrections**. Technical Report, ISO/TR 17766.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – API (1992). **Technical Data Book**. Chapter 11 – Viscosity, 5th edition.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA (1999). **Calibration guidelines for water distribution system modeling**. Disponível em: http://www.fwea.org/cmsitems/attachments/9/calibrate_AWWA.pdf. Acessado em : 04/05/2006 às 19:40h.

ANGELI, P. & HEWITT, G. F. (1998). **Pressure gradient in horizontal liquid-liquid flows**. International Journal of Multiphase Flow. vol 24, p1183-1203.

ANGELI, P. & HEWITT, G. F. (2000). **Flow structure in horizontal oil-water flow**. International Journal of Multiphase Flow. vol 26, p1117-1140.

ARAÚJO, J. K. & CHAUDHRY, F. H. (2004). **Influência das condições de estado permanente na identificação dos fatores de atrito de uma rede de distribuição de água com dados transientes**. VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís, 20p.

ASSY, T. M. (2004). **Mecânica dos Fluidos**. 2ª edição, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 500p.

BASCIA, A. & TUCCIARELLI, T. (2003). **Simultaneous zonation and calibration of pipe network parameters**. Journal of Hydraulic Engineering, vol 129, p394-403.

BEGA, E. A. (2006a). Pressão. In: BEGA, E. A. (org.), **Instrumentação Industrial**. 2ª edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 583p.

BEGA, E. A. (2006b). Nível. In: BEGA, E. A. (org.), **Instrumentação Industrial**. 2ª edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 583p.

BHAVE, P. R. (1988). **Calibrating water distribution networks models**. Journal of Environmental Engineering, vol 114, p120-136.

BONIZZI, M. & ISSA, R. I. (2003). **On the simulation of three phase slug flow in nearly horizontal pipes using the multi-fluid model**. International Journal of Multiphase Flow, vol 29, p1719-1747.

BOULOS, P. F. & WOOD, D. J. (1990). **Explicit calculation of pipe-network parameters**. Journal of Hydraulic Engineering, vol 116, p1329-1344.

BRAUNER, N., MARON, D. N. & ROVINSKY, J. (1998). **A two-fluid model for stratified flows with curves interfaces**. International Journal of Multiphase Flow, vol 24, p975-1004.

BUSH, C. A. & UBER, J. G. (1998). **Sampling design methods for water distribution model calibration**. Journal of Water Resources Planning and Management, vol 124, p334-344.

CESARIO, A. L. & DAVIS, J. O. (1984). **Calibrating water system models**. Journal of American Water Works Association, vol 76, p66-69

CHASE, D. V. (2000). Operation of water distribution systems. In: MAYS, L. W. (org.), **Water Distribution Systems Handbook**. Mc-Graw Hill, New York, 912p.

CHEUNG, P. B. (2001). **Investigação de métodos clássicos de calibração de redes hidráulicas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 132p.

CHEUNG, P. B., SOARES, A. K. & SOUZA, R. S. (2000). **Implementação e investigação de um método analítico de calibração de redes hidráulicas**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 15p.

DATTA, R. S. N. & SRIDHARAN, K. (1994). **Parameter estimation in water-distribution systems by least squares**. Journal of Water Resources Planning and Management, vol 120, p405-421.

DELMÉE, G. (2006). Vazão. In: BEGA, E. A. (org.), **Instrumentação Industrial**. 2ª edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 583p.

FALCO, R. DE & MATTOS, E. E. DE (1989). **Bombas Industriais**. JR Editora Técnica, Rio de Janeiro, 474p.

FARAH, M. A., OLIVEIRA, R. C., CALDAS, J. N. & RAJAGOPAL, K. (2005). **Viscosity of water-in-oil emulsions: variation with temperature and water volume fraction**. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol 48, p169-184.

GARCÍA, F., GARCÍA, R., PADRINO, J. P., MATA, C. & TRALLERO, J. L. (2003). **Power law and composite power law friction factor correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipelines**. International Journal of Multiphase Flow, vol 29, p1605-1624.

GRECO, M. & DEL GIUDICE, G. (1999). **New approach to water distribution network calibration**. Journal of Hydraulic Engineering, vol 125, p849-854.

HERRIN, G. A. (1997). The fundamentals of calibration. In: HAESTAD METHODS (org.), **The practical guide to hydraulics and hydrology**. Haestad Press.

HONG-BO, L., CHAO, W. & YONG-GANG, Z. (2004). **Plane flow model of non-newtonian turbulent stratified flow in wells and pipes**. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol 44, p223-229.

IZQUIERDO, J., PÉREZ, R. & IGLESIAS, P. L. (2004). **Mathematical models and methods in the water industry**. Mathematical and computer modelling, vol 39, p1353-1374.

KENNEDY, J. L. (1993). **Oil and Gas Pipeline Fundamentals**. 2th editon, PennWell Publishing Company, Tulsa, 366p.

KHODABANDEH, R. (2005). **Pressure drop in rise and evaporator in an advanced two-phase thermosyphon loop**. International Journal of Refrigeration. vol 28, p725-734.

KOIDE, S. (1998). **Equações simplificadas para a utilização da fórmula universal de perda de carga em tubulações**. Engenharia Sanitária e Ambiental, vol 3, n 3 e 4.

LANSEY, K. E. (2001). **Calibration assessment and data collection for water distribution networks**. Journal of Hydraulic Engineering, vol 127, p270-279.

LIGGETT, J. A. & CHEN, L. (1994). **Inverse transient analysis in pipe networks**. Journal of Hydraulic Engineering, vol 120, p934-955.

LIMA, E. P. C. (2003). **Mecânica das Bombas**. 2ª edição, Editora Interciência Ltda, Rio de Janeiro, 610p.

LINGIREDDY, S. & ORMSBEE, L. E. (2002). **Hydraulic network calibration using genetic optimization**. Civil Engineering and Environmental Systems, vol 19, p13-39.

LOVICK, J. & ANGELI, P. (2004). **Experimental Studies on the dual continuous flow pattern in oil-water flows**. International Journal of Multiphase Flow, vol, 30, p139-157.

LOVICK, J., BRISTOW, R. & ANGELI, P. (2000). **Pressure drop and hold-up in liquid-liquid flows**. Disponível em: <http://www.ichmt.org/abstracts/MFTP-2000/abstracts/65.pdf>. Acessado em: 04/05/2006 às 16:00h.

LOWRY, S. G. (2003). Using SCADA data for hydraulic modeling. In: HAESTAD METHODS (org.), **Advanced water distribution modeling and management**. Haestad Press, Waterbury, USA, 751p.

MACINTYRE, A. J. (1997). **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2ª edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 782p.

MARCHENA, I. & ORTEGA, D. A. (sem data). **Influencia de las propiedades físicas de los fluidos em la caída de presion y determinación de los patrones de flujo em um sistema bifásico liquido-liquido em tuberias horizontales**. Disponível em: http://iq.coord.usb.ve/pdf/miniproyecto/ene_mar2003/marchena_ortega.pdf Acessado em: 04/05/2006 às 18:00h.

NADLER, M. & MEWES, D. (1995). **The effect of gas injection on the flow of immiscible liquids in horizontal pipes**. Chemical Engineering Technology, vol 18, p 156-165.

NADLER, M. & MEWES, D. (1997). **Flow induced emulsification in the flow of two immiscible liquids in horizontal pipes**. International Journal of Multiphase Flow, vol 23, p55-68.

ODDIE, G., SHI, H., DURLOFSKY, L. J., AZIZ, K., PFEFFER, B. & HOLMES, J. A. (2003). **Experimental study of two and three flows in large diameter inclined pipes**. International Journal of Multiphase Flow, vol 29, p527-558.

OLIVEIRA, R. C. G. & CARVALHO, H. M. (1998). **Influência do tipo de emulsão sobre o escoamento e o processo de deposição.** Rio Oil and Gas Conference, Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro.

OLUJIC, Z. (1981). **Compute friction factors fast for flow in pipes.** Chemical Engineering, p91-93.

ORMSBEE, L. E. (1989). **Implicit network calibration.** Journal of Water Resources Planning and Management, vol 115, p243-257.

ORMSBEE, L. E. & LINGIREDDY, S. (1997). **Calibrating hydraulic networks models.** Journal of American Water Works Association, vol 89, p42-50

ORMSBEE, L. E. & WOOD, D. J. (1986a). **Explicit pipe network calibration.** Journal of Water Resources Planning and Management, vol 112, p166-182.

ORMSBEE, L. E. & WOOD, D. J. (1986b). **Hydraulic design algorithms for pipe networks.** Journal of Water Resources Planning and Management, vol 112, p1194-1207.

PICKERING, P. F., HEWITT, G. F., WATSON, M. J. & HALE, C. P. (sem data). **The prediction of flows in production risers – truth & myth?** Disponível em: <http://www.feesa.net/pdf/Discussion%20Papers/010627%20-%20Deepwater%20Risers%20Rev%20D.pdf> Acessado em: 04/05/2006 às 17:22h.

PORTO, R. de M. (2004). **Hidráulica Básica.** 3ª edição, EESC-USP, São Carlos, 519p.

PORTO, R. L. & AZEVEDO, L. G. T. (1997). Sistemas de suporte à decisões aplicados a problemas de recursos hídricos. In: PORTO, R. L. (org.), **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Ed. Universidade/UFRGS/ABRH; Porto Alegre.

PRADA, J. W. V. & BANNWART, A. C. (2001). **Modeling of vertical core annular flow and application to heavy oil production.** In: ETCE/OMAE Joint Conference - Energy for the New Millennium, American Society of Mechanical Engineering, New Orleans.

RAMALHO, J. B. V. S. (2000). **Efeito do envelhecimento sobre viscosidade e estabilidade de emulsões de petróleo do tipo água-óleo.** Boletim técnico Petrobrás, Rio de Janeiro.

RIGHETTO, A. M. (2001). **Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol 6, p33-44.

SANTANA, C. W. S., TÔRRES, E. G. & LACERDA, I. S. (2005). **Ajuste de equações para a viscosidade cinemática para produtos de petróleo em função da temperatura.** 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Salvador.

SALGADO, R., E. TODINI & P. E. O'CONNELL (1988). **Comparison of the gradient method with some traditional methods for the analysis of water supply distribution networks.** In: International Conference on Computer Applications for water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK.

SHAMIR, U. & HOWARD, C. D. D. (1977). **Engineering analysis of water distribution systems.** Journal of the American Water Works Association, vol 69, p510-514.

SILVA, F. G. B. (2003). **Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos.** Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 240p.

SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O. & CHAUDRY, F. H. (2004). **Calibração de um modelo de rede de distribuição de água para um setor de abastecimento real contemplando vazamentos.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol 9, p37-54.

SILVA, F. G. B. & REIS, L. F. R. (2002). **Calibração de redes de distribuição de água com algoritmos genéticos aplicada a uma rede hipotética.** VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 15p.

SMARTPUMPING. (2005). **Controle Inteligente de Sistemas de Bombeamento em Redes de Escoamento de Petróleo.** Projeto desenvolvido pela Universidade Federal de Campina Grande em parceria com a PETROBRAS. Laboratório de Sistemas Distribuídos. Disponível em: <http://www.lsd.ufcg.edu.br/sp>. Acessado em: 04/05/2006 às 15:10h.

SOARES, A. K. (2003). **Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão.** Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 178p.

SOARES, A. K., REIS, L. F. R. & CARRIJO, I. B. (2003). Head-driven simulation model (HDSM) for water distribution system calibration. In: **Advances in Water Supply Management.** Ed. Lisse, The Netherlands: A. A. Balkema Publishers, p197-207.

SPIEGEL, M. (1977). **Estatística.** Tradução de Pedro Consentino, edição revisada por Carlos José Pereira de Lucena, São Paulo, Mc-Graw Hill do Brasil.

STREETER, V. L. & WYLIE, E. B. (1980). **Mecânica dos Fluidos.** 7ª edição, Mc-Graw Hill, 585p.

SUSLICK, S. B. & SCHIOZER, D. J. (2004). **Risk analysis applied to petroleum exploration and production: an overview.** Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 44, p.1-9.

TERNYIK, J., BILGESU, H. I., MOHAGHEGH, S. & ROSE, D. M. (1995a). **Virtual measurement in pipes, part 1: flowing bottom hole pressure under multi-phase flow and inclined wellbore conditions.** In: Society of Petroleum Engineers – Eastern Regional Conference & Exhibition, Morgantown, USA.

TERNYIK, J., BILGESU, H. I. & MOHAGHEGH, S. (1995b). **Virtual measurement in pipes, part 1: liquido hold-up and flow pattern correlations.** In: Society of Petroleum Engineers – Eastern Regional Conference & Exhibition, Morgantown, USA.

TODINI, E. & S. PILATI (1987). A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks. In: **Computer Applications in Water Supply.** Volume 1, Ed. Bryan Coulbeck and Chun-Hou Orr, Research Studies Press Ltd., Letchworth, Hertfordshire, England.

TOPALLAR, H. e BAYRAK, Y. (1998). **The effect of temperature on the dynmaic viscosity of sunflower-seed oil mixtures.** Trakya University, Turkey.

WALSKI, T. M. (1983). **Technique for calibrating network models.** Journal of Water Resources Planning and Management, vol 109, n4, p360-370.

WALSKI, T. M. (1986). **Case study: pipe network model calibration issues.** Journal of Water Resources Planning and Management, vol 112, n2, p238-249.

WALSKI, T. M., CHASE, D. V., SAVIC, D., GRAYMAN, W. M., BECKWITH, S. & KOELLE, E. (2003). Calibrating hydraulic network models. In: HAESTAD METHODS (org.), **Advanced water distribution modeling and management.** Haestad Press, Waterbury, USA, 751p.

8. Anexos

8.1. Anexo A

Lista de figuras dos ajustes realizados de uma equação de primeiro grau aos pontos de trabalho das bombas (pontos negros), encontrados nas três partes selecionadas do Supervisório para realizar a calibração, sem alterações e com média até 10 e 20 minutos. E ajuste dos pontos de trabalho encontrados nos catálogos das bombas (círculos) às equações.

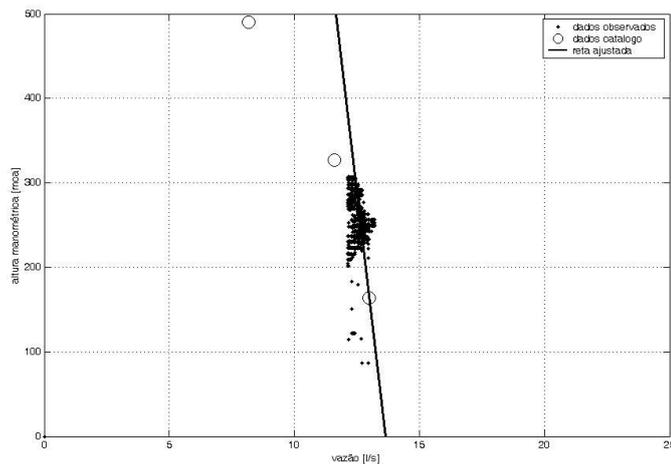


Gráfico 24 - Ajuste com pontos da parte 1 sem alterações, para B1 em RFQ.

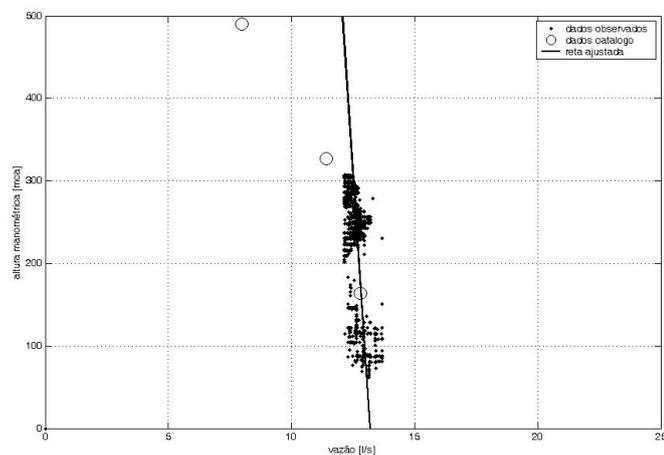


Gráfico 25 - Ajuste com pontos da parte 1 sem alterações, para B2 em RFQ.

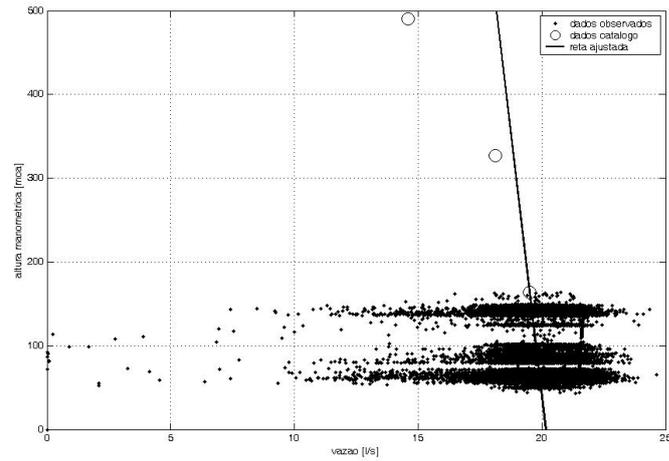


Gráfico 26 - Ajuste com pontos da parte 1 sem alterações, para B3 em LPX.

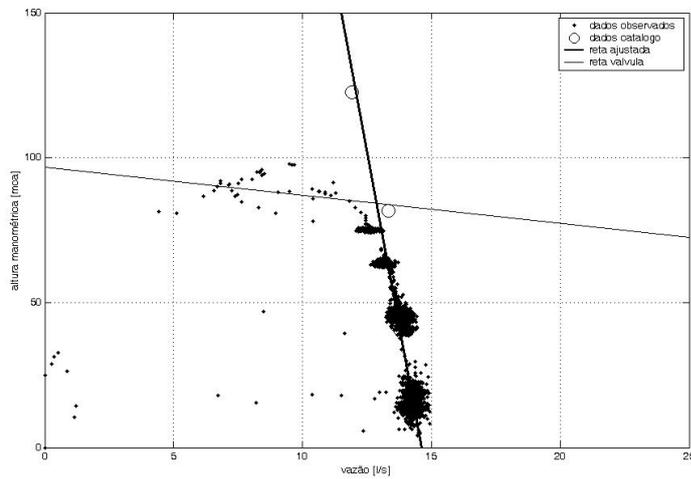


Gráfico 27 - Ajuste com pontos da parte 1 sem alterações, para B5 em LOR.

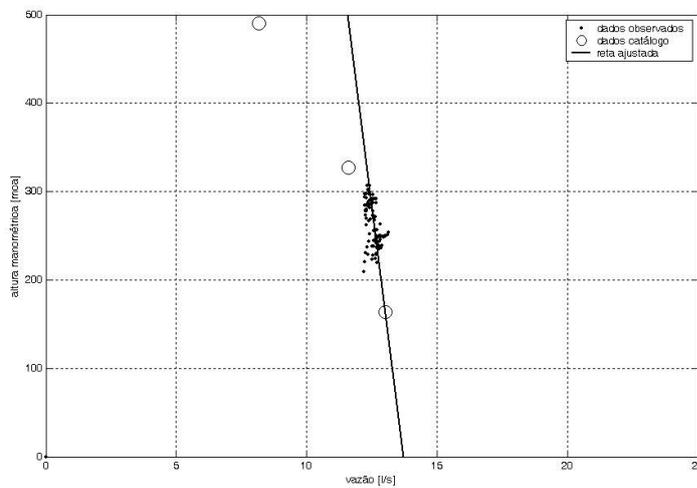


Gráfico 28 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 10 minutos, para B1 em RFQ.

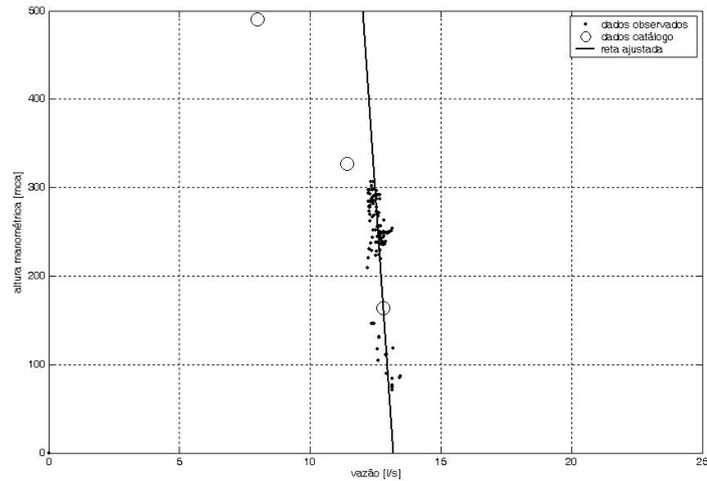


Gráfico 29 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 10 minutos, para B2 em RFQ.

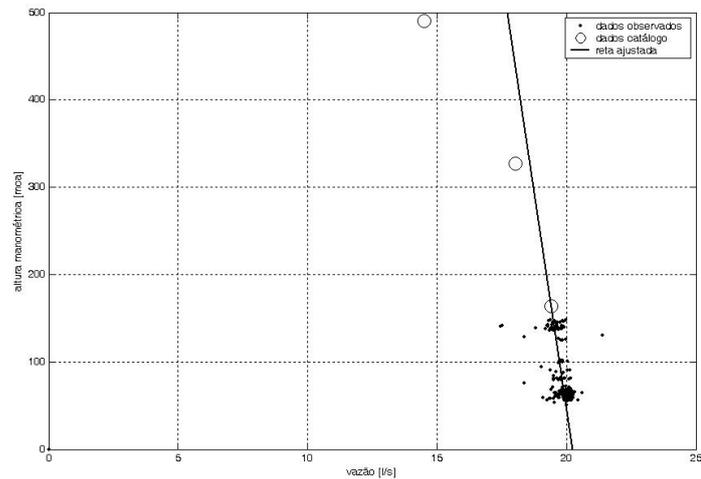


Gráfico 30 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 10 minutos, para B3 em LPX.

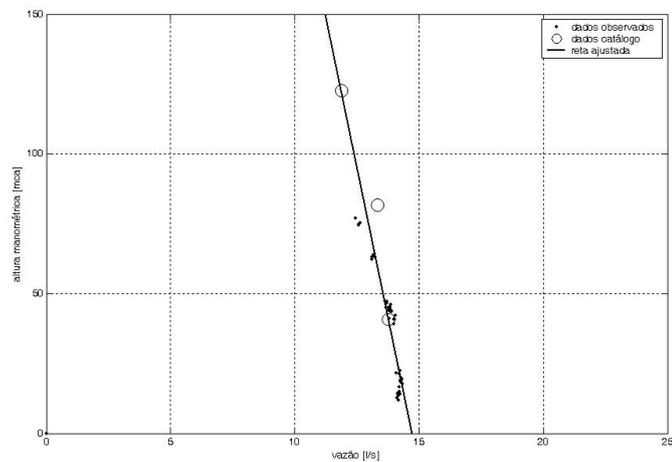


Gráfico 31 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 10 minutos, para B5 em LOR.

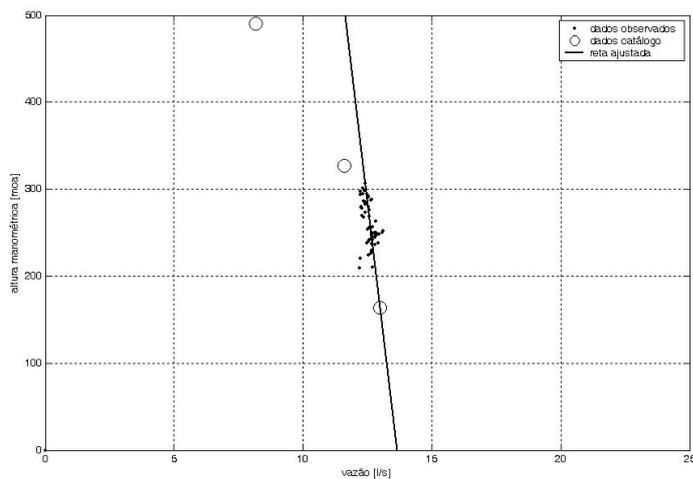


Gráfico 32 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 20 minutos, para B1 em RFQ.

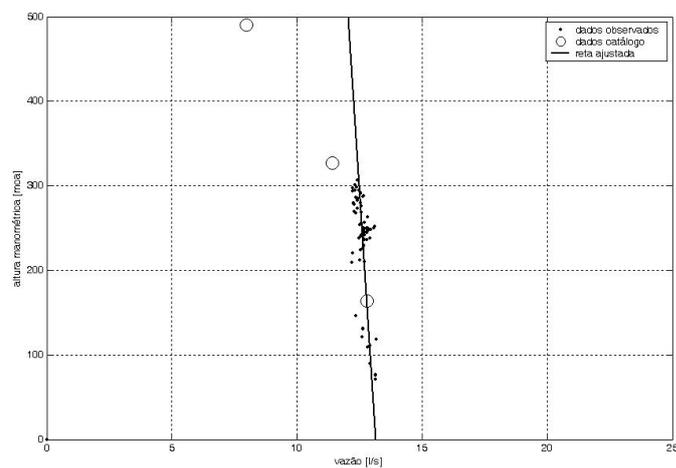


Gráfico 33 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 20 minutos, para B2 em RFQ.

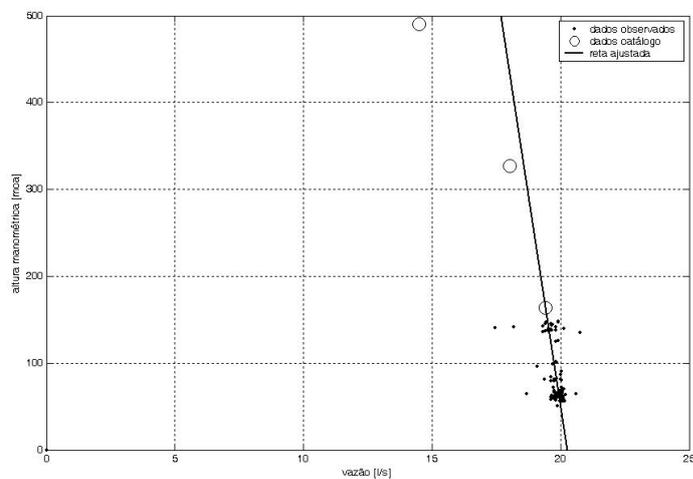


Gráfico 34 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 10 minutos, para B3 em LPX.

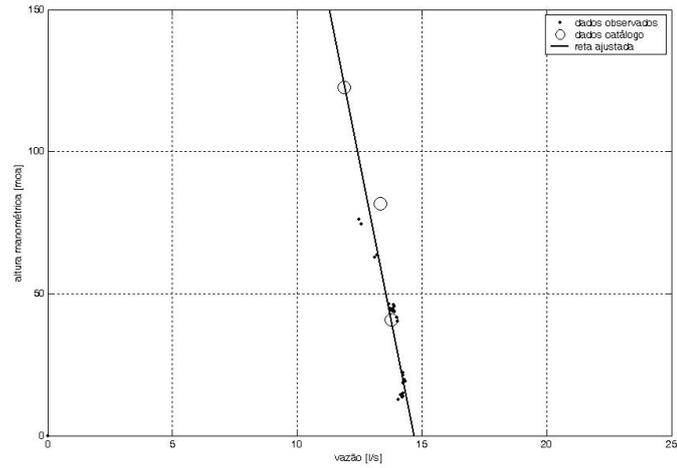


Gráfico 35 - Ajuste com pontos da parte 1 com média até 20 minutos, para B5 em LOR.

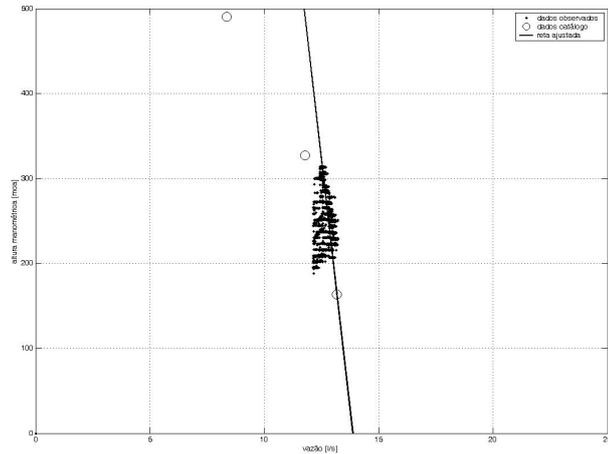


Gráfico 36 - Ajuste com pontos da parte 2 sem alterações, para B1 em RFQ.

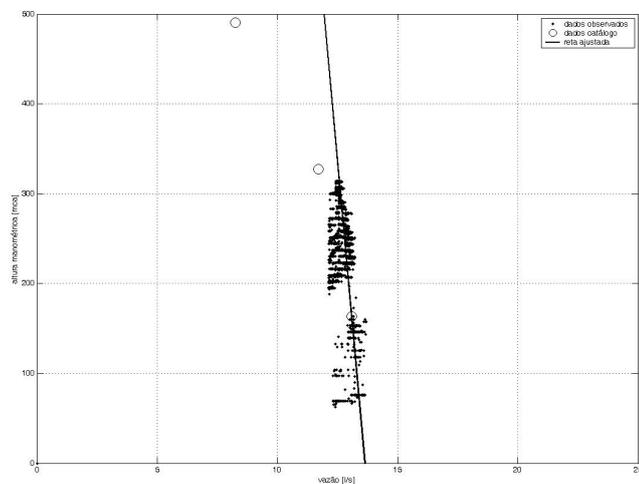


Gráfico 37 - Ajuste com pontos da parte 2 sem alterações, para B2 em RFQ.

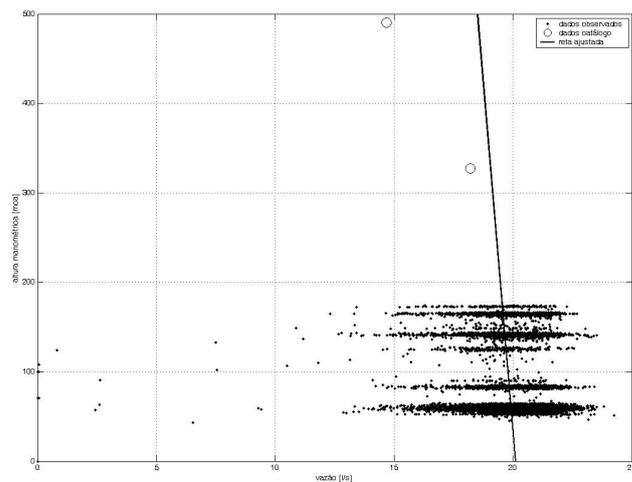


Gráfico 38 - Ajuste com pontos da parte 2 sem alterações, para B3 em LPX.

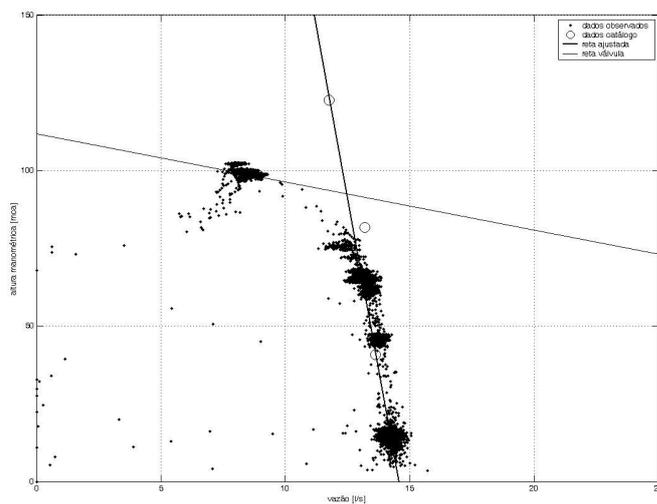


Gráfico 39 - Ajuste com pontos da parte 2 sem alterações, para B5 em LOR.

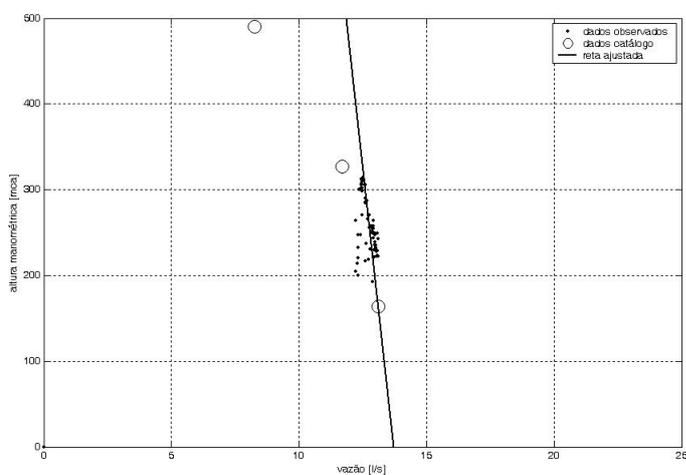


Gráfico 40 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 10 minutos, para B1 em RFQ.

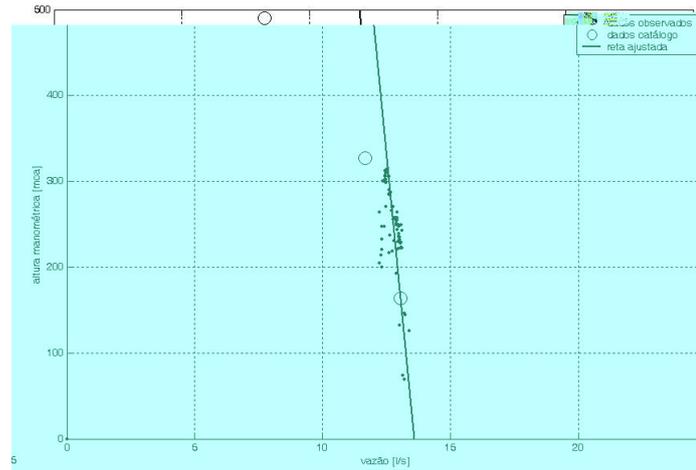


Gráfico 41 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 10 minutos, para B2 em RFQ.

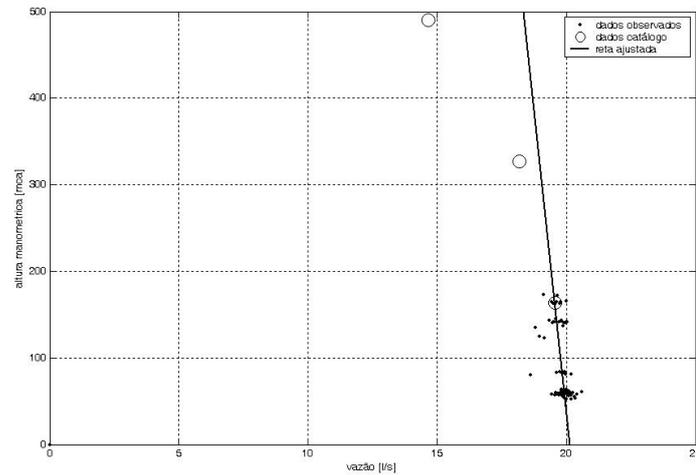


Gráfico 42 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 10 minutos, para B3 em LPX.

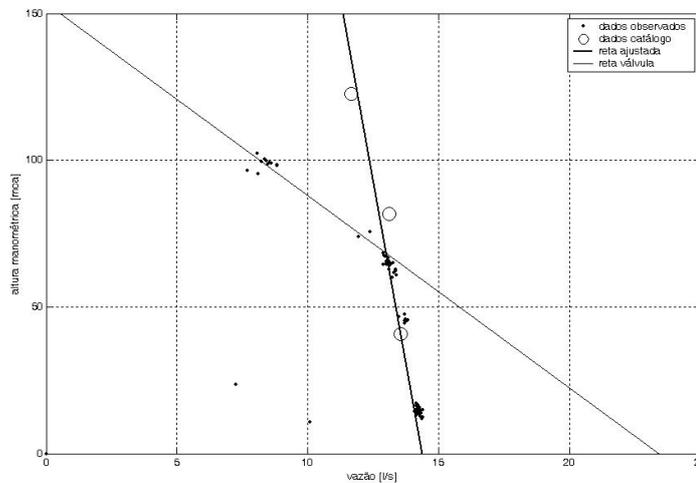


Gráfico 43 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 10 minutos, para B5 em LOR.

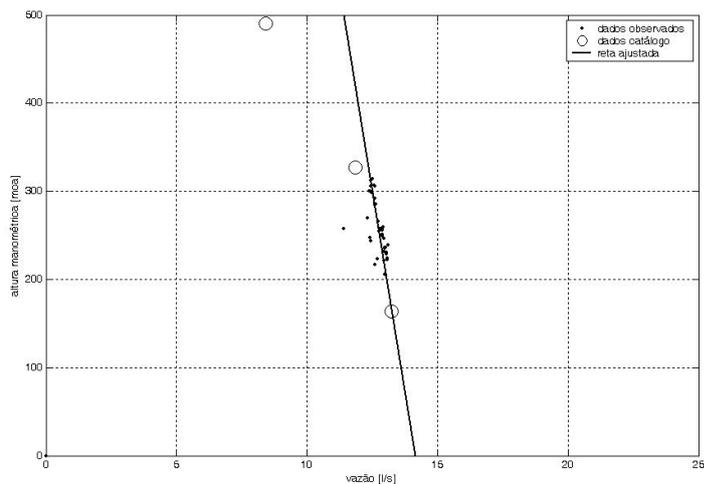


Gráfico 44 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 20 minutos, para B1 em RFQ.

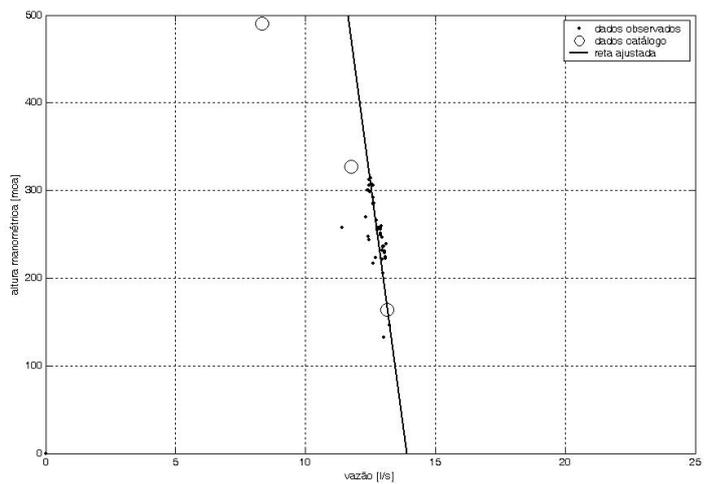


Gráfico 45 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 20 minutos, para B2 em RFQ.

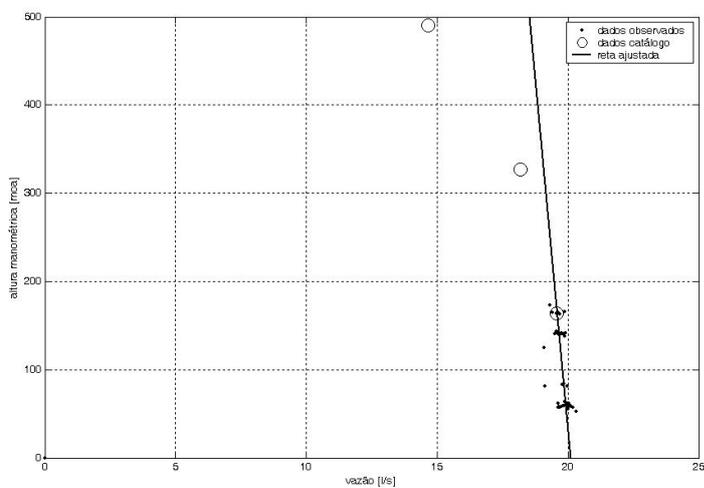


Gráfico 46 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 20 minutos, para B3 em LPX.

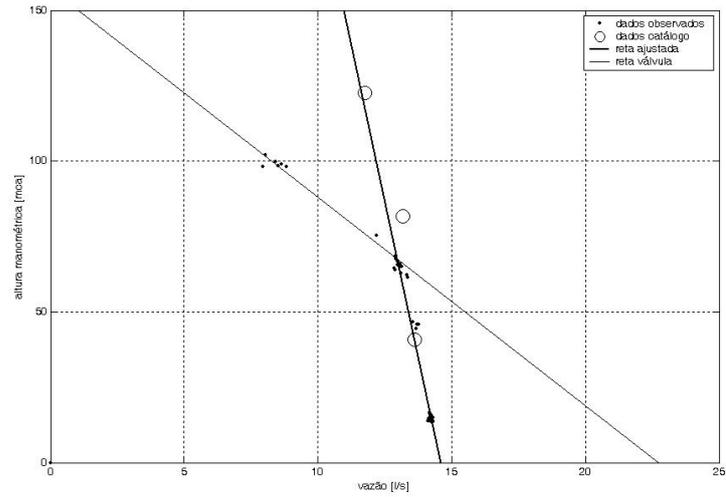


Gráfico 47 - Ajuste com pontos da parte 2 com média até 20 minutos, para B5 em LOR.

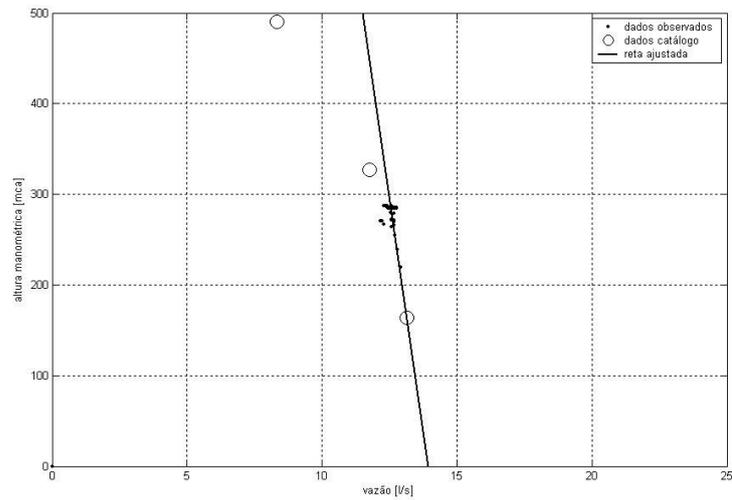


Gráfico 48 - Ajuste com pontos da parte 3 sem alterações, para B1 em RFQ.

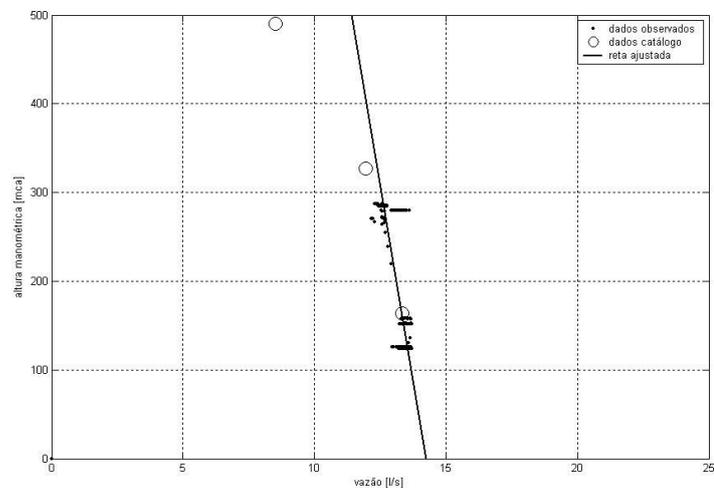


Gráfico 49 - Ajuste com pontos da parte 3 sem alterações, para B2 em RFQ.

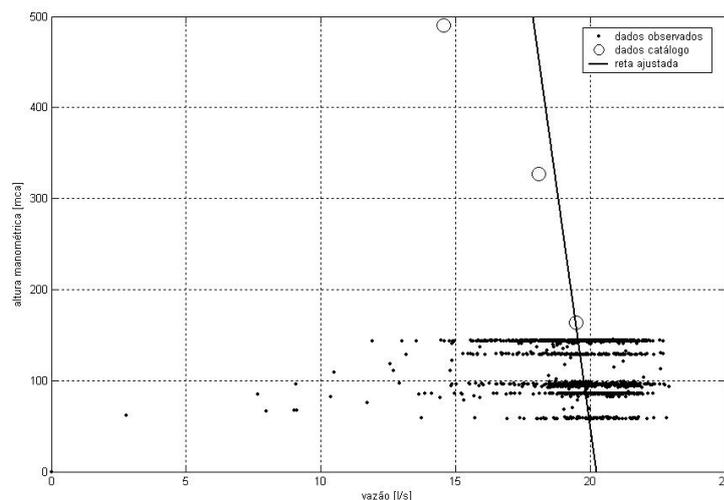


Gráfico 50 - Ajuste com pontos da parte 3 sem alterações, para B3 em LPX.

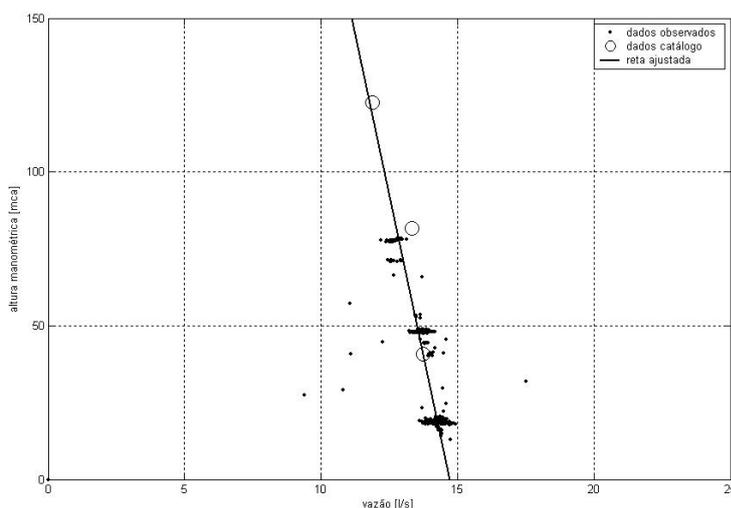


Gráfico 51 - Ajuste com pontos da parte 3 sem alterações, para B5 em LOR.

8.2. Anexo B

Lista de gráficos da distribuição de freqüências dos fatores de atrito, encontrados nas duas primeiras partes selecionadas do Supervisório para realizar a calibração, sem alterações e com média até 10 e 20 minutos. A terceira parte não gerou resultados porque poucas ocorrências foram verificadas para cada configuração, e para a discretização “sem alterações” não foi possível utilizá-la. Somente as configurações que geraram as maiores freqüências foram destacadas nos gráficos abaixo.

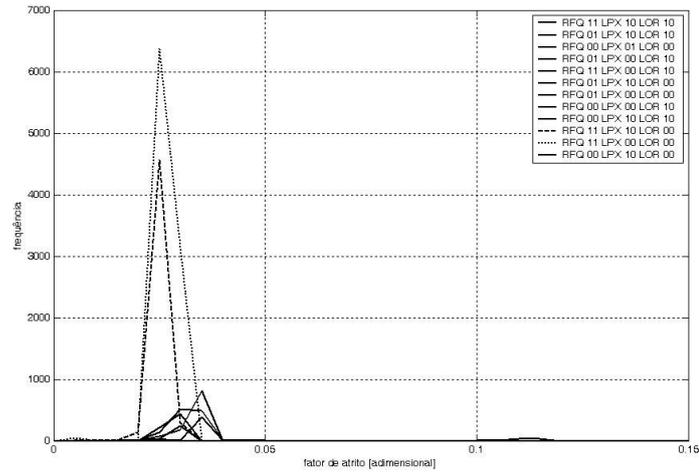


Gráfico 52 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 sem alterações, para D1.

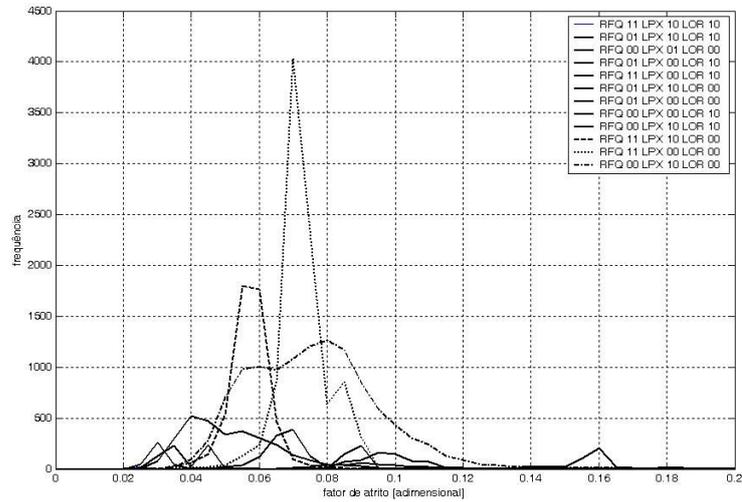


Gráfico 53 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 sem alterações, para D2.

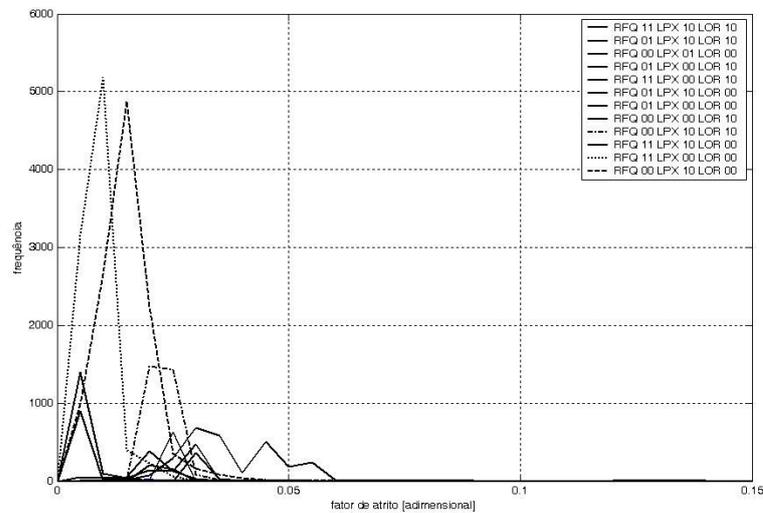


Gráfico 54 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 sem alterações, para D3.

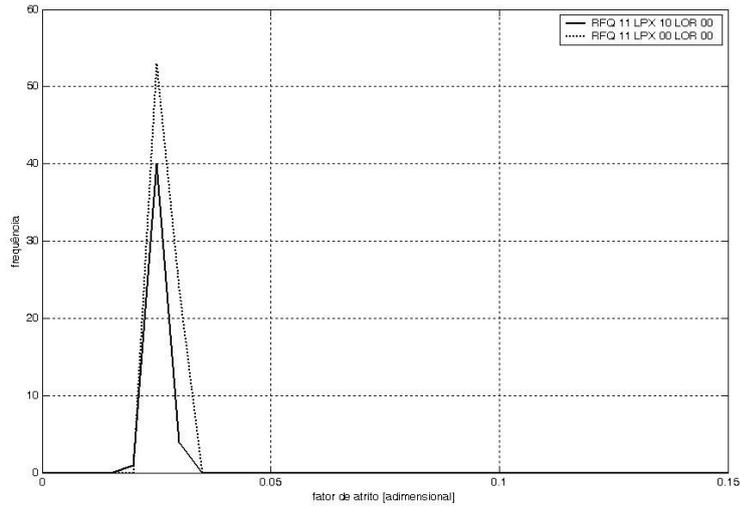


Gráfico 55 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 10 min, para D1.

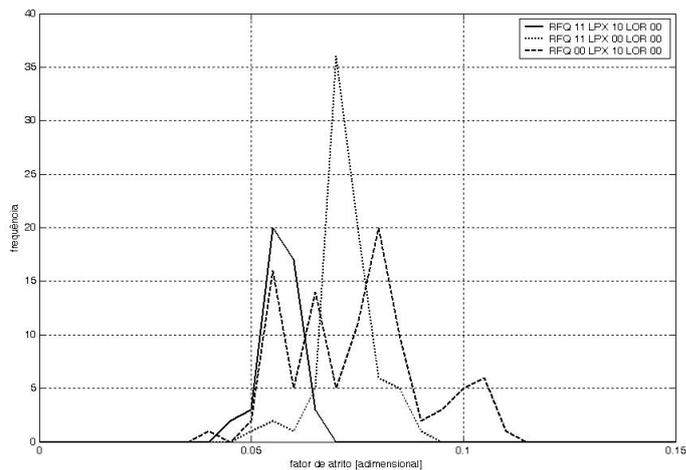


Gráfico 56 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 10 min, para D2.

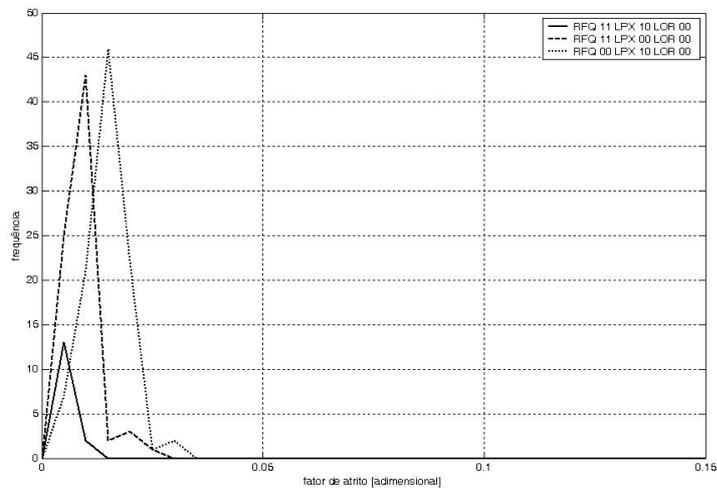


Gráfico 57 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 10 min, para D3.

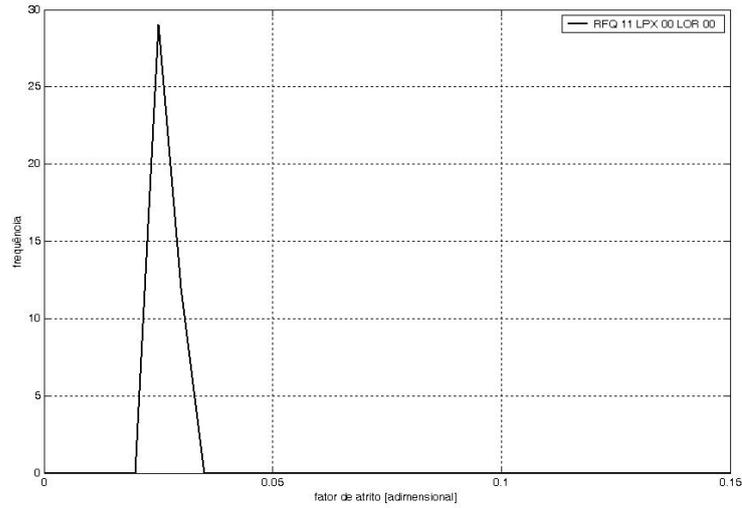


Gráfico 58 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 20 min, para D1.

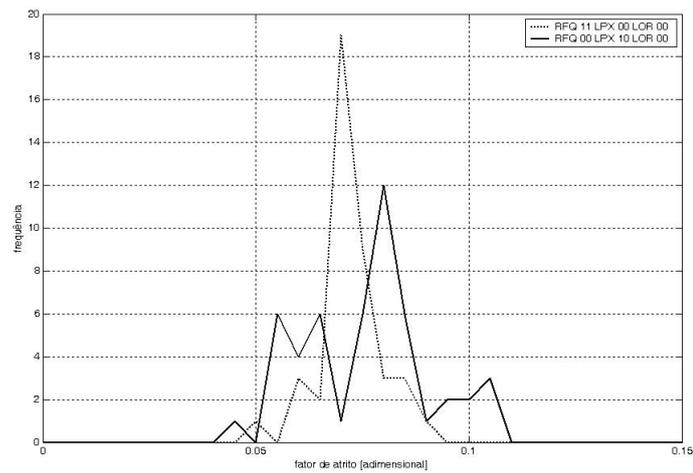


Gráfico 59 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 20 min, para D2.

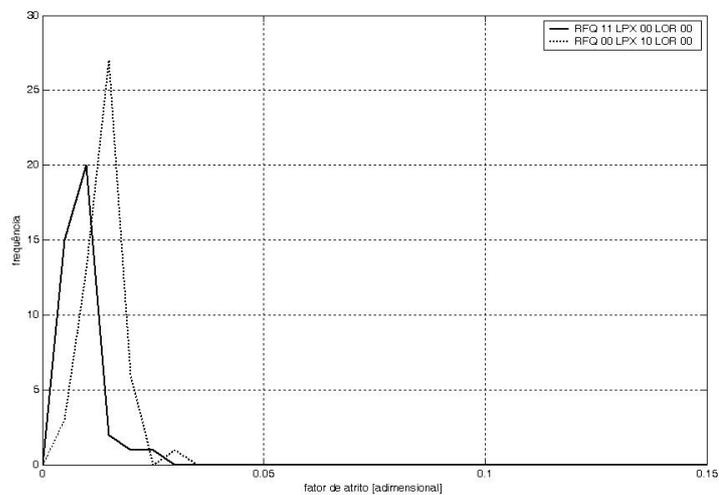


Gráfico 60 - Distribuição de frequência com dados da parte 1 com média até 20 min, para D3.

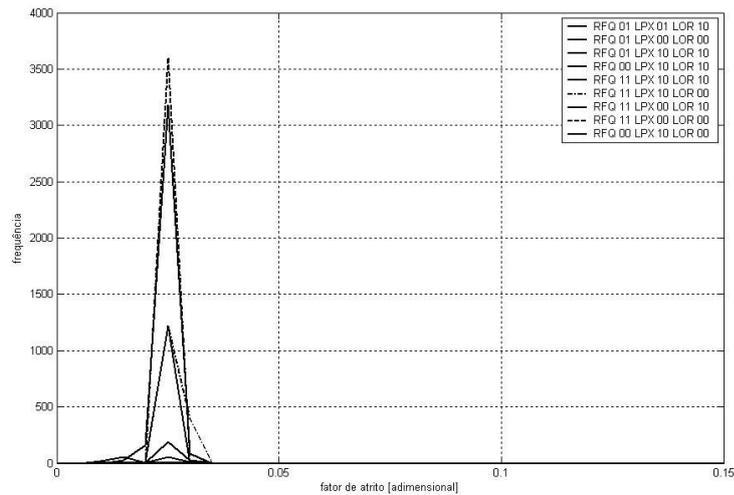


Gráfico 61 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 sem alterações, para D1.

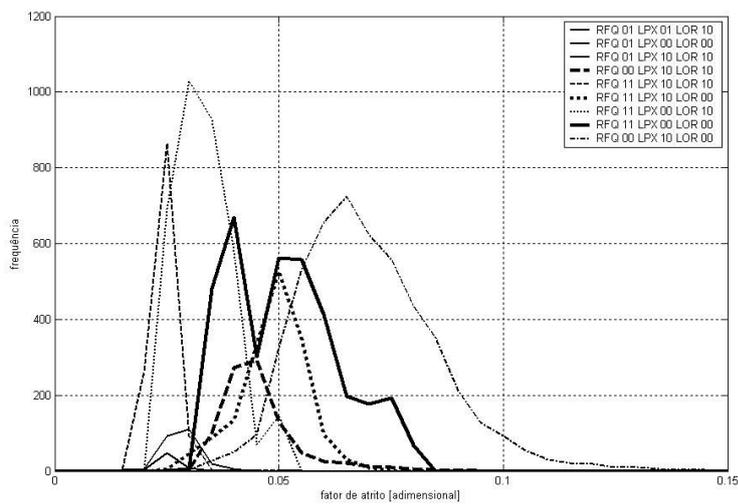


Gráfico 62 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 sem alterações, para D2.

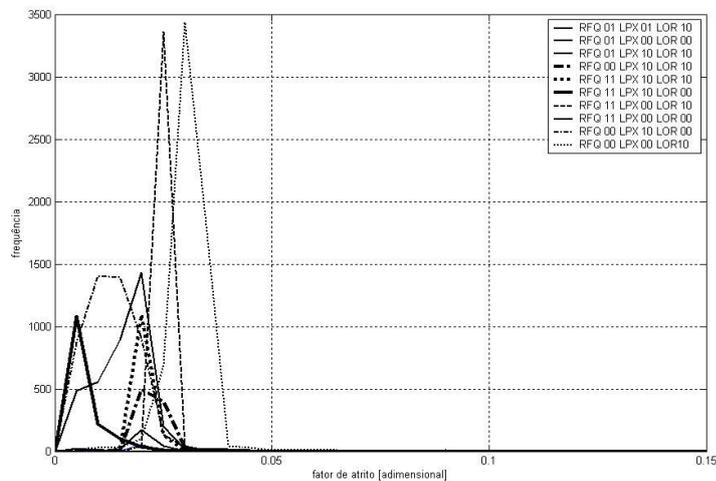


Gráfico 63 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 sem alterações, para D3.

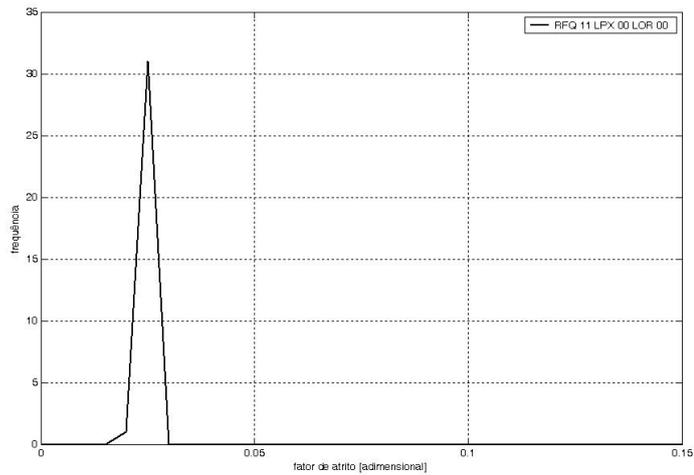


Gráfico 64 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 com média até 10 min, para D1.

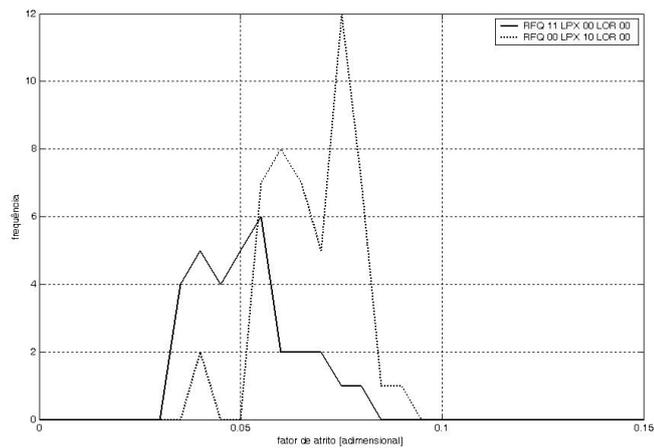


Gráfico 65 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 com média até 10 min, para D2.

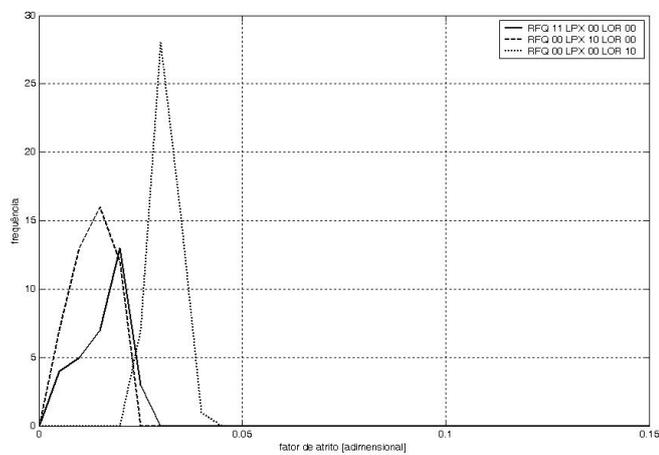


Gráfico 66 - Distribuição de frequência com dados da parte 2 com média até 10 min, para D3.

8.3. Anexo C

Lista de gráficos das vazões nos dutos D1, D2 e D3 e cotas piezométricas nas saídas das estações, observadas e calibradas, separadamente, com os dados das partes 1 e 2 do Supervisor.

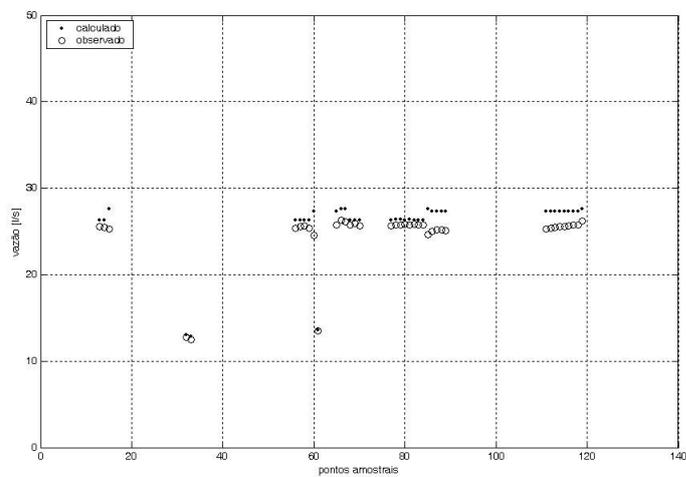


Gráfico 67 - Vazões em D1, com dados calibrados da parte 1.

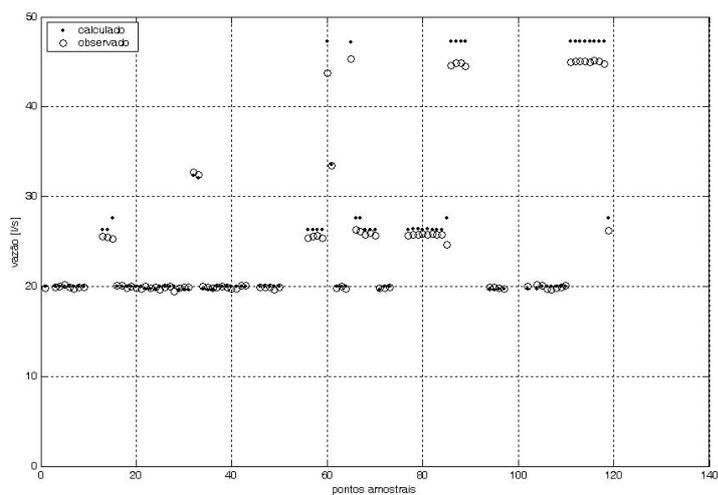


Gráfico 68 - Vazões em D2, com dados calibrados da parte 1.

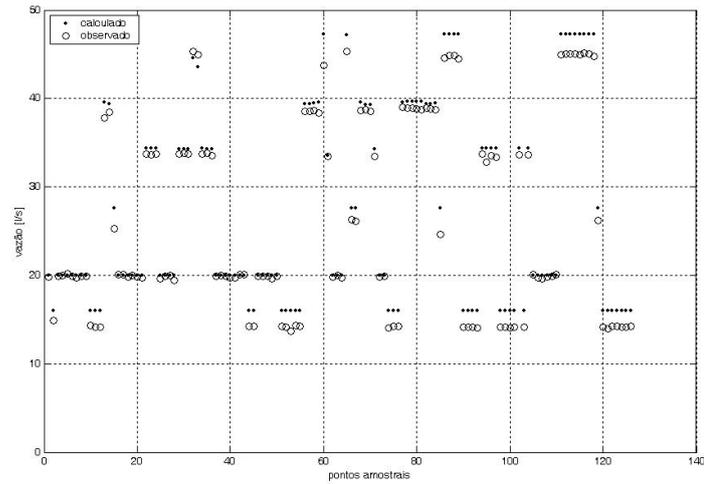


Gráfico 69 - Vazões em D3, com dados calibrados da parte 1.

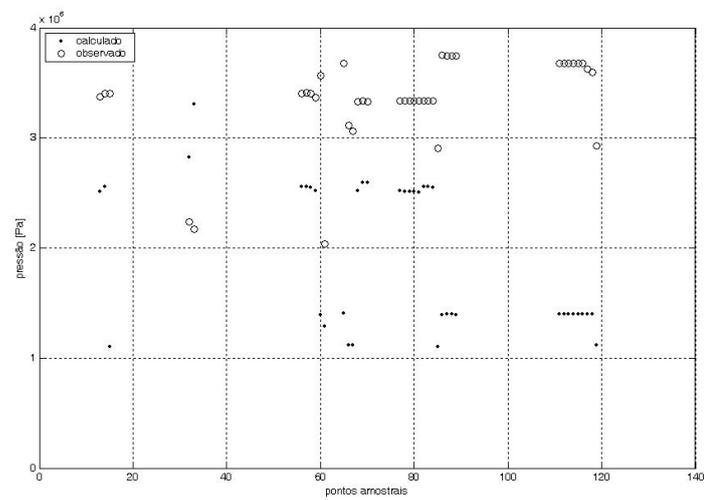


Gráfico 70 - Cotas piezométricas a montante de D1, com dados calibrados da parte 1.

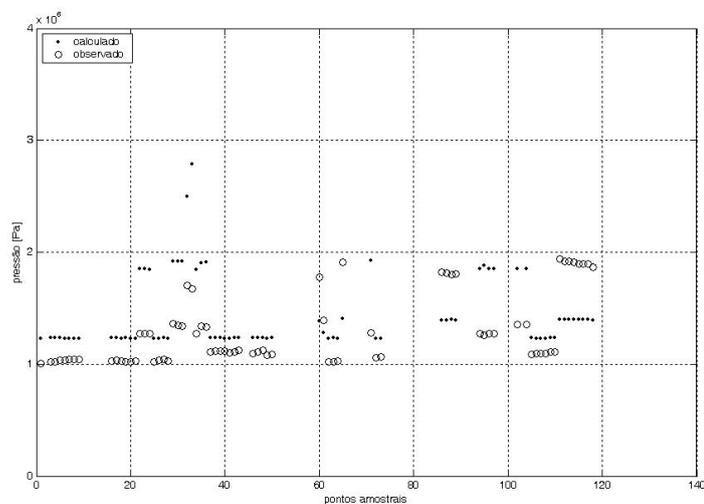


Gráfico 71 - Cotas piezométricas a montante de D2, com dados calibrados da parte 1.

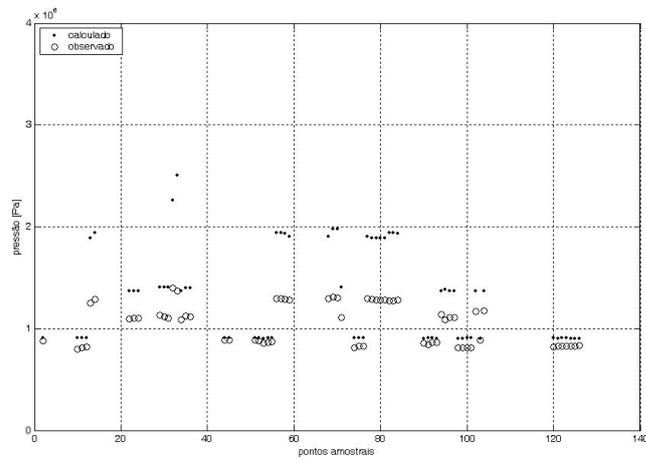


Gráfico 72 - Cotas piezométricas a montante de D3, com dados calibrados da parte 1.

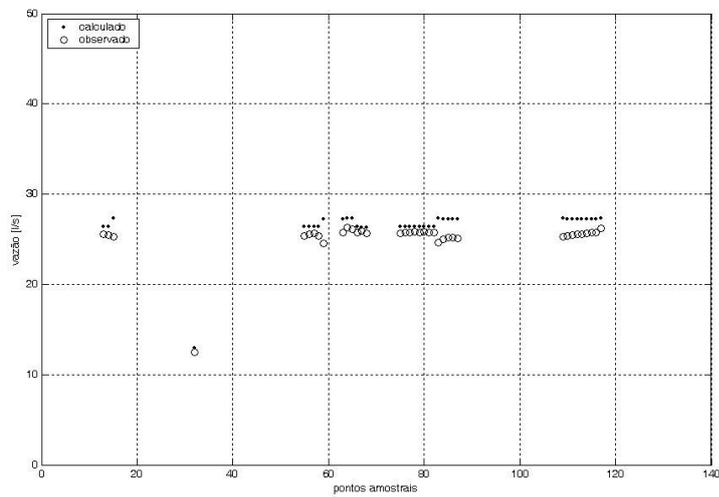


Gráfico 73 - Vazões em D1, com dados calibrados da parte 2.

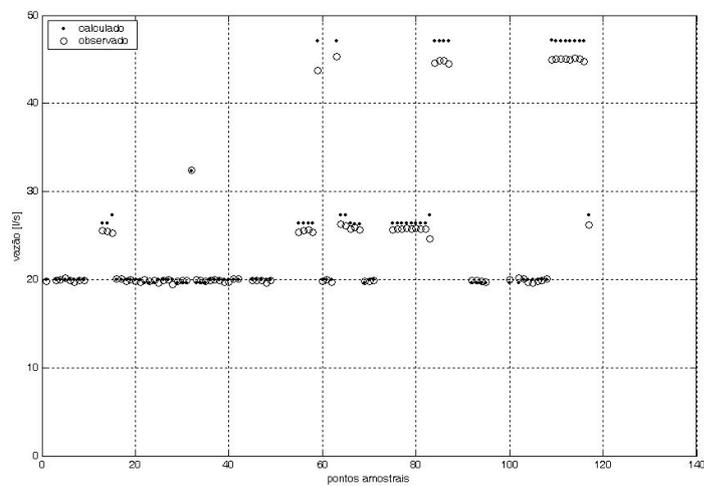


Gráfico 74 - Vazões em D2, com dados calibrados da parte 2.

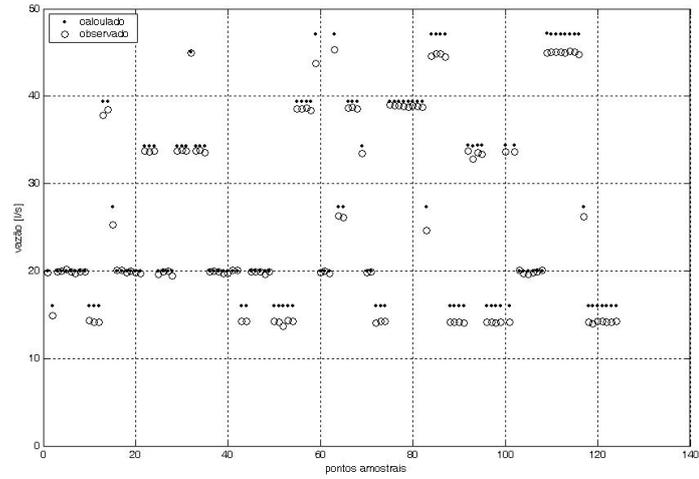


Gráfico 75 - Vazões em D3, com dados calibrados da parte 2.

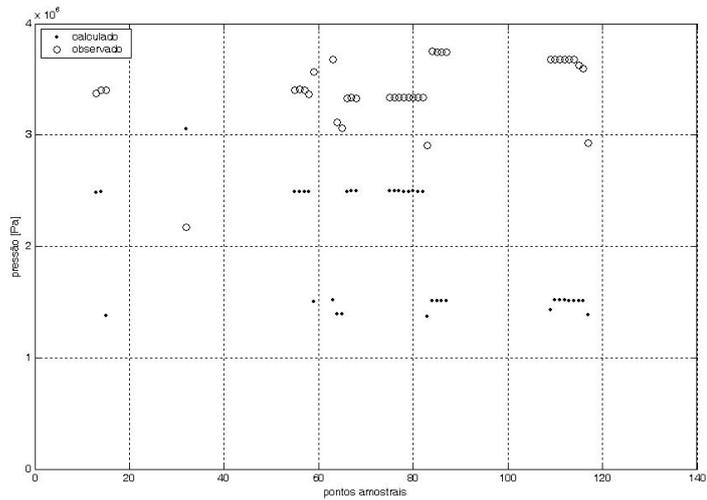


Gráfico 76 - Cotas piezométricas a montante de D1, com dados calibrados da parte 2.

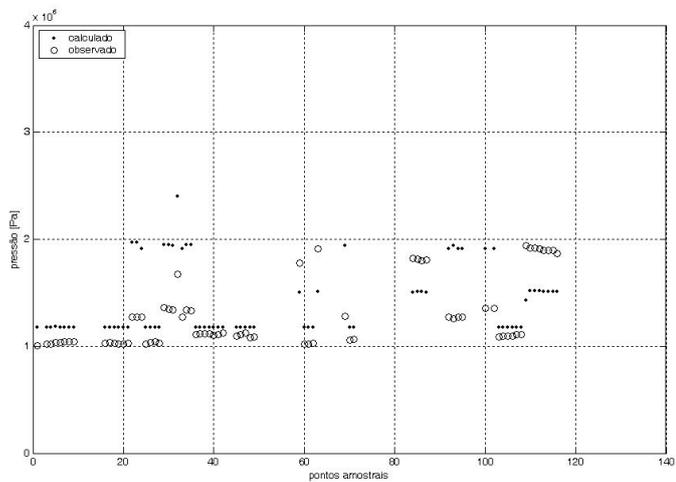


Gráfico 77 - Cotas piezométricas a montante de D2, com dados calibrados da parte 2.

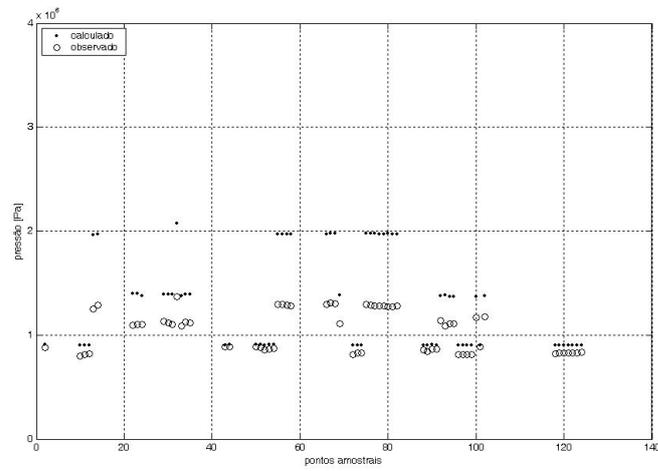


Gráfico 78 - Cotas piezométricas a montante de D3, com dados calibrados da parte 2.

9. Apêndices

A – Curva característica da bomba NEMO 8N100

B – Curva característica da bomba NEMO 2N89

C – Relatório de Análise – Lote de Controle: 050000074960

D – Relatório de Análise – Lote de Controle: 050000081503

E – Relatório de Análise – Lote de Controle: 050000081505

F – Relatório de Análise – Lote de Controle: 050000081507

G – Relatório de Análise – Lote de Controle: 050000081986