

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUÍS FERNANDO DE QUEIROZ LAVEZZO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS EM  
MEDIÇÃO DE LÍQUIDOS COM REFERÊNCIA TIPO *BALL PROVER***

VITÓRIA  
2010

LUÍS FERNANDO DE QUEIROZ LAVEZZO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS EM  
MEDIÇÃO DE LÍQUIDOS COM REFERÊNCIA TIPO *BALL PROVER***

Dissertação apresentada ao Programa da  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal do Espírito Santo, como  
requisito parcial para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos.

VITÓRIA  
2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

L399a Lavezzo, Luís Fernando de Queiroz, 1980-  
Análise experimental e avaliação das incertezas em medição  
de líquidos com referência tipo *ball prover* / Luís Fernando de  
Queiroz Lavezzo. – 2010.  
153 f. : il.

Orientador: Rogério Ramos.  
Co-Orientador: Márcio Coelho de Mattos.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito  
Santo, Centro Tecnológico.

1. Medidores de fluxo. 2. Calibração. 3. Incerteza. I. Ramos,  
Rogério. II. Mattos, Márcio Coelho de. III. Universidade Federal  
do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621

---


**LUÍS FERNANDO DE QUEIROZ LAVEZZO**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS EM  
MEDIÇÃO DE LIQUIDOS COM REFERÊNCIA TIPO *BALL PROVER***

Dissertação apresentada ao Programa da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.


Aprovada em 09 de abril de 2010.

**COMISSÃO EXAMINADORA**



---

**Prof. Dr. Rogerio Ramos - orientador**  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES



---

**Prof. Dr. Márcio Coelho de Mattos - co-orientador**  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES



---

**Prof. Dr. Edson José Soares - examinador interno**  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES



---

**Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo - examinador externo**  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

A Deus, fonte de vida, generosidade e amor.  
Aos meus pais, por todo o apoio e estímulo  
dados ao longo da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Foram muitos os desafios enfrentados ao longo deste projeto e nada seria possível se não fosse a contribuição e a credibilidade das pessoas que me trouxeram até aqui.

Agradeço especialmente ao meu orientador pelo qual mantenho uma alta estima, o professor Rogério Ramos, que acreditou no meu potencial, esteve sempre presente em todas as etapas do projeto, agindo com paciência nas adversidades e com um profundo discernimento dos fatos. Obrigado Professor!

Agradeço em especial ao colega Marcelo Kosminsky Protasio, que participou desde o início do projeto, na concepção e montagem laboratorial com o qual compartilho o mérito deste trabalho.

Agradeço ao Engenheiro Leonardo Pereira Bastos, por sua atenção e dedicação na preparação e desenvolvimento do módulo eletrônico de aquisição de dados especialmente desenvolvido para o *Ball prover*.

Agradeço ao professor Márcio Coelho, por sua paciência, e disponibilidade na elucidação dos conceitos quanto à expressão da incerteza.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, pela oportunidade de cursar o Mestrado.

A Agência Nacional do Petróleo – ANP, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT por meio do “Programa Institucional da UFES para o Setor Petróleo e Gás” – PRH29.

Agradeço com muito carinho, a Zezé, secretária do PPGEM, sempre atenciosa com as pessoas.

Agradeço ao Geólogo Fernando Taboada Fontes e ao Geofísico Ícaro Sanguiné Ribeiro gestores na área de exploração de petróleo da PETROBRAS no Espírito Santo por apoiarem e acreditarem na parceria Universidade x Empresa.

Agradeço aos meus amigos e colegas que fiz no mestrado e os que estão presentes em minha vida: sem vocês tudo seria menos alegre.

Agradeço a Camila por sua dedicação na revisão deste trabalho.

Por fim, mais uma vez, agradeço a Deus, pois sem Ele nada seria possível. Obrigado pela vida, por sua bondade e principalmente por me guiar a ser um ser humano melhor a cada novo dia.

*“Não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez”*

*Jean Cocteau*

## RESUMO

Este estudo se dedica à medição referencial de vazão de líquidos com o propósito de se lidar com as características específicas do funcionamento de um medidor, que tem suma importância nos interesses envolvendo transações comerciais na indústria de petróleo. O processo de medição de vazão envolve diversas variáveis que contribuem para a incerteza do real valor que se propõe medir. Estas variáveis vão desde características construtivas do medidor, propriedades do fluido a ser medido, das condições ambientais e perícia do operador. A proposta deste estudo é apresentar um projeto de protótipo laboratorial de medidor de referência tipo *ball prover*, avaliar experimentalmente seu desempenho e buscar se alinhar com os requisitos estabelecidos pelas normas. As incertezas inerentes à medição e sua contribuição em diferentes trechos será avaliada através de comparações com um medidor do tipo turbina, calibrado pelo fabricante.

**Palavras-chave:** Medidores de fluxo, calibração, incerteza, provador em linha.



## ABSTRACT

This work is dedicated to the reference measurement of liquid flow aiming to deal with the peculiarities related to the subject, which reach great importance in commercial transactions involving typical interests of the oil industry. The flow measurement process however is not deterministic and involves a large number of variables that contributes to the doubt about of the real value that it proposes to measure. Such variables, which contribute to uncertainty in measurement, include a lot of aspects such constructive feature meter, fluid properties, environmental conditions and operator ability, for instance. This work presents a prototype project of a laboratorial scale ball prover, experimentally evaluate its performance, aiming to point out its alignment with the requirements established by the norms, considering the uncertainties in the measurement and the contribution of different lengths. Otherwise, it is procedured a comparison with a turbine meter calibrated by the manufacturer.

**Keywords:** Flow measurement, calibration, uncertainty, pipe prover.

## LISTA DE TABELAS

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Tabela 1   | - Cronologia das normas técnicas  | 9   |
| Tabela 2   | - Fator de abrangência  | 31  |
| Tabela 3   | - Fator de compressibilidade da água  | 56  |
| Tabela 4   | - Dados de operação e calibração fornecidos pela tecnofluid para turbina tv-t-1 ø3/4"                         | 58  |
| Tabela 5   | - Recomendações para operação do <i>ball prover</i>   | 61  |
| Tabela 6   | Regime de escoamento do fluido no provador  | 62  |
| Tabela 7   | - Resumo dos dados experimentais - vazão máxima   | 69  |
| Tabela 8   | - Resumo dos dados experimentais - vazão intermediária  | 71  |
| Tabela 9   | - Resumo dos dados experimentais - vazão mínima   | 73  |
| Tabela 10  | - Resultado da calibração do provador em 3 ciclos consecutivos - vazão máxima                                 | 75  |
| Tabela 11  | - Resultado da calibração do provador em 3 ciclos consecutivos - vazão intermediária                          | 75  |
| Tabela A-1 | - Tabela de calibração do rotâmetro   | 84  |
| Tabela A-2 | - Observações experimentais registradas   | 84  |
| Tabela B-1 | - Levantamento dimensional e análise estatística  | 89  |
| Tabela C-1 | - Medição do vazamento da esfera nº1 (em gramas)  | 96  |
| Tabela C-2 | - Medição do vazamento da esfera nº2 (em gramas)  | 97  |
| Tabela C-3 | - Medição do vazamento da esfera nº4 (em gramas)  | 98  |
| Tabela C-4 | - Medição do vazamento da esfera nº6 (em gramas)  | 99  |
| Tabela D-1 | - Levantamento dimensional executado – trechos retilíneos   | 106 |
| Tabela D-2 | - Levantamento dmensional executado – diâmetro  | 107 |
| Tabela D-3 | - Análise estatística   | 109 |
| Tabela D-4 | - Volumes base e expressão da incerteza   | 110 |
| Tabela E.1 | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 1-4) para o nível de vazão máximo do sistema ( $v_f = 19$ ) | 111 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabela E.2  | - Dados coletados no sentido horário (trecho 4-1) para o nível de vazão máximo do sistema ( $v_I=17$ )      | 112 |
| Tabela E.3  | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 1-2) para o nível de vazão máximo do sistema ( $v_I=17$ ) | 113 |
| Tabela E.4  | - Dados coletados no sentido horário (trecho 2-1) para o nível de vazão máximo do sistema ( $v_I=17$ )      | 114 |
| Tabela E.5  | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 2-3) para o nível de vazão máximo do sistema ( $v_I=19$ ) | 115 |
| Tabela E.6  | - Dados coletados no sentido horário (trecho 3-2) para o nível de vazão máximo do sistema ( $v_I=17$ )      | 116 |
| Tabela E.7  | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 3-4) para o nível de vazão máximo do sistema ( $v_I=19$ ) | 117 |
| Tabela E.8  | - Dados coletados no sentido horário (trecho 4-3) para o nível de vazão máximo do sistema ( $v_I=17$ )      | 118 |
| Tabela E.9  | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 1-4) para o nível de vazão médio do sistema ( $v_I=11$ )  | 119 |
| Tabela E.10 | - Dados coletados no sentido horário (trecho 4-1) para o nível de vazão médio do sistema ( $v_I=10$ )       | 120 |
| Tabela E.11 | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 1-2) para o nível de vazão médio do sistema ( $v_I=11$ )  | 121 |
| Tabela E.12 | - Dados coletados no sentido horário (trecho 2-1) para o nível de vazão médio do sistema ( $v_I=10$ )       | 122 |
| Tabela E.13 | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 2-3) para o nível de vazão médio do sistema ( $v_I=11$ )  | 123 |
| Tabela E.14 | - Dados coletados no sentido horário (trecho 3-2) para o nível de vazão médio do sistema ( $v_I=10$ )       | 124 |
| Tabela E.15 | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 3-4) para o nível de vazão médio do sistema ( $v_I=11$ )  | 125 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabela E.16 | - Dados coletados no sentido horário (trecho 4-3) para o nível de vazão médio do sistema ( $v_l = 11$ )       | 126 |
| Tabela E.17 | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 1-4) para o nível de vazão mínimo do sistema ( $v_l = 14$ ) | 127 |
| Tabela E.18 | - Dados coletados no sentido horário (trecho 4-1) para o nível de vazão mínimo do sistema ( $v_l = 17$ )      | 128 |
| Tabela E.19 | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 1-2) para o nível de vazão mínimo do sistema ( $v_l = 14$ ) | 129 |
| Tabela E.20 | - Dados coletados no sentido horário (trecho 2-1) para o nível de vazão mínimo do sistema ( $v_l = 17$ )      | 130 |
| Tabela E.21 | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 2-3) para o nível de vazão mínimo do sistema ( $v_l = 14$ ) | 131 |
| Tabela E.22 | - Dados coletados no sentido horário (trecho 3-2) para o nível de vazão mínimo do sistema ( $v_l = 17$ )      | 132 |
| Tabela E.23 | - Dados coletados no sentido anti-horário (trecho 3-4) para o nível de vazão mínimo do sistema ( $v_l = 14$ ) | 133 |
| Tabela E.24 | - Dados coletados no sentido horário (trecho 4-3) para o nível de vazão mínimo do sistema ( $v_l = 16$ )      | 134 |

## LISTA DE FIGURAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 1  | - <i>Ball prover</i> convencional   | 11 |
| Figura 2  | - Princípio de funcionamento do <i>ball prover</i>  | 11 |
| Figura 3  | - <i>Piston prover</i> ou <i>small volume prover</i>  | 12 |
| Figura 4  | - Representação dos tipos de erros  | 19 |
| Figura 5  | - Protótipo unidirecional com lançador individual   | 32 |
| Figura 6  | - Protótipo unidirecional com lançador tipo t   | 33 |
| Figura 7  | - Protótipo bidirecional com válvulas de reversão individuais   | 33 |
| Figura 8  | - Principais componentes do sistema ball prover – vista lateral   | 34 |
| Figura 9  | - Fotografia da montagem experimental do ball prover  | 35 |
| Figura 10 | - Válvula de quatro vias convencional   | 37 |
| Figura 11 | - Válvula de reversão de fluxo projetada  | 38 |
| Figura 12 | - Válvula de reversão de fluxo construída   | 38 |
| Figura 13 | - Croquis da montagem e operação do conjunto de válvulas com 4 vias:<br>(a) posição de alimentação do braço 1 e retorno no braço 2;<br>(b) posição de alimentação do braço 2 e retorno no braço 1 | 39 |
| Figura 14 | - Detalhe do cavalete de comandos   | 40 |
| Figura 15 | - Posto de instalação do conjunto led de infravermelho e sensor, montados em colar de tomada em posição diametralmente oposta   | 41 |
| Figura 16 | - Detalhe construtivo – posição de instalação do sensor ótico   | 42 |
| Figura 17 | - Detalhe do espaçador interno  | 42 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 18 | - Sistema de alimentação do provador   | 43 |
| Figura 19 | - Detalhe das válvulas de purga de ar e de drenagem                          | 44 |
| Figura 20 | - Esferas de elastômero  | 45 |
| Figura 21 | - Metodologia para alinhamento dos sensores                                  | 47 |
| Figura 22 | - Arquitetura do sistema   | 49 |
| Figura 23 | - Croqui dos sinais enviado  | 50 |
| Figura 24 | - Croqui de um pulso inteiro   | 50 |
| Figura 25 | - Exemplo de contagem de pulsos  | 51 |
| Figura 26 | - Contagem de tempo  | 52 |
| Figura 27 | - Pulsos processados   | 52 |
| Figura 28 | - Medidor tipo turbina em linha (modelo: tvt-I $\varnothing 3/4''$ )         | 57 |
| Figura 29 | - Sistema de contagem de pulsos  | 59 |
| Figura 30 | - Dados experimentais no trecho de ida vazão máxima                          | 63 |
| Figura 31 | - Dados experimentais no trecho de volta vazão máxima                        | 63 |
| Figura 32 | - Dados experimentais no trecho de ida vazão intermediária                   | 64 |
| Figura 33 | - Dados experimentais no trecho de volta vazão intermediária                 | 64 |
| Figura 34 | - Dados experimentais trecho de ida vazão mínima                             | 65 |
| Figura 35 | - Dados experimentais trecho de volta - vazão mínima                         | 65 |
| Figura 36 | - Média acumulada do trecho s1-s4 para o nível de vazão máxima               | 67 |
| Figura 37 | - Sub-trechos do provador de 3 metros de comprimento                         | 68 |
| Figura 38 | - Comportamento da vazão no percurso de ida e de volta                       | 70 |
| Figura 39 | - Comportamento da vazão no percurso de ida e de volta - vazão intermediária | 72 |
| Figura 40 | - Comportamento da vazão no percurso de ida e de volta - vazão mínima        | 74 |
| Figura 41 | - Comparativo de vazão entre os resultados da turbina e o ball prover        | 76 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figura A-1  | - Bancada experimental para teste da bomba                   | 83  |
| Figura A-2  | - Curva de operação da bomba                                 | 85  |
| Figura A-3  | - Representação característica entre $p_1$ e $p_2$           | 85  |
| Figura B-1  | - Representação aleatória do diâmetro dos planos das esferas | 90  |
| Figura B-2  | - Classificação das esferas quanto a média e desvio padrão   | 90  |
| Figura C-1  | - Desenho esquemático do teste de estanqueidade              | 93  |
| Figura C-2  | - Bancada experimental                                       | 94  |
| Figura C-3  | - Balança de precisão  | 95  |
| Figura C-4  | - Vazamento registrado na esfera nº1                         | 96  |
| Figura C-5  | - Vazamento registrado na esfera nº2                         | 97  |
| Figura C-6  | - Vazamento registrado na esfera nº4                         | 98  |
| Figura C-7  | - Vazamento registrado na esfera nº6                         | 99  |
| Figura C-8  | - Comportamento das esferas à pressão de 5,44 kpa            | 100 |
| Figura C-9  | - Comportamento das esferas à pressão de 6,42 kpa            | 100 |
| Figura C-10 | - Comportamento das esferas à pressão de 7,40 kpa            | 101 |
| Figura C-11 | - Comportamento das esferas à pressão de 8,38 kpa            | 101 |
| Figura C-12 | - Comportamento das esferas à pressão de 9,37 kpa            | 102 |
| Figura C-13 | - Esfera submetida à ação de forças                          | 104 |
| Figura D-1  | - Croqui básico da curva                                     | 107 |
| Figura D-2  | - Média acumulada dos sub-trechos                            | 109 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                |  |
|----------------|--|
| $c_i$          | Coeficiente de sensibilidade: $c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$ .   |
| $C_{twd}$      | Fator de correção do efeito da temperatura na água.  |
| $C_{t_{pvc}M}$ | Fator de correção do efeito da temperatura no provador (Medido).   |
| $C_{t_{pvc}P}$ | Fator de correção do efeito da temperatura no provador (Inicial).  |
| $C_{p_{pvc}P}$ | Fator de correção do efeito da pressão no provador.  |
| $C_{p_{lp}}$   | Fator de correção do efeito da pressão no líquido.   |
| D              | Diâmetro interno [mm].   |
| e              | Espessura da parede do provador [mm].  |
| E              | Módulo de elasticidade do material [kPa].  |
| F              | Fator de compressibilidade da água ( $k \text{ Pa}^{-1}$ ).  |
| k              | Fator de abrangência usado para calcular a incerteza expandida $U$ .   |
| n              | Número de observações repetidas.   |
| N              | Número de grandezas de entrada $X_i$ das quais depende o mensurando $Y$ .  |
| P              | Pressão [kPa].   |
| q              | Grandeza que varia aleatoriamente descrita por uma distribuição de probabilidade.  |
| $q_k$          | K-ésima observação repetida independente da grandeza aleatoriamente variável $q$ .   |
| $\bar{q}$      | Média aritmética ou média de observações repetidas independentes $q_k$ da grandeza aleatoriamente variável $q$ .                         |
| $r(x_i, x_j)$  | Coeficiente de correlação estimado associado as estimativas de entrada $x_i$ e $x_j$ que estimam as grandezas de entrada $X_i$ e $X_j$ . |
| $s^2(\bar{q})$ | Variância experimental da média $\bar{q}$ e estimativa da variância $\sigma^2/n$ de $\bar{q}$ .  |
| $s(\bar{q})$   | Desvio padrão experimental da média $\bar{q}$ .  |
| T              | Temperatura [°C].  |



|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $u(x_i)$                    | Incerteza padrão da estimativa de entrada $x_i$ que estima a grandeza de entrada $X_i$ , igual a raiz quadrada positiva de $u^2(x_i)$ .                |
| $u^2(x_i)$                  | É uma variância estimada associada a estimativa de entrada $x_i$ que estima a grandeza de entrada $X_i$ .  |
| $u_c(y)$                    | Incerteza padrão combinada da estimativa de saída $y$ , igual a raiz quadrada de $u_c^2(y)$ .  |
| $u_c^2(y)$                  | Variância combinada associada à estimativa de saída $y$ .  |
| $u_c(y)/y$                  | Incerteza padrão combinada relativa da estimativa de saída $y$ .   |
| $U$                         | Incerteza expandida da estimativa de saída $y$ que define um intervalo $Y = y \pm U$ .   |
| $V$                         | Volume [l].  |
| $x_i$                       | Estimativa da grandeza de entrada $X_i$ .  |
| $X_i$                       | I-ésima grandeza de entrada da qual depende o mensurando $Y$ .   |
| $X_{i,k}$                   | K-ésima observação repetida independente de $X_i$ .  |
| $y$                         | Estimativa do mensurando, resultado de uma medição.  |
| $Y$                         | Um mensurando; valor verdadeiro do mensurando.   |
| $\alpha$                    | Coeficiente de expansão linear.  |
| $\gamma$                    | Coeficiente de expansão cúbica do material.  |
| $\delta e_a$                | Erro aleatório proveniente de um efeito aleatório.   |
| $\delta e_s$                | Erro sistemático proveniente de um efeito sistemático.   |
| $\mu_q$                     | Esperança ou média da distribuição de probabilidade da grandeza aleatoriamente variável $q$ .  |
| $\rho$                      | Densidade [kg/m <sup>3</sup> ].  |
| $\sigma^2$                  | Variância de uma distribuição de probabilidade de uma grandeza $q$ aleatoriamente variável estimada por $s^2(\bar{q})$ .                               |
| $\sigma^2(\bar{q})$         | Variância de $\bar{q}$ , igual a $\sigma^2/n$ , estimada por $s^2(\bar{q})$ .  |
| $\partial f / \partial x_i$ | Derivada parcial com respeito à grandeza de entrada $X_i$ da relação $f$ entre o mensurando $Y$ e as grandezas de entrada $X_i$ das quais $Y$ depende. |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1. Introdução  | 1  |
| 1.1. Motivação e objetivos   | 2  |
| 2. Revisão bibliográfica sobre sistemas de provadores de vazão e incertezas na medição                         | 4  |
| 3. Sistemas de provadores de vazão para líquidos   | 10 |
| 3.1. Sistema de medição de vazão primária: provadores em linha de deslocamento mecânico ( <i>ball prover</i> ) | 10 |
| 4. Introdução à determinação da expressão das incertezas no processo de medição de vazão                       | 14 |
| 4.1. Repetibilidade  | 15 |
| 4.2. Reprodutibilidade   | 16 |
| 4.3. Rastreabilidade   | 17 |
| 4.4. Incerteza associada à medição   | 18 |
| 4.5. Avaliando a incerteza padrão  | 23 |
| 4.5.1. Avaliando a incerteza padrão do tipo A  | 24 |
| 4.5.2. Avaliando a incerteza padrão do tipo B  | 26 |
| 4.6. Determinando a incerteza padrão combinada   | 27 |
| 4.6.1. Grandezas de entrada não correlacionadas  | 27 |
| 4.6.2. Grandezas de entrada correlacionadas  | 28 |
| 4.6.3. Lei da propagação da incerteza  | 29 |
| 4.7. Determinando a incerteza padrão expandida   | 30 |
| 5. “ <i>Ball prover</i> ”: projeto e montagem experimental   | 32 |
| 5.1. Discussões iniciais do protótipo  | 32 |
| 5.2. Projeto do protótipo de <i>ball prover</i>  | 34 |
| 5.3. Princípio de funcionamento  | 35 |
| 5.4. Detalhes construtivos   | 36 |
| 6. Metodologia de cálculo volumétrico: <i>ball prover</i> x turbina  | 46 |
| 6.1. <i>Ball prover</i>  | 46 |
| 6.2. Turbina   | 56 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 7. Tratamento de dados    | 61 |
| 8. Resultados e discussão | 67 |
| 9. Referências            | 79 |

**Apêndices:**

## Apêndice A:

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| Caracterização da bomba centrífuga | 82 |
|------------------------------------|----|

## Apêndice B:

|  |    |
|--|----|
| Levantamento dimensional das esferas de elastômero | 89 |
|--|----|

## Apêndice C:

|   |    |
|---|----|
| Teste de estanqueidade das esferas de elastômeros em condições estatísticas | 92 |
|---|----|

## Apêndice D:

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| Levantamento dimensional do provador | 105 |
|--------------------------------------|-----|

## Apêndice E:

|   |     |
|---|-----|
| Dados experimentais do <i>ball prover</i> | 111 |
|---|-----|

## 1. INTRODUÇÃO

Na indústria de óleo e gás, a transferência de custódia é uma transação na qual o proprietário de certa quantidade de material transfere esta quantidade de um operador para outro. Deste modo, o operador responsável pela concessão de produção transferirá os direitos sobre certa quantidade de petróleo para o operador responsável pelo transporte deste material. Por conseguinte, o mesmo será responsável por sua custódia até entregá-lo em seu próximo destino onde será tratado ou refinado em diversos subprodutos do petróleo. O alto valor deste material e os interesses governamentais sobre a tributação dos impostos desses produtos conduzem para um aperfeiçoamento das técnicas de medição, no intuito de verificar a quantidade de material envolvida em cada transação.

As normas e padrões atuais estabelecem que os medidores de fluxo usados em medições de transferência de custódia devem passar por uma verificação de desempenho de medição. Este processo é conhecido como calibração de um medidor, cujo objetivo é aferir a quantidade de fluido passado em determinado intervalo de tempo.

Segundo a Portaria Conjunta nº1, (ANP/INMETRO,2000):

“6.3.1 Os sistemas de medição em linha devem ser constituídos, pelo menos, dos seguintes equipamentos:

- a) Medidores de fluidos do tipo deslocamento positivo ou do tipo turbina, ou medidores mássicos tipo coriolis, com a indicação de volume.”

A portaria também estabelece os sistemas de calibração de medidores para líquidos em linha:

“6.4.2 Para instalações e operação de sistemas de calibração de medidores de petróleo em linha podem ser utilizados provadores, tanques de prova, medidores padrão ou outros sistemas previamente autorizado pela ANP”

O provador de vazão primária do tipo provador bidirecional de esfera (*Bi-directional Ball Prover*, nesse texto denominado simplesmente *ball prover*) é em geral muito utilizado para medir grandes volumes de líquidos em transferência de

custódia (TOMBS, 2006), seja nas plataformas de petróleo, estações de tratamento, pontos de medição fiscal, etc.

O termo vazão primária consiste na obtenção de valores, através de grandezas base independentes (tempo, comprimento, massa, etc), segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia - VIM (VIM, 2007). Neste contexto, o *Ball Prover* mede o tempo de percurso de determinado trecho da tubulação com diâmetro e comprimento conhecido obtendo-se assim a vazão por correlação direta de volume por tempo. Em metrologia, métodos de medição obtidos através de grandezas base seguem os padrões primários de medição, os quais são amplamente reconhecidos como tendo as mais altas qualidades metrológicas e cujo valor é aceito sem referência a outros padrões de mesma grandeza (VIM, 2007).

Já medidores secundários, por sua vez, consistem na obtenção de valores em que não existe uma correlação direta de volume com o tempo, havendo necessidade de uma correlação intermediária. As leituras obtidas em medidores do tipo turbina (contagem de pulsos), rotâmetro (posição do flutuador no cone), ultrassom (tempo de trânsito de pulso ultrassônico), *Laser scattering* (velocidade de partículas) são exemplos de medidores secundários.

Diferentes tipos de medidores apresentam diferentes incertezas durante uma determinada medição, devendo ser recalibrado depois de determinado período, para verificação de sua eficiência ou *performance*.

O objetivo do presente trabalho é analisar as incertezas na medição de vazão utilizando um protótipo de *Ball Prover* em escala laboratorial.

## 1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Após a criação da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP, ficou estabelecido que, uma de suas atribuições é definir uma legislação adequada para a distribuição dos recursos arrecadados com as participações governamentais.

Em 19 de junho de 2000, foi criada a Portaria Conjunta Nº1 ANP/INMETRO, que regulamenta a medição de Petróleo e Gás Natural e que:

- Regulamenta a medição de petróleo e gás natural na área de E&P e de transporte.
- Estabelece os requisitos mínimos para os sistemas de medição de petróleo e gás;
- Define medidores, calibração e incertezas;
- Objetiva garantir resultados completos e acurados.

Neste sentido, para garantir resultados mais completos, conforme as agências reguladoras e as partes interessadas almejam, este trabalho visa construir e avaliar um medidor primário de vazão de líquidos, muito utilizado na indústria de petróleo, aqui denominado *Ball Prover*.

O *Ball Prover* projetado e avaliado é do tipo bidirecional e se propõe a responder questões, tais como:

- O número de ciclos proposto pela norma para calibrar o provador atende aos limites de incerteza estabelecidos?
- Trechos menores atendem aos limites de incerteza estabelecidos?
- A inserção de acidentes de linha, tais como curvas, afeta o resultado de medição?
- Existe tendência entre os sentidos de vazão no provador?
- Quais os limites de vazão para operar o sistema?
- O fator-k da turbina fornecido pelo fabricante está de acordo com o fator-k do provador primário?
- Qual a influência da qualidade dimensional da esfera?
- Qual a influência dos métodos de interpolação?

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA SOBRE SISTEMAS DE PROVADORES DE VAZÃO E INCERTEZAS NA MEDIÇÃO

Esta seção é baseada em artigos técnicos e normas com o foco voltado para a medição de vazão na indústria de petróleo, incertezas no processo de medição, e em especial medidores de vazão de referência, aqui denominados simplesmente como provadores convencionais de petróleo em linha (*Conventional pipe provers*), ou provadores por deslocamento mecânico tipo *Ball Provers*.

O uso de *Ball Provers* do tipo bidirecional para medições em líquidos teve início no ano de 1959 (TING e HALPINE, 1991).

Logo no início dos anos 60, PFREHM (1962) detalhou os mecanismos de operação, construção e os detalhes da calibração do provador bidirecional para utilização em LACT Units (*Lease Automatic custody transfer units*), que são as unidades de transferência de custódia para aluguel automático. Na época, os medidores em LACT *units* tradicionalmente eram calibrados com o uso de provadores tanque ou com medidores mestre. A calibração com o uso de provadores bidirecionais veio como uma terceira ferramenta, permitindo uma calibração em ambos os sentidos no sistema, evitando vícios ou tendências dos provadores, além de uma série de vantagens quando comparado, por exemplo, com o provador tanque como rapidez na calibração, como maior precisão, menor custo de instalação, operações contínuas, sem necessidade de bombas, entre outros. Além de descrever os procedimentos de montagem e de operação do provador bidirecional, PFREHM (1962) também abordou três métodos de calibração de provadores: Método de Drenagem de Água (*Water-Withdrawal Method*); Método do Medidor Mestre (*Master Meter Method*) e Método de Medição Direta (*Direct Measurement Method*).

Em 1965, a Associação Americana de Petróleo (*American Petroleum Institute* - API) publicou o padrão API 2531, *Mechanical Displacement Meters Provers*, com recomendações sobre os provadores de medição por deslocamento mecânico e as limitações de velocidades do sistema, seja com o uso de pistão ou com uso esferóides.

Na década de 70, o aparelho de teste para medição de fluxo em linha foi patenteado por TYAU (1974) e sua principal característica é a utilização de uma

esfera, de material elastômero, que pode ser rolada com interferência por dentro de um tubo, passando em determinado momento por dois interruptores conectados a um gerador de pulsos, por exemplo, uma turbina. Este aparelho foi chamado de *Ball Prover* e passou a comparar as vazões indicadas no provador com os pulsos gerados pela turbina. Como cada pulso da turbina representa uma unidade de volume, a comparação entre os sistemas se torna possível.

REDILLA (1977) estudou os dois tipos de *Ball Prover* utilizados em sistema de medições mais convencionais. São eles: o provador unidirecional e o provador bidirecional. Em seu trabalho, REDILLA aborda os detalhes de projeto e construtivos, além de tecer considerações sobre o cálculo de volume, o sistema de detecção de contagem de tempo, válvulas de reversão de fluxo, composição da esfera de elastômero, velocidades limites de operação no sistema entre os aspectos que podem contribuir com o erro nas medições.

No mesmo ano, SU (1977), publicou um estudo sobre a aplicação da estatística na calibração de medidores. Tal trabalho propôs encontrar um número de corridas no medidor suficiente para uma calibração com o nível de confiança desejado.

Em 1983, a *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, em conjunto com *American National Standard (ANSI)*, publicou a norma *Measurement Uncertainty for Fluid Flow in Closed Conduits*, que define conceitos e diretrizes para a determinação da incerteza na medição de vazão em condutos fechados.

Na década de 80, ainda sem ter um consenso internacional sobre a calibração e a expressão da incerteza, GYORY (1984) estudou estes processos em provadores do tipo bidirecionais seguindo as prescrições de três entidades em metrologia: API dos Estados Unidos, PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) da Alemanha e OMH (*National Office Measures Hungary*) da Hungria. As incertezas foram relatadas de acordo com as recomendações de cada entidade para medições simples em um mesmo volume base. Deste modo, para realizar uma analogia entre os métodos, GYORY tomou a estimativa de desvio padrão pela raiz quadrada do número de ciclos recomendado por cada entidade como base. Assim, pôde comparar os três métodos e encontrar os limites de incerteza máximos para cada método.

YOUNG (1984), por sua vez, abordou a construção dos três tipos básicos de provadores convencionais comumente utilizados:



- O provador tanque
- O provador medidor mestre
- O provador em linha

Em seu artigo, YOUNG foca o detalhamento dos provadores linha, quais sejam, Bidirecionais e Unidirecionais, apresentando vantagens e desvantagens no uso, condições que podem alterar o fator de medição, método de calibração e detalhamento do projeto como: características dos componentes e comprimento recomendado do provador.

Os métodos de calibração voltaram a ser abordados por COMSTOCK (1985) que estudou dois métodos de calibração comumente utilizados para provadores em linha: o *Waterdraw Method* (Drenagem de Água) que consiste em mensurar a água proveniente do provador com a que se acumula no reservatório e o *Master Method* (Medidor Mestre), que é referência na calibração de outros medidores.

Em 1988, foi publicado o manual para medições em petróleo em linha (API MPMS 4.2), que veio a substituir a norma API 2531 (1965). No mesmo ano, a *International Organization for Standardization* (ISO) publicou a norma de sistemas provadores para medidores volumétricos (ISO-7278-2).

No início da década de 90, COMSTOCK (1990) também estudou a teoria e aplicação da interpolação de pulsos em provadores em linha. Dos métodos de interpolação conhecidos, COMSTOCK apresentou três métodos comumente utilizados: o *Four time method* (Método de quatro tempos), *Phase lock loop* (Método em circuito fechado) e o *Double Chronometry* (Método de dupla cronometragem).

LURIE (1991) por sua vez abordou a metodologia de cálculo da interpolação de pulsos em provadores, exemplificando os conceitos apresentados por COMSTOCK.

Outro trabalho da época, de autoria de TING e HALPINE (1991), trata de provadores portáteis para gás do tipo pistão para calibrações de medidores em campo. Os autores detalham os componentes do provador e suas similaridades com os provadores utilizados para líquidos. Além disso, utilizando as recomendações da ASME sobre incertezas na medição de fluidos em condutos fechados, os autores mensuraram a incerteza no processo de medição,

comparando os volumes calculados pelo provador com o volume calculado pelo medidor do tipo turbina quando estão nas mesmas condições de medição.

Em 1993, a ISO / BIPM<sup>1</sup> publicou a 1ª edição do “*Guide Uncertainty Measurement – GUM*” sendo corrigida e reimpressa em 1995 (GUM, 1995).

Por sua vez, o progresso da tecnologia *pipe prover* foi abordado novamente por JAKUBENAS (1995), que discorreu sobre as configurações mecânicas e os avanços dos instrumentos eletrônicos que permitiram ao *pipe prover* maior grau de precisão e de confiabilidade nos dados além de uma diminuição nos custos e no comprimento do provador. Dentre os principais avanços nos últimos dez anos, podem ser citados como exemplos, a inserção de múltiplos detectores ao longo do provador, detalhes de projeto que permitem a redução do comprimento do provador em sua pré-operação, a redução do volume do provador devido a técnicas de interpolação, o controle computadorizado do sistema e sua integração com as demais partes.

Em 1997, o INMETRO publicou a 1ª edição brasileira do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição - GEIM, sendo revisada em 2003 (3ª edição) em parceria com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Por uma questão de jargão técnico normalmente utilizado no meio, este texto será referenciado nas iniciais em inglês como (GUM, 2003).

Em 1999, a ISO publicou o guia para operações em provadores de petróleo em linha (ISO-7278-4).

No fim dos anos 90, GARCIA e SHERIEF (1999) fizeram um estudo sobre a metodologia aplicada na calibração por *Waterdraw method*. Este método de calibração, já estudado por PFREHM (1962) e COMSTOCK (1985), utilizou tecnologias de automação não acessíveis à época, que permitiram um sincronismo entre a detecção da esfera, a coleta de dados e o controle das válvulas de fluxo.

Com as consolidações dos conhecimentos em medição, UPP e LANASA (2002), em sua obra de “Medição de Fluxo de Fluidos”, cujo propósito é orientar sobre as práticas em medições de precisão, abordaram os processos inerentes à medição de fluidos, os tipos de medidores de vazão, as considerações sobre escolha apropriada do medidor e outros aspectos, tais como, fatores ambientais,

---

<sup>1</sup> BIPM, Bureau International des Poids et Mesures

contratuais, limitações do instrumento de medição, intervalos de calibração, entre outros fatores que impactam diretamente na eficiência dos processos de medição.

A incerteza na medição voltou a ser abordada por SILVA (2004), com base nas recomendações do GUM. Em seu trabalho, SILVA abordou os conceitos sobre incerteza, como determiná-las, classificá-las e os procedimentos de cálculo quando ocorre sua propagação. Além disso, o autor também aborda alguns tipos de medidores e suas considerações particulares para expressão da incerteza.

ANDRADE (2006) também realizou estudos sobre considerações na incerteza de medição para diferentes tipos de medidores mais comumente utilizados pela indústria. Neste estudo o autor cita os conceitos sobre erros aleatórios e erros sistemáticos, como identificá-los e como tratá-los em processos de medição de vazão.

Em 2006, o API publicou os procedimentos para os cálculos dos volumes de petróleo (MPMS-12), consolidando a primeira versão publicada em 2001.

Recentemente, TOMBS (2006) fez um estudo para relatar a alta precisão do medidor mássico do tipo Coriolis e utilizou como referência um *small volume prover*, semelhante ao provador do tipo *Ball Prover*, cuja diferença baseia-se no deslocamento mecânico realizado por um pistão ao invés de uma esfera.

Na mesma linha de estudo, SYLNYK (2007) estudou a precisão de medidores de vazão ultrassônicos e utilizou o provador bidirecional como referência para relatar a incerteza dos medidores ultrassônicos em medições de óleo e gás.

RIBEIRO (2010) concentrou seus estudos não simplesmente em relatar a incerteza de um medidor, mas também em como relatar a incerteza de forma correta. Tal trabalho mostra erros grosseiros cometidos em certificados de calibração, no uso indevido dos limites de precisão dos instrumentos, na forma incorreta de cálculo na propagação da incerteza, tecendo ainda, considerações sobre Algarismos Significativos Expressos.

Em pouco mais de cinquenta anos de uso, observa-se uma grande evolução no aspecto tecnológico e construtivo do *Ball Prover*, principalmente nos anos 90 quando COMSTOCK, nos trabalhos de interpolação, JAKUBENAS nas configurações mecânicas e eletrônicas do provador, e ainda, GARCIA e SHERIEF usufruindo desta tecnologia na calibração por *Waterdraw Method* fez com que o *Ball Prover* atingisse um novo patamar de confiabilidade. Em

comparação ao atual trabalho pode-se destacar o rearranjo da válvula de quatro vias e os princípios de detecção da esfera como principais diferenciais entre os convencionais já estudados e como resultados apresenta um menor custo na sua construção e uma confiabilidade ainda maior.

Para finalizar esta seção, encontra-se na Tabela 1 um resumo sobre a evolução cronológica das normas referentes às medições utilizando provadores e a expressão da incerteza declarada:

Tabela 1 - Cronologia das normas técnicas

| Ano de publicação | Sigla      | Descrição  | Órgão responsável | Edição |
|-------------------|------------|--|-------------------|--------|
| 1965              | API 2531   | Mechanical Displacement Meter Provers  | API               | 1ª     |
| 1980              | ISO-2714   | Volumetric measurement by displacement meter systems other than dispensing pumps             | ISO               | 1º     |
| 1981              | ISO-2715   | Volumetric measurement by turbine meter Systems  | ISO               | 1º     |
| 1983              | MFC-2M     | Mesurement Uncertainty for fluid flow in closed conduits                                     | ANSI / ASME       | 1ª     |
| 1987              | ISO-7278-1 | Dynamic Measurement: Proving Systems for volumetric Meters - General Principles              | ISO               | 1ª     |
| 1988              | ISO-7278-2 | Dynamic Measurement: Proving Systems for volumetric Meters - Pipe provers                    | ISO               | 1ª     |
|                   | ISO-4267-2 | Calculation of oil quantities: Dynamit measurement   | ISO               | 1ª     |
| 1994              | MPMS-1     | Manual of Petroleum Measurement Standard - Vocabulary  | API               | 2ª     |
| 1995              | GUM        | Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement  | ISO / BIPM        | 1ª     |
| 1998              | ISO-7278-3 | Dynamic Measurement: Proving Systems for volumetric Meters - Pulse interpolation techniques  | ISO               | 1ª     |
| 1999              | ISO-7278-4 | Dynamic Measurement: Proving Systems for volumetric Meters - Guide operators of pipe provers | ISO               | 1ª     |
|                   | ISO-5074   | Measurement: Standard reference conditions   | ISO               | 2ª     |
| 2003              | MPMS-4     | Manual of Petroleum Measurement Standard - Proving System                                    | API               | 3ª     |
| 2005              | MPMS-5     | Manual of Petroleum Measurement Standard - Measurement of liquids by displacement liquids    | API               | 3ª     |
|                   | ISO-5168   | Measurement of fluid flow: Procedures for the evaluation of uncertainties                    | ISO               | 2º     |
| 2006              | MPMS-12    | Manual of Petroleum Measurement Standard - Calculation of Petroleum Quatities                | API               | 1ª     |
|                   | MPMS-13    | Manual of Petroleum Measurement Standard - Statistical Aspects of measuring and sampling     | API               | 1ª     |
|                   | ISO-3534-1 | General statistical terms and terms used in probability                                      | ISO               | 2º     |
| 2007              | MPMS-6     | Manual of Petroleum Measurement Standard - Metering Assemblies                               | API               | 2ª     |
|                   | MPMS-7     | Manual of Petroleum Measurement Standard - Temperature Determination                         | API               | 2ª     |

### 3. SISTEMAS DE PROVADORES DE VAZÃO PARA LÍQUIDOS

Conforme mencionado no Capítulo 1, os sistemas de provadores de vazão para líquidos são sistemas utilizados na calibração de medições de petróleo em linha, cujo objetivo é “provar” a boa performance de um medidor.

Os principais sistemas provadores são (ISO 7278-1,1987):

- Provadores em linha: Bidirecionais ou Unidirecionais
- Tanques de prova
- Medidores Padrão (Medidores Mestre)

Dentre estes, os dois primeiros são ditos como provadores de vazão primária e o último como provador de vazão secundária.

Neste trabalho, o foco de estudo concentra-se na construção e avaliação do sistema de provador em linha bidirecional e a comparação com um medidor do tipo turbina.

#### 3.1. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO PRIMÁRIA: PROVADORES EM LINHA DE DESLOCAMENTO MECÂNICO (*BALL PROVER*)

O Sistema de medição em linha por deslocamento mecânico é popularmente conhecido como sistema de medição do tipo *Ball Prover* (Figura 1). O *Ball Prover* consiste na utilização de uma esfera oca, de material elastômero, preenchida com o fluido de trabalho, para registrar o tempo de passagem em um determinado trecho da tubulação. A detecção da esfera é feita por sensores de posição cujos sinais são interceptados durante sua passagem (Figura 2).

O *Ball Prover* é um tipo de provador *pipe prover*, utilizado na calibração de medidores de hidrocarbonetos líquidos na indústria do petróleo.

Outro tipo de *pipe prover*, o *piston prover* (Figura 3), também conhecido como *Small Volume pipe prover* é acionado por um pistão onde o fluxo passa através de um cilindro de volume conhecido. Os sensores de posição registram a passagem do pistão através da emissão de pulsos, contabilizando o tempo de percurso do pistão.



Figura 1 – *Ball Prover* convencional

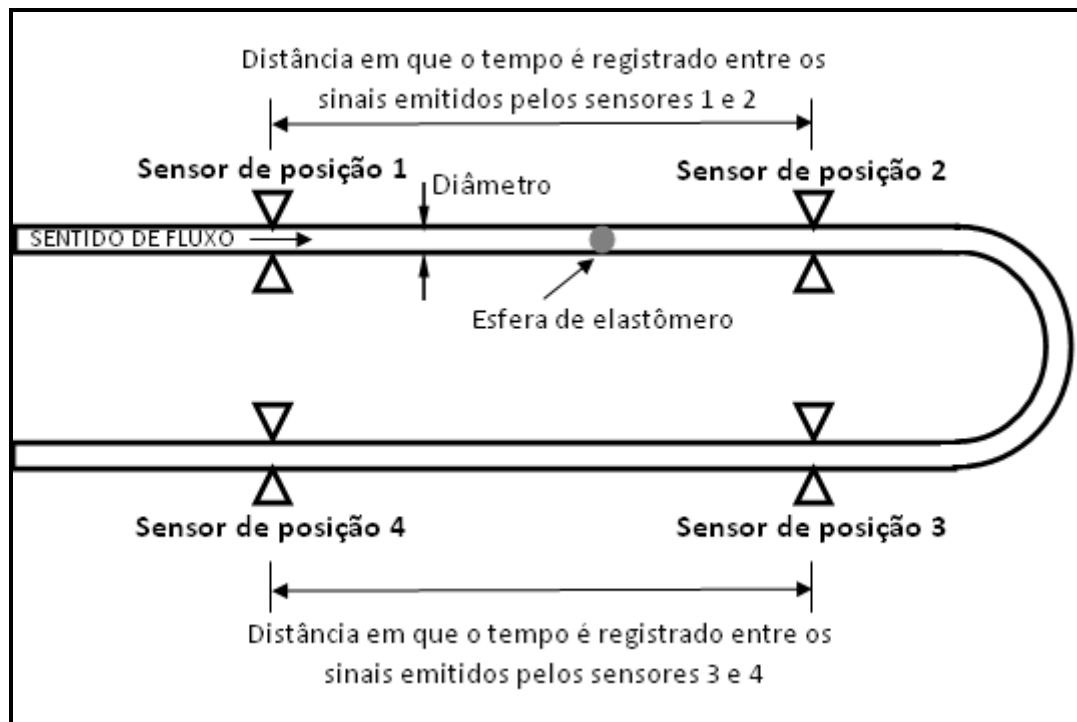


Figura 2 – Princípio de funcionamento do *Ball Prover*

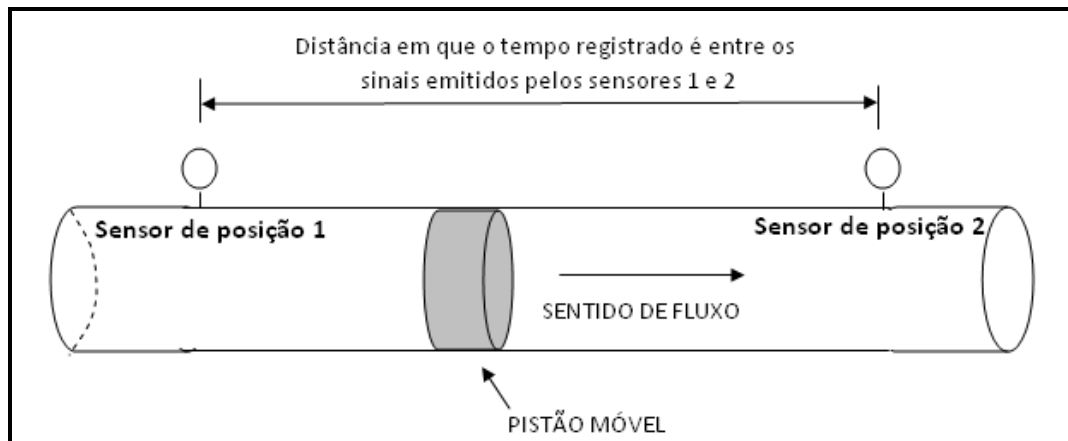


Figura 3 – Pistão Prover ou Small volume prover

Há, no entanto, diferentes *pipe prover* com diferentes geometrias e configurações mecânicas, tais que, permitem o fluxo no provador em um único sentido e outros que permitem o percurso de volta no provador. Todos os tipos operam pelo mesmo princípio: “o deslocamento do volume de um líquido na seção calibrada da tubulação onde é registrado o tempo de passagem da esfera (ou pistão) através da captação de sinais de pelo menos dois detectores” (REDILLA, 1977).

Os provadores que permitem um único sentido de fluxo são conhecidos como unidirecionais. Nesta configuração mecânica, o *Ball Prover* unidirecional permite que o retorno da esfera a sua posição inicial seja feita de duas maneiras: retorno manual ou retorno automático (ISO 7278-2,1988).

No retorno manual, a esfera é lançada no provador em fluxo contínuo. Ao percorrer o provador, a esfera passa pelo primeiro detector, que emite pulsos elétricos continuamente. A passagem da esfera pelo detector faz com que o mesmo tenha sua emissão de pulsos interceptada, e deste modo, a contagem de tempo é iniciada. Ao passar pelo segundo detector a contagem é finalizada. Depois de registrar a informação emitida pelos detectores, a esfera é recebida por um dispositivo com válvulas que permite a sua retirada do provador sem interrupção do fluxo.

No retorno automático, o arranjo do provador é feito de tal forma que permite o retorno da esfera à posição inicial sem a necessidade de retirá-la do sistema.

Assim é possível realizar leituras de vários ciclos sem interrupção, o que permite uma maior confiança sobre a convergência dos dados.

Os provadores que permitem o fluxo em ambos sentidos são conhecidos como bidirecionais. A esfera no *Ball Prover* bidirecional realiza uma trajetória no provador nos sentidos de ida e de volta por meio da utilização da válvula de reversão de fluxo, também chamada válvula de quatro vias (*Four-way*, Figura 11). Neste caso, é necessário que o provador tenha comprimento que possibilite um escoamento estável, devido à reversão de fluxo, antes da passagem pelo primeiro detector na ida e último detector na volta. O *Ball Prover* bidirecional por coletar dados em sentidos de ida e de volta no provador, permite a verificação de vícios e tendências que podem ocorrer no sistema. Além disso, por registrar mais dados em ambos sentidos, o *Ball Prover* bidirecional pode ser utilizado como um tipo de provador de volumes múltiplos, ou seja, seções com mesmo volume calibrado em série e assim reduzir o tempo de prova em baixas taxas de fluxo. Isto não é possível com o *Ball Prover* unidirecional porque o deslocamento da esfera percorre todo provador e retorna ou para a válvula de transferência ou para sua posição inicial. Com apenas os dados em um único sentido no provador não é possível comparar as diferentes seções calibradas em série.



#### 4. INTRODUÇÃO À DETERMINAÇÃO DA EXPRESSÃO DAS INCERTEZAS NO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

Segundo a norma do *Manual of Petroleum Measurement Standards* (API, 2006) medição é o procedimento para determinar um valor para uma variável física. Então, se a variável física sob análise representa um número de objetos ou de eventos ocorridos contáveis, é o mesmo dizer que, não há dúvida na contagem dos objetos e dos eventos. Quando grandes números estão envolvidos, de modo que, não seja possível contar todos os elementos faz-se necessário fazer uma aproximação. Esta dispersão dos valores observados em torno do verdadeiro valor, se sua contagem fosse possível, é denominada como incerteza. Atualmente, a maior referência para a expressão da incerteza em medição é o GUM (ABNT; INMETRO, 2003), onde a palavra “incerteza de medição” significa dúvida acerca da validade do resultado de uma medição.

Segundo o GUM (2003):

“Incerteza (de medição), parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando”

As propostas para o uso de técnicas estatísticas para determinação da incerteza requerem que nos processos de medição obtenha-se um controle estatístico do mensurando, ou seja, da variável que está sendo medida (GUM, 2003).

Enquanto este controle estatístico não for alcançado, qualquer informação relativa à estimativa do valor verdadeiro da quantidade que está sendo medida e a incerteza associada a este, não é estritamente válida e pode não ter sentido algum (API, 2006).

Dessa forma, para alcançar determinado controle estatístico dentro de um processo de medição é necessário que as mesmas quantidades medidas sejam repetidas pelos mesmos métodos e principalmente sob as mesmas condições, mostrando estabilidade do valor principal e uma dispersão regular dos resultados individuais.

Um comportamento estatístico quando propriamente estabilizado pode ser utilizado como referência no controle estatístico das rotinas básicas de um sistema de medição. Para isso, torna-se necessário conhecer os conceitos de repetibilidade e a reprodutibilidade de um sistema que auxiliam na avaliação de um comportamento estatístico e caso haja ainda necessidade de comparar diferentes resultados com determinado nível de confiança é necessário também avaliar a rastreabilidade do mensurando.

#### 4.1. REPETIVIDADE

A repetibilidade é definida pelo GUM (2003) como o “grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando, efetuadas sobre as mesmas condições de medição”. Em outras palavras é a capacidade de retornar o mesmo valor em um determinado experimento observado diversas vezes sob as mesmas condições.

A caracterização de mesma condição de repetibilidade deve ao experimento observar:

- Mesmo procedimento de medição.
- Mesmo observador.
- Mesmo instrumento de medição, utilizado nas mesmas condições.
- Mesmo local.
- Repetição em curto período de tempo.

A repetibilidade de um experimento pode ser expressa, quantitativamente, em função das características de dispersão dos resultados. A recomendação do API (2006) é que em um experimento a cada vinte observações uma esteja fora das demais.

Em repetibilidade de curto período, a calibração de um provador bidirecional pelo método de drenagem de água (*Water Draw Method*) deverá satisfazer que (ISO-7278-2, 1988):

“O resultado de três corridas sucessivas, sendo cada uma delas compreendendo um ciclo no provador, deverá estar em torno de 0,02%”.

## 4.2. REPRODUTIBILIDADE

A reprodutibilidade é definida pelo GUM (2003) como sendo o grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando, em diferentes locais sob condições modificadas de medição.

O termo reprodutibilidade segundo o API (2006) é uma expressão quantitativa do erro aleatório associado a vários operadores que trabalham em locais diferentes com instrumentos diferentes, com o qual cada operador obtém medições únicas sobre o mesmo corpo de material, utilizando o mesmo método e os mesmos tipos de instrumentos de medição. E essa definição, basicamente, coincide com aquela dada em GUM (2003).

Para que uma expressão de reprodutibilidade seja válida é necessário que, sejam especificadas as condições modificadas que podem incluir:

- Princípio de medição
- Método de medição
- Observador
- Padrão de referência
- Local
- Condições de utilização
- Tempo

A reprodutibilidade pode ser expressa, quantitativamente, em função das características da dispersão dos resultados. Boa reprodutibilidade indica que os erros aleatórios são aceitáveis, ou seja, pequenos erros e que os erros sistemáticos que não sejam aqueles inerentes ao método provavelmente também são muito limitados em tamanho e número. As condições de reprodutibilidade, tal como definidos, raramente podem ser satisfeitas em termos quantitativos em medições de petróleo, porque a identidade de um corpo de petróleo é quase sempre perdida durante seu deslocamento de um local para outro. No entanto, em uma estreita aproximação, às condições de reprodutibilidade podem ser alcançadas por medidas de aferição se cada dois operadores adotarem os

mesmos métodos de medição, nos mesmos tipos de aparelhos de medição, prescritos no mesmo local.

Em particular, este trabalho vai se ater apenas em atingir as condições de repetibilidade, já que os estudos em medições de um mesmo corpo em diferentes lugares não fazem parte do foco do trabalho. Portanto, os conceitos sobre reprodutibilidade expendidos no trabalho são de caráter meramente informativo, devendo ser considerados apenas para as circunstâncias mencionadas.

#### 4.3. RASTREABILIDADE

Além das condições de repetibilidade e reprodutibilidade, utilizados como referência num controle estatístico, caso haja necessidade de comparar resultados, seja de diferentes laboratórios ou do mesmo laboratório em ocasiões diferentes deve-se assegurar que todos os laboratórios usem a mesma escala de medição, ou os mesmos pontos de referência. Em muitos casos isto pode ser atingido através de uma cadeia de calibrações conduzida aos padrões primários nacionais ou internacionais.

Esta cadeia contínua de comparações conduzindo a um valor de referência é denominada cadeia de rastreabilidade. Por definição (EURACHEM, 2001):

“Propriedade do resultado de uma medição ou valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas com incertezas associadas”.

Este importante conceito nos domínios da medição fornece meios para colocar todas as medições relacionadas, numa escala consistente de medições, dentro de um controle do resultado de medição. A incerteza neste aspecto é um parâmetro que reforça o elo desta cadeia e o acordo que se espera entre os laboratórios efetuando medições semelhantes.

#### 4.4. INCERTEZA ASSOCIADA À MEDIÇÃO

Estabelecido um comportamento estatístico estabilizado e obedecidas as condições de repetitividade nos experimentos, passa-se em seguida, a identificar e analisar as possíveis fontes de incerteza associadas ao processo de medição.

Neste contexto, uma declaração de incerteza associada à medição deverá ser emitida junto com o resultado de uma medição. Isso porque tal resultado ou o cálculo de uma grandeza representa somente uma aproximação ou uma estimativa do valor do mensurando e, por este motivo, deve estar acompanhado da incerteza associada.

A incerteza de um resultado de medição geralmente ocorre, pois uma medição está sujeita as imperfeições que dão origem a um erro cujas amplitudes não são completamente conhecidas em todos os seus diferentes aspectos e parâmetros. Tais erros são causados por pequenas diferenças sejam elas, na construção dos instrumentos, por desvios que ocorrem ao longo do tempo, pelos métodos de medição adotados ou ainda por variações ambientais.

Assim para obter o intervalo que define a incerteza ou faixa de erros, o método mais simples é somar os valores limites desses componentes individuais. Porém além da contribuição dos valores máximos destes componentes serem improváveis ao mesmo tempo, obteríamos também uma estimativa pessimista de sua amplitude.

Em primeira instância pode parecer que a soma aritmética simples dos erros observados impliquem numa abrangência de 100% das medidas, mas sempre existe a possibilidade de que algumas observações fiquem fora desse intervalo.

Por este motivo, a incerteza da medição é especificada em termos da faixa de erros prováveis em vez de limites absolutos, por levar em conta a impossibilidade de se obter todas as medidas com 100% de abrangência.

De acordo com o GUM (2003) “um erro é visto como tendo dois componentes, a saber, um componente aleatório e um componente sistemático”:

O VIM (2007) define os erros aleatórios e os erros sistemáticos, respectivamente, conforme as definições a seguir:

“Erro aleatório ( $\delta e_a$ ) é o resultado de uma medição menos a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade”.

“Erro sistemático ( $\delta e_s$ ) é a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando”.

Uma representação esquemática (Figura 4), ilustra estes conceitos:

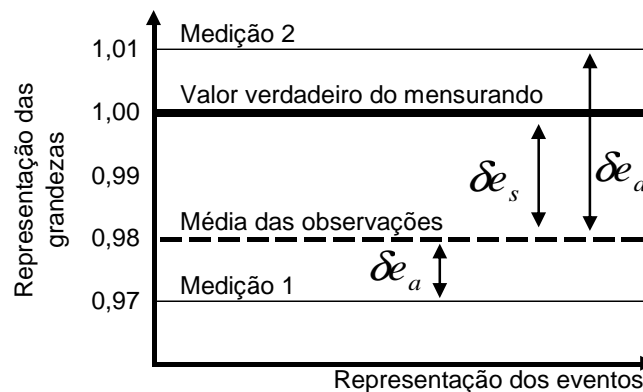


Figura 4 - Representação dos tipos de erros

Para uma melhor compreensão da origem destes erros, suas possíveis influências, como diferenciá-las e tratá-las, o GUM traz as seguintes considerações:

Sobre o erro aleatório, GUM (2003):

“O erro aleatório presumivelmente se origina de variações temporais ou espaciais, estocásticas ou imprevisíveis, de grandezas de influência. Os efeitos de tais variações, daqui para frente denominados *efeitos aleatórios*, são a causa de variações em observações repetidas do mensurando”.

Observa-se neste enunciado a introdução do conceito dos efeitos aleatórios, originados a partir da média de uma série de observações provocando um afastamento em relação à média. Ora se tal conceito advém presumidamente de variações temporais, estocásticas ou imprevisíveis, os termos “erro” e “incerteza”

passam-se a se distinguir com maior clareza, na qual o primeiro é o “resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando” VIM (2007) e o segundo refere-se ao resultado de uma medição que reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. Devido a isso, o valor exato do erro originado desses efeitos na média não pode ser conhecido.

Seguindo a mesma linha de raciocínio para o erro sistemático tem-se que (GUM, 2003):

“O erro sistemático, como o erro aleatório não pode ser eliminado, porém ele também, freqüentemente, pode ser reduzido. Se um erro sistemático se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição, daqui pra diante denominado como *efeito sistemático*, o efeito pode ser quantificado e, se for significativo com relação à exatidão requerida da medição, uma correção ou fator de correção pode ser aplicado para compensar o efeito”.

Assim, a incerteza de uma correção aplicada a um resultado de medição, para compensar um efeito sistemático, não é o erro sistemático no resultado de medição. Este efeito sistemático é freqüentemente denominado de tendência e também, algumas vezes chamado de efeito de tendência. É uma medida de incerteza devido ao conhecimento incompleto do valor requerido da correção. O erro originado da compensação imperfeita de um efeito sistemático, do mesmo modo que o erro aleatório, não pode ser exatamente conhecido.

Idealmente este efeito de tendência poderia ser considerado como constante para todas as medições feitas com os mesmos operadores e equipamentos, porém a avaliação de tendências é complicada devido ao fato de que algumas contribuições de tendência variem com o tempo. Por exemplo, o conhecimento e controle das condições de testes podem ser inadequados ou os instrumentos podem sofrer desgaste com o tempo. Tais fatores não implicariam significantes mudanças em curto prazo, mas pode ter influência significativa em longos períodos.

Assim, a avaliação dos erros sistemáticos pelos recursos experimentais é dificultada, especialmente quando as variações com o tempo estão envolvidas. Os erros apurados pelas observações ou por mudanças nas condições de operações são provavelmente fáceis de identificar (API, 1985), mas em alguns

experimentos a eliminação dos erros sistemáticos pode envolver uma completa mudança de equipamentos, na qual naturalmente não o torna mais exeqüível. A alternativa para experimentação, neste caso, é realizar uma avaliação subjetiva nas bases do experimento e um conhecimento dos instrumentos envolvidos.

Em suma, o resultado de uma medição será emitido após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos e ainda é tão somente uma estimativa do valor do mensurando por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos.

Na prática, existem muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição que podem incluir (GUM, 2003):

- Definição incompleta do mensurando;
- Realização imperfeita da definição do mensurando;
- Amostragem não representativa – a amostra medida pode não representar o mesurando definido;
- Conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- Erro de tendência pessoal na leitura de experimentos analógicos;
- Resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- Valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- Valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- Aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- Variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas;

Naturalmente, um efeito sistemático não reconhecido não pode ser levado em consideração na avaliação da incerteza do resultado de uma medição, porém contribui para o seu erro.

Devido à complexidade apresentada de se expressar à incerteza, torna-se necessário agrupar os componentes da incerteza em categorias baseadas nos seus métodos de avaliação. Este trabalho teve início em 1977 pelo Comitê



Internacional de Pesos e Medidas (CIPM)<sup>2</sup> que, reconhecendo uma falta de um consenso internacional sobre a expressão da incerteza em medição, solicitou ao Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) que em conjunto com laboratórios padrões internacionais, apresentasse uma recomendação para a obtenção deste consenso. Este grupo concluiu que havia a necessidade de obter um procedimento comum, internacionalmente aceito, para expressar a incerteza da medição, combinando os componentes individuais da incerteza em uma incerteza total simples. Neste momento, no entanto, não houve um consenso quanto ao método a ser utilizado. O tema então foi retomado em 1980 por outro grupo de especialistas que elaborou a recomendação INC-1, “Expressão da Incerteza Experimental”, aprovada pelo CIPM em 1981 e reconfirmada em 1986.

Esta recomendação, em resumo, indicou que os vários componentes da incerteza da medição fossem agrupados em duas categorias: aquela que é avaliada por métodos estatísticos (avaliação da incerteza do tipo A) e aquela que é avaliada por outros meios, que não pela análise estatística de uma série de observações (avaliação da incerteza do tipo B).

Estas categorias se aplicam à incerteza e não são substitutas para os termos “aleatórios” e “sistemáticos”. Nota-se que, a incerteza de uma correção de um “efeito sistemático” conhecido, pode em alguns casos, ser obtida por uma avaliação do tipo A, enquanto que, em outros casos, por uma avaliação do tipo B, podendo-se obter do mesmo modo a incerteza que caracteriza um “efeito aleatório”. Vale ressaltar também que, por exemplo, um “efeito aleatório” de incerteza em uma medição pode se tornar um componente “sistemático” da incerteza em outra medição na qual o resultado é usado como dado de entrada. Tal categorização de componentes da incerteza pode se tornar ambígua quando aplicada genericamente. Deste modo categorizando os métodos de avaliação dos componentes da incerteza, em vez de fazê-los com os próprios componentes, evita-se tal ambigüidade. Ao mesmo tempo, isto não impede designar componentes individuais que tenham sido avaliados pelos dois diferentes métodos em grupos distintos, a serem usados para uma finalidade em particular.

---

<sup>2</sup> CIPM, Comité International des Poids et Mesures

Estes estudos serviram como base para a consolidação do GUM que reforça os propósitos de classificação em ambas as categorias e as avaliações de probabilidade quantificadas por variâncias e desvios padrões:

“O propósito da classificação Tipo A e Tipo B é indicar as duas maneiras diferentes de avaliar os componentes da incerteza e serve apenas para discussão; a classificação não se propõe a indicar que haja qualquer diferença na natureza dos componentes resultando dos dois tipos de avaliação. Ambos os tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes da incerteza resultante de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrões”.

Assim, a caracterização de cada componente da incerteza passa ser obtida através da caracterização da função densidade de probabilidade derivada da observação de uma distribuição de frequência, para o caso da incerteza tipo A, e para uma suposta função densidade de probabilidade, baseada no grau de credibilidade de que um evento vá ocorrer, freqüentemente chamada probabilidade subjetiva, para a incerteza tipo B.

#### 4.5. AVALIANDO A INCERTEZA PADRÃO

Conforme já definido, a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. Assim de forma a decidir se um sistema de medição esta funcionando adequadamente, a variabilidade observada experimentalmente de seus valores de saída, conforme medido pelo seu desvio padrão observado, é freqüentemente comparada com o desvio padrão previsto, obtido pela combinação dos vários componentes da incerteza que caracterizam a medição.

Deste modo, o mensurando  $Y$  é determinado através de  $N$  outras grandezas do qual depende, através de uma relação funcional  $f$ , dada por:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

Da mesma forma, uma estimativa do mensurando  $Y$ , designada por  $y$ , é obtida da Equação (1) usando estimativas de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_N$  para os valores das  $N$  grandezas  $X_1, X_2, \dots, X_N$ . Deste modo pode-se reescrever da seguinte forma:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2)$$

A função  $f$  é interpretada como sendo a função que contém todas as grandezas, incluindo todas as correções e fatores de correção que possam contribuir com um componente significativo da incerteza para o resultado da medição. Assim, se  $f$  não modela a medição no grau imposto pela exatidão requerida do resultado de medição deve-se adicionar grandezas de entrada adicionais em  $f$  para eliminar esta inequação.

O conjunto de grandezas de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_N$  pode ser categorizado como (GUM, 2006):

“grandezas cujos valores e incertezas podem ser diretamente determinadas na medição em curso. Estes valores e incertezas podem ser obtidos, por exemplo, de uma única observação, de observações repetidas, ou no julgamento baseado na experiência e podem envolver a determinação de correções a leitura de instrumentos e correções por conta de grandezas de influência, tais como temperatura ambiente, pressão barométrica e umidade; grandezas cujos valores e incertezas são incorporados à medição a partir de fontes externas, tais como grandezas associadas com padrões de medição calibrados, materiais de referência certificados e dados técnicos de referência obtidos de manuais técnicos”.

A categorização citada pelo GUM refere-se a avaliações do Tipo A e avaliações do Tipo B enunciadas anteriormente.

#### 4.5.1. AVALIANDO A INCERTEZA PADRÃO DO TIPO A

Em avaliações fundamentadas em distribuições de frequência para uma variável aleatória  $q$ , para qual,  $n$  observações independentes  $q_k$  foram obtidas sob as mesmas condições de medição, pode-se ter uma melhor estimativa da

esperança  $\mu_q$ , ou valor esperado (ISO 3435-1, 2006), através da média aritmética das  $n$  observações:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^N q_k \quad (3)$$

Assim para uma grandeza de entrada  $X_i$ , estimada a partir de  $n$  observações repetidas independentes  $X_{i,k}$ , a média aritmética  $\bar{X}_i$ , obtida pela Equação (3) é usada como estimativa de entrada  $x_i$ , na Equação (2), para determinar o resultado de medição  $y$ . As variações de  $q_k$  são devidas aos efeitos aleatórios e a variância de uma distribuição de probabilidade  $\sigma^2$  dessa grandeza  $q$  e é estimada pela variância experimental das observações  $s^2(q_k)$ , então:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (4)$$

A estimativa da variância experimental e sua raiz quadrada positiva,  $s(q_k)$  denominada desvio padrão experimental caracteriza a dispersão dos valores  $q_k$  em torno da média  $\bar{q}$ . Assim, a melhor estimativa da variância da média  $\sigma^2(\bar{q})$  é dada pela variância experimental da média  $s^2(\bar{q})$ :

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (5)$$

Tanto quanto  $s^2(\bar{q})$  como  $s(\bar{q})$  quantificam bem  $\bar{q}$  e estimam a esperança  $\mu_q$  e qualquer um deles pode ser usado como uma medida de incerteza de  $\bar{q}$ . Portanto, para cada grandeza de entrada  $X_i$ , determinada por  $n$  observações independentes  $X_{i,k}$ , a incerteza padrão  $u(x_i)$  de sua estimativa  $x_i = \bar{X}_i$  é calculada de acordo com a Equação  $s^2(\bar{q})$ , onde  $u^2(x_i) = s^2(\bar{X}_i)$  e  $u(x_i) = s(\bar{X}_i)$ , denominadas respectivamente *variância estimada associada do tipo A* (ou variância do tipo A) e *incerteza padrão do tipo A*.

#### 4.5.2. AVALIANDO A INCERTEZA PADRÃO DO TIPO B

Para um componente de incerteza obtido por uma avaliação do Tipo B, a variância estimada associada  $u^2(x_i)$  ou a incerteza padrão  $u(x_i)$  é avaliada por julgamento científico, baseando-se todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de  $X_i$ .

O conjunto de informações a respeito do julgamento científico da avaliação do Tipo B pode incluir (GUM, 2003.):

- Dados de medições prévias;
- A experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- Especificações do fabricante;
- Dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados;
- Incertezas atribuídas a dados de referência extraídos de manuais.

Seu uso adequado baseia-se conforme citado (GUM, 2003):

“o uso adequado do conjunto de informações disponíveis para uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão exige o discernimento baseado na experiência e no conhecimento geral, sendo esta uma habilidade que pode ser aprendida com a prática. Deve se reconhecer que uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão pode ser tão confiável quanto uma avaliação do Tipo A, especialmente numa situação de medição onde uma avaliação do Tipo A é baseada em um número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes”.

Assim, por exemplo, caso a estimativa de  $x_i$  na função  $f$ , for obtida através da especificação do fabricante, do certificado de calibração, do manual técnico ou de outra fonte e se sua incerteza citada declarada for um múltiplo de um desvio padrão, a incerteza padrão  $u(x_i)$  é simplesmente o valor mencionado dividido pelo multiplicador e a variância estimada  $u^2(x_i)$  é o quadrado do quociente (GUM, 2003).

Em outras situações, que a incerteza citada não é tida como múltiplo de um desvio padrão, pode-se encontrar declarado que a incerteza citada define um

intervalo tendo para este um nível de confiança ou ainda, caso não esteja declarado pode-se supor que foi utilizada uma distribuição normal para calcular a incerteza citada, e a partir daí, recuperar a incerteza padrão através de um fator apropriado para a distribuição normal e conseqüentemente sua variância.

Por conveniência,  $u^2(x_i)$  e  $u(x_i)$  estimados por este método são referidos, por vezes, como *variância estimada associada do tipo B* (ou variância do tipo B) e *incerteza padrão do tipo B*, respectivamente.

#### 4.6. DETERMINANDO A INCERTEZA PADRÃO COMBINADA

Quando a incerteza padronizada, ou simplesmente incerteza padrão do resultado de uma medição e o resultado desta, é obtida por meio dos valores de várias outras grandezas, este resultado é denominado *incerteza padrão combinada* e designada por  $u_c$ , sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, sendo estes as variâncias e covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com o quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas.

Em outras palavras, a incerteza padrão de  $y$ , na qual  $y$  é a estimativa do mensurando  $Y$ , é obtida através da combinação apropriada de incertezas padrão das estimativas de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_N$ .

Quando todas as grandezas de entrada são independentes, diz-se que estas grandezas não são correlacionadas. Do mesmo modo, quando existe uma dependência entre grandezas, estas por sua vez, são correlacionadas.

##### 4.6.1. GRANDEZAS DE ENTRADA NÃO CORRELACIONADAS

No caso em que as grandezas de entrada são ditas como independentes, a variância combinada  $u_c^2(y)$  será dada por (GUM, 2003):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (6)$$

Na qual  $u(x_i)$  é uma incerteza padrão avaliada pelo tipo A ou tipo B e  $f$  uma função das estimativas de  $x_i$  em relação a  $y$ , baseadas numa aproximação de

primeira ordem da série de Taylor (GUM, 2003). Portanto, a incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  será a raiz positiva de  $u_c^2(y)$ .

Nota-se também que, as derivadas parciais  $\partial f / \partial x_i$ , são iguais a  $\partial f / \partial X_i$ , quando avaliadas para  $X_i = x_i$ , assim, quando ocorrem alterações nos valores das estimativas de entrada  $x_i$ , a estimativa de saída  $y$ , também varia  $(\Delta y)_i = (\partial f / \partial x_i)(\Delta x_i)$ . Se esta alteração é gerada pela incerteza padrão da estimativa de entrada  $x_i$ , a variação correspondente de  $y$  é  $(\partial f / \partial x_i)u(x_i)$ . A variância combinada de  $u_c^2(y)$  pode, deste modo, ser vista como a soma dos termos, onde cada um deles representa a variância estimada associada com a estimativa de saída  $y$  gerada com cada variância estimada associada com cada estimativa de entrada  $x_i$ . Estas derivadas, por sua vez, são denominadas coeficientes de sensibilidade (GUM, 2003) e a Equação (6) é expressa da seguinte forma:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u_c(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (7)$$

$$\text{Onde: } c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$$

Em outro caso particular, se o mensurando  $Y$  é da forma  $Y = cX_1^{p_1} X_2^{p_2} \dots X_N^{p_N}$  e os expoentes  $p_i$  são números positivos ou negativos conhecidos tendo incertezas desprezíveis, a variância combinada será expressa por (GUM, 2003):

$$[u_c(y)/y]^2 = \sum_{i=1}^N [p_i u(x_i)/x_i]^2 \quad (8)$$

#### 4.6.2. GRANDEZAS DE ENTRADA CORRELACIONADAS

Quando grandezas de entradas são correlacionadas, ou dependentes, a expressão apropriada para a variância combinada  $u_c^2(y)$ , associada com o resultado de uma medição é (GUM, 2003):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (9)$$

Na qual  $x_i$  e  $x_j$  são estimativas de  $X_i$  e  $X_j$  e  $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$  é a covariância estimada, associada com  $x_i$  e  $x_j$ .

A ISO 3435-1 (2006) define que a covariância, entre duas grandezas de entrada  $y$  e  $z$  é “a soma dos produtos dos desvios dos pares das variáveis aleatórias em amostragem aleatórias originados da amostragem dos recursos divididos pelo número de termos menos um” e pode ser estimada por  $s(y_i, z_i)$ , obtida a partir de  $n$  pares independentes de observações simultâneas  $y_i$  e  $z_i$  de  $y$  e  $z$ , conforme a Equação abaixo:

$$s(y_i, z_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) \quad (10)$$

Onde:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (11.1,2)$$

O grau de relação entre duas grandezas é caracterizado pelo coeficiente de correlação estimado por:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (12)$$

Onde  $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$  e  $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$

Caso  $x_i$  e  $x_j$  sejam estimativas independentes  $r(x_i, x_j) = 0$ .

As grandezas de entradas entre o comprimento e o tempo (Ver Capítulo 6) possuem uma dependência entre si, porém não expressiva, e por este motivo são tratadas neste trabalho como grandezas independentes.

#### 4.6.3. LEI DA PROPAGAÇÃO DA INCERTEZA

A Equação (6) para grandezas de entrada independentes e a Equação (9) para grandezas de entrada dependentes expressam o que é denominado como a lei de propagação da incerteza. Entretanto a incerteza se propaga de modo



diferente em função da relação matemática que define o mensurando. Mendes e Rosário (2005) abordam o assunto para a propagação das incertezas prováveis em operações na soma e na subtração dos componentes da incerteza proveniente dos resultados de medições diretas e do mesmo modo nas operações de multiplicação e divisão. A regra básica, também relatada por Ribeiro (2010), que simplifica os cálculos e não requer uso de derivadas parciais e coeficientes de sensibilidade são:

- Na soma e subtração, as incertezas se propagam pela soma das incertezas absolutas (ou incertezas padrão).
- Na multiplicação e divisão, as incertezas se propagam pela soma das incertezas relativas.

Para a soma das incertezas dependentes a soma das incertezas é direta.

Para a soma das incertezas independentes a soma das incertezas é feita pela raiz quadrada da soma dos quadrados conforme definido a seguir;

Propagação da incerteza em operações de soma e subtração:

$$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + u(x_3)^2} \quad (13)$$

Propagação da incerteza em operações de multiplicação e divisão:

$$\frac{u_c}{\sum_{i=1}^3 \bar{X}_i} = \sqrt{\left(\frac{u(x_1)}{\bar{X}_1}\right)^2 + \left(\frac{u(x_2)}{\bar{X}_2}\right)^2 + \left(\frac{u(x_3)}{\bar{X}_3}\right)^2} \quad (14)$$

#### 4.7. DETERMINANDO A INCERTEZA PADRÃO EXPANDIDA:

Embora a incerteza padrão combinada possa ser universalmente usada para expressar a incerteza de um resultado de medição, em algumas aplicações comerciais, industriais e regulamentadoras, e quando a saúde e a segurança estão em questão, é, muitas vezes, necessário dar uma medida de incerteza que

define um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

Para isso, uma incerteza expandida, representada por  $U$ , é obtida multiplicando-se a incerteza padrão combinada,  $u_c$ , por um fator de abrangência  $k$ . A finalidade pretendida para  $U$  é fornecer um intervalo em torno do resultado de uma medição, com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente ser atribuídos ao mensurando.

$$U = k * u_c(y) \quad (15)$$

A escolha do fator  $k$  é baseada na probabilidade de abrangência ou ocorrência do requerido do intervalo. Supondo uma distribuição normal e uma confiança desejada  $p$ , o fator de abrangência  $k_p$ , segue conforme tabela abaixo:

Tabela 2 – Fator de abrangência

| Confiança<br>desejada<br>$p$ (por cento) | Fator abrangência<br>$k_p$ |
|--|----------------------------|
| 68,27                                    | 1,00                       |
| 90,00                                    | 1,64                       |
| 95,00                                    | 1,96                       |
| 95,45                                    | 2,00                       |
| 99,00                                    | 2,58                       |
| 99,73                                    | 3,00                       |

Determinado  $U$ , o resultado de uma medição do mensurando  $Y$  será expresso como:

$$Y = y \pm U \quad (16)$$

Na qual intervalo entre  $y - U$  a  $y + U$  é o intervalo que se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser atribuídos a  $Y$ .

## 5. PROJETO E MONTAGEM EXPERIMENTAL DO *BALL PROVER*

### 5.1. DISCUSSÕES INICIAIS DO PROTÓTIPO

Dentre os diferentes tipos de *Ball Prover* existentes no mercado (Ver Capítulo 3), tomaram-se como premissas para execução deste projeto considerações sobre as vantagens na avaliação da incerteza, a facilidade de construção e operação e os custos inerentes ao projeto, a disponibilidade comercial e as limitações espaciais do laboratório para a montagem.

Visando os aspectos construtivos e as limitações orçamentárias, o primeiro protótipo, seguindo as prescrições das normas (ISO 7278-2, 1988), previa dois lançadores de esfera, em formato tipo Y com o provador, sendo um lançador em cada braço do provador, com funções de lançar a esfera para dentro do provador e o outro para lançar a esfera para fora do lançador (Figura 5). A principal característica desse provador é o fato de ser do tipo unidirecional. Porém, este protótipo foi descartado pelo fato de não permitir uma avaliação do sistema quanto as suas tendências e impossibilidade de executar duas corridas sem a retirada da esfera com conseqüente intervenção do operador.

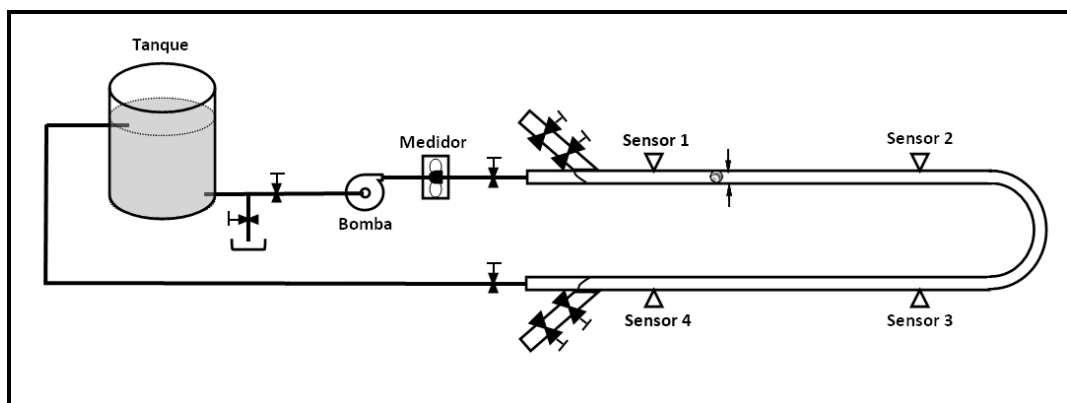


Figura 5 - Protótipo Unidirecional com lançador individual

No segundo protótipo previsto, um lançador do tipo T (Figura 6), cujo arranjo interliga os braços do provador, deu lugar aos lançadores individuais, permitindo que  $n$  corridas sejam realizadas sem a retirada da esfera e sem a intervenção do operador, o que permite uma calibração com menos ciclos.

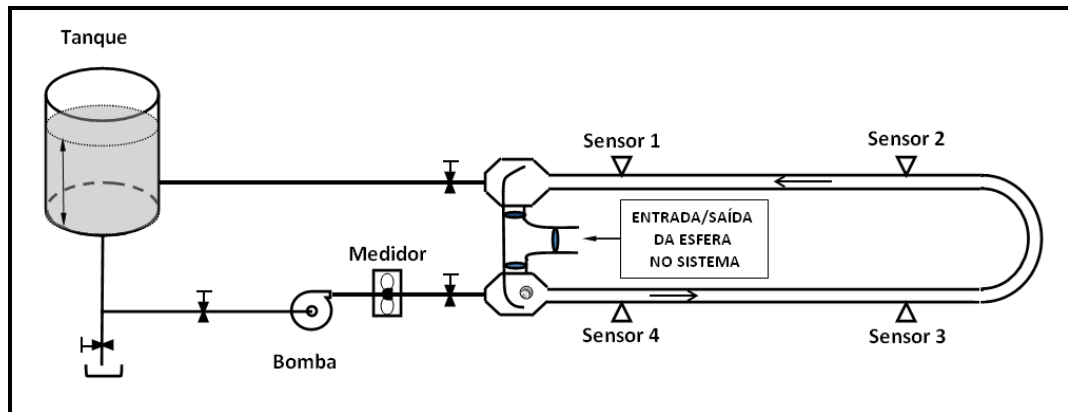


Figura 6 - Protótipo Unidirecional com lançador tipo T

Apesar de este arranjo permitir uma facilidade de operação do sistema, também não permite uma avaliação sobre os efeitos de tendência em ambos os sentidos. Além do mais, foi detectado que a distância entre os tubos ( $2R$ ) não permitia a montagem de um conjunto de válvulas comerciais necessário para as manobras com a esfera.

Dessa forma o provador bidirecional, antes descartado pelo alto custo da válvula de reversão de fluxo (válvula de quatro vias) foi reconsiderado, sendo para isso necessário o desenvolvimento de um projeto específico para a função dessa válvula, porém utilizando 4 válvulas globo ordinárias, primeiramente através de um sistema operando individualmente (Figura 7) até chegar a uma configuração final (Figura 9). O desenvolvimento desse conjunto de válvulas será mais bem detalhado no decorrer do texto (Seção 5.4).

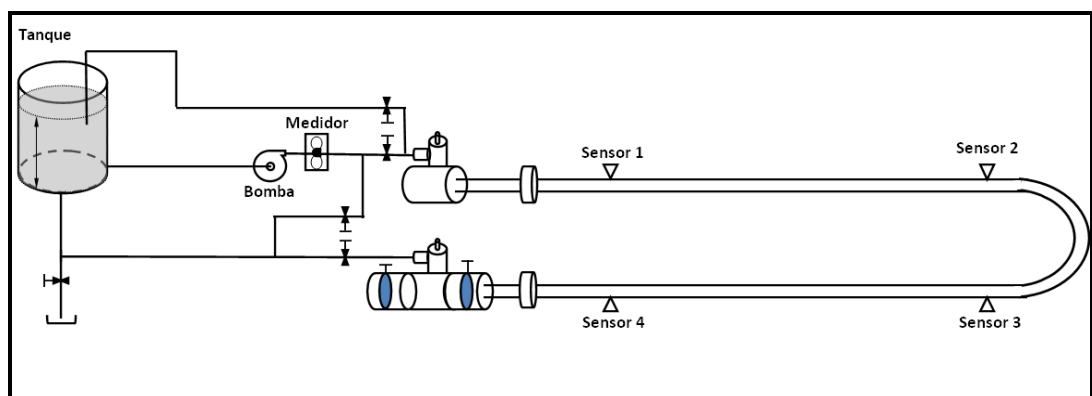


Figura 7 - Protótipo Bidirecional com válvulas de reversão individuais

## 5.2. PROJETO DO PROTÓTIPO DE *BALL PROVER*

A seleção por uma montagem experimental de um modelo bidirecional se deve, portanto, às vantagens proporcionadas já mencionadas (Ver item 5.1), além de possibilitar a avaliação de várias seções calibradas com o mesmo volume e as tendências de acidentes de linha, como o trecho em curva projetado.

O modelo bidirecional projetado é composto pelos seguintes componentes principais (Figura 8):

- [1] Tanque de água (Reservatório)
- [2] Medidor mestre (Turbina)
- [3] Bomba de sucção
- [4] Válvula de reversão de fluxo
- [5] Válvulas para operação e manutenção do provador
- [6] Provador de  $\phi$  60 mm e 12 metros de comprimento
- [7] Sensores óticos
- [8] Computador (Interligação turbina x sensores) – Banco de dados
- [9] Manômetros de registro de pressão
- [10] Termostato
- [11] Espaçadores internos
- [12] Válvulas de purga de ar e de drenagem
- [13] Mangueiras de borracha

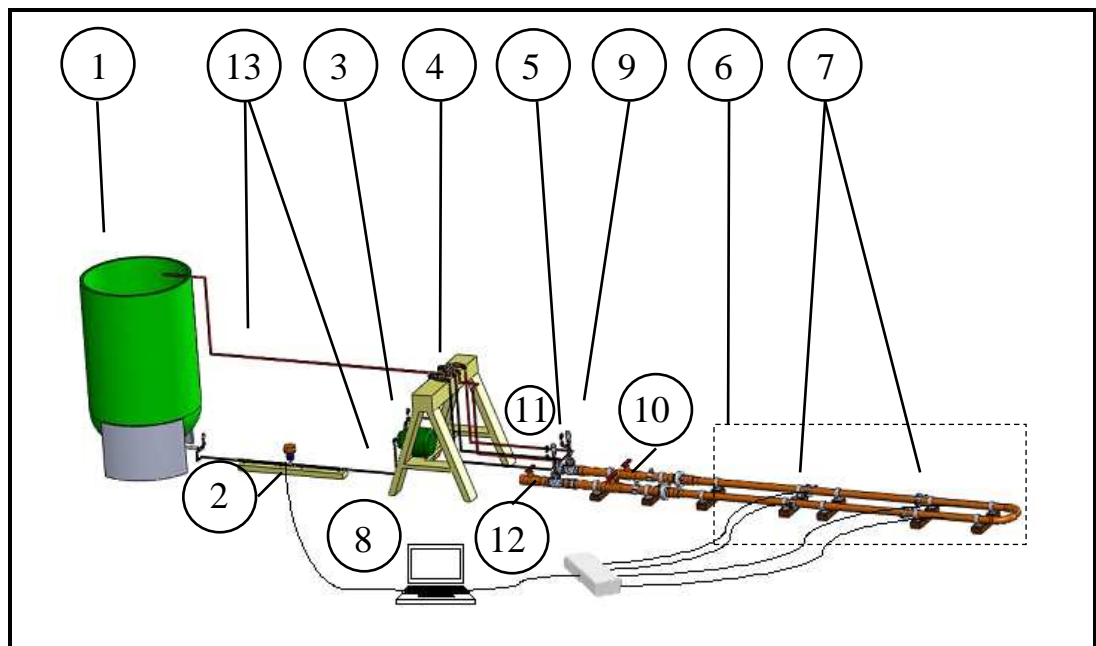


Figura 8 – Principais componentes do sistema *Ball Prover*

O resultado da montagem experimental é ilustrado a seguir (Figura 9):

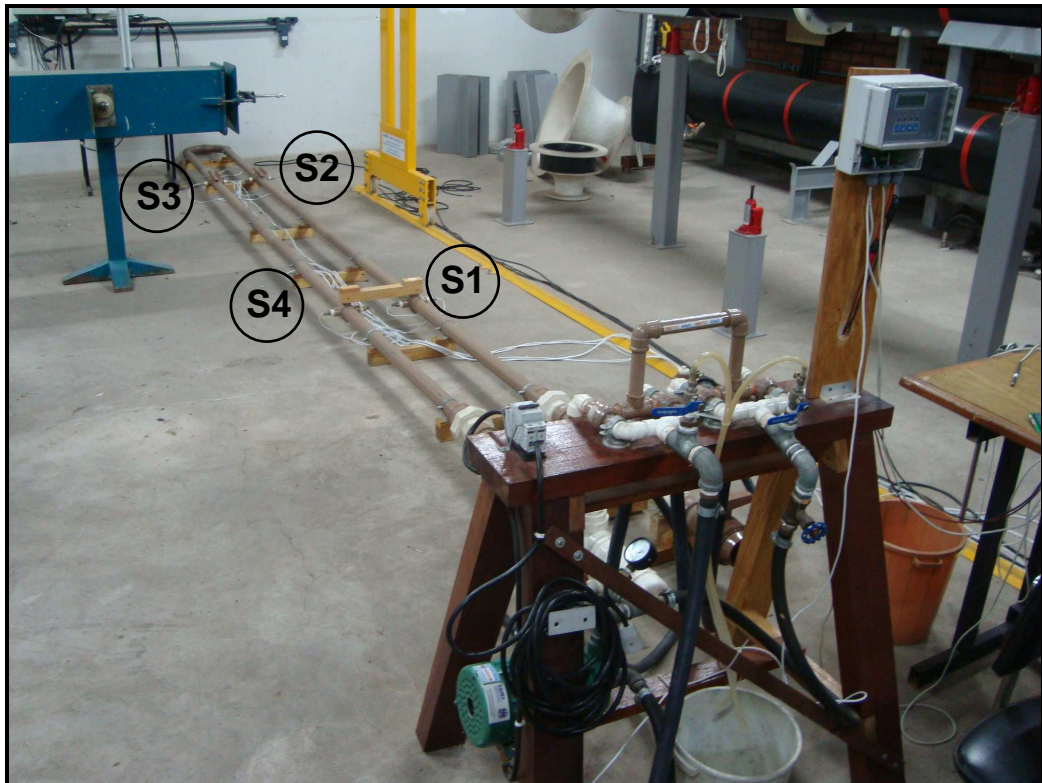


Figura 9 – Fotografia da Montagem experimental do *Ball Prover*

### 5.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

Neste trabalho, o provador bidirecional (Componente nº 6 - Figuras 8) é alimentado por um reservatório (Componente nº 1 - Figuras 8) que é interligado com um medidor do tipo turbina (Componente nº 2 - Figuras 8) e esse a uma bomba centrífuga (Componente nº 3 - Figuras 8). O fluido a ser medido então é enviado para a válvula de reversão de fluxo (Componente nº 4 - Figuras 8) que por sua vez distribui o fluido para dentro do provador. Assim, o fluido deslocará a esfera pelo provador, passando pelos os detectores óticos (Componente nº 7 - Figuras 8), até retornar para a válvula de reversão e posteriormente para o reservatório.

Neste processo de operação, quando a esfera passar pelo primeiro detector, este enviará um sinal para o computador, que também está conectado com o medidor do tipo turbina. Assim, cada vez que a esfera passar por um detector, um sinal será enviado para o computador, que registrará o intervalo de tempo

entre um sinal e outro e os pulsos emitidos pela turbina neste período. Desta forma, será possível correlacionar a vazão do provador com a registrada pela turbina.

#### 5.4. DETALHES CONSTRUTIVOS

Alguns aspectos construtivos que são fundamentais para o correto funcionamento do provador e encontram-se detalhados a seguir:

##### ➤ SISTEMA DE BOMBEAMENTO

A bomba de sucção utilizada, neste projeto, é uma bomba do tipo centrífuga marca ZIMERMAN, com potência de  $\frac{1}{4}$  cavalo vapor (cv). Situada entre o medidor mestre e a válvula de reversão de fluxo, tem como principal função fornecer energia para o sistema, a fim de promover o deslocamento da esfera dentro do provador.

Para determinar qual potência necessária a ser gerada pela bomba, tanto para iniciar o movimento da esfera, quanto para gerar um intervalo de velocidade na avaliação, um estudo de caracterização da bomba foi realizado, conforme consta no Apêndice A.

##### ➤ VÁLVULA DA REVERSÃO DE FLUXO

A válvula de reversão de fluxo (válvula de quatro vias) tem a função de promover o fluxo nos dois sentidos do provador, função esta que é a principal característica do provador bidirecional. Nos provadores bidirecionais encontrados no mercado, a válvula de reversão de fluxo (Figura 10) tem geometria de uma válvula de esfera, no entanto, possui quatro saídas e uma aleta móvel, que funciona com um leme para direcionar o fluxo. O princípio de funcionamento baseia-se na entrada do fluxo no sistema através de uma das vias, a outra via é para o retorno do fluxo para o sistema. As duas outras vias são conectadas ao provador que, através da manobra de fluxo, inverte o sentido de fluxo no provador com o mínimo impacto na operação.



Figura 10 - Válvula de quatro vias convencional  
(Fonte: Saudi Aramco Journal. Garcia & Sherief . 1999)

Para viabilizar este projeto, neste trabalho, foi desenvolvida uma válvula de reversão de fluxo (Figuras 11 e 12) utilizando um rearranjo entre quatro válvulas de esfera ordinárias. Para construí-la, primeiramente foram retiradas as manoplas de cada válvula de esfera e interligadas duas a duas e em posições ortogonais com um adaptador tipo T, de maneira que enquanto uma está aberta à outra permanece fechada. Posteriormente, os adaptadores tipos T de cada par de válvulas foram interligados através de uma alavanca. Assim, com o conjunto sincronizado enquanto o primeiro par de válvulas é alimentado pelo reservatório e os distribui para um dos dois braços do provador, o segundo par funciona como retorno para o reservatório, recebendo fluxo do outro braço. Este detalhe de operação é esquematizado através da Figura 13.



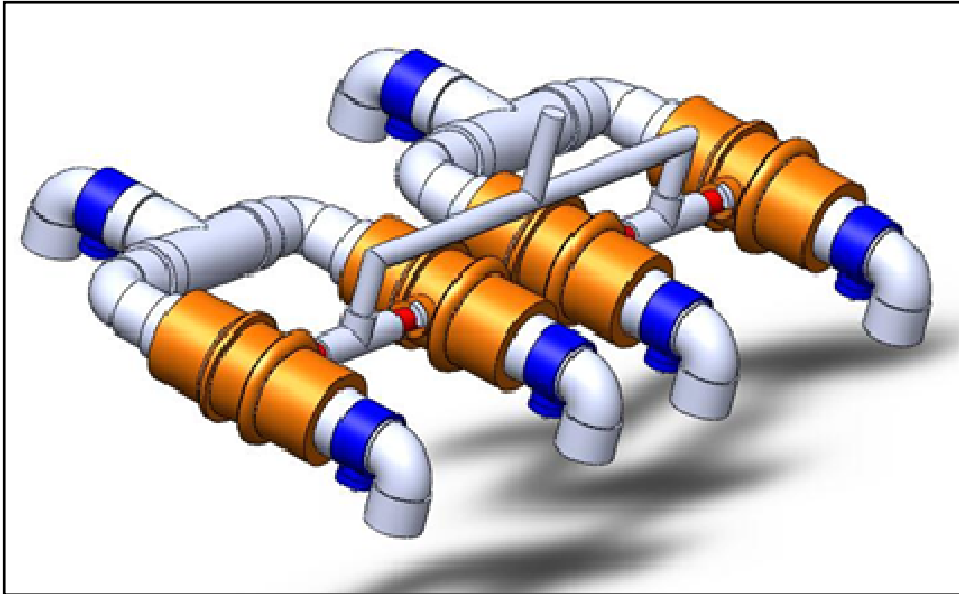
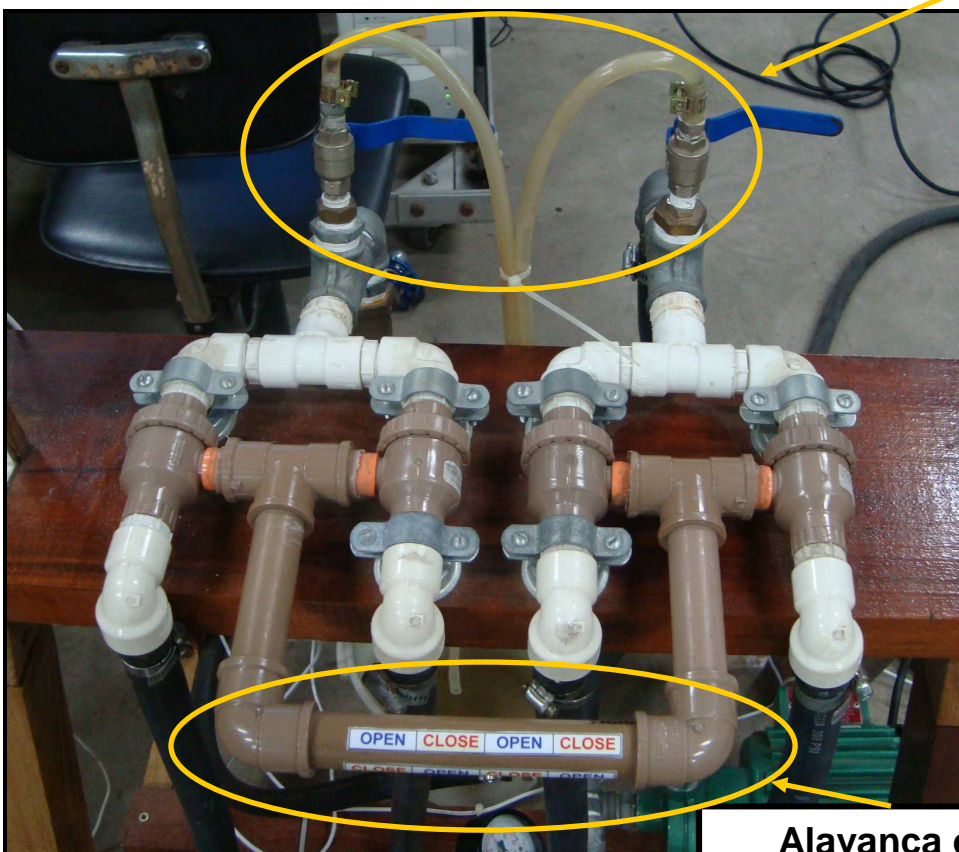


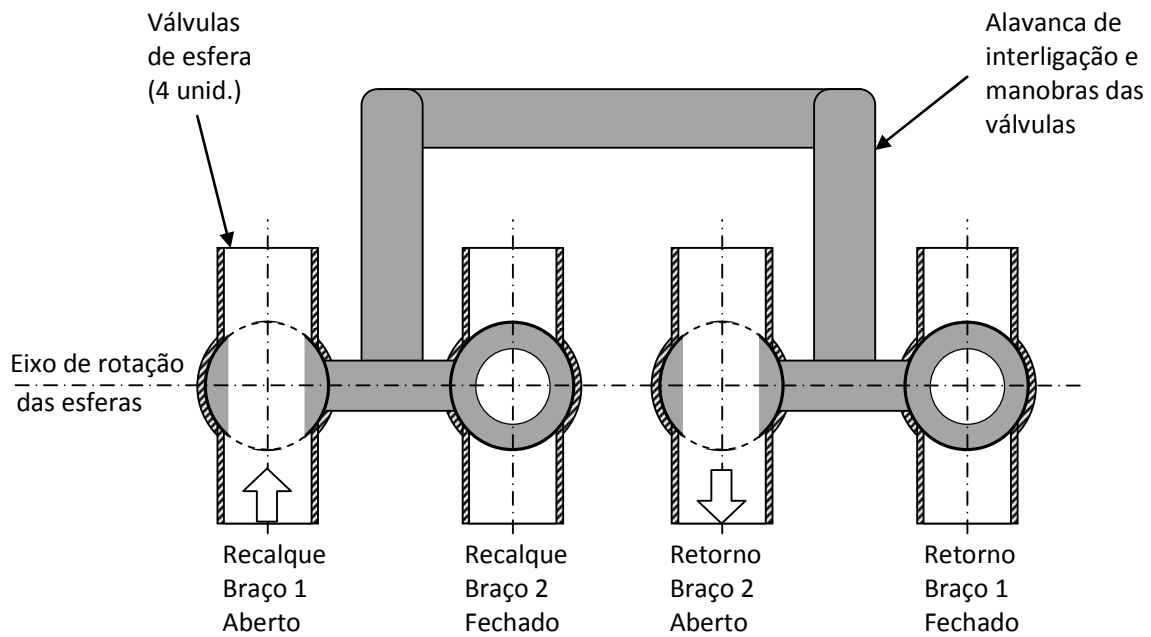
Figura 11 - Válvula de reversão de fluxo projetada

**Válvulas de Purga de ar**

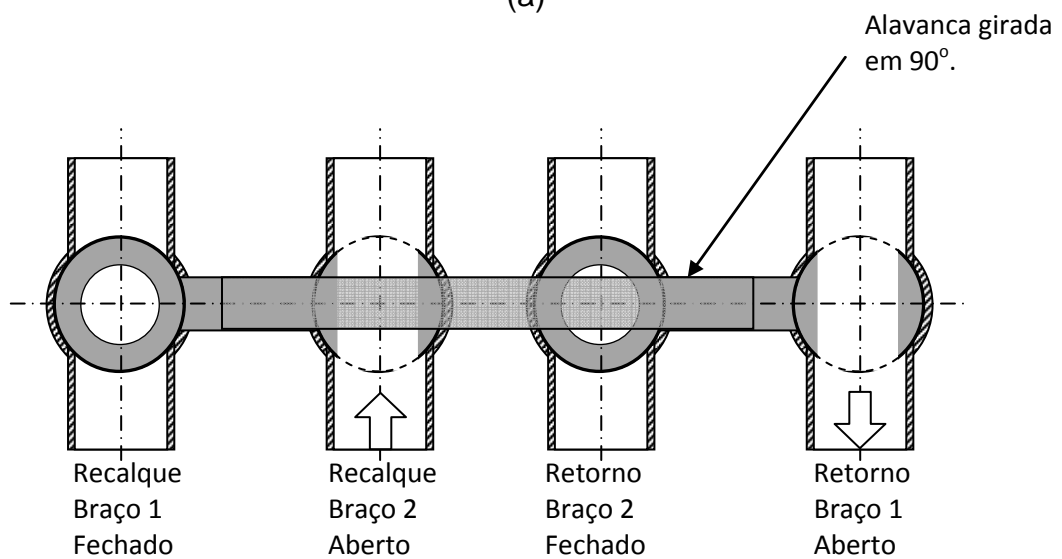


**Alavanca de  
reversão de fluxo**

Figura 12 - Válvula de reversão de fluxo construída



(a)



(b)

Figura 13 - Croquis da montagem e operação do conjunto de válvulas com 4 vias:

(a) Posição de alimentação do braço 1 e retorno no braço 2;

(b) Posição de alimentação do braço 2 e retorno no braço 1

### ➤ CAVALETE DE COMANDOS

O cavalete de comandos (Figura 14) é uma estrutura de madeira na qual se encontram instalados o sistema de válvulas para reversão de fluxo e o sistema de bombeamento do provador. É neste posto, que o operador do *Ball Prover* realiza as manobras de reversão, bem como os registros das variações das pressões e da temperatura do sistema.

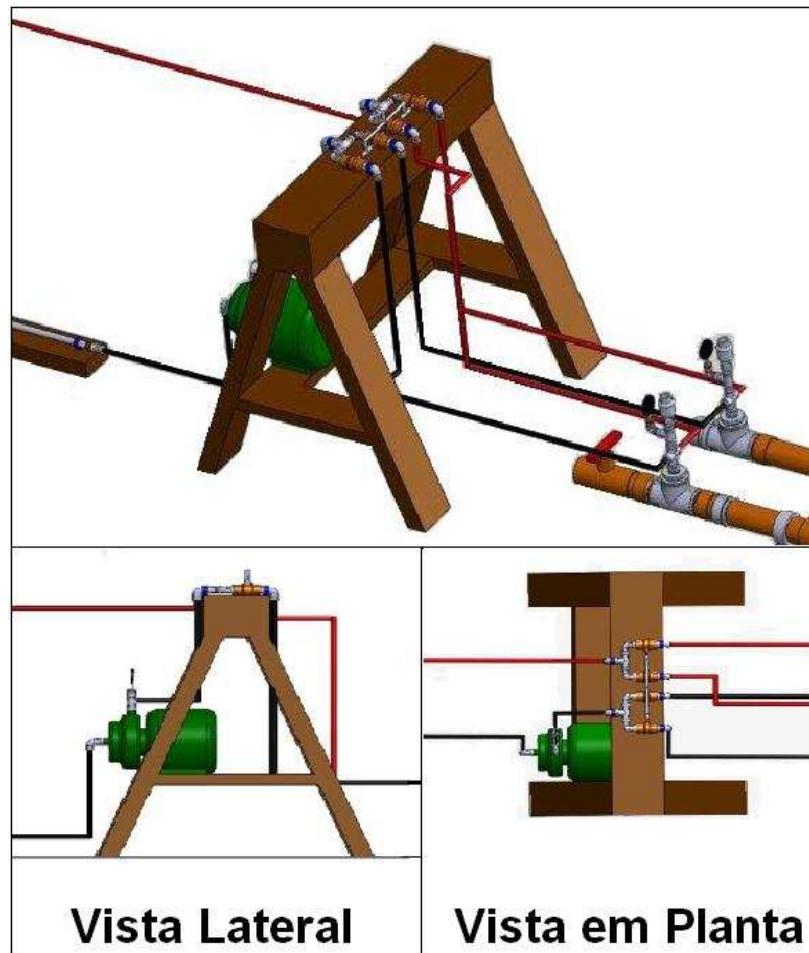


Figura 14 – Detalhe do Cavalete de Comandos

### ➤ SENSORES ÓTICOS

Os sensores óticos (Figura 15), utilizados neste trabalho, são fixados ao longo do provador, através de peças de fixação denominadas colar de tomada. A detecção da passagem da esfera é feita através de ondas de eletromagnéticas geradas por *leds* na faixa do infravermelho. Essas ondas eletromagnéticas são

interrompidas pela passagem de um objeto e causam interferência na comunicação entre o *led* e o sensor localizado na posição diametralmente oposta. A interferência na comunicação é registrada pelo sistema de aquisição de dados. Este tipo de tecnologia tem sido aplicado com sucesso neste trabalho, cujo fluido de trabalho é transparente (água). Em provadores de petróleo tem-se utilizado interruptores para detectar a passagem da esfera, o que tem gerado uma contribuição significativa para o aumento da incerteza na medição.



Figura 15 – Posto de instalação do conjunto *led* de infravermelho e sensor, montados em colar de tomada em posição diametralmente oposta

Para garantir que a instalação destes detectores tenha seus *leds* perfeitamente alinhados e devidamente posicionados no decorrer do provador, as seguintes etapas são necessárias:

- Demarcar uma distância de três metros entre cada detector, considerando o trecho em curva.
- Instalar o colar de tomada, cuja função é promover a vedação dos orifícios no provador e o alinhamento no eixo central do diâmetro do tubo.
- Instalar na seguinte ordem os componentes para fixação para cada *led* (Figura 16):

- [1] Anel de vedação (*O'ring*)
- [2] Janela circular de vidro
- [3] Centralizador

- [4] Cap roscável
- [5] Presilha
- [6] Led

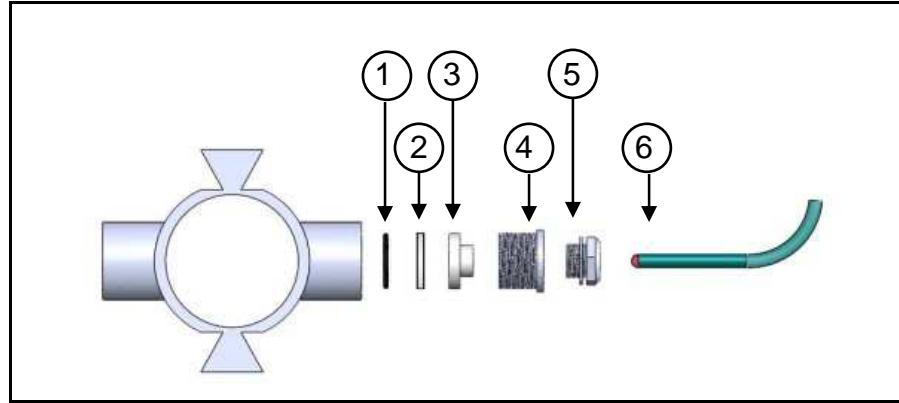


Figura 16 - Detalhe construtivo – Posição de Instalação do Sensor óptico

#### ➤ ESPAÇADORES INTERNOS

Para garantir que após cada operação de manobra na válvula de reversão de fluxo a esfera percorrerá todo provador e que irá retornar fazendo o caminho contrário, faz-se necessário a instalação de espaçadores internos (Figura 17). Estes espaçadores têm a função de impedir que a esfera ultrapasse o ponto de alimentação do sistema, garantindo também que em cada novo ciclo iniciado, a esfera inicie seu movimento de um ponto equidistante ao do outro braço do provador, portanto, tendo um mesmo comprimento de pré-operação. Este cuidado foi considerado para se evitar tendências de aceleração da esfera em ambos os sentidos no provador.

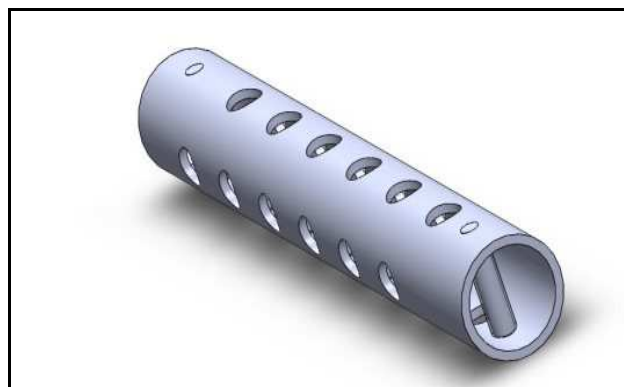


Figura 17 – Detalhe do Espaçador interno

## ➤ VÁLVULAS OPERACIONAIS E O SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO PROVADOR

O sistema de vedação do provador é composto de três válvulas de esfera de diâmetro interno de  $\varnothing 75$  mm. Das três válvulas duas encontram-se situadas entre a união que conecta com o provador e o sistema de alimentação do provador (Figura 18). A principal função destas duas válvulas é promover o isolamento do líquido contido dentro do provador, caso haja necessidade de alguma manutenção no sistema de alimentação. A terceira válvula de esfera tem a função de facilitar a inserção da esfera de elastômero para dentro do provador e ainda impedir que o líquido vazze do provador enquanto estiver em operação.

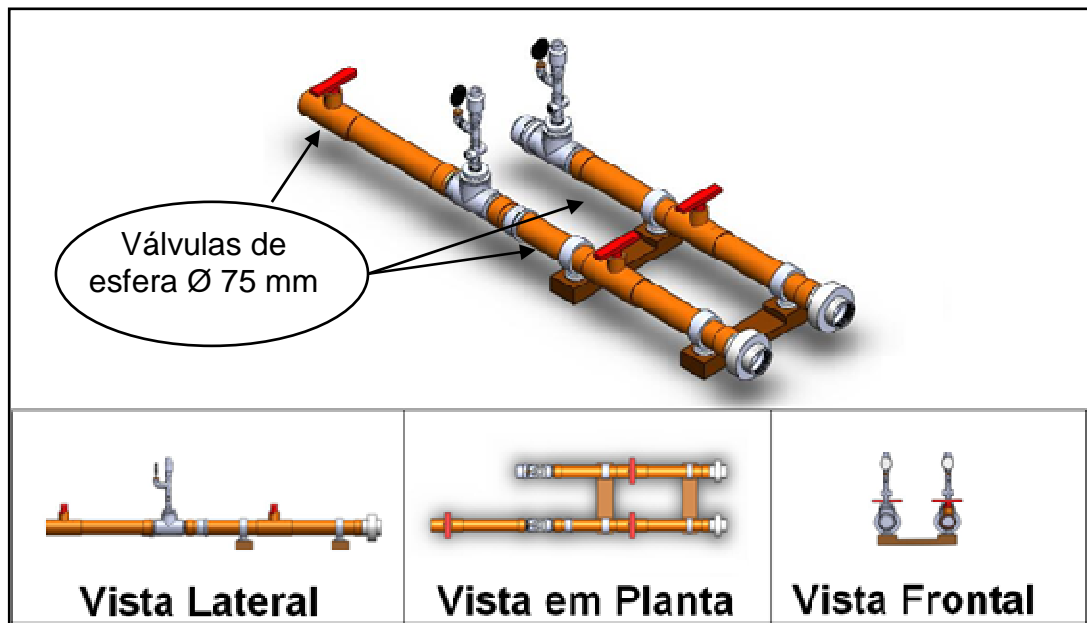


Figura 18 - Sistema de Alimentação do provador

O sistema de alimentação do provador é conectado com a válvula de reversão de fluxo através de quatro mangueiras. Cada braço do provador recebe duas mangueiras que estão combinadas de tal forma que enquanto uma está aberta a outra se encontra fechada. Assim, se a alimentação de líquido no sistema é direcionada para determinado braço do provador, obrigatoriamente o líquido percorre todo o provador para retornar à válvula de reversão de fluxo pelo outro braço. De modo semelhante, quando a manobra de reversão de fluxo é realizada, o fluxo de líquido no provador é invertido. Esta combinação permite

que a esfera de elastômero complete o percurso no provador em um sentido de fluxo, e a partir daí, quando ocorre a manobra de reversão de fluxo, a esfera de elastômero percorre o percurso contrário completando assim um ciclo.

#### ➤ VÁLVULAS DE PURGA DE AR E DRENAGEM

As válvulas de purga de ar estão localizadas nas partes altas do provador (Figura 19) e no cavalete de comandos próximo a válvula de quatro vias (Figura 12) sendo responsáveis pela retirada do ar dentro da tubulação. De acordo com orientações da norma (ISO-7278-4, 1999), as válvulas de purga de ar devem ser instaladas para evitar problemas de fluxo durante a operação que podem comprometer os resultados experimentais.

As válvulas de drenagem (Figura 19) ficam situadas próximas ao sistema de alimentação do provador, no trecho de pré-operação, cuja função é facilitar durante o período de manutenção o esvaziamento do provador.

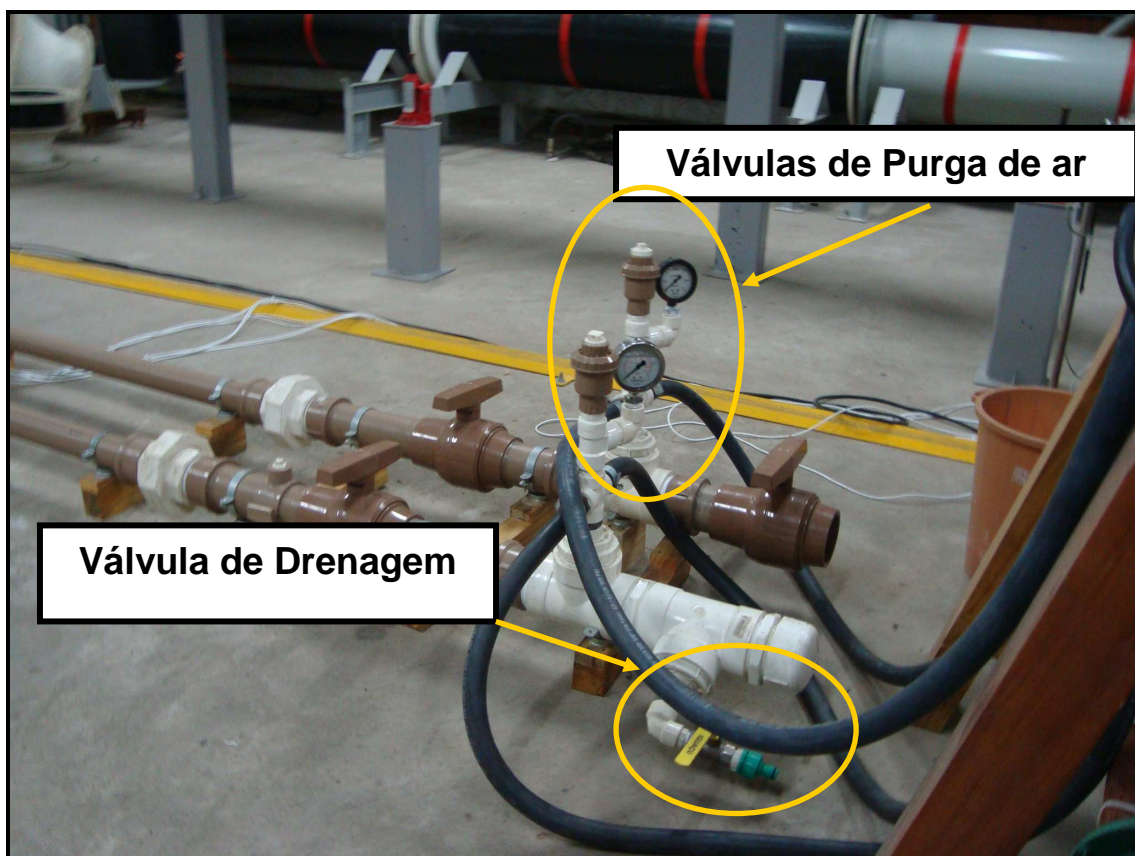


Figura 19 – Detalhe das válvulas de purga de ar e de drenagem

## ➤ ESFERAS DE ELASTÔMERO

As esferas disponíveis para os experimentos (Figura 20) conforme citado no capítulo 4, são de material elastômero, preenchidas com o fluido de trabalho e, segundo recomendações das normas, devem possuir diâmetro superior (interferência) ao diâmetro interno do provador de pelo menos 2% (ISO 7278-2, 1988). Uma interferência muito pequena pode levar a um vazamento de líquido entre a esfera e o diâmetro interno do provador e uma interferência muito elevada da esfera pode não melhorar as condições de selamento e ainda causar um desgaste mais rápido danificando também a circularidade da esfera e conseqüentemente seu movimento. Para tal caracterização, encontra-se no Apêndice B deste trabalho, a análise dimensional das esferas, segundo a qual um estudo qualitativo das esferas propõe uma classificação baseada nas observações das variâncias e dos desvios padrão do diâmetro de cada esfera em relação ao diâmetro do provador e sua expansão de 2%.

Desta maneira, das seis esferas disponíveis preenchidas com fluido de trabalho, a melhor classificada foi utilizada para a realização dos experimentos no *Ball Prover*. Outra esfera, constituída do mesmo material que as anteriores, porém sem preenchimento com o fluido de trabalho também é considerada nos experimentos a fim de verificação de seu comportamento no provador.



Figura 20 - Esferas de Elastômero



## 6. METODOLOGIA DE CÁLCULO VOLUMÉTRICO E EXPRESSÃO DA INCERTEZA: *BALL PROVER* x TURBINA

### 6.1. *BALL PROVER*

Para determinar o volume base do provador ( $V_b$ ), ou seja, o volume de líquido sob condições padrão, delimitado nos trechos da tubulação onde se encontram os sensores, são utilizadas, neste trabalho, avaliações fundamentadas na observação da frequência das variáveis aleatórias. Assim, a estimativa do mensurando  $y$  (Ver item 4.5) é baseada na função que melhor exprime o valor verdadeiro de  $Y$  e tem como componentes de entrada as estimativas  $x_1, x_2, x_3$ , conforme proposto pela Equação abaixo:

$$y = \frac{[x_1][x_2]}{[x_3]} \quad (17)$$

Onde:

$x_1$  é a estimativa do comprimento da tubulação acompanhado de sua incerteza padrão.

$x_2$  é a estimativa da área da seção transversal da tubulação acompanhado de sua incerteza padrão.

$x_3$  é a estimativa de tempo entre o traslado da esfera de um sensor a outro acompanhado de sua incerteza padrão.

A Equação anterior, então, pode ser reescrita da seguinte forma:

$$y = \frac{[\bar{X}_1 + u(x_1)][\bar{X}_2 + u(x_2)]}{[\bar{X}_3 + u(x_3)]} \quad (18)$$

Para uma melhor estimativa de cada termo da Equação 16, torna-se necessário identificar os efeitos aleatórios e sistemáticos que contribuem para a dispersão dos resultados, quando utilizados os mesmos métodos e procedimentos de medição dentro de  $n$  observações. Nem todos os efeitos

podem ser identificados, muitas vezes nem podem ser quantificados, mas quanto melhor estas variáveis que influenciam a qualidade da medição estiverem sob controle mais confiável será o fator de correção proposto e a expressão da incerteza relatada.

### ➤ COMPRIMENTO DA TUBULAÇÃO

Para estimar o comprimento da tubulação no trecho de interesse que delimita o volume base, entre os sensores nº 1 (S1) e nº 4 (S4), os seguintes cuidados foram observados:

- Utilização de trena de precisão a laser
- Utilização de uma mira
- Registros da temperatura ambiente e do líquido<sup>3</sup>
- Influência da pressão atmosférica
- Propriedades do material<sup>4</sup> PVC (Polyvinyl chloride) <sup>5</sup>

O trecho entre S1 e S4, daqui para frente designado S1-S4, compreende o somatório entre os trechos S1 e S2 (sensor nº 2), ou S1-S2, S2 e S3 (sensor nº 3), ou S2-S3 e o trecho S3 e S4, ou S3-S4. A distância projetada entre S1-S4 é de 9 (nove) metros e suas sub-divisões, S1-S2, S2-S3 e S3-S4 são eqüidistantes (3 metros cada trecho). Na montagem experimental, um tubo interligando os sensores extremos e os intermediários auxiliam no alinhamento dos sensores (Figura 21).



Figura 21 – Metodologia para alinhamento dos sensores

<sup>3</sup> Supondo que a temperatura no provador seja igual à temperatura no líquido

<sup>4</sup> Cortesia: TIGRE S/A – TUBOS E CONEXÕES

<sup>5</sup> Tradução: Policloreto de vinila

Os trechos S1-S2 e S3-S4 são trechos retilíneos, enquanto o trecho S2-S3 possui uma curva com raio (135,83 mm) fornecido pelo fabricante. O levantamento dimensional executado e os procedimentos de cálculo da estimativa de comprimento da tubulação acompanhado de sua incerteza padrão estão disponíveis no Apêndice D.

#### ➤ ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA TUBULAÇÃO

Para estimar a área da seção transversal da tubulação, os mesmos cuidados observados no levantamento dimensional do comprimento da tubulação foram tomados, no entanto, o equipamento de medição utilizado neste caso é o paquímetro. O levantamento dimensional executado e os procedimentos de cálculo da estimativa da área da seção transversal da tubulação acompanhado de sua incerteza padrão estão disponíveis no Apêndice D.

#### ➤ MÓDULO ELETRÔNICO DO *BALL PROVER*

O módulo eletrônico desenvolvido especificamente para utilização no *Ball Prover* possui como base um microcontrolador PIC18F452, fabricado pela *Microchip*. O serviço de projeto e execução do módulo foi especificado e contratado de acordo com as necessidades operacionais e de precisão do sistema e possui em seu circuito integrado programável as seguintes funcionalidades:

- Contagem de tempo;
- Contagem de pulsos do medidor tipo turbina;
- Detecção da esfera nos quatro pontos definidos;
- Armazenamento dos dados pertinentes em memória não-volátil.

Um programa (*firmware*) desenvolvido em linguagem C e executado pelo microcontrolador realiza as atividades descritas, e a execução do mesmo ocorre a uma velocidade que depende da oscilação de um cristal de quartzo, que é ligado externamente ao microcontrolador. A utilização de um cristal de 10 MHz de frequência de ressonância implica em uma base de tempo de 0,1  $\mu$ s (0,1 x 10<sup>-6</sup> s

= 1/10 MHz), que define o incremento dos contadores de tempo e da execução de uma instrução básica do programa.

A arquitetura do sistema é mostrada na Figura 22:

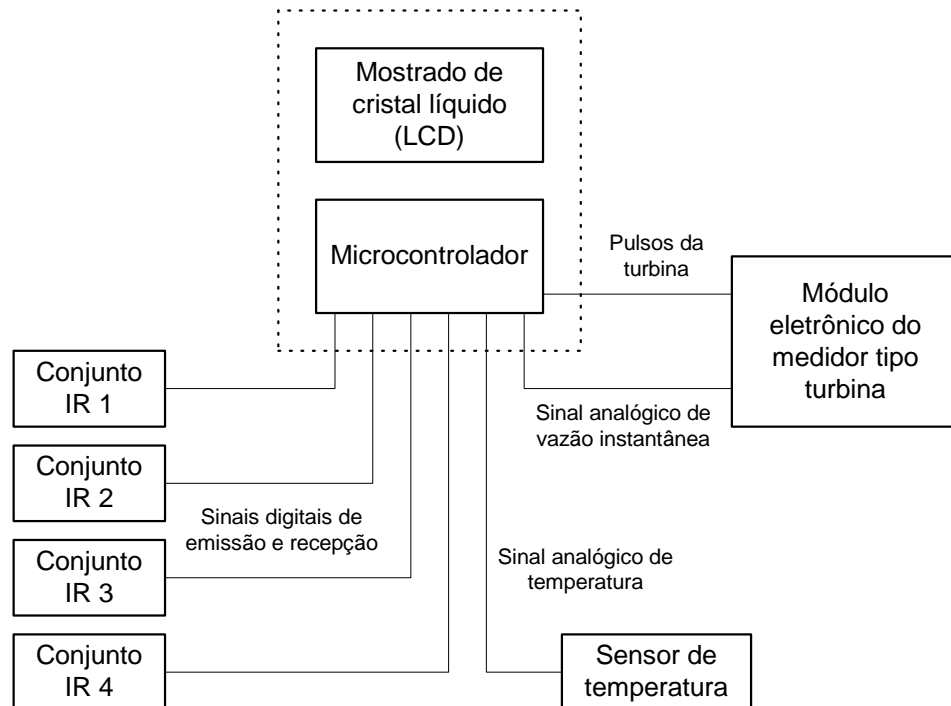


Figura 22 - Arquitetura do Sistema

Tal circuito funciona de forma independente, sendo necessário o computador somente para capturar os dados armazenados, salvando-os em arquivo.

#### o DETECÇÃO DA ESFERA

No processo, a detecção da esfera se dá pela utilização do conjunto emissor-receptor infravermelho (IR). O emissor (LD 271), quando acionado, emite um sinal com o comprimento de onda do espectro infravermelho e o receptor (TIL 78) é sensibilizado a partir da detecção de um sinal deste mesmo espectro. Quando não há obstáculo (no caso, uma esfera) entre emissor e receptor, este é sensibilizado. A passagem da esfera entre ambos faz com que a recepção do sinal IR seja interrompido. O microprocessador é o responsável por controlar a emissão e fazer a leitura do receptor.

A validação ocorre no terceiro pulso consecutivo válido, mas o registro do tempo ocorre na primeira detecção. Assim, ao se detectar um obstáculo, o tempo de contador é registrado, mas armazenado somente caso se detecte a interrupção do sinal infravermelho por três leituras consecutivas.

O sinal enviado pelo emissor IR possui o seguinte formato na Figura 23:

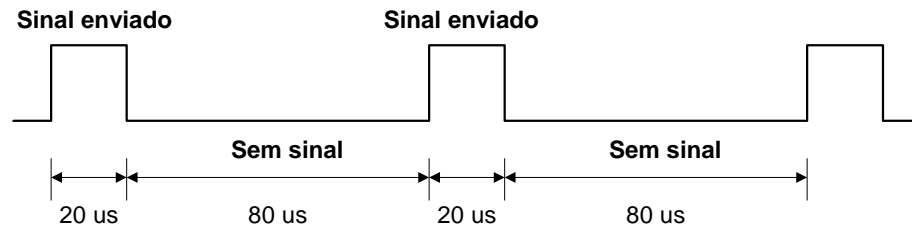


Figura 23 - Croqui dos sinais enviado

Considerando o pior caso, uma esfera pode ser detectada com um atraso de 80,5  $\mu$ s, que corresponde ao período sem sinal e à execução de algumas instruções do programa do microcontrolador antes da detecção. As contagens de pulsos da turbina e de tempo são realizadas de duas formas, a saber:

A contagem relativa aos pulsos inteiros entre dois pontos de detecção de esfera se entende por pulso inteiro a forma de onda que corresponde a um período completo (Figura 24):

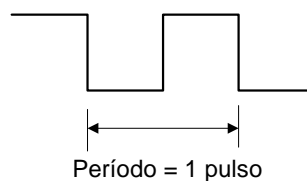


Figura 24 - Croqui de um pulso inteiro

Assim, a Figura 25 mostra o exemplo da contagem do número de pulsos em dois trechos: entre 1 e 2 (2 pulsos inteiros); e entre 1 e 3 (6 pulsos inteiros):

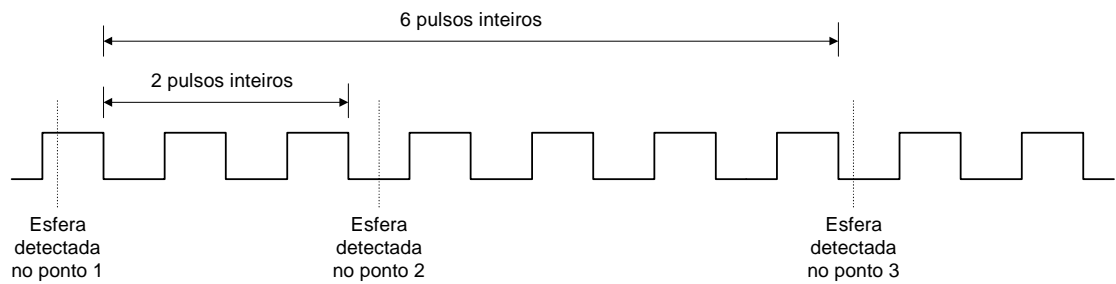


Figura 25 - Exemplo de contagem de pulsos

Neste caso, a contagem de tempo corresponde ao tempo do número de pulsos inteiros. O contador de tempo utilizado incrementa a cada  $0,4 \mu\text{s}$  e a incerteza no início e no término da contagem está relacionada com a incerteza na detecção da esfera, já descrita.

- **CONTAGEM ESTIMADA DO NÚMERO DE PULSOS TOTAL ENTRE DOIS PONTOS DE DETECÇÃO DE ESFERA:**

Nesta situação, a contagem de tempo refere-se a todo o trecho entre os pontos de detecção da esfera. O contador de tempo é iniciado no instante em que a esfera é detectada no primeiro conjunto emissor-receptor do caminho (conjunto 1, caso seja o caminho anti-horário, ou conjunto 4, caso seja o caminho horário) e paralisado no final do caminho. Nos pontos intermediários, o valor do contador de tempo é registrado. A Figura 26 mostra um exemplo considerando o caminho anti-horário. A contagem de tempo é iniciada assim que a esfera é detectada no ponto 1. Ao ser detectada no ponto 2, o valor do contador de tempo é armazenado, mas o contador não é interrompido. O mesmo acontece quando a esfera é detectada no ponto 3.

O contador de tempo utilizado incrementa a cada  $0,4 \mu\text{s}$  e a incerteza no início e no término da contagem está relacionada com a incerteza na detecção da esfera, já descrita:

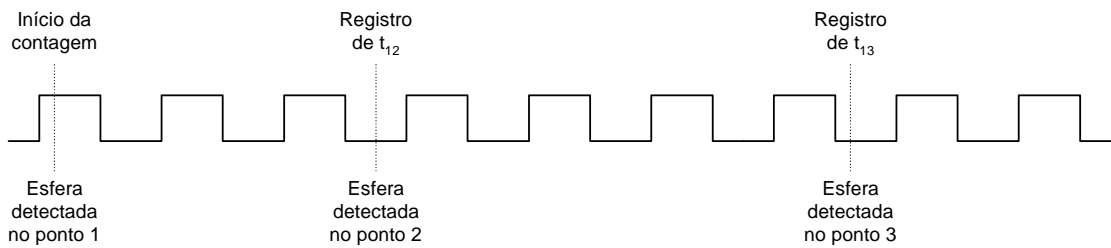


Figura 26 - Contagem de tempo

A contagem de pulsos considera, além dos pulsos inteiros, parte de pulsos, o que pode resultar em um número com casas decimais. O que na Figura 27 seria considerado como sendo 2 pulsos inteiros pela primeira forma de contagem é processado da seguinte forma na contagem estimada:

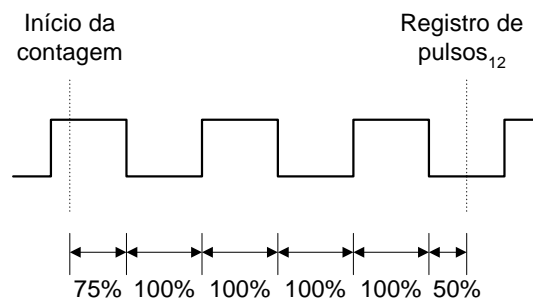


Figura 27 - Pulsos Processados

Número estimado de pulsos =  $(75\% + 100\% + 100\% + 100\% + 100\% + 50\%) / 200\% = 2,625$  pulsos

Os 200%, mostrado no denominador, corresponde à representação de um pulso inteiro. Neste algoritmo, considera-se que os pulsos possuem o mesmo tamanho.

### ➤ FATORES DE CORREÇÃO

Além das estimativas de entrada dos termos que compõem  $y$  e de uma metodologia cuidadosa no levantamento dimensional, devem-se levar em consideração os fatores de correção recomendados pelas normas (ISO-4267-2, 1988). Por se tratar do fluido medido ser água, os fatores de correção empregados serão os mesmos considerados nas correções aplicadas para os

volumes medidos pelo método *water draw* (ISO-4267-2, 1988). Tendo em vista que os efeitos de compressibilidade da água são insignificantes para os níveis de pressão registrados e que a temperatura de operação do provador é a temperatura ambiente, a incerteza proveniente desta correção é considerada desprezível em relação à incerteza global. O volume base corrigido do provador ( $V_{b_c}$ ) será considerado como:

$$V_{b_c} = \frac{\sum [V_{M_{st}} * C_{tdw} * C_{t_{PVC}M}]}{C_{t_{PVC}P} * C_{p_{PVC}P} * C_{plp}} \quad (19)$$

Onde:

- $V_{M_{st}}$  - É o volume medido nas condições padrões (15°C)
- $C_{tdw}$  - Fator de correção do efeito da temperatura na água
- $C_{t_{PVC}M}$  - Fator de correção do efeito da temperatura no provador (Medido)
- $C_{t_{PVC}P}$  - Fator de correção do efeito da temperatura no provador (Inicial)
- $C_{p_{PVC}P}$  - Fator de correção do efeito da pressão no provador
- $C_{plp}$  - Fator de correção do efeito da pressão no líquido

A determinação dos fatores de correção faz-se da seguinte forma:

○  $V_{M_{st}}$

Corresponde ao volume medido corrigido para as condições padrões (15°), dado pela Equação:

$$V_{M_{st}} = V_M * C_{tl} \quad (20)$$

Onde  $C_{tl}$  é o fator de correção dos efeitos da temperatura no líquido, conforme dado pela Equação:

$$C_{tl} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (21)$$



E  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são determinados pela expressão:

$$\rho_t = \rho_o \{1 - [A(t - t_o) + B(t - t_o)^2 + C(t - t_o)^3 + D(t - t_o)^4 + E(t - t_o)^5]\} \quad (22)$$

Onde:

$$\rho_o = 999,97358 \text{ kg/m}^3 \text{ (máxima massa específica da água na temperatura } t_o \text{)}$$

$$t_o = 3,9818 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A = 7,0134 \times 10^{-8} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = 7,926504 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -7,575677 \times 10^{-8} \text{ }^\circ\text{C}^{-3}$$

$$D = 7,314894 \times 10^{-10} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$$

$$E = -3,596458 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-5}$$

o  $C_{twd}$

Fator de correção da expansão da água entre as diferenças da temperatura nas condições de teste e nas condições iniciais no provador, considerando a massa específica da água livre de ar, para temperaturas entre 1°C e 40°C (ISO-8222, 2002) é obtido de forma semelhante ao procedimento de cálculo do  $C_{il}$ :

$$C_{twd} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (23)$$

o  $C_{t_{PVC}M}$ ,  $C_{t_{PVC}P}$

Fator de correção do efeito da temperatura na tubulação PVC durante o processo de medição (designado por M) e no provador nas condições iniciais de medição (designado por P), é dado por:

$$C_{I_{PVC}} = 1 + (T - 15)\gamma \quad (24)$$

Onde:

$T$  - Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) na parede do provador

$\gamma$  - Coeficiente de expansão cúbica do material

$\gamma = 3\alpha$  (Coeficiente de expansão linear –  $\alpha = 7 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ )<sup>6</sup>

o  $C_{P_{PVC}P}$

Fator de correção do efeito da pressão na tubulação PVC é dado pela seguinte Equação:

$$C_{P_{PVC}P} = 1 + \frac{PD}{Ee} \quad (25)$$

Onde:

$P$  – É a pressão interna medida (kPa)

$D$  – É o diâmetro interno (mm)

$E$  – Módulo de elasticidade do material ( $E=2,94 \cdot 10^6 \text{ kPa}$ )<sup>10</sup>

$e$  - Espessura da parede do provador (mm)

o  $C_{plp}$

Fator de correção do efeito da pressão no líquido é dado pela seguinte Equação:

$$C_{plp} = \frac{1}{1 - (P - P_e)F} \quad (26)$$

Onde:

---

<sup>6</sup> Cortesia: TIGRE S/A – TUBOS E CONEXÕES

$P$  – É a pressão interna medida (kPa)

$P_e$  – É a pressão de vapor de equilíbrio medido no líquido a determinada temperatura. [ $P_e = 0$ ,  $p/0$  e  $100^\circ\text{C}$ ,  $P_e$  é  $< 101,3$  kPa (Pressão absoluta) ISO-4267-2]

$F$  – Fator de compressibilidade da água ( $\text{k Pa}^{-1}$ )

Tabela 3 - Fator de compressibilidade da água

| Temperatura $^\circ\text{C}$ | Fator de compressibilidade |
|------------------------------|----------------------------|
|                              | ( $\text{k Pa}^{-1}$ )     |
| 5                            | $4,9 \times 10^{-7}$       |
| 10                           | $4,8 \times 10^{-7}$       |
| 15                           | $4,7 \times 10^{-7}$       |
| 20                           | $4,6 \times 10^{-7}$       |
| 25                           | $4,5 \times 10^{-7}$       |
| 30                           | $4,5 \times 10^{-7}$       |
| 35                           | $4,4 \times 10^{-7}$       |
| 40                           | $4,4 \times 10^{-7}$       |
| 45                           | $4,4 \times 10^{-7}$       |
| 50                           | $4,4 \times 10^{-7}$       |

### ➤ EXPRESSÃO DA INCERTEZA

A expressão da incerteza no provador será dada pela incerteza combinada do volume do provador (Ver Apêndice D) com a incerteza relativa do tempo de traslado da esfera de um sensor a outro e será designada por  $u_c(y)$ . A expressão da incerteza global  $U$  (Ver Equação 16), será a multiplicação do fator  $k_p$  por  $u_c(y)$ , adotando um nível de confiança de 99,73% ( $k_p = 3$ ).

## 6.2. TURBINA

O medidor de vazão do tipo turbina utilizado neste trabalho é um instrumento de referência dos testes experimentais. O modelo TVT-L (Figura 28), produzido pela TECNOFLUID para medições em linha possui dentro de seus componentes

um rotor com um sistema de palhetas fixas, suspensas livremente sobre um eixo horizontal, posicionado no sentido do fluido.



Figura 28 - Medidor tipo Turbina em linha (Modelo: TVT-L Ø3/4'')

(Fonte: Tecnofluid do Brasil Ltda.)

A velocidade rotacional da turbina é proporcional à velocidade do fluido<sup>7</sup> e representa o volume do fluido que passa através do transdutor, por meio da rotação do rotor que gera pulsos elétricos que são captados pelo medidor a cada passagem das palhetas do rotor. Assim cada pulso representa um volume discreto de fluido. Sua frequência representa o valor da vazão instantânea e sua totalização acumulada representa o volume total medido.

A instalação deste equipamento segue as recomendações do fabricante que disponibiliza em seu catálogo a esperança de repetibilidade e linearidade do equipamento, o fator K e os erros verificados nos resultados de calibração (Tabela 4).

---

<sup>7</sup> Desde que, a área de passagem do fluido é fixa.

Tabela 4 - Dados de operação e calibração fornecidos pela Tecnofluid para turbina TVT-L Ø3/4"

| INDICAÇÃO:                                 |   |
|--|---|
| <b>Linearidade</b>                         | Líquidos: ±0,5% para vazões de 10% a 100% do range com viscosidade menor que 5 cSt. |
| <b>Repetividade</b>                        | Líquidos: ± 0,05% da leitura.   |
| <b>Constante do Medidor:<br/>(Fator K)</b> | 500,39  |
| <b>Faixa de medição</b>                    | 0,189 - 1,89 l/s  |
| RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO                   |   |
| <b>Vazão Indicada</b>                      | 11,8    28,7    56,1    85,2    111,9   |
| <b>Volume Real</b>                         | 10    30    60    80    100   |
| <b>Volume Indicado</b>                     | 9,96    29,9    60,1    79,7    99,8  |
| <b>Erro %</b>                              | -0,4    -0,33    0,17    -0,37    -0,2  |

O fator K da turbina é a relação entre o número de pulsos gerados pelo medidor para uma unidade de volume entregue, ou seja:

$$Fator - k = \frac{n_p}{Vb_{ij} * C_{t_{pvcP}} * c_{p_{pvcP}}} \quad (27)$$

Onde:

$n_p$  - É o número de pulsos gerados pela turbina.

$Vb_{ij}$  - Volume base em determinado trecho

#### ➤ A INTERPOLAÇÃO DE PULSOS

Os pulsos gerados pela turbina durante a contagem de tempo de traslado da esfera pelos sensores são registrados na memória de dados do programa. Os pulsos registrados são aqueles acumulados entre dois detectores (Figura 29). Dessa forma, o primeiro pulso posterior a passagem da esfera no sensor 1 é considerado, assim como o pulso imediatamente anterior a passagem da esfera nos demais sensores.

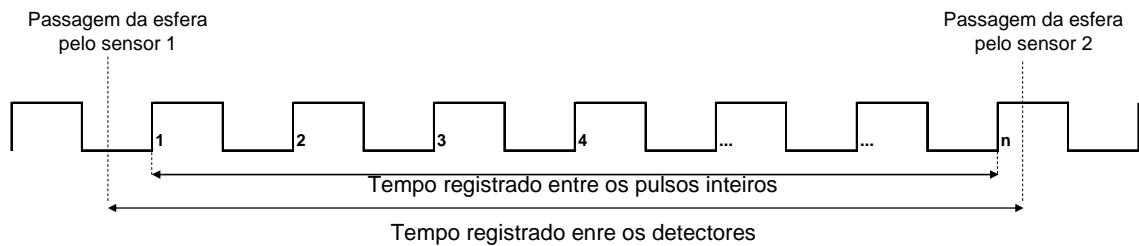


Figura 29 - Sistema de contagem de pulsos

A interpolação de pulsos, para este caso, é baseada nas orientações das normas (ISO 7278-3. 1998) para o método de interpolação em tempo duplo (*Double-timing method*) e segue a seguinte Equação:

$$n'_p = n_p \frac{t_s}{t_p} \quad (28)$$

Onde:

$n'_p$  - pulsos interpolados entre os detectores

$n_p$  - pulsos brutos gerados pela turbina entre os detectores

$t_s$  - Tempo registrado entre os sinais emitidos pelos detectores

$t_p$  - Tempo registrado entre os pulsos inteiros gerados entre os detectores

Além destes dados registrados na memória de dados, o programa computacional também processa os pulsos gerados entre os detectores, fazendo uma estimativa precisa dos pulsos entre cada sensor. Esta estimativa de pulso fornecida pelo programa será utilizada de forma comparativa com os pulsos interpolados a fim de verificação do erro.

#### ➤ EXPRESSÃO DA INCERTEZA

A expressão da incerteza na turbina será dada pela variabilidade dos pulsos gerados em cada trecho. Dessa forma a incerteza relatada dos pulsos emitidos pela turbina será a própria incerteza da turbina. Considerando um nível de confiança de 99,73% ( $k_p = 3$ ), a incerteza global da turbina será U (Conforme

Equação 16). Além disto, caso o resultado entre a turbina e o provador primário seja igual, isso significa que a turbina não possui erro sistemático e encontra-se devidamente calibrada. Caso contrário, será proposto um novo fator de k para a turbina e um fator de correção MF (Fator de medição) para correção do erro sistemático:

$$MF = \frac{Vb_{ij}}{Vt_{ij}} \quad (29)$$

Onde:

$Vb_{ij}$  - Volume base em determinado trecho

$Vt_{ij}$  - Volume indicado pela turbina em determinado trecho

## 7. TRATAMENTO DE DADOS

Os experimentos realizados no *Ball Prover* mostraram que todas as esferas, com exceção da esfera 2 que se encontra sem preenchimento do fluido de trabalho, percorreram normalmente o provador em ambos os sentidos.

Para a avaliação do *Ball Prover*, a esfera 1, que foi considerada a melhor classificada na caracterização das esferas (Ver Apêndice B e C), foi submetida a testes em diferentes níveis de vazões, a fim de uma avaliação mais profunda.

Para a realização dos testes, alguns procedimentos de pré-operação e durante a operação devem ser verificados (Tabela 5) para auxiliar na validação dos testes e evitar possíveis tendências no sistema.

Tabela 5 - Recomendações para operação do *Ball Prover*

| <b>Causa</b>   | <b>Efeitos</b>  | <b>Recomendações</b>  |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sujeiras na saída do tanque ou entrada na turbina</li> </ul>                      | Diminuição da vazão no provador                           | Desmontar, limpar e reconectar conexões                                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ar na tubulação</li> </ul>  | Dispersão / Diminuição das vazões das vazões              | Apertar conexões, retirar o ar através das válvulas de alívio                 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensores de detecção</li> </ul>   | Não detecção dos sensores                                 | Ajustar frequência dos sensores   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reversão de fluxo incorreta</li> </ul>  | Aceleração da esfera no sistema                           | Aguardar a esfera chegar ao seu ponto final para realizar manobra de reversão |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de termômetros descalibrados</li> </ul>                                       | Erros nos fatores de correção                             | Calibrar termômetros  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de manômetros descalibrados</li> </ul>  | Erros nos fatores de correção                             | Calibrar manômetros   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nível do tanque baixo</li> </ul>  | Cavitação na bomba  | Manter o nível do tanque acima do mínimo recomendado                          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfera preenchida com fluido inflada abaixo do recomendado</li> </ul>             | Vazamentos entre a parede da esfera e da tubulação        | Substituir a esfera por uma outra dentro das especificações técnicas          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfera preenchida com fluido inflada bem acima do recomendado</li> </ul>          | Dificuldade de movimentação da esfera; Desgaste excessivo | Substituir a esfera por uma outra dentro das especificações técnicas          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfera sem preenchimento de fluido de trabalho</li> </ul>                         | Esfera não entra no sistema                               | Substituir a esfera por uma outra dentro das especificações técnicas          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfera preenchida com fluido de trabalho diferente com o fluido medido</li> </ul> | Possibilidade de tendências ocasionada pelo empuxo        | Substituir a esfera por uma outra dentro das especificações técnicas          |

Após verificação dos procedimentos recomendados, o sistema é colocado em funcionamento e são realizadas corridas preliminares com a esfera (mínimo de 3) a fim de estabilizar o sistema. Somente depois destas etapas, os testes são iniciados e começam a serem registrados no banco de dados do programa.



Para análise do comportamento do *Ball Prover* com a esfera 1, vinte ciclos foram realizados (sendo cada ciclo compreendendo uma corrida de ida e outra de volta no provador) em três níveis de vazões (máxima, intermediária e mínima), onde na Tabela 6 possuem as seguintes características de escoamento:

Tabela 6 – Regime de escoamento do fluido no provador

|                      | Vazão [m <sup>3</sup> /s] | Velocidade [m/s]        | Re <sub>d</sub> [adim.] |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Máxima</b>        | 3,30 x 10 <sup>-4</sup>   | 1,50 x 10 <sup>-1</sup> | 9,88 x 10 <sup>3</sup>  |
| <b>Intermediária</b> | 2,28 x 10 <sup>-4</sup>   | 1,04 x 10 <sup>-1</sup> | 6,83 x 10 <sup>3</sup>  |
| <b>Mínima</b>        | 1,34 x 10 <sup>-4</sup>   | 0,61 x 10 <sup>-1</sup> | 4,01 x 10 <sup>3</sup>  |

(D<sub>int</sub> = 53mm, Propriedades do fluido: Água a T=30°C, ρ=996 kg/m<sup>3</sup>, μ=7,99x10<sup>-4</sup> N.s/m<sup>2</sup>)

Além disso, os dados brutos coletados fornecem:

- A temperatura do líquido no provador;
- O tempo de detecção entre os sensores;
- O número de pulsos inteiros entre os sensores;
- O tempo dos pulsos inteiros;
- O número de pulsos processados pelo programa;
- A vazão indicativa da turbina fornecida por uma saída de sinal analógico.

Em uma fase preliminar do tratamento de dados os pulsos inteiros são interpolados conforme Equação (29). Após esta etapa os dados são agrupados por trecho (Conforme designação definida no Apêndice D). Uma análise estatística preliminar então é realizada para cada grupo de amostragens observando a dispersão dos resultados em torno dos limites superiores e inferiores do desvio padrão<sup>8</sup> ( $\sigma$ ) da população em cada trecho. O comportamento das amostras é similar para cada trecho em ambos os sentidos, apresentando poucos pontos espúrios. Alguns resultados, antes da aplicação dos critérios de rejeição, são mostrados a seguir (Figuras 31 a 36) numa comparação por trecho em sentidos opostos para cada nível de vazão.

<sup>8</sup> Desvio padrão representado por  $\sigma$  ou por “sigma” neste trabalho.

o Vazão Máxima:

Neste nível de vazão observa-se um desvio padrão muito pequeno no trecho de ida (Figura 30) e no sentido de volta dois pontos espúrios fazem o desvio padrão aumentar (Figura 31).

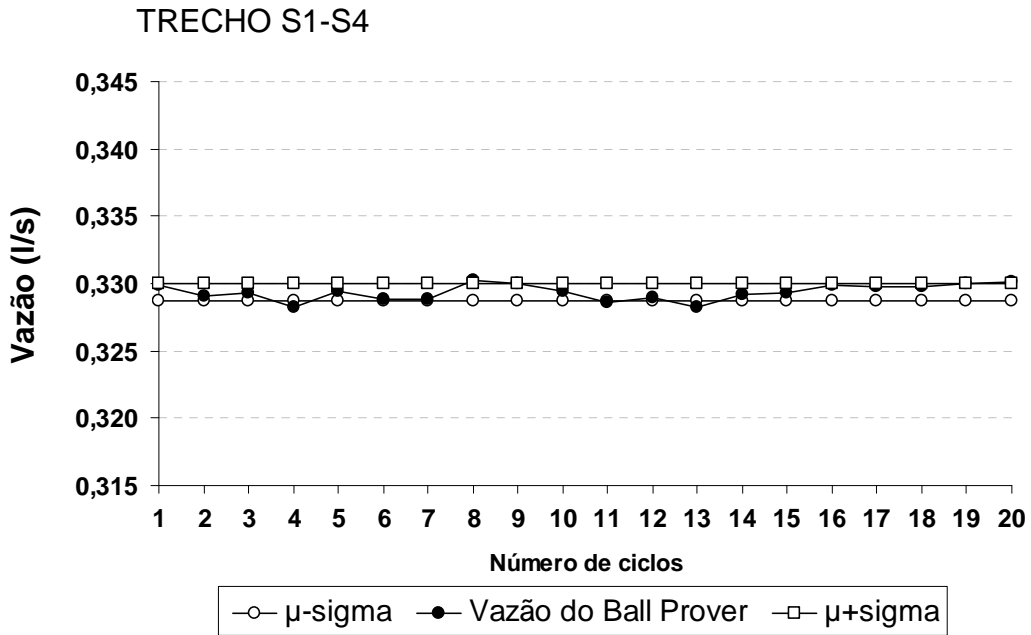


Figura 30 - Dados experimentais no trecho de ida - Vazão Máxima

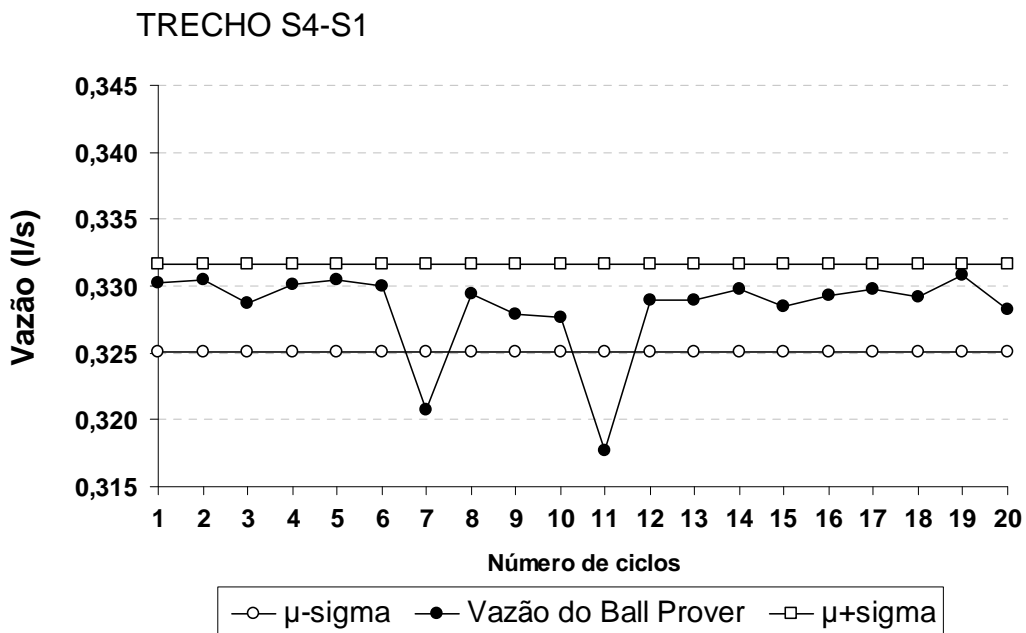


Figura 31 - Dados experimentais no trecho de volta - Vazão Máxima

○ Vazão Intermediária:

No nível de vazão intermediária nota-se uma forte tendência dos resultados com uma mudança evidente no nível de vazão a partir do 12º ciclo (Figura 32 e 33).

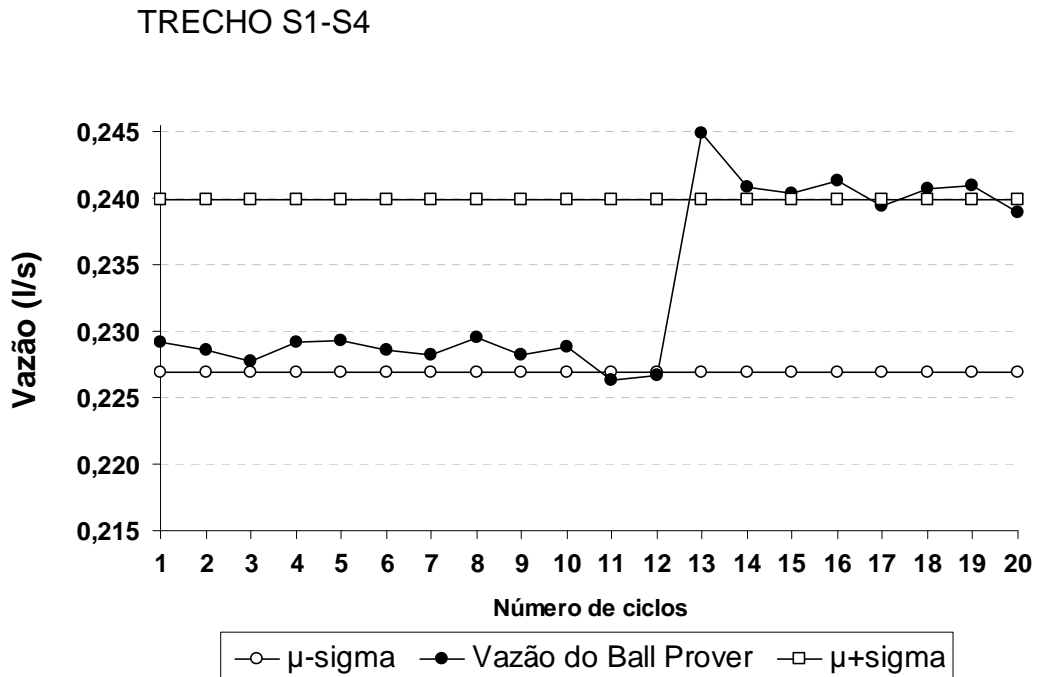


Figura 32 - Dados experimentais no trecho de ida - Vazão Intermediária

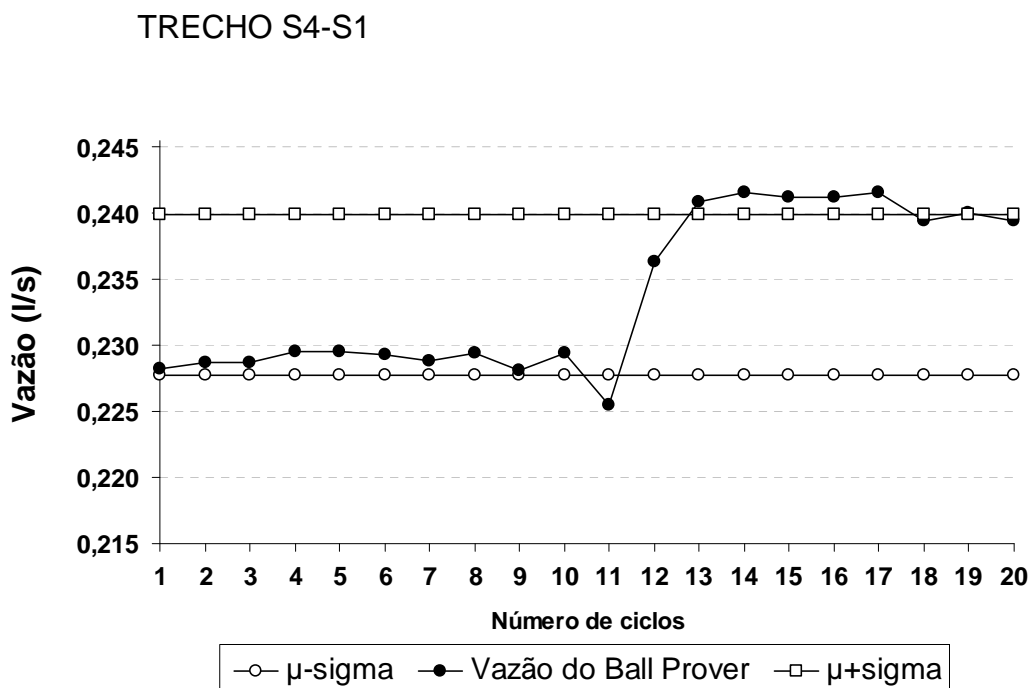


Figura 33 - Dados experimentais no trecho de volta - Vazão Intermediária

○ Vazão Mínima:

Observa-se neste caso que o nível de vazão vai decaindo com o número de ciclos (Figura 34 e 35).

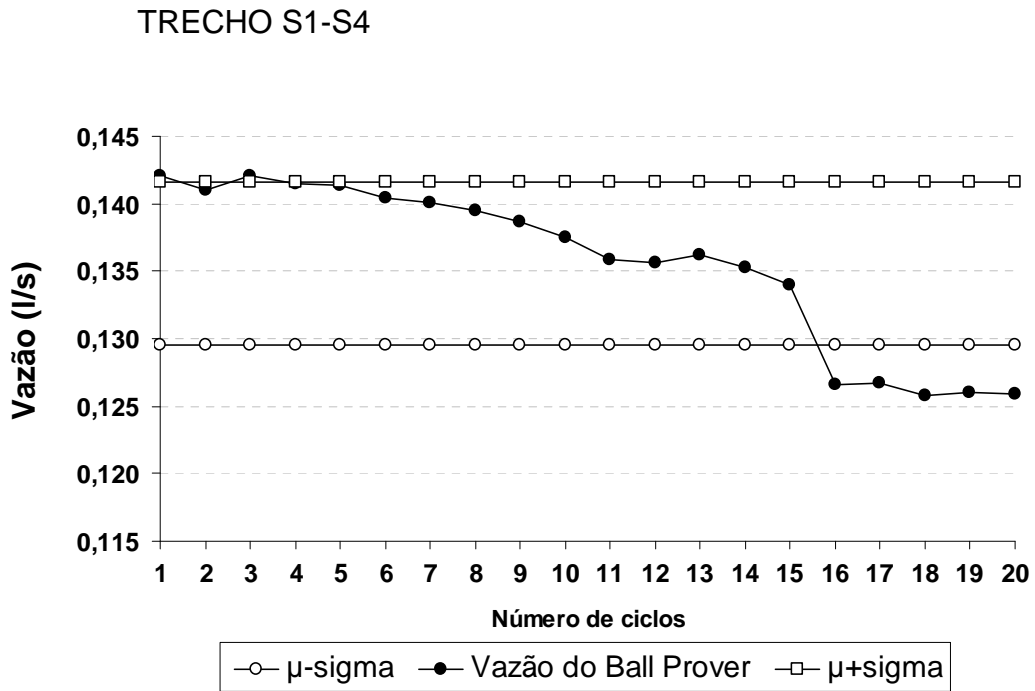


Figura 34 - Dados experimentais trecho de ida - Vazão Mínima

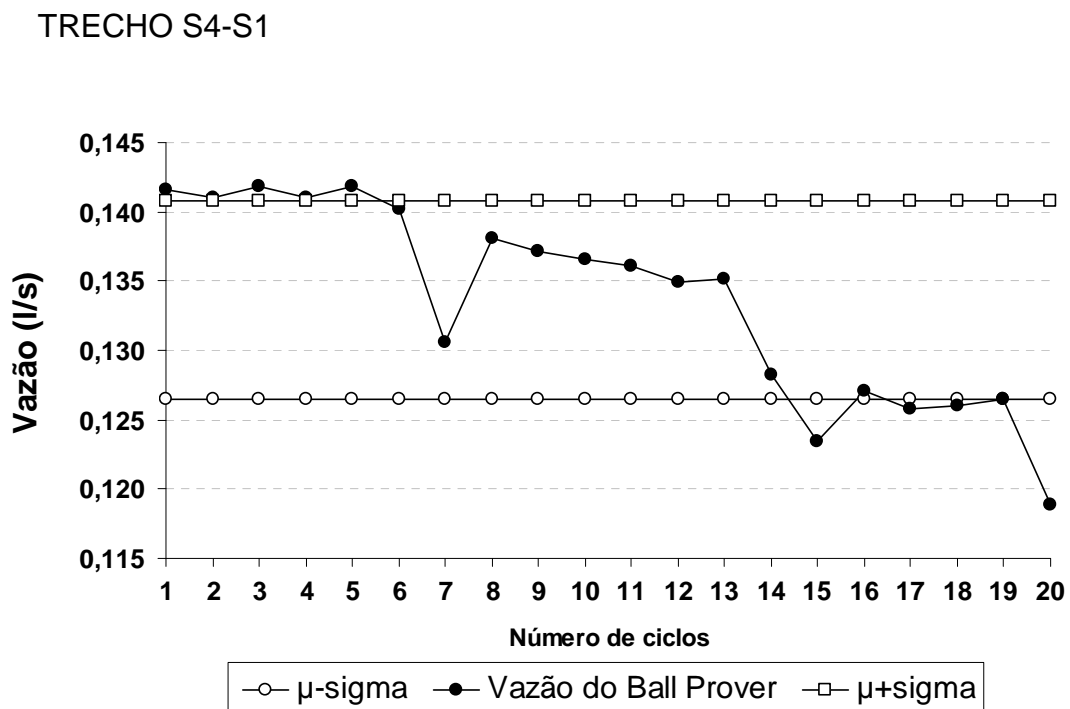


Figura 35 - Dados experimentais trecho de volta - Vazão Mínima

Como pode ser observado para cada nível de vazão existem particularidades pertinentes em cada teste. O fato de diferentes testes em diferentes vazões não representar em primeira instância uma forte tendência não significa que os resultados não sejam válidos. Estas divergências ocorrem em função de erros grosseiros na operação, falhas momentâneas do instrumento e medição, medições fora dos limites de operação ou outros motivos ainda. Dessa maneira, é necessário que se verifique a existência de valores que possam ser considerados dispersos, ou seja, que não pertençam a uma mesma população. Este critério de análise dos dados é conhecido como critério de rejeição.

Neste trabalho, o critério de rejeição adotado será semelhante aos critérios de rejeição de Chauvenet (Mendes e Rosário, 2005), que de acordo com uma determinada população o desvio padrão ( $\sigma$ ) é multiplicado por uma constante que define o módulo deste desvio. Então caso a variável medida menos a média da amostra for maior que o módulo deste desvio a amostra será rejeitada. Na mesma linha de raciocínio o critério de rejeição adotado no tratamento dos dados será semelhante ao critério de Chauvenet, porém não será considerado nenhuma constante para definir o módulo do desvio sendo este o próprio desvio padrão ( $\sigma$ ) com uma faixa de tolerância de 0,5%.

Desta maneira, conforme pode ser verificado no Apêndice E, os dados destacados em cinza em cada tabela foram rejeitados na análise estatística.

Excepcionalmente na análise dos dados da população no nível de vazão intermediária (Figuras 32 e 33), um critério preliminar de exclusão foi aplicado, antes do critério de rejeição convencional, pois pela forte tendência de convergência dos dados fica evidente que houve uma perturbação no sistema a partir do décimo segundo ciclo que mudou o patamar de vazão, mas não afetou a tendência dos dados. Por estes motivos os dados a partir do décimo segundo ciclo para o nível de vazão intermediária foram descartados preliminarmente da população.

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Os resultados apresentados pelos dados experimentais no “*Ball Prover*” mostraram uma forte tendência de estabilidade (Figura 36).

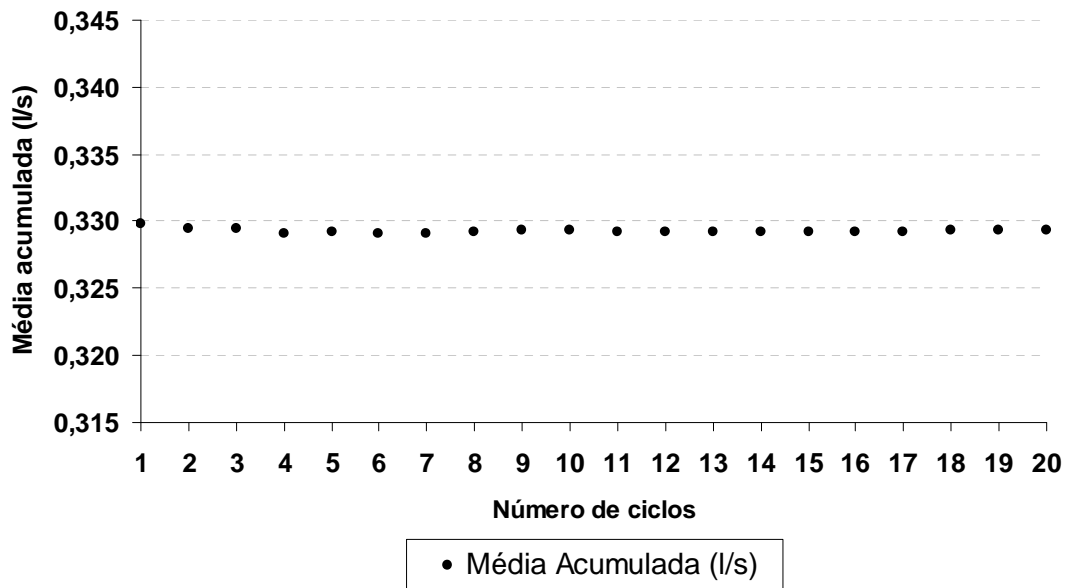


Figura 36 - Média acumulada do trecho S1-S4 para o nível de vazão máxima

Foram analisadas as vazões em ambos os sentidos nos trecho total do provador (mensurando  $y$  de referência) e em seus respectivos sub-trechos (Figura 37) para os níveis de vazão.

Em relação à incerteza relativa espera-se obter uma menor incerteza quanto maior for o comprimento da tubulação no provador (REDILLA, 1977), portanto espera-se uma menor incerteza no trecho total do provador.

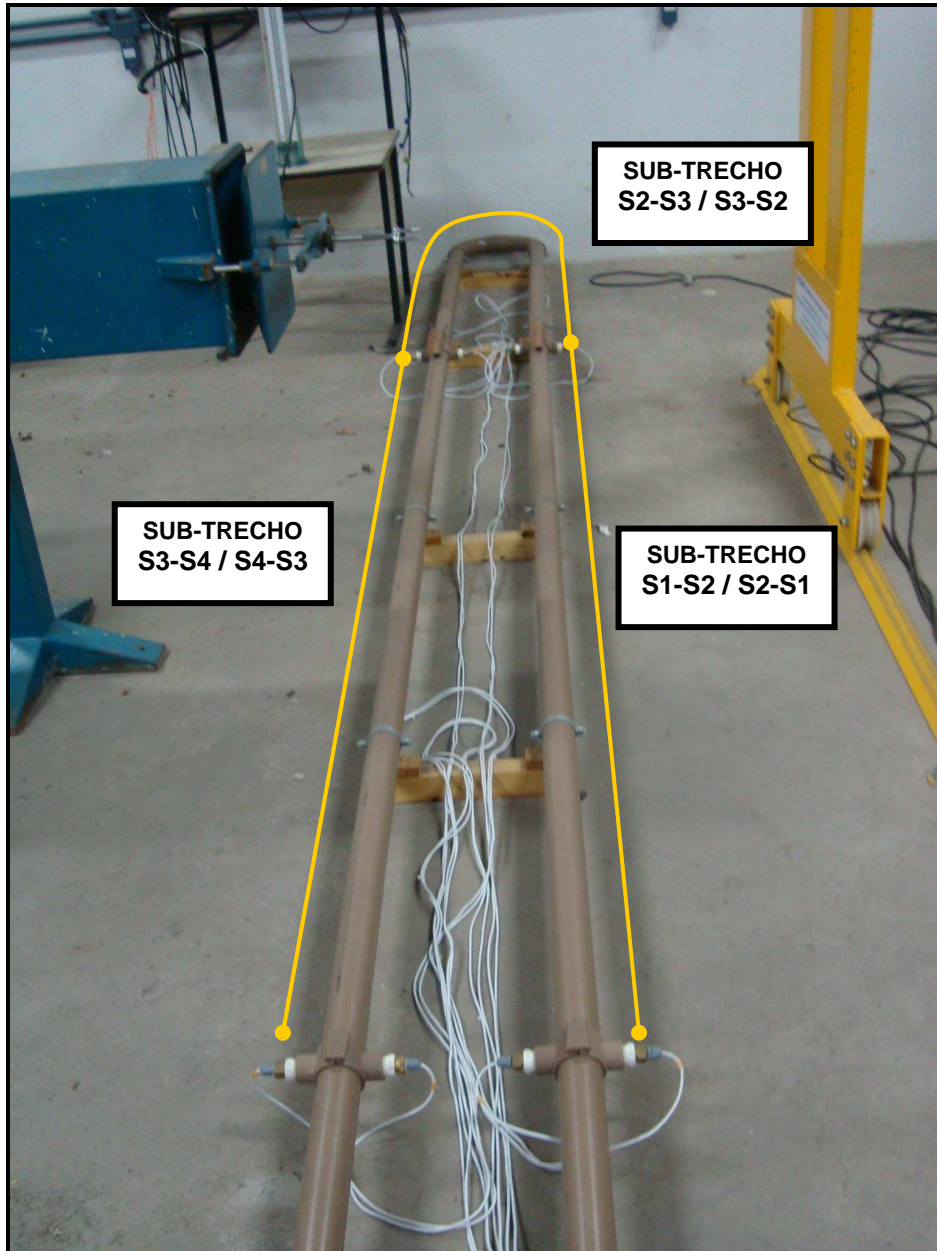


Figura 37 -Sub-trechos do provador de 3 metros de comprimento

➤ RESULTADOS PARA DIFERENTES NÍVEIS DE VAZÕES

○ Vazão Máxima:

Levando em consideração as leituras anotadas nas tabelas de E.1 a E.8 (Apêndice E) cujos testes foram realizados operando na vazão máxima do sistema (0,329 l/s), pode-se através de um resumo na Tabela 7 comparar os resultados para cada trecho do provador:

Tabela 7 - Resumo dos dados experimentais - Vazão máxima

| TRECHO                 | Mensurando<br>(y) | Incerteza<br>U(%) | Erro Sistemático<br>(%)<br>Contagem de pulsos | Fatores de Correção |               |                 | Relação:<br>$y_i / y_j$ (%) |
|------------------------|-------------------|-------------------|---|---------------------|---------------|-----------------|-----------------------------|
|                        |                   |                   |   | Fator-k             | Fator-k       | MF              |                             |
|                        |                   |                   |   | DOUBLE-TIMING       | PROCESSADO    |                 |                             |
| 1-2                    | 0,329             | 0,00              | 0,08%   | 500,13              | 501,55        | 1,000806        | -0,109%                     |
| 2-1                    | 0,329             | 0,00              | 0,46%   | 498,18              | 499,64        | 1,004639        |                             |
| Média / U <sub>c</sub> | <b>0,329</b>      | <b>0,0048</b>     | <b>0,27%</b>                                  | <b>499,15</b>       | <b>500,59</b> | <b>1,002722</b> |                             |
| 2-3                    | 0,330             | 0,00              | 0,43%   | 498,37              | 499,82        | 1,004261        | -0,004%                     |
| 3-2                    | 0,330             | 0,00              | 0,71%   | 496,95              | 498,40        | 1,007118        |                             |
| Média / U <sub>c</sub> | <b>0,330</b>      | <b>0,0049</b>     | <b>0,57%</b>                                  | <b>497,66</b>       | <b>499,11</b> | <b>1,005689</b> |                             |
| 3-4                    | 0,330             | 0,00              | 0,72%   | 496,92              | 498,36        | 1,007205        | 0,191%                      |
| 4-3                    | 0,330             | 0,00              | 0,86%   | 496,21              | 497,63        | 1,008637        |                             |
| Média / U <sub>c</sub> | <b>0,330</b>      | <b>0,0053</b>     | <b>0,79%</b>                                  | <b>496,56</b>       | <b>497,99</b> | <b>1,007921</b> |                             |
| 1-4                    | 0,329             | 0,00              | 0,41%   | 498,46              | 499,90        | 1,004105        | -0,004%                     |
| 4-1                    | 0,329             | 0,00              | 0,68%   | 497,11              | 498,55        | 1,006793        |                             |
| Média / U <sub>c</sub> | <b>0,329</b>      | <b>0,0045</b>     | <b>0,54%</b>                                  | <b>497,79</b>       | <b>499,23</b> | <b>1,005449</b> |                             |

Conforme pode ser observado na Tabela 7, o mensurando  $y$  para determinado trecho em um sentido é o mesmo para o mesmo trecho no sentido inverso, trecho 1-2/2-1 (0,329), trecho 2-3/3-2 (0,330), trecho 3-4/4-3 (0,329) e trecho 1-4/4-1 (0,329), respeitado o número de algarismos significativos (Ribeiro, 2010).

Sob as mesmas considerações de Ribeiro (2010) a incerteza relativa expandida é zero, para os trechos 1-2/2-1, 2-3/3-2 e o trecho total 1-4/4-1, o que significa que a estimativa do valor verdadeiro do mensurando  $y$  é sua própria esperança. No trecho 2-3/3-2 a incerteza expandida é 0,01%, dentro do recomendado pela norma (0,02%). Excepcionalmente, para verificar a dimensão da incerteza em cada trecho, a incerteza expandida combinada em ambos sentidos é expressa com mais algarismos significativos na Tabela 7. Dessa forma, é possível constatar, conforme REDILLA que, a menor incerteza está no trecho de maior comprimento, no caso o trecho [S1-S4 / S4-S1]. A maior incerteza, por sua vez, é constatada no sub-trecho [S3-S4 / S4-S3].

A relação  $y_i / y_j$ , no entanto, revela um erro que, apesar de ser desprezível em relação à grandeza total, existe e tem comportamento crescente na seguinte ordem:

$$[1] \text{ Trecho: } |S1-S4/S4-S1| = 0,004\%$$

$$[2] \text{ Trecho: } |S2-S3/S3-S2| = 0,004\%$$

$$[3] \text{ Trecho: } |S1-S2/S2-S1| = 0,109\%$$

$$[4] \text{ Trecho: } |S3-S4/S4-S3| = 0,191\%$$



Este resultado indica que não há tendência significativa nos trechos do provador quanto ao sentido de vazão, porém observa-se que nos sub-trechos extremos (S1-S2/S2-S1 e S3-S4/S4-S3) a diferença é mais acentuada e indica velocidades maiores quando em uma determinada corrida, o trecho medido é o último do percurso e menores quando é o primeiro. Isso explica uma relação negativa para o sub-trecho S1-S2/S2-S1 e positiva para o sub-trecho S3-S4/S4-S3 (Tabela 7). Esta aceleração no percurso de uma corrida pode ser melhor visualizada, quando desconsiderado os Algarismos significativos, comparando o comportamento das vazões na ida e na volta (Figura 38).

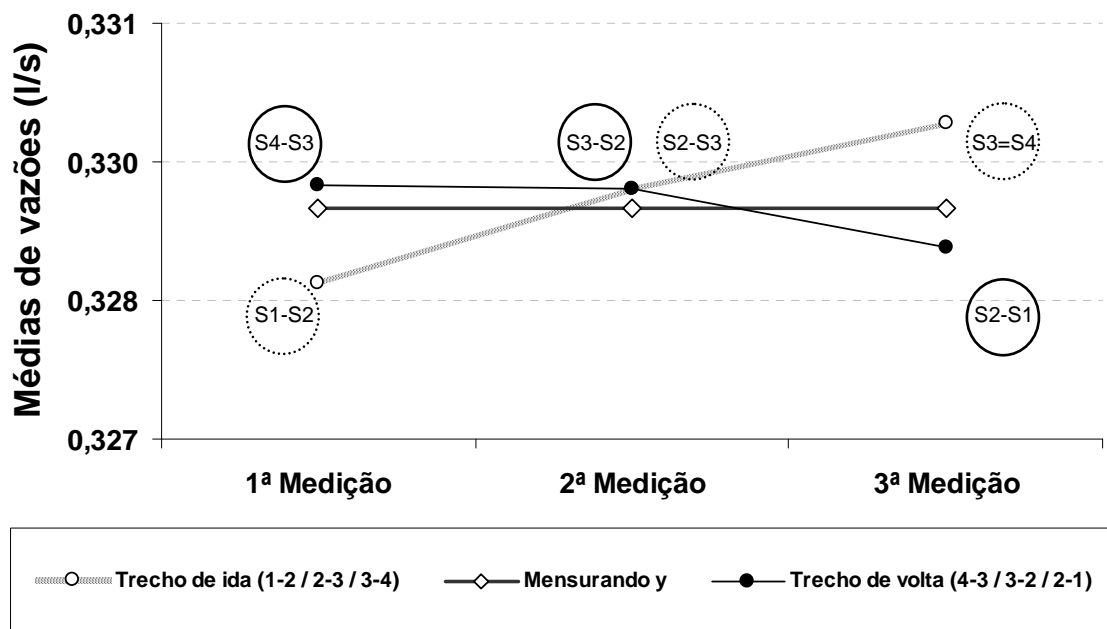


Figura 38 - Comportamento da vazão no percurso de ida e de volta

Observa-se que, conforme já verificado, que a vazão do primeiro ponto medido na ida, sub-trecho [S1-S2] é menor que a do último trecho medido na volta sub-trecho [S2-S1].

Do mesmo modo, a vazão do primeiro trecho medido na volta [sub-trecho S4-S3] é menor que o último trecho na ida [sub-trecho S3-S4]. Conclui-se que diante desta observação que a esfera tem maior velocidade no último trecho medido do que no primeiro em qualquer sentido (ida e volta)

Outra observação (Figura 38) é que no trecho de ida ocorre uma aceleração à medida que a esfera avança e no trecho de volta a esfera tende a permanecer

em velocidade constante vindo a desacelerar no último trecho. Uma das hipóteses para esse comportamento pode ser devido à existência de uma irregularidade no diâmetro interno da tubulação, que mesmo não sendo significativa, contribui para um erro, indicando que no sub-trecho [S1-S2 / S2-S1] o diâmetro interno seja mais estreito que no sub-trecho [S3-S4 / S4-S3].

O resultado experimental da avaliação do *Ball Prover* com o sistema operando na vazão máxima tem sua menor incerteza no maior trecho (Valor mais confiável do mensurando  $y$ ), e é dado pelo trecho [S1-S4 / S4-S1]. Na Tabela 7, o erro em relação à leitura da turbina, no trecho [S1-S4 / S4-S1], é de 0,54%. O fator-k proposto, dado pelo fator processado do módulo eletrônico do *Ball Prover*, é de  $k=499,23$  e possui uma diferença de 0,29% em relação aos dados interpolados.

O fator de medição proposto para correção do erro sistemático da turbina em relação ao *Ball Prover* é de 1,005449 (0,54%). E ainda pode-se relatar que o trecho com curva [S2-S3 / S3-S2] é o que mais se aproxima do valor verdadeiro do mensurando.

o Vazão Intermediária:

Observando as tabelas de E.9 a E.16 (Apêndice E) cujos testes foram realizados operando na vazão intermediária do sistema (0,228 l/s), pode-se através de um resumo na Tabela 7, comparar os resultados para cada trecho do provador nessa vazão.

Tabela 8 - Resumo dos dados experimentais - Vazão intermediária

| TRECHO        | Mensurando<br>(y) | Incerteza<br>U(%) | Erro Sistemático<br>(%)<br>Contagem de pulsos | Fatores de Correção      |                       |                 | Relação:<br>$y_{ij} / y_j$ (%) |
|---------------|-------------------|-------------------|---|--------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|
|               |                   |                   |   | Fator-k<br>DOUBLE-TIMING | Fator-k<br>PROCESSADO | MF              |                                |
| 1-2           | 0,227             | 0,01              | -0,23%  | 501,84                   | 503,37                | 0,997651        | -0,438%                        |
| 2-1           | 0,228             | 0,00              | -0,27%  | 501,99                   | 503,55                | 0,997336        |                                |
| Média / $U_c$ | <b>0,228</b>      | <b>0,0073</b>     | <b>-0,003</b>                                 | <b>501,916</b>           | <b>503,458</b>        | <b>0,997</b>    |                                |
| 2-3           | 0,229             | 0,00              | 0,16%   | 499,82                   | 501,39                | 1,001585        | -0,065%                        |
| 3-2           | 0,229             | 0,01              | 0,06%   | 500,32                   | 501,89                | 1,000625        |                                |
| Média / $U_c$ | <b>0,229</b>      | <b>0,0082</b>     | <b>0,11%</b>                                  | <b>500,07</b>            | <b>501,64</b>         | <b>1,001105</b> |                                |
| 3-4           | 0,229             | 0,01              | 0,41%   | 498,57                   | 500,14                | 1,004083        | 0,221%                         |
| 4-3           | 0,229             | 0,01              | 0,31%   | 499,12                   | 500,64                | 1,003065        |                                |
| Média / $U_c$ | <b>0,229</b>      | <b>0,0092</b>     | <b>0,36%</b>                                  | <b>498,85</b>            | <b>500,39</b>         | <b>1,003574</b> |                                |
| 1-4           | 0,228             | 0,00              | 0,11%   | 500,08                   | 501,63                | 1,001098        | -0,139%                        |
| 4-1           | 0,229             | 0,01              | 0,04%   | 500,45                   | 502,00                | 1,000387        |                                |
| Média / $U_c$ | <b>0,228</b>      | <b>0,0072</b>     | <b>0,07%</b>                                  | <b>500,26</b>            | <b>501,81</b>         | <b>1,000742</b> |                                |

Diferente do observado para o nível de vazão máxima (Tabela 7), o mensurando  $y$  para o nível de vazão intermediária (Tabela 8) apresenta pequenas variações nas médias das vazões em determinados trechos (trecho [S1-S2 / S2-S1] e trecho [S1-S4 / S4-S1]), observado o número de Algarismos Significativos, para um sentido da vazão no provador comparado com o sentido inverso.

Este resultado, por sua vez, também afeta a expressão da incerteza expandida que antes tido como nula agora é expressa em 0,01% (Tabela 8) para o provador. A menor incerteza, desconsiderado os Algarismos Significativos, é do trecho [S1-S4 / S4-S1] e a maior do trecho [S3-S4 / S4-S3].

A relação  $y_i / y_j$ , apresenta uma diferença numérica relativa em relação ao nível de vazão máxima e tem comportamento crescente na seguinte ordem:

- [1] Trecho:  $|S2-S3/S3-S2| = 0,065\%$       [2] Trecho:  $|S1-S4/S4-S1| = 0,139\%$   
 [3] Trecho:  $|S3-S4/S4-S3| = 0,221\%$       [4] Trecho:  $|S1-S2/S2-S1| = 0,438\%$

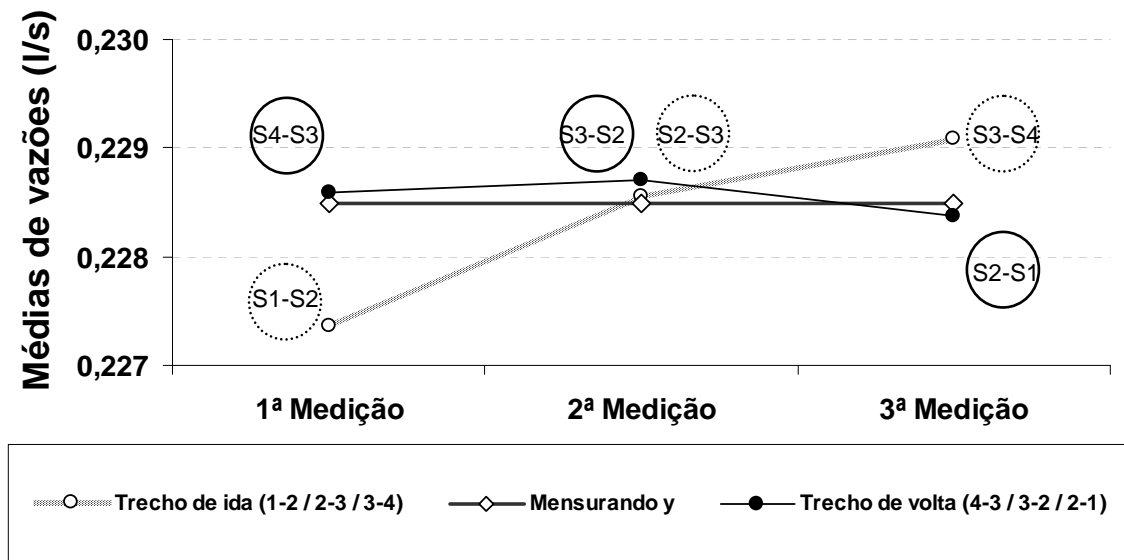


Figura 39 - Comportamento da vazão no percurso de ida e de volta - Vazão Intermediária

Observa-se que devido à diminuição da vazão de operação (Figura 39), a pressão de fluxo exercida sobre a esfera também diminui e com isso a dificuldade da esfera de passar pelo trecho [S1-S2] fica mais evidente (trecho mais estreito) em relação aos demais. Este resultado provoca um aumento da diferença entre a relação aos mensurandos no trecho [S1-S2 / S2-S1] e

conseqüentemente afeta o trecho total do provador. Observa-se também que o trecho que possui uma curva é o que mais se aproxima do valor do mensurando  $y$  e também tem a menor variação quando se inverte o fluxo no provador.

Em comparação com a geração de pulsos da turbina, os resultados da Tabela 8 mostram que, o erro sistemático é menor (0,07%) que o erro sistemático operado na vazão máxima (0,54%). O fator-k proposto na vazão intermediária é de 501,81 e o fator de medição para correção do erro da turbina de 1,000742.

O fato da vazão da turbina ter se aproximado da vazão da estimativa do mensurando  $y$  não significa que estes dados sejam mais confiáveis que os resultados operados na vazão máxima. Tal afirmação não pode ser feita, pois conforme verificado, algumas perturbações no sistema provocam aumento da incerteza no *Ball Prover*. Além disso, o aumento da diferença na relação  $y_i / y_j$  (Tabela 8) é resultado do afastamento entre as leituras de vazão na ida e na volta e indicam que há um aumento na tendência quanto ao sentido da vazão.

o Vazão Mínima:

Para o último teste, realizado sob as condições de vazão mínima do sistema, conforme pode ser observado nas tabelas E.17 a E.24 (Apêndice E) e em resumo pela tabela 9, observa-se uma grande diferença entre as leituras de um sentido de fluxo e o outro, a relação  $y_i / y_j$  passa a ser de 3,79 % para a pior situação e a expressão da incerteza atinge 0,04%.

Tabela 9 - Resumo dos dados experimentais - Vazão mínima

| TRECHO                 | Mensurando<br>(y) | Incerteza<br>U(%) | Erro Sistemático<br>(%)<br>Contagem de pulsos | Fatores de Correção      |                       |                 | Relação:<br>$y_i / y_j$ (%) |
|------------------------|-------------------|-------------------|---|--------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|
|                        |                   |                   |   | Fator-k<br>DOUBLE-TIMING | Fator-k<br>PROCESSADO | MF              |                             |
| 1-2                    | 0,138             | 0,02              | -4,65%  | 525,08                   | 526,68                | 0,953521        | 2,448%                      |
| 2-1                    | 0,135             | 0,03              | -5,42%  | 529,51                   | 531,16                | 0,945845        |                             |
| Média / U <sub>c</sub> | <b>0,137</b>      | <b>0,0362</b>     | <b>-5,03%</b>                                 | <b>527,295</b>           | <b>528,919</b>        | <b>0,950</b>    |                             |
| 2-3                    | 0,139             | 0,02              | -4,32%  | 523,23                   | 524,87                | 0,956781        | 3,057%                      |
| 3-2                    | 0,135             | 0,04              | -5,32%  | 528,99                   | 530,65                | 0,946798        |                             |
| Média / U <sub>c</sub> | <b>0,137</b>      | <b>0,0391</b>     | <b>-4,82%</b>                                 | <b>526,11</b>            | <b>527,76</b>         | <b>0,951789</b> |                             |
| 3-4                    | 0,139             | 0,02              | -4,15%  | 522,29                   | 523,93                | 0,958513        | 3,793%                      |
| 4-3                    | 0,134             | 0,03              | -5,48%  | 529,93                   | 531,55                | 0,945216        |                             |
| Média / U <sub>c</sub> | <b>0,136</b>      | <b>0,0363</b>     | <b>-4,81%</b>                                 | <b>526,11</b>            | <b>527,74</b>         | <b>0,951865</b> |                             |
| 1-4                    | 0,139             | 0,02              | -4,37%  | 523,53                   | 525,16                | 0,956265        | 2,766%                      |
| 4-1                    | 0,135             | 0,03              | -5,25%  | 528,59                   | 530,23                | 0,947505        |                             |
| Média / U <sub>c</sub> | <b>0,137</b>      | <b>0,0360</b>     | <b>-4,81%</b>                                 | <b>526,06</b>            | <b>527,70</b>         | <b>0,951885</b> |                             |

Além disto, a comparação dos resultados do *Ball Prover* com a turbina se torna mais duvidosa, pois a perda de pressão de fluxo sobre a esfera faz com que a velocidade da esfera diminua e se aproxime cada vez mais da velocidade mínima necessária para colocar a esfera em movimento (Apêndice C), o que supostamente leva a esfera à não ter um movimento contínuo dentro da tubulação, principalmente nas regiões de diâmetro mais estreitas. Contudo a esfera continua aumentando sua velocidade de rolamento entre a primeira leitura e a última leitura (Figura 40).

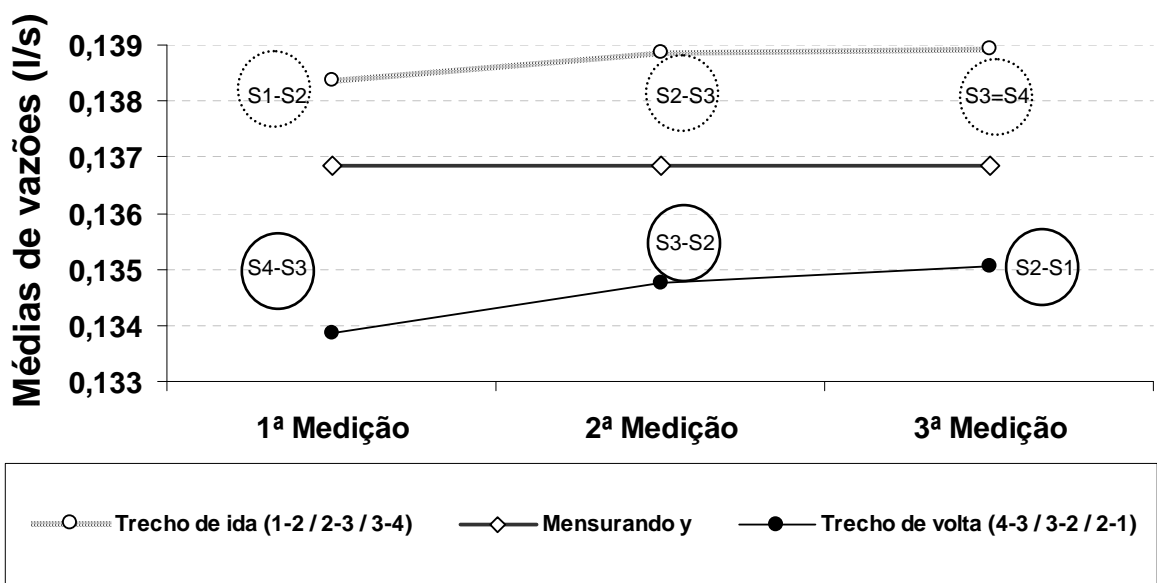


Figura 40 - Comportamento da vazão no percurso de ida e de volta - Vazão Mínima

Da mesma forma, para análise da vazão da turbina, conforme os limites de operação fornecidos pelo fabricante (Tabela 4) os resultados desta também são duvidosos, apontando erros grosseiros e um fator-K muito distante daquele indicado pelo fabricante.

Concluiu-se que para este nível de vazão nem os dados do *Ball Prover* nem os dados da turbina são bons indicadores de vazão, indicando uma alta incerteza dos dados e um erro sistemático maior, porém não quantificável devido a uma não convergência para o valor verdadeiro do mensurando Y.

Deve-se observar também que esse nível de vazão está abaixo do mínimo recomendado pelo fabricante para o modelo TVT-L Ø3/4".

➤ RESULTADOS PARA 3 CICLOS CONSECUTIVOS

A calibração do provador, seguindo as prescrições das normas ISO 7278-2, deve estar em torno de 0,02% para três ciclos sucessivos. Deste modo os resultados para o nível de vazão máxima e para o nível de vazão intermediária, que apresentaram um nível de incerteza dentro dos padrões recomendados, foram avaliados, considerando apenas os três primeiros ciclos de cada teste (Tabelas 10 e 11).

Tabela 10 – Resultado da calibração do provador em 3 ciclos consecutivos - Vazão Máxima

| TRECHO<br>ENTRE OS<br>SENSORES | Mensurando<br>(y) | Incerteza<br>U(%) | Erro Sistemático<br>(%)<br>Contagem de pulsos | Fatores de correção   |          |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|---|-----------------------|----------|
|                                |                   |                   |   | Fator-k<br>PROCESSADO | MF       |
| 1º e 4º                        | 0,330             | 0,00              | -1,16%  | 507,85                | 0,988357 |
| 1º e 2º                        | 0,329             | 0,00              | -1,36%  | 508,87                | 0,986379 |
| 2º e 3º                        | 0,330             | 0,00              | -1,14%  | 507,75                | 0,988554 |
| 3º e 4º                        | 0,330             | 0,00              | -0,99%  | 506,94                | 0,990146 |

Tabela 11 - Resultado da calibração do provador em 3 ciclos consecutivos - Vazão Intermediária

| TRECHO<br>ENTRE OS<br>SENSORES | Mensurando<br>(y) | Incerteza<br>U(%) | Erro Sistemático<br>(%)<br>Contagem de pulsos | Fatores de correção   |          |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|---|-----------------------|----------|
|                                |                   |                   |   | Fator-k<br>PROCESSADO | MF       |
| 1º e 4º                        | 0,228             | 0,00              | 0,61%   | 499,16                | 1,006124 |
| 1º e 2º                        | 0,228             | 0,00              | 0,29%   | 500,77                | 1,002943 |
| 2º e 3º                        | 0,229             | 0,01              | 0,66%   | 498,95                | 1,006582 |
| 3º e 4º                        | 0,229             | 0,01              | 0,89%   | 497,77                | 1,008877 |

Os resultados mostram que para ambos níveis de vazões a incerteza relativa expandida se manteve dentro dos padrões recomendados permanecendo nula para a vazão máxima e em torno de 0,01% para o nível de vazão intermediária.

O resultado do mensurando  $y$  para o nível de vazão máxima apresentou uma diferença de 0,30% maior que o encontrado na tabela 7 (0,329 l/s). O fator  $k$  e o fator de medição, por sua vez, apresentou uma diferença de 1,73%.

Comparando os resultados para o nível de vazão intermediária, o mensurando  $y$  se manteve igual e a diferença percentual entre o fator- $k$  e o fator

de medição em relação aos resultados encontrados na tabela 8 gira em torno de 0,22%.

A relação percentual encontrada entre os resultados do fator-k, para três ciclos consecutivos, entre o resultado mais confiável (maior trecho) e o resultado mais extremo tanto para o nível de vazão máxima quanto para o nível de vazão intermediária é de 0,20% e 0,32% respectivamente.

Tais resultados mostram que para ambos os níveis de vazão o resultado do *Ball Prover* é confiável com pequenos erros desprezíveis pertinentes a medição.

Outra observação entre os resultados do *Ball Prover* e da turbina pode ser melhor visualizada através da Figura 41, onde são correlacionados os resultados da estimativa de mensurando  $y$  com os resultados indicativos da turbina. Tal correlação mostra uma pequena dispersão das vazões registradas pela turbina, sendo os valores mais dispersos no nível de vazão intermediária.

Para o nível de vazão mínima, o resultado da estimativa de vazão  $y$  do *Ball Prover* encontra-se abaixo das leituras obtidas com a turbina, o que reforça hipótese da má qualidade dos resultados do *Ball Prover* para operação com as vazões mais baixas devido a perda do movimento contínuo da esfera.

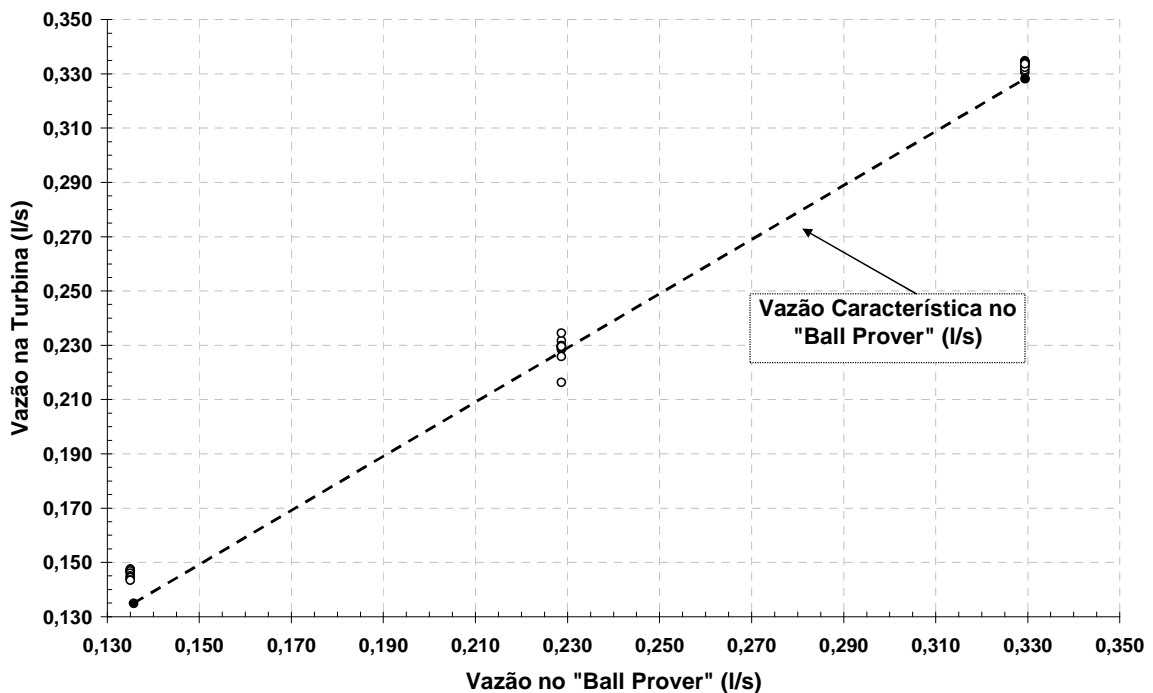


Figura 41 – Correlação de vazão entre os resultados da turbina e o Ball Prover

Quanto aos objetivos do trabalho podemos então concluir:

O número de ciclos proposto pela norma para calibração de um medidor através de um *ball prover* primário do tipo bidirecional atende para a dispersão da incerteza expandida recomendada, em torno de 0,02%, e a estimativa do mensurando  $y$  fornecida pelo mesmo mostra um erro, quando comparado com o medidor turbina, calibrado pelo fabricante, maior quando operado no nível de vazão máxima (1,16%) e menor para o nível de vazão intermediária (0,61%).

Em relação aos resultados obtidos nos trechos menores, o sub-trecho compreendido entre o 2º e 3º sensor (S2-S3) apresentou resultados mais próximos à estimativa de mensurando  $y$  (S1-S4), o que indica que a curva existente neste trecho não influi nos resultados do *ball prover*. Observando os resultados para 3 ciclos consecutivos (Tabelas 10 e 11) com os resultados de maior amostragem (Tabelas 7 e 8), os resultados do *ball prover* mostraram a mesma estimativa de mensurando  $y$  e a incerteza dentro dos padrões recomendados para todos os trechos, o que indica que os trechos menores são aceitáveis para uma calibração de 3 ciclos.

Quando comparado com a turbina o erro de leitura entre os dois medidores tende ser maior para a vazão máxima, variando de 0,27% a 0,79% na maior amostragem e entre 0,99% a 1,36% para uma amostragem de 3 ciclos. Para a vazão intermediária esta variação fica em torno de 0,003% a 0,36% na maior amostragem e de 0,29% a 0,89% para 3 ciclos. Fica claro que para a vazão intermediária a leitura da turbina fica mais confiável devido ao aumento do número de pulsos gerados. Na comparação do erro da turbina do trecho total com o erro dos sub-trechos a variação gira em torno de 0,30%.

Quanto aos resultados de tendência do *ball prover* em relação ao sentido de fluxo no provador, conforme já discutido neste capítulo, a maior variação fica em torno de 0,44% para o sub-trecho S1-S2 na vazão intermediária (Resultado considerado válido) e ainda nota-se que a medida que a vazão vai aumentando esta tendência tende a diminuir.

Quanto ao nível de operação de vazão no *ball prover*, os resultados para os níveis de vazões máxima e intermediária se mostraram satisfatórios. Para a vazão mínima a incerteza do provador não atende o recomendado pela norma.



Quanto ao fator-k proposto pelo fabricante, para determinação do volume indicado pela turbina, o resultado deste se mostrou satisfatório com um erro em torno de 0,30%, conforme variação prevista pelo fabricante, com exceção ao resultado de calibração com 3 ciclos consecutivos para vazão máxima que chega a atingir uma variação de 1,45%, fato provável devido a pequena quantidade de pulsos gerados pela turbina.

Quanto à análise dimensional da esfera, conforme estudo dos Apêndices B e C, a esfera deve ser preenchida com fluido de trabalho e uma variação mínima na sua circularidade. Para um melhor entendimento sobre a interferência mínima que ela deve ter em relação ao diâmetro interno da tubulação, recomenda-se para trabalhos futuros um estudo de correlação entre esferas com diferentes níveis de interferências.

Em relação aos métodos de interpolação o método processado apresenta um erro em torno de 0,30% em relação ao método *double-timming*. Neste trabalho foi adotado que o método processado tem maior confiabilidade que o método *double-timming*, seguindo orientações do fabricante.

Como trabalhos futuros que complementam esta linha de estudo, podem-se citar:

Estudos sobre correlações dimensionais entre esferas com diferentes níveis de expansões, conforme já mencionado.

Estudos de correlação entre os provadores primários, com a utilização de um medidor tanque como referência, através do método gravimétrico.

Avaliação quanto ao tamanho dos trechos de pré-operação.

Avaliação do sistema quanto à inserção de mais acidentes de linha tanto na horizontal quanto na vertical.

Avaliação de medições para diferentes fluidos com diferentes densidades.

Avaliações de medições através de métodos de detecção magnética, utilizando esferas apropriadas, para detecção de fluidos não incolores.

Avaliar o comportamento do provador para diferentes diâmetros e comprimentos para o nível de vazão que se pretende operar.

Avaliação de medições para fluxos multifásicos (gás + óleo).

## 9. REFERÊNCIAS

ABNT, INMETRO. **Guia para a expressão da incerteza de medição**. 3 ed. Rio de Janeiro. 2003

ANDRADE, Paulo C.N. **Considerações sobre incerteza na medição de óleo e gás**. Revista Analytica nº23. 2006

ANP, INMETRO. **Portaria conjunta nº 1**, de 19/06/2000 - DOU 20/06/2000

ANSI/ASME. **Measurement uncertainty for fluid flow in closed conduits**. USA.1983

API, Manual of Petroleum Measurement Standard - Chapter 12 - **Calculation of petroleum quantities**. 2006

API, Manual of petroleum measurement standards - Chapter 13 - **Statistical aspects of measuring and sampling**.2006

COMSTOCK, Daniel M. **Calibration of liquid provers**. Annual International School of Hydrocarbon Measurement. p.131-135.1985

COMSTOCK, Daniel M. **Theory and application of pulse interpolation to provers systems**. Annual International School of Hydrocarbon Measurement.1990

GARCIA, Elmer Ner; SHERIEF, Noor Mohammed Abdul. **Water draw calibration of a meter prover**. Saudi Aramco Journal of Technology.p.25-36.1999

GYORY, József. **The determination and the uncertainty of a prover's base volume**. Measurement Vol 2 nº 4. 1984

INMETRO, **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 5ª ed. Rio de Janeiro. 2007

ISO 3435-1, **Statistics - Vocabulary and symbols**. 2 ed. 2006

ISO 4267-2, **Calculation of oil quantities: Dynamic measurement**. 1 ed. 1988

ISO 7278-1, Liquid hydrocarbons - Dynamic measurement - **Proving systems for volumetric meters - Part 1: General principles**. 1 ed. 1987

ISO 7278-2, Liquid hydrocarbons - Dynamic measurement - **Proving systems for volumetric meters - Part 2: Pipe provers**. 1 ed. 1988

ISO 7278-3, Dynamic Measurement: Proving Systems for volumetric Meters - **Pulse interpolation techniques**. 1 ed. 1998

ISO 7278-4, Dynamic Measurement: Proving Systems for volumetric Meters - **Guide operators of pipe provers**. 1 ed. 1999

ISO 8222, Petroleum measurement systems - Calibration - **Temperature corrections for use when calibrating volumetric proving tanks**. 2 ed. 2002

JAKUBENAS, Peter P. **Advances in pipe prover technology**. Fluid Flow Measurement 3rd Inter.Symposio. 1995

LURIE, Brad D. **Theory and application of pulse interpolation to provers systems**. School of Hydrocarbon Measurement. p.457-461.1991

MENDES, Alexandre; ROSÁRIO, Pedro Paulo. **Metrologia & incerteza de medição**. Editora EPSE. São Paulo. 2005

PFREHM, R.H. **The calibrate pipe prover**. Society Petroleum Engineer, SPE n° 343. p.1087-1090.1962

REDILLA, Richard L. **Design of displacement provers**. International School of Hydrocarbon Measurement (ISHM). Oklahoma., 28S3-S290.1977

RIBEIRO, Marco Antônio. **Incerteza na medição de vazão**. Revista Intech nº 118. 2010

SILVA, Claudio Barreiro C. **Incerteza na medição de vazão**. Boletim técnico da Petrobras nº 47. p. 202-232. Rio de Janeiro. 2004

SU, SHIAW Y. **A Statistical meter proving method**. Journal of Petroleum Technology. SPE nº 7113. 1979

TING, V. C; HALPINE, J. C, **Portable piston gas prover for field calibration of flowmeters**. Society of Petroleum Engineer, SPE nº 19767. p.454-458. 1991

TOMBS, Michael et al. **High precision Coriolis mass flow measurement applied to small volume proving**. Flow Measurement and Instrumentation. p. 371-382. 2006

TYAU, Walter Fah Min. **Ball prover and components thereof**. Patent nº 3832833. USA.1974

UPP, E.L.; LANASA, Paul J.**Types of fluid flow measurements**. Fluid Flow Measurement. p.35-47. 2002

YOUNG, Willian R. **Liquid flow prover (Conventional)**. **Advances in instrumentation** Vol 39. p.432-435.1984.

## APÊNDICE A

### CARACTERIZAÇÃO DA BOMBA CENTRÍFUGA

---

**Objetivos:** Verificar se a bomba centrífuga tem condições satisfatórias para operar no sistema de medição. Delimitar os limites de operação baseados em estudos de comportamento das pressões e vazões do sistema.

---

**Premissas:** Basear-se nas recomendações da ISO-7278-2.  
O comprimento entre os detectores extremos do provador é de 9 (nove) metros.  
O diâmetro interno do provador é  $\varnothing$  53,13 mm.  
O nível máximo do líquido do tanque que alimenta o provador em relação ao nível onde a bomba encontra-se instalada é de 1,465 m.

---

**Material utilizado:** Bomba ZIMERMAN Mod.: 71 (1/4 cv; 60 Hz; 3500 RPM).  
Rotâmetro HAAKE MEDINGEN GMBH (Graduação: 50 l/h).  
Manômetro de pressão ASTA tipo Boudon de limite de trabalho de 19,61 kPa (Graduação: 0,49 kPa).  
Manômetro de pressão ASTA de limite de trabalho de 294,20 kPa (Graduação: 9,81 kPa).  
Reservatório de água com válvulas de drenagem.  
Mangueiras de interligação.

---

#### Montagem Experimental:

A bomba centrífuga instalada na bancada experimental (Figura A-1) recebe alimentação no sistema através de uma conexão de mangueira com o reservatório de água, localizado há 1,5 m (um metro e meio) acima do nível da bomba. Neste trecho, um dos manômetros de pressão encontra-se instalado, imediatamente na sucção da bomba [1]. O outro manômetro encontra-se

instalado imediatamente no recalque da bomba [2]. Uma segunda conexão de mangueira interliga a saída da bomba com o rotâmetro [3] e outra terceira faz o retorno para o reservatório.

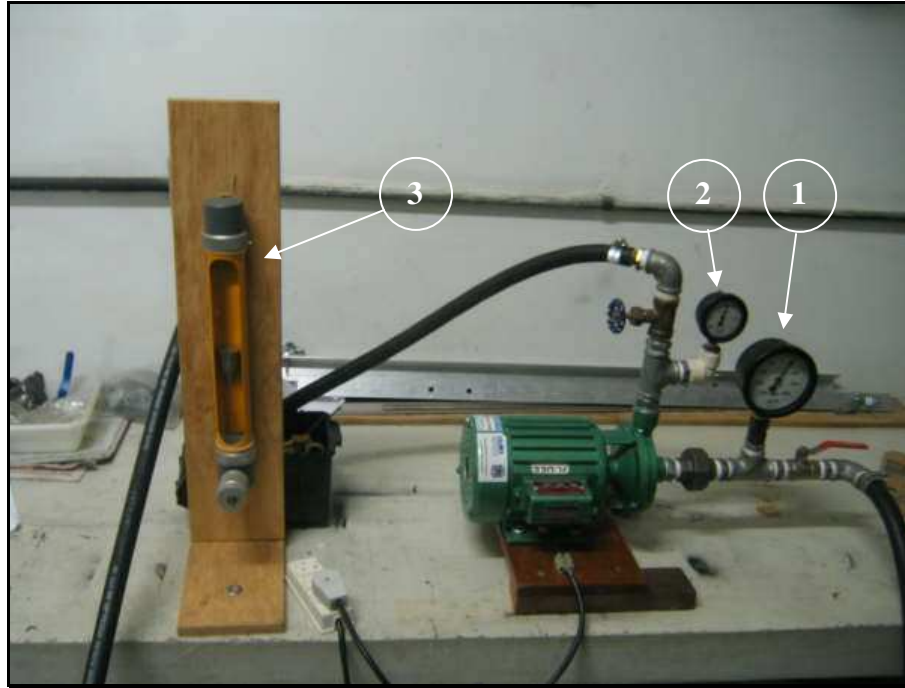


Figura A-1 - Bancada Experimental para Teste da Bomba

---

### **Metodologia Aplicada:**

Com todas as válvulas abertas, a bomba é acionada e o sistema entra em funcionamento até atingir um regime de fluxo em estado estacionário. O período de tempo proveniente desta etapa é necessário para purga do ar nas mangueiras que pode prejudicar a qualidade das medições e contribuir para efeitos indesejáveis. Em condições estacionárias de fluxo, dá-se início ao processo de obtenção de dados, através do fechamento da válvula de controle de vazão do próprio rotâmetro, registrando neste momento a vazão zero e as pressões nos manômetros (P1 na sucção e P2 no recalque da bomba). A partir daí, passa-se a abrir gradualmente a válvula do rotâmetro de acordo com sua graduação indicativa registrando a vazão (obtida pela Tabela A-1) e as pressões dos manômetros. Este procedimento é realizado até a abertura total da válvula completando assim em um primeiro ensaio. Em seqüência, este procedimento é repetido fechando a válvula do rotâmetro até que se atinja a vazão zero



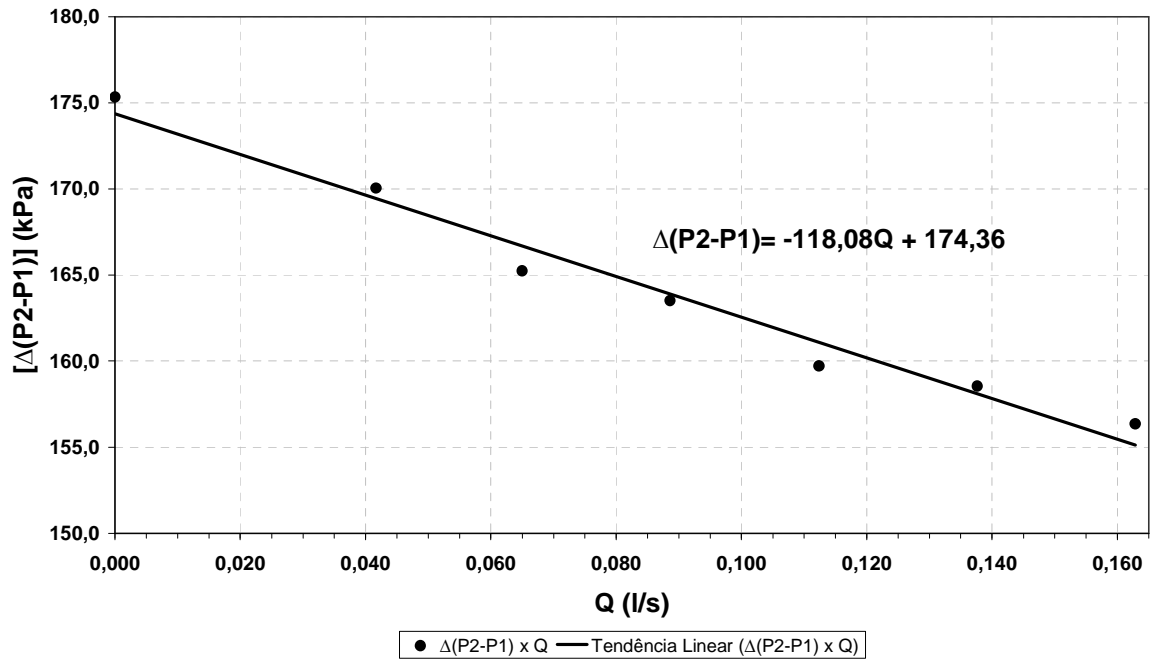


Figura A-2 – Curva de Operação da bomba

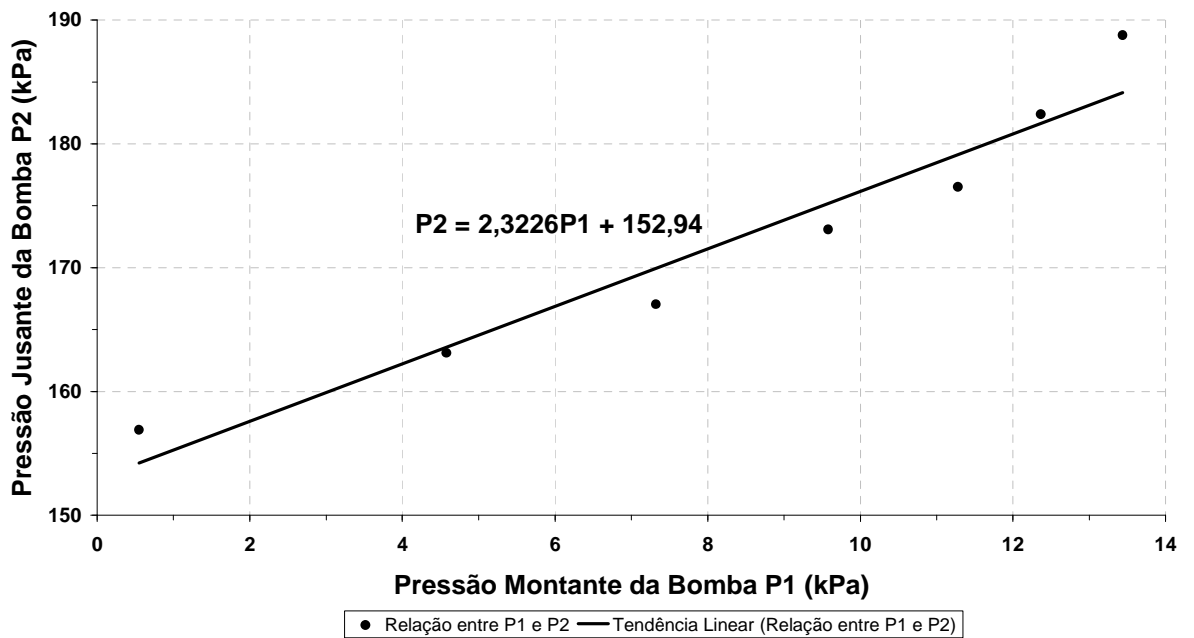


Figura A-3 – Representação característica entre  $P1$  e  $P2$



---

**Análise dos Resultados:**

De acordo com as observações experimentais (Tabela A-2), com exceção da vazão nula, a indicação de leitura da vazão no rotâmetro varia de 0,042 a 0,163 l/s e o diferencial de pressão dos manômetros de recalque (P2) e de sucção (P1) da bomba tem as médias variando de 175,34 KPa quando a vazão é nula e 156,36 kPa quando a vazão atinge a capacidade máxima da vazão registrada pelo rotâmetro.

Analisando os gráficos das leituras experimentais, os pontos dispersos (Figura A-2) apresentam uma tendência linear, o que sugere uma representação aproximada, deste experimento específico, pela Equação (A-1):

$$\Delta(P_2 - P_1) = -118,08Q + 174,36 \quad (A-1)$$

Onde a vazão Q é fornecida em l/s e o resultado expresso em KPa.

Analisando o comportamento característico da relação entre a pressão de recalque (P2) e a pressão de sucção (P1), através dos pontos dispersos (Figura A-3) pode-se representar estes pontos através de uma aproximação linear, pela Equação:

$$P_2 = 2,3226P_1 + 152,94 \quad (A-2)$$

Na qual quando P1 tende a zero P2 aproxima de 152,94 kPa.

---

**Conclusões e Observações:**

Neste experimento, a vazão máxima atingida é devida à capacidade limitada do rotâmetro, não caracterizando a vazão máxima que pode ser oferecida pela bomba. Esta pode ser estimada, através de sua Equação de desempenho característico, em quase 1,67 l/s quando  $\Delta(P_2 - P_1)$  torna-se nulo.

Se  $\Delta(P_2 - P_1)$  tornar-se negativo, fisicamente isto quer dizer que, a bomba necessita de mais suprimento do que o sistema pode fornecer, o que pode causar cavitação.

Com base no nível máximo do reservatório, considerado para os experimentos no provador como sendo de 1,465 m, o que representa uma pressão de suprimento de 14,36 kPa, pode-se estimar que a vazão máxima a ser atingida pela bomba, nestas condições (Equação A-1), é aproximadamente de  $Q_{\max} = 1,51 \text{ l/s}$ .

Sabendo que, para iniciar o movimento da esfera (Ver Apêndice C), necessita-se de uma pressão mínima de 14,36 kPa (situação para esfera 1), conclui-se que é necessária uma coluna de água de 1,455 m para colocar a esfera em movimento sem a utilizar a bomba.

Com a utilização da bomba, considerado a pressão mínima necessária de 14,36 kPa e em relação ao potencial máximo que ela pode oferecer ( $\Delta(P_2 - P_1) = 174,36 \text{ kPa}$  quando  $Q = 0$ ), o que retorna uma diferença de  $\Delta(P_2 - P_1) = 160,09 \text{ kPa}$ , e substituindo em (A-1), pode-se estimar a vazão mínima para operação, sem consideração das perdas de carga ao longo do trecho, de aproximadamente 485 l/h (ou 0,135 l/s).

Uma velocidade de 3m/s é típica para especificações para provadores unidirecionais para uso comercial (ISO 7278-2, 1988). Utilizando as premissas deste Apêndice, para esta velocidade é estimada uma vazão 6,67 l/s, o que torna a bomba insatisfatória sob esse aspecto.

Para provadores bidirecionais usam-se usualmente velocidades mais baixas (ISO 7278-2, 1988).

Tendo por premissa básica de projeto que o comprimento do provador é de 9 metros, que o diâmetro interno é igual a 0,5302 m e que a vazão mínima necessária para colocar a esfera em movimento é de 0,135 l/s, pode-se estimar o tempo de percurso da esfera dentro do provador em 147,50 s (aproximadamente cento e quarenta e oito segundos).

Com base nos valores estimados para a vazão máxima oferecida pela bomba e pela vazão máxima considerando o fato de a pressão disponível no tanque ser muito maior que a pressão mínima necessária para colocar a esfera em movimento e ainda o fato do percurso total do sistema ser curto e ter poucos acidentes de linha, o cálculo da perda de carga ao longo do trecho não se faz necessário, pois não são significativos para atingir os objetivos do projeto.

Além disto, substituindo-se (A-2) em (A-1), e considerando-se a pressão mínima necessária de 14,27 kPa, ou seja,  $\Delta(P_2 - P_1) = 160,09 \text{ kPa}$ , pode-se estimar que a altura mínima do nível de água do reservatório deve ser  $H = 0,55 \text{ m}$ . Tomando um fator de segurança de 1,3, o nível mínimo que o reservatório deve operar é de 0,70 m do nível da bomba.

Em testes experimentais preliminares, a esfera de elastômero percorreu o provador numa vazão de aproximadamente 0,33 l/s em um tempo de 60 (sessenta segundos)<sup>9</sup>.

Portanto, a bomba utilizada satisfaz as condições necessárias para operar no sistema, podendo chegar a 1,51 l/s devido à restrição de altura do tanque, estando os limites de operação estão em torno de 0,135 l/s a 0,333 l/s.

---

<sup>9</sup> Considerando a válvula de vazão totalmente aberta

## APÊNDICE B

### LEVANTAMENTO DIMENSIONAL DAS ESFERAS DE ELASTÔMERO

**Objetivo:** Classificar qualitativamente as esferas de elastômero utilizadas no “Ball Prover”.

**Premissa:** Basear-se nas recomendações da ISO-7278-2

**Material utilizado:** Seis esferas de elastômero preenchidas com fluido de trabalho.

Uma esfera de elastômero sem preenchimento.

Microscópio eletrônico (Graduação: 0,01 mm).

#### Metodologia Aplicada:

Com a utilização de um microscópio, registraram-se através de fotos, as medidas de cada esfera em quatro planos diferentes, passando estes pelo centro da esfera e formando ângulos congruentes entre si.

#### Levantamento Dimensional Executado e Análise Estatística:

Tabela B-1 - Levantamento dimensional e Análise Estatística

| Planos | Diâmetro $\varnothing$ externo das Esferas (mm) |          |          |          |          |          |          | $\varnothing_{int}$ do | $\varnothing_{int}$ do |
|--------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------------|------------------------|
|        | Esfera 1  | Esfera 2 | Esfera 3 | Esfera 4 | Esfera 5 | Esfera 6 | Esfera 7 | Tubo (mm)              | Tubo (mm)<br>+ 2%      |
| A      | 53,90   | 54,05    | 53,80    | 53,65    | 53,50    | 53,60    | 53,00    | 53,05                  | 54,11                  |
| B      | 54,00   | 54,15    | 54,40    | 53,35    | 53,70    | 53,35    | 53,30    | 53,00                  | 54,06                  |
| C      | 54,30   | 54,15    | 54,00    | 53,65    | 53,30    | 53,55    | 53,35    | 53,00                  | 54,06                  |
| D      | 54,10   | 54,20    | 53,80    | 53,70    | 53,75    | 53,25    | 53,60    | 53,00                  | 54,06                  |

| Análise Estatística das esferas e da tubulação interna         |          |          |          |          |          |          |          |                             |                                  |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------------|----------------------------------|
| Parâmetro Avaliado   | Esfera 1 | Esfera 2 | Esfera 3 | Esfera 4 | Esfera 5 | Esfera 6 | Esfera 7 | $\varnothing_{int}$ do Tubo | $\varnothing_{int}$ do Tubo + 2% |
| Média  | 54,08    | 54,14    | 54,00    | 53,59    | 53,56    | 53,44    | 53,31    | 53,01                       | 54,07                            |
| Variância  | 0,029    | 0,004    | 0,080    | 0,026    | 0,042    | 0,027    | 0,061    | 0,001                       | 0,001                            |
| Desvio padrão  | 0,171    | 0,063    | 0,283    | 0,160    | 0,206    | 0,165    | 0,246    | 0,025                       | 0,025                            |
| Aumento percentual em relação ao $\varnothing$ interno do tubo | 2,00     | 2,12     | 1,86     | 1,08     | 1,04     | 0,80     | 0,57     | -                           | 2,00                             |

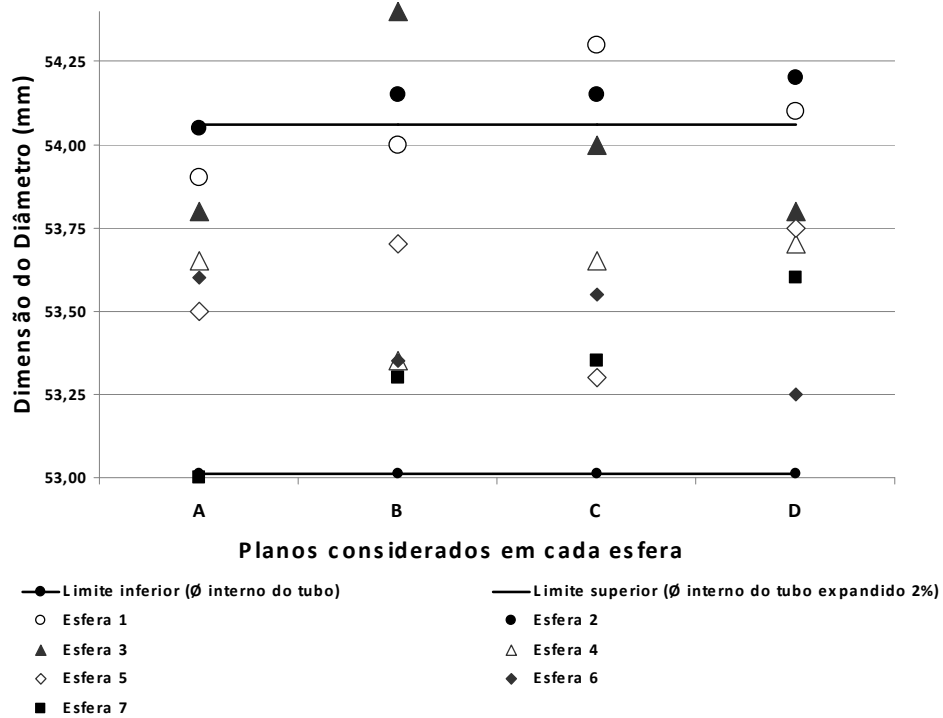


Figura B-1 - Representação aleatória do diâmetro dos planos das esferas

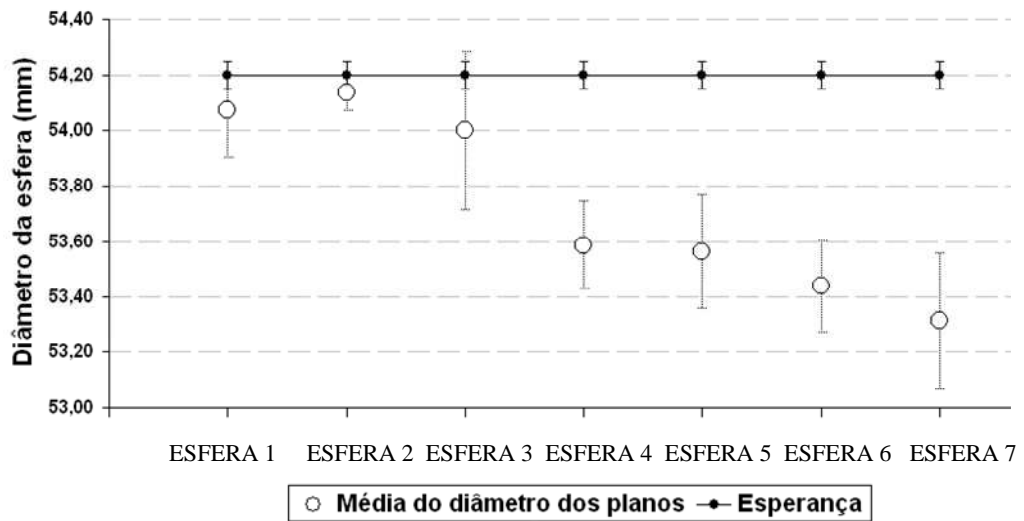


Figura B-2 - Classificação das esferas quanto a média e desvio padrão

---

### **Análise dos Resultados:**

De acordo com a análise estatística dos resultados (Tabela B-1), as esferas 1 e 2 atingiram a expansão mínima estabelecida pela ISO-7278-2 de 2% (dois por cento) em relação ao diâmetro interno do provador.

De acordo com os gráficos, é possível visualizar que todos os diâmetros dos planos das esferas estão acima do diâmetro interno do tubo (Figura B-1) e sua expansão em 2% (dois por cento), com exceção ao plano A da esfera 7 (53,00).

Em relação ao desvio padrão das esferas 1, 2 e 3, todas atingem a esperança estabelecida pela norma (Figura B-2).

---

### **Conclusões e Observações:**

As esferas: 4, 5, 6 e 7, obtiveram médias mais afastadas da esperança (Figura B-2), não sendo recomendadas para uso no provador, entretanto estas esferas podem ser avaliadas em trabalhos futuros para avaliação de suas incertezas e da contribuição para o erro na medição..

As esferas: 1, 2 e 3, atendem as expectativas da norma, quando consideradas as contribuições de suas incertezas, porém deve-se destacar que a esfera 3 possui chances maiores de contribuição com um erro na medição, por possuir média mais afastada que as demais e uma maior variância.

A esfera 2, por sua média estar mais próxima da esperança e por possuir uma pequena variância, possui uma qualidade maior quando comparada com a esfera 1, porém, por não estar preenchida com o fluido de trabalho, esta qualidade torna-se duvidosa.

A esfera 1, considerando sua incerteza, abrange todos os valores em torno da esperança, o que não elimina sua possível contribuição com o erro.

Dentro das esferas classificadas, a esfera 1, melhor classificada, será utilizada nos experimentos com a expectativa de bons resultados. A esfera 2, que tem sua qualidade colocada em dúvida por estar vazia, também fará partes nos experimentos, para tentativa de avaliação desta particularidade. A esfera 3 não será considerada, devido a maior variância de seus resultados quando comparada com as outras.

## APÊNDICE C

### TESTE DE ESTANQUEIDADE DAS ESFERAS DE ELASTÔMERO EM CONDIÇÕES ESTÁTICAS

---

**Objetivos:** Analisar o comportamento da estanqueidade de cada esfera de elastômero submetida às mesmas condições experimentais.  
Estimar a pressão mínima necessária para colocar cada esfera em movimento.

---

**Premissas:** Estabelecer as mesmas condições experimentais no início de cada ensaio.  
Executar cada experimento independente com os mesmos metodologia e rigores dos demais experimentos.

---

**Material utilizado:** Sistema de elevação, formado por uma polia fixada em um pórtico com altura efetiva máxima de elevação de aproximadamente de 3m.  
Reservatório de água suspenso com indicador de nível de água.  
Conjunto de conexões em PVC, formado por conexão tipo cap, Tê, reduções, tubo e curva 90°.  
Mangueira de interligação.  
Suporte para conexões.  
Quatro esferas de elastômeros (nº 1, 2, 4 e 6).  
Balança de precisão OHAUS (Precisão: gramas).  
Recipientes plásticos.  
Dois Béquer.  
Régua de referência.  
Trena.  
Cronômetro.

### Montagem Experimental:

O reservatório de água suspenso é fixado ao sistema de elevação e seu nível de água é completado até determinado nível de referência considerado para iniciar todos os outros ensaios. Na parte inferior do reservatório, está inserida uma válvula de esfera que controla a abertura e o fechamento do reservatório. Esta válvula, por sua vez, possui uma saída para a mangueira que interliga o reservatório com o conjunto de conexões em PVC que fica apoiado em um suporte.

Os principais componentes da bancada (Figura C-1) são:

- [1] Polia elevatória
- [2] Reservatório elevável
- [3] Válvula de esfera
- [4] Conexões de PVC
- [5] Béquer

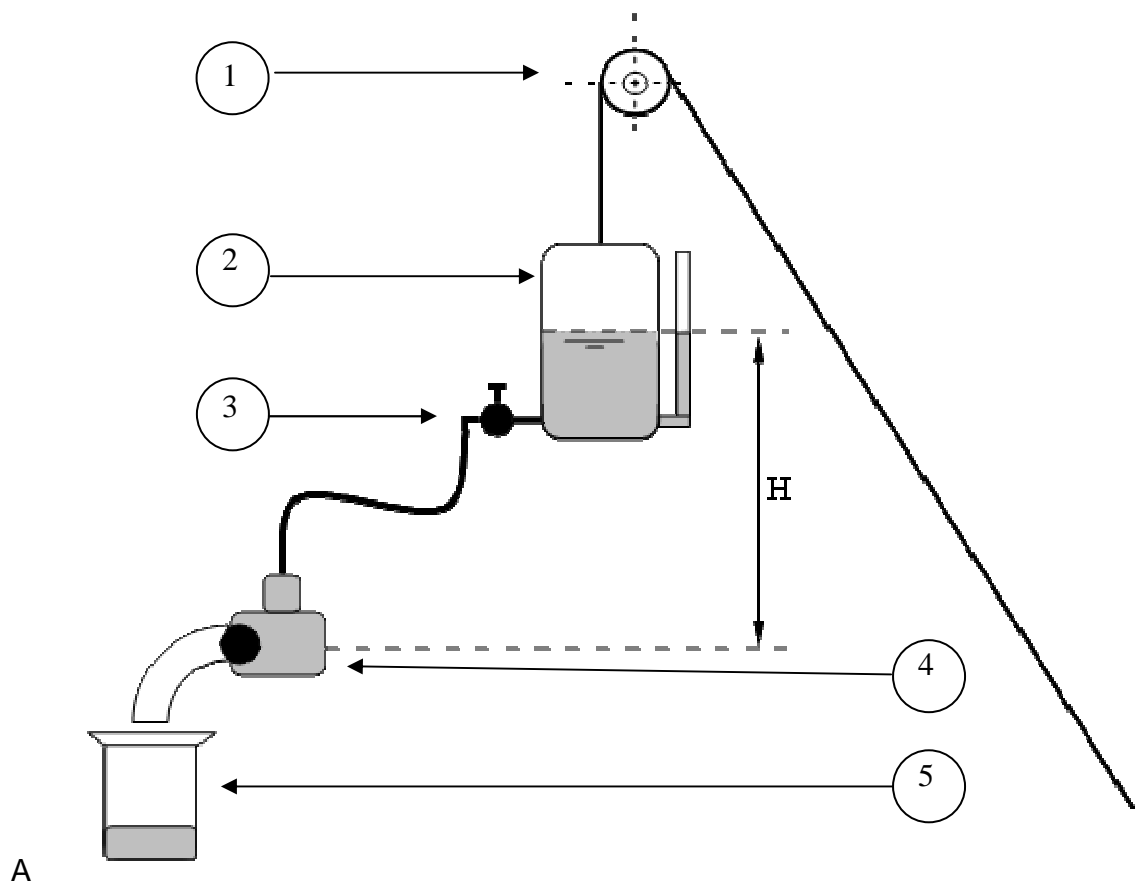


Figura C-1 – Desenho esquemático do teste de estanqueidade



Figura C-2 mostra a banca experimental instalada:



Figura C-2 - Bancada Experimental

---

### **Metodologia Aplicada:**

Cada ensaio é realizado com o nível inferior do reservatório a 555 mm acima do ponto central do diâmetro da tubulação. Antes do início dos testes, a válvula de esfera encontra-se fechada e a curva de 90° é retirada para completar com água o sistema de conexões, e após este procedimento, a esfera de elastômero é colocada em posição demarcada para, somente depois destas etapas, retornar com a curva de 90° para sua posição inicial.

A balança de precisão é aferida (Figura C-3) e os recipientes plásticos têm sua tara registrada.



Figura C-3 - Balança de precisão

A válvula de esfera então é aberta, e o cronômetro é acionado. O sistema então passa a exercer uma pressão inicial de 5,44 kPa na esfera de elastômero. Com o auxílio do béquer, toda água que vaza do sistema é coletada a cada minuto e transferida para os recipientes plásticos onde é registrada a massa de água. Para não haver perdas durante este procedimento, é feito um revezamento com os béquer para captação do vazamento. Para cada nível de pressão é observado o vazamento durante um tempo total de cinco minutos, registrando, portanto, cinco massas de água acumulativas. Ao final desta etapa, com o auxílio da trena e da régua de referência, aumenta-se à pressão do sistema sobre a esfera de elastômero em 0,98 kPa e os procedimentos de coleta recomeçam para os próximos cinco minutos.

O registro de vazamento é feito em cinco níveis de pressões na qual a pressão máxima atinge 0,93 kPa.

A partir da pressão de 9,37 kPa há um acompanhamento do vazamento sem registro da massa de água, porém aguardam-se os mesmos cinco minutos para aumentar a pressão em 0,38 kPa. A pressão é aumentada gradativamente até que a esfera de elastômero saia do sistema.

Esse procedimento foi elaborado no sentido de tentar reproduzir com a máxima fidelidade o comportamento da esfera no interior da tubulação do provador. Outras concepções de teste de estanqueidade, introduzindo batentes

para manter a esfera parada, por exemplo, levaram a deformações da esfera, não reproduzindo o movimento como de fato ele ocorre.

### Observações Experimentais e diagramas esquemáticos:

Tabela C-1 – Medição do Vazamento da Esfera nº1 (em gramas)

| ELASTÔMERO 1     |       |       |        |        |        |
|------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| tempo<br>P (kPa) | tempo |       |        |        |        |
|                  | 1 min | 2 min | 3 min  | 4 min  | 5 min  |
| 5,44             | 30,89 | 61,59 | 90,92  | 121,56 | 151,30 |
| 6,42             | 32,40 | 64,43 | 95,41  | 126,15 | 156,75 |
| 7,40             | 31,32 | 61,51 | 92,43  | 121,73 | 151,25 |
| 8,38             | 29,54 | 58,74 | 87,48  | 116,03 | 145,56 |
| 9,37             | 47,79 | 99,02 | 148,79 | 196,05 | 244,61 |

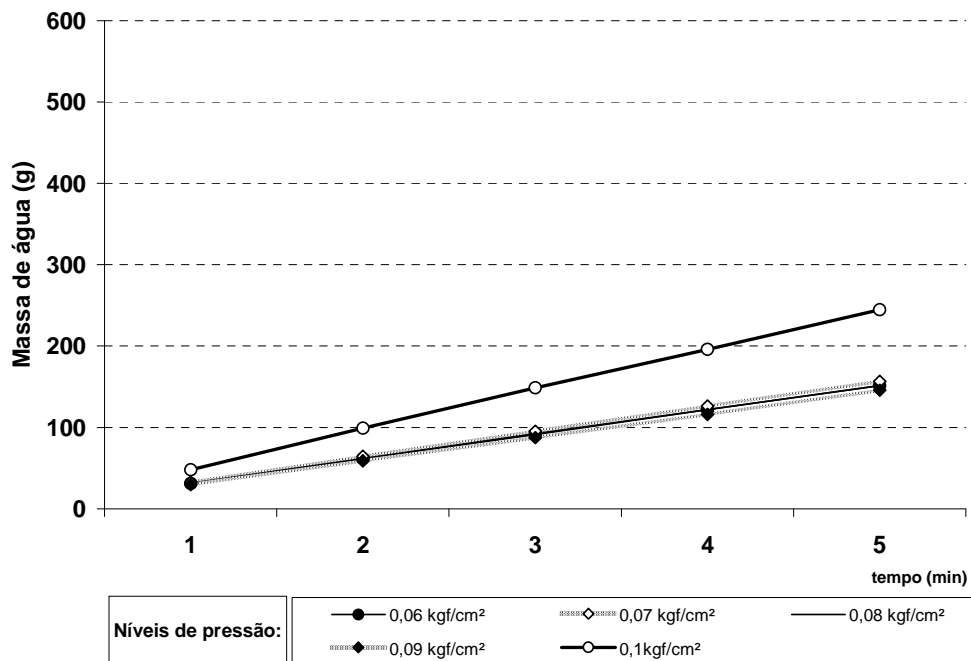


Figura C-4 – Vazamento registrado na esfera nº1

Pressão de início de movimento e saída do sistema:  $P_{saída}$ : 14,27 kPa

Tabela C-2 - Medição do Vazamento da Esfera nº2 (em gramas)

| ELASTÔMERO 2 |        |        |        |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| tempo        | 1 min  | 2 min  | 3 min  | 4 min  | 5 min  |
| P (kPa)      |        |        |        |        |        |
| 5,44         | 0,28   | 0,69   | 1,28   | 1,81   | 2,38   |
| 6,42         | 1,49   | 8,94   | 24,86  | 40,41  | 56,25  |
| 7,40         | 57,54  | 111,79 | 169,56 | 219,89 | 325,29 |
| 8,38         | 94,66  | 187,46 | 283,03 | 375,80 | 469,29 |
| 9,37         | 112,64 | 224,54 | 333,14 | 446,69 | 557,95 |

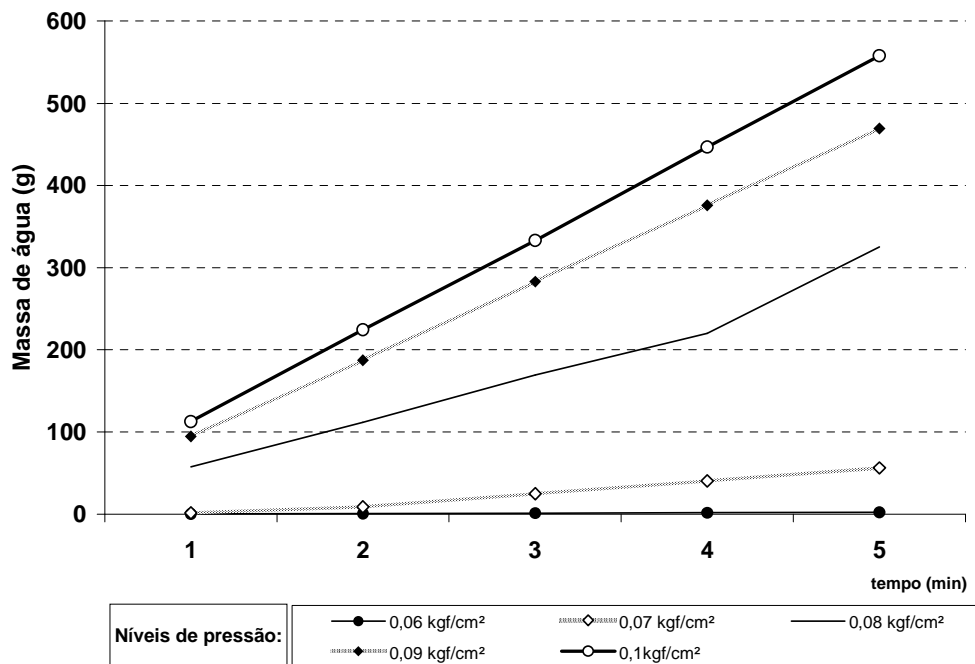


Figura C-5 – Vazamento registrado na esfera nº2

Pressão de início de movimento e saída do sistema:  $P_{saída}$ : 14,27 kPa

Tabela C-3 - Medição do Vazamento da Esfera nº4 (em gramas)

| ELASTÔMERO 4     |       |        |        |        |        |
|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| tempo<br>P (kPa) | tempo |        |        |        |        |
|                  | 1 min | 2 min  | 3 min  | 4 min  | 5 min  |
| 5,44             | 0,68  | 1,08   | 1,60   | 2,07   | 2,50   |
| 6,42             | 1,98  | 5,00   | 8,26   | 11,48  | 14,67  |
| 7,40             | 27,94 | 50,16  | 71,78  | 92,65  | 113,03 |
| 8,38             | 72,56 | 142,76 | 211,50 | 289,69 | 370,66 |
| 9,37             | 88,65 | 172,47 | 258,80 | 346,47 | 434,02 |

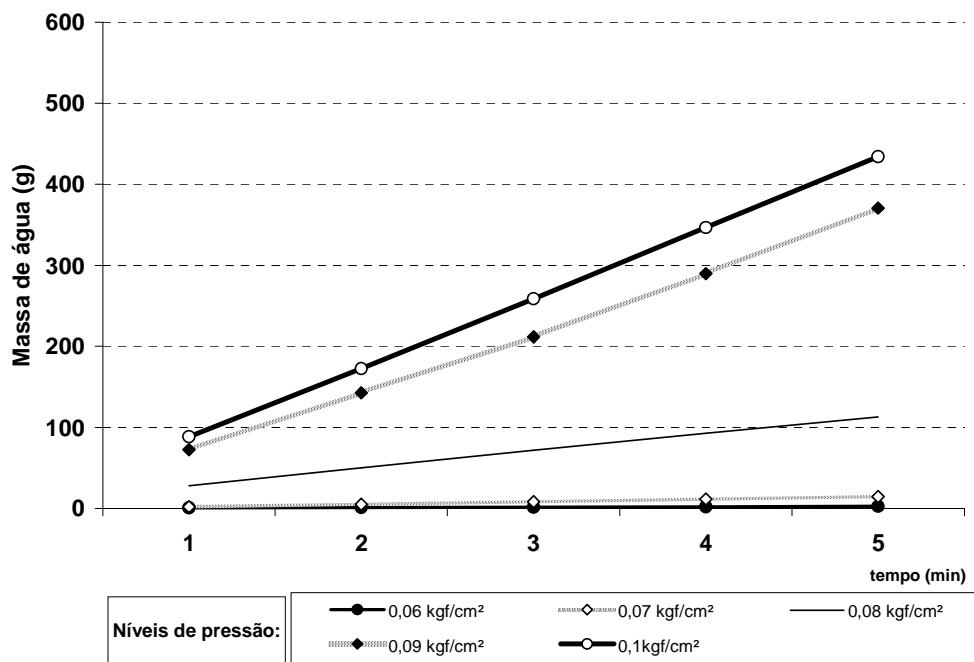


Figura C-6- Vazamento registrado na esfera nº4

Pressão de início de movimento e saída do sistema:  $P_{saída}$ : 16,23 kPa

Tabela C-4 - Medição do Vazamento da Esfera nº6 (em gramas)

| ELASTÔMERO 6 |        |        |        |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| tempo        | 1 min  | 2 min  | 3 min  | 4 min  | 5 min  |
| P (kPa)      |        |        |        |        |        |
| 5,44         | 0,74   | 1,21   | 1,74   | 2,30   | 2,80   |
| 6,42         | 0,63   | 1,00   | 1,67   | 2,30   | 2,61   |
| 7,40         | 22,23  | 46,96  | 71,64  | 95,92  | 120,19 |
| 8,38         | 63,64  | 132,55 | 200,36 | 275,46 | 338,59 |
| 9,37         | 101,89 | 183,12 | 272,80 | 362,91 | 452,23 |

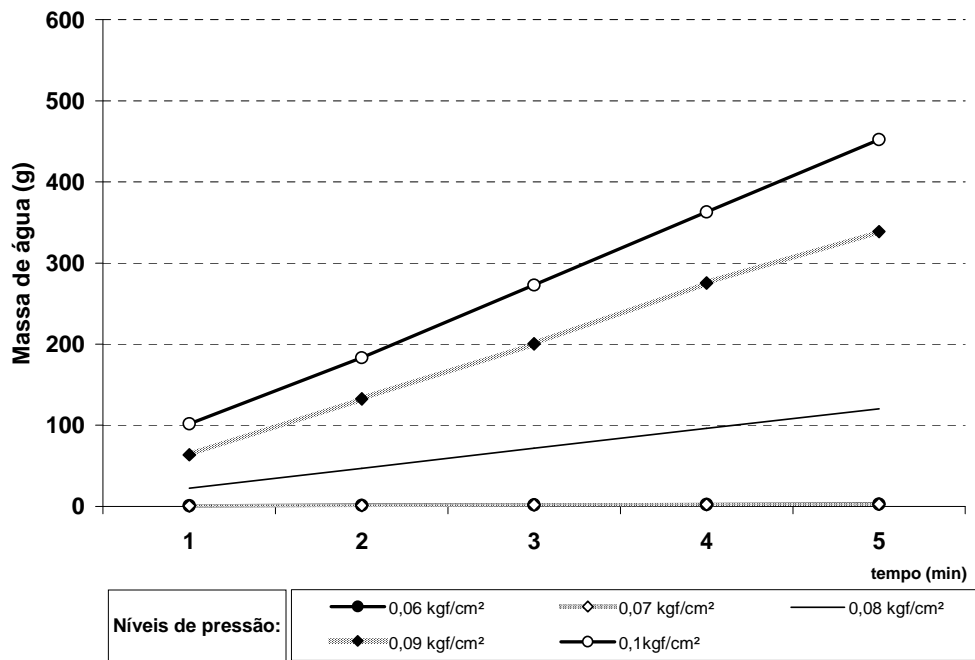


Figura C-7 – Vazamento registrado na esfera nº6

Pressão de início de movimento e saída do sistema:  $P_{saída}$ : 16,23 kPa

### Análise gráfica por níveis de pressão:

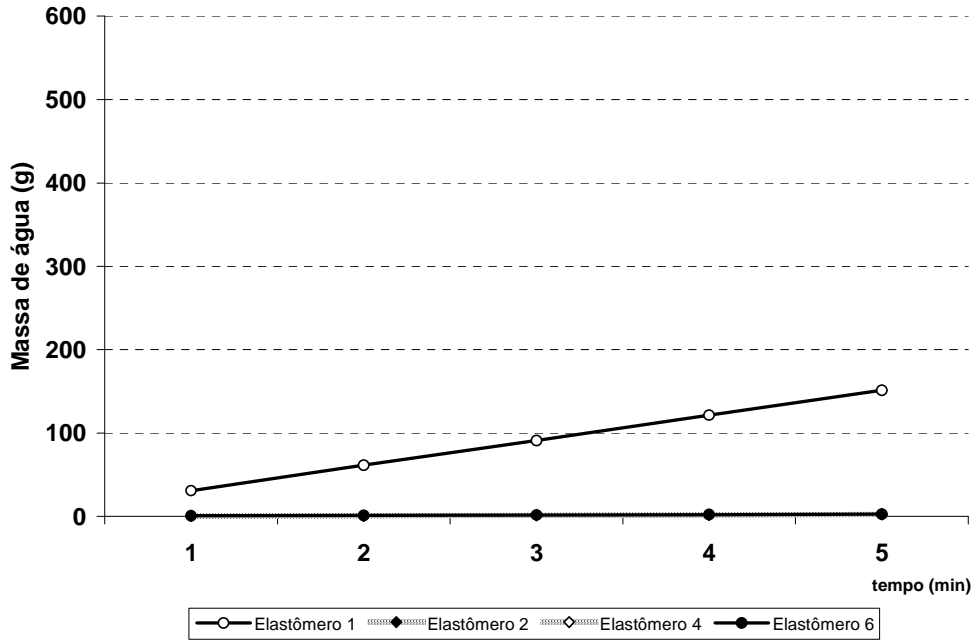


Figura C-8 - Comportamento das Esferas à Pressão de 5,44 kPa

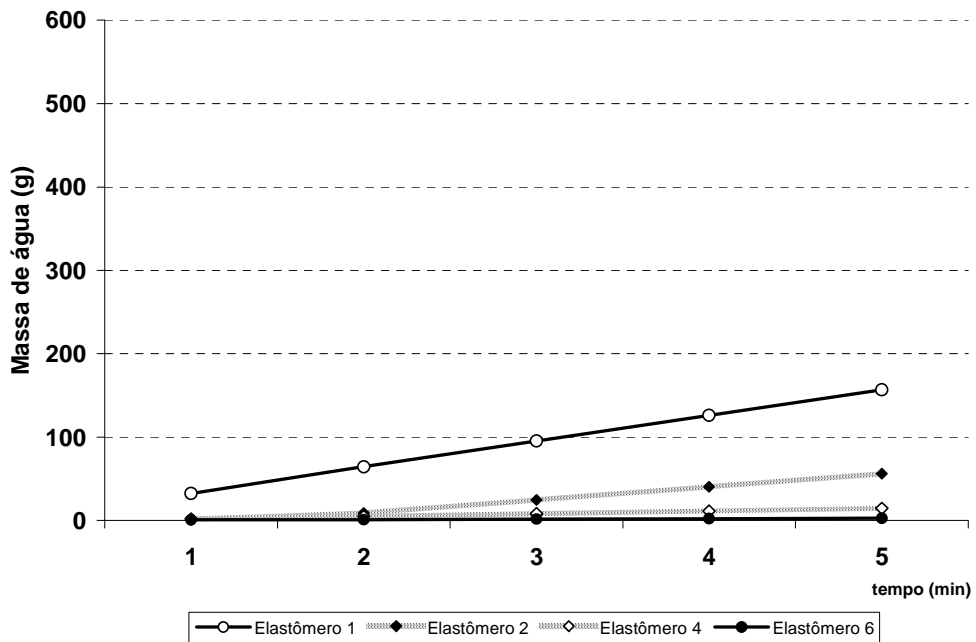


Figura C-9 - Comportamento das Esferas à Pressão de 6,42 kPa

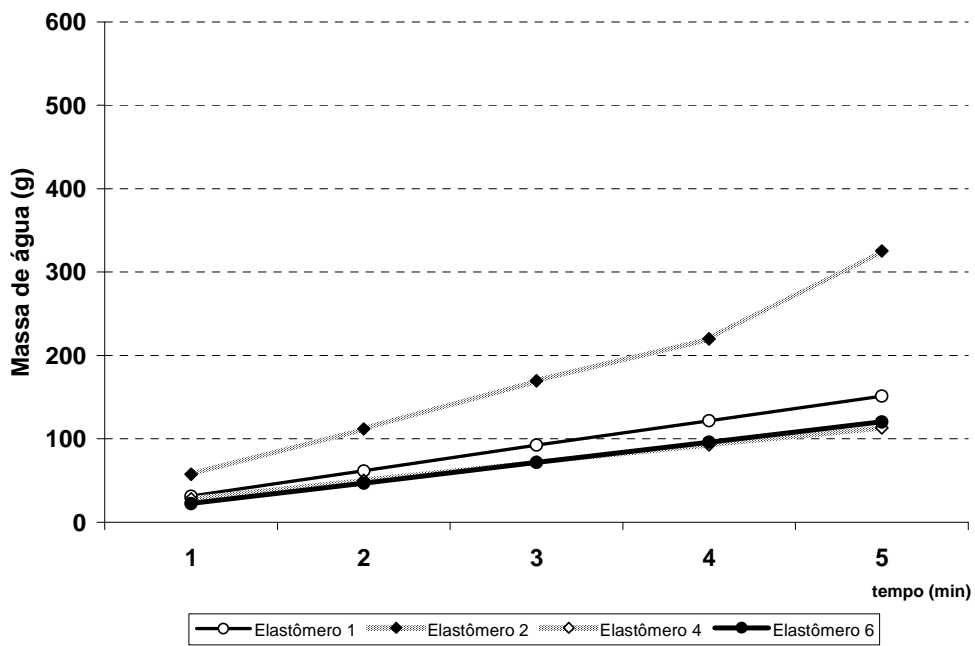


Figura C-10 - Comportamento das Esferas à Pressão de 7,40 kPa

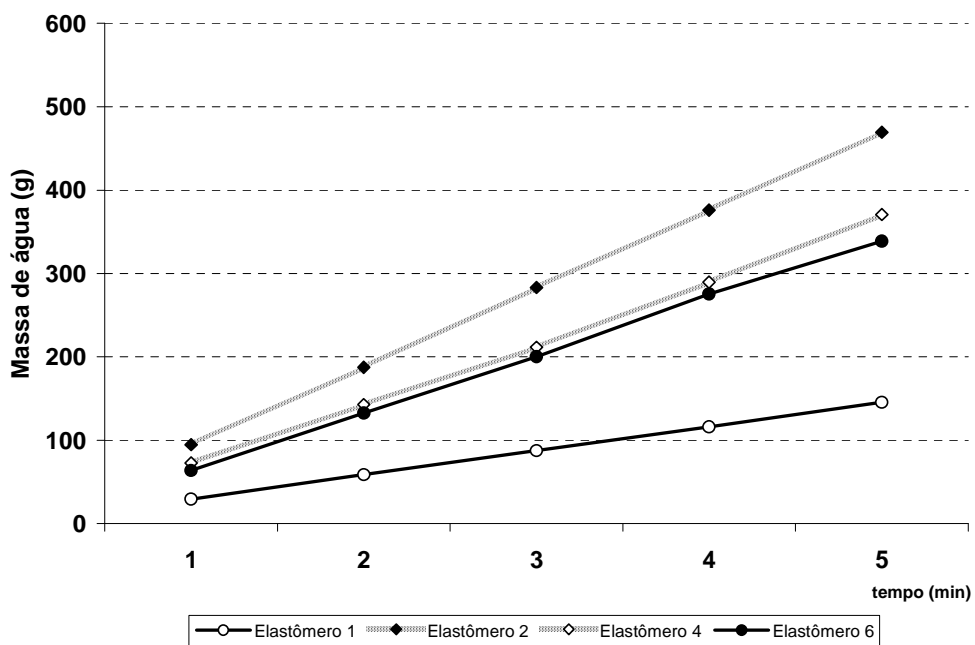


Figura C-11 - Comportamento das Esferas à Pressão de 8,38 kPa



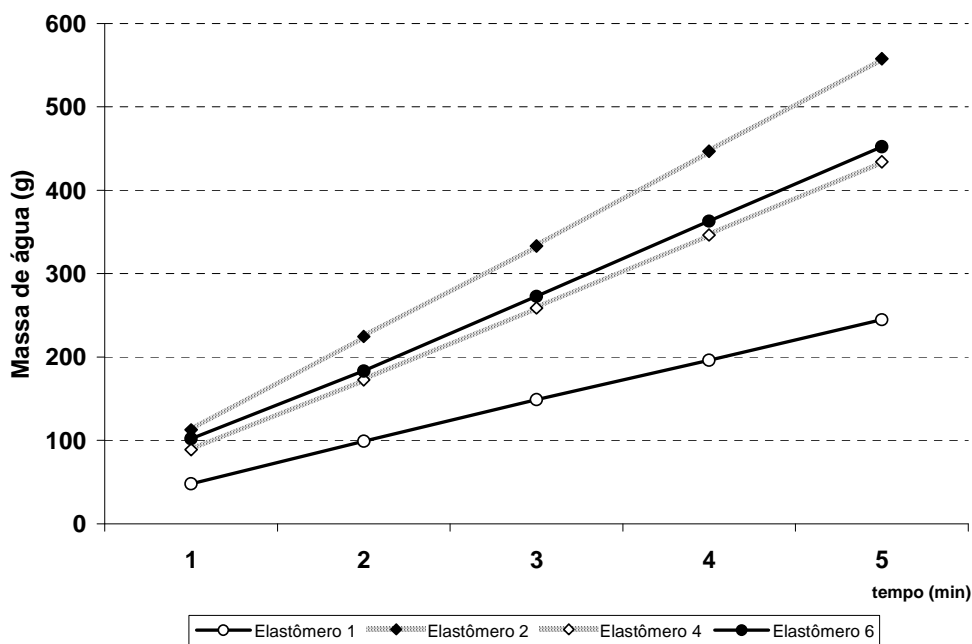


Figura C-12 - Comportamento das Esferas à Pressão de 9,37 kPa

### Análise dos Resultados:

De acordo com as observações experimentais (Tabela C-1 a C-4), a esfera de elastômero nº 1 apresenta uma menor dispersão do vazamento quando submetida a diferentes níveis de pressões (Figura C-4). A esfera de elastômero nº 2 apresenta a maior dispersão de vazamento, sendo o único caso a ultrapassar 500 g de massa de água quando submetido à pressão de 9,37kPa (Figura C-5). As esferas de elastômero nº 4 e nº 6 apresentam um comportamento muito semelhante na distribuição dos vazamentos para os diferentes níveis de pressão a qual foram submetidas (Figuras C-6 e C-7).

Analisando o vazamento acumulado em cada ensaio, a esfera nº 1 possui um menor vazamento acumulado (2563 g), as esferas nº 4 (2792 g) e nº 6 (2757 g) possuem vazamentos muito próximos e são em média 8 % maiores em relação ao vazamento da esfera nº 1. A esfera nº 2 (4107 g), por sua vez, possui um vazamento em torno de 60% maior em relação à esfera nº 1.

O início de movimento e a saída de cada esfera no sistema ocorrem na pressão de 14,27 kPa para as esferas nº 1 e nº 2 e na pressão de 16,23 kPa para a esferas nº 4 e nº 6.

Acompanhando os comportamentos dos gráficos e analisando as esferas condicionadas em um mesmo nível de pressão de trabalho, verifica-se que há um aumento do vazamento conforme se aumenta a pressão de trabalho (Figuras C-8 a C-12). Na comparação dos vazamentos entre as esferas, observa-se um comportamento mais estável da esfera nº1 e um comportamento mais instável da esfera nº2, além de se evidenciar a observação anterior sobre o comportamento semelhante nos vazamentos registrados das esferas nº4 e nº6.

---

### **Conclusões e Observações:**

Em todos os ensaios quando a esfera passa do estado estático para o dinâmico, observa-se uma estanqueidade do vazamento. É constatado que a esfera inicia o movimento dentro da tubulação rolando sobre seu eixo. Não é possível afirmar, dentro da limitação deste experimento, o porquê que deste fenômeno de estanqueidade acontecer, mas sugere-se que, ao vencer o estado estático, a pressão que era dissipada no vazamento passa a exercer uma pressão efetiva no movimento da esfera, visto que a resistência quanto ao movimento foi amenizada, tornando-se mais viável contribuir para o movimento da esfera do que vencer a resistência entre a esfera e o tubo.

De acordo com a classificação das esferas de elastômero (Ver Apêndice B) a esfera nº 1, possui 2% de interferência em relação ao diâmetro interno do tubo, sendo uma das que mais se aproxima do recomendado pela norma (2%). Além disto, a caracterização mostra um pequeno desvio padrão (0,171) e variância (0,029) quando comparadas as piores classificações, o que sugere uma boa condição de circularidade. Diante destes aspectos e na linha dos resultados deste experimento que aponta para uma boa retenção do vazamento, a esfera nº1 induz uma menor contribuição para o erro sistemático nos aspectos relacionados a vazamento. Espera-se também que resultados melhores sejam alcançados, quanto mais próxima estiver a interferência da esfera daquela recomendada pela norma.

Analisando a esfera nº 2, que possui uma maior dispersão dos vazamentos e maior vazamento acumulado, e considerando, por outro lado, que sua caracterização (Ver Apêndice B) tem maior interferência com o tubo (2,12%) e possui o menor desvio padrão (0,063) e menor variância (0,004), conclui-se que

se tratam de informações conflitantes, o que reforça a conclusão do estudo de caracterização sobre a qualidade duvidosa da esfera 2. Estes aspectos sugerem que o fato da esfera não estar preenchida com fluido de trabalho, contribui para um selamento de má qualidade. A alta dispersão dos vazamentos, neste caso, pode ser explicada pela ausência da força peso que permite uma maior deformação da esfera. Em testes no provador, a esfera 2 não entrou no provador devido a falta de fluido de trabalho em seu interior, sendo portanto descartada.

As esferas nº4 e nº6, além de terem comportamentos similares, passaram do estado estático para o dinâmico somente a uma pressão de 16,23 kPa. Isso pode ter ocorrido devido à perda de pressão ocasionada pelo vazamento e maior resistência devido ao fato de encontrarem-se preenchidas com fluido de trabalho (Figura C-13), caso que a esfera nº 2, estando vazia passa oferecer menor resistência e por isso sai do sistema à pressão de 14,27 kPa mesmo registrando um maior vazamento.

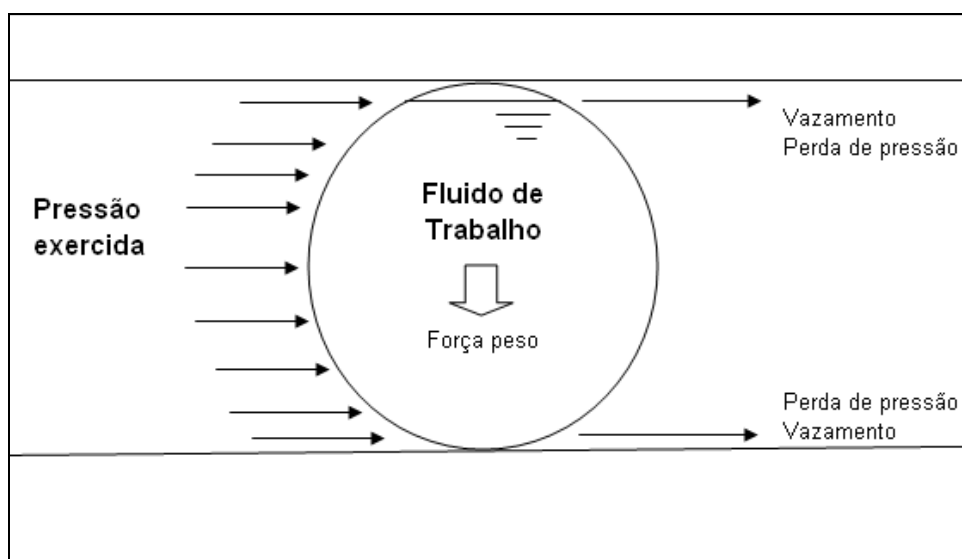


Figura C-13 - Esfera submetida à ação de forças

## APÊNDICE D

### LEVANTAMENTO DIMENSIONAL DO PROVADOR

**Objetivo:** Caracterizar o volume base do provador ( $V_b$ ) e relatar incerteza padrão.

**Premissa:** Aplicar a mesma metodologia para os  $n$  levantamentos dimensionais.

**Material utilizado:** Trena a laser. Marca: Leica Disto™ D2. (Graduação: 1 mm)  
Paquímetro Digimess (Graduação: 0,05 mm).  
Mira de referência.  
Suporte base.

#### Metodologia Aplicada:

O levantamento dimensional do comprimento é iniciado após a demarcação e instalação dos sensores de acordo com as dimensões definidas no projeto, três metros entre cada sensor. Assim para descrever a metodologia do levantamento dimensional, primeiramente é preciso descrever como os sensores são instalados a fim de obterem-se as mesmas medidas. Nesta etapa, com o auxílio de uma trena métrica, a posição dos sensores é demarcada. Em seguida, com o auxílio de tubos PVC fixados no colar de tomada, os sensores extremos e intermediários são alinhados e a dimensão entre cada trecho reconferida. Por conseguinte faz-se a perfuração da tubulação do provador e instalação dos outros componentes que fixam os sensores. Concluída a etapa de instalação dos sensores, instala-se também o suporte base nos sensores intermediários afim de acomodar a trena a laser. É traçada então uma linha de referência que passa no eixo central dos sensores. Do mesmo modo, a mira de referência é demarcada tanto para o trecho retilíneo quanto para o trecho que possui uma curva, levando-se em consideração a altura que se encontra a emissão da fonte do laser e o paralelismo em relação ao eixo da tubulação. No trecho S2-S3, que possui uma

curva, as medições levantadas diretamente são aquelas pertencentes ao trecho retilíneo, delimitados entre o sensor 2 até a face do início do trecho em curva (Designado como S2') e a face final do trecho em curva (Designado S3') até o sensor 3; os limites S2' e S3' são demonstrados conforme figura D-1. O trecho curvilíneo, por sua vez, é determinado de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante.

Finalmente, após estes procedimentos de instalação, pode-se dar início ao levantamento dimensional (Tabela D-1) através da trena a laser e da mira, de modo que se o faça alternadamente para cada trecho, se possível em diferentes períodos do dia e com o registro da temperatura ambiente. O procedimento de alternar o levantamento em cada trecho gera uma perturbação do sistema e espera-se obter o mesmo valor quando re-posicionado na mesma posição inicial.

Para o levantamento dimensional do diâmetro da tubulação (Tabela D-2), o paquímetro é utilizado tomando aleatoriamente as faces dos eixos centrais da tubulação.

---

### Levantamento Dimensional Executado:

#### ➤ Levantamento dimensional dos trechos retilíneos:

Tabela D-1 - Levantamento dimensional executado – Trechos retilíneos

| Temperatura: 30 °C           | AMOSTRAGEM (n=10) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| LEVANTAMENTO DIMENSIONAL (m) | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| S1-S2                        | 2,997             | 2,997 | 2,997 | 2,998 | 2,997 | 2,997 | 2,996 | 2,997 | 2,996 | 2,997 |
| S2-S2'                       | 1,240             | 1,241 | 1,241 | 1,240 | 1,241 | 1,241 | 1,240 | 1,240 | 1,240 | 1,240 |
| S3-S3'                       | 1,245             | 1,246 | 1,245 | 1,245 | 1,246 | 1,245 | 1,245 | 1,246 | 1,245 | 1,246 |
| S3-S4                        | 2,998             | 2,997 | 2,998 | 2,998 | 2,997 | 2,998 | 2,997 | 2,998 | 2,997 | 2,998 |

#### ➤ Determinação do trecho em curva:

O trecho em curva (TC) é determinado a partir das informações fornecidas pelo fabricante e as considerações de campo. Deste modo as dimensões de A (156 mm) e R (135,83 mm) fornecidas pelo fabricante (Figura D-1) são consideradas no cálculo supostamente com erro nulo. A diferença entre A e R representa o trecho de encaixe da tubulação retilínea do provador com a curva (também conhecido como bolsa) e que no caso específico formam quatro

trechos. O comprimento do trecho efetivamente em curva é dado pelo perímetro de uma semicircunferência. Há ainda a considerar um trecho entre as duas curvas soldadas (6 mm) ocasionado durante a operação de soldagem a frio. Então o comprimento do trecho em curva pode ser dado pela expressão:

$$TC(mm) = [4 \times (A - R) + \pi R + 6] \quad (D-1)$$

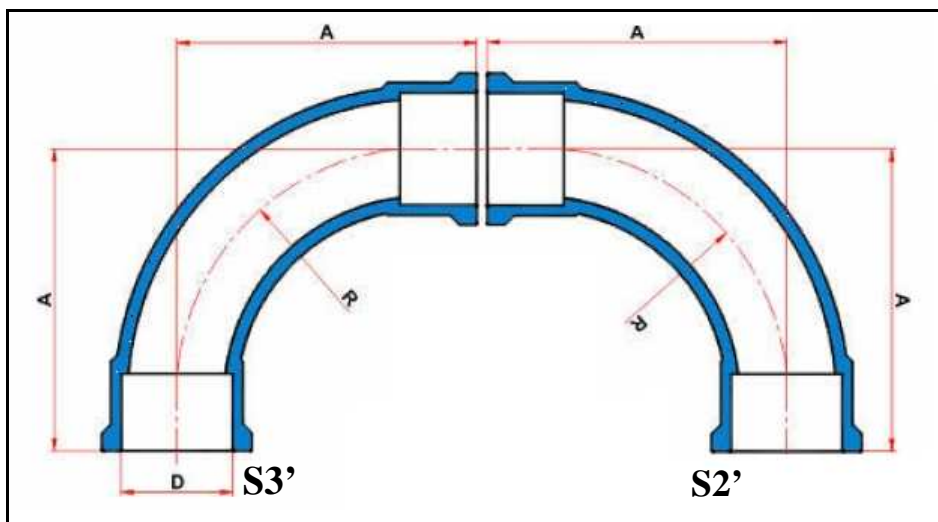


Figura D-1 - Croqui básico da curva

Fonte: [www.tigre.com.br](http://www.tigre.com.br)

Portanto o trecho em curva TC é igual a 0,51309 m ou 513,09 mm.

### ➤ Levantamento dimensional do diâmetro da tubulação:

Tabela D-2 - Levantamento dimensional executado – Diâmetro

| Temperatura: 30°C        | AMOSTRAGEM (n=10) |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--------------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| LEVANTAMENTO DIMENSIONAL | 1                 | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       |
| Diâmetro interno (mm)    | 53,05             | 53,00    | 53,00    | 53,00    | 53,00    | 53,00    | 52,95    | 53,05    | 53,05    | 53,05    |
| Área (m <sup>2</sup> )   | 0,002210          | 0,002206 | 0,002206 | 0,002206 | 0,002206 | 0,002206 | 0,002202 | 0,002210 | 0,002210 | 0,002210 |

### Estimativa das Grandezas de Entrada e Expressão da Incerteza:

A estimativa das grandezas de entrada ( $x_i$ ) que melhor representa as grandezas independentes levantadas aleatoriamente ( $X_i$ ) é a média aritmética

das  $n$  observações, fornecida pela Equação (3) e a incerteza padrão a raiz quadrada da Equação (5).

Desta maneira, a estimativa de  $x_i$  e a expressão de incerteza dos trechos S1-S2, S3-S4 e do diâmetro da tubulação interna são obtidas diretamente das medições levantadas conforme metodologia para Avaliação da incerteza padrão do tipo A.

A estimativa da grandeza de entrada no trecho S2-S3 é a soma das médias de seus subtrechos e a expressão da incerteza é obtida através da Equação (14) na qual os trechos independentes S2-S2', S3-S3' somam-se com o trecho em curva. Este último, fornecido pelo fabricante, é adotado como tendo uma incerteza desprezível, porém mesmo que seja mínima, a incerteza neste trecho não deixa de existir.

De modo semelhante, a estimativa da grandeza de entrada no trecho total S1-S4 é a soma das médias que representam os trechos S1-S2, S2-S3 e S3-S4 e a incerteza relatada será a incerteza combinada dos trechos também fornecida pela Equação (14).

A expressão da incerteza da área do provador e do volume do provador se propaga através da Equação (15) por serem operações de multiplicação.

A tabela a seguir resume a análise estatística dos resultados apurados, considerando nove graus de liberdade ( $\nu_i = 9$ ):

Tabela D-3 - Análise Estatística

| <b>ANÁLISE ESTATÍSTICA</b> ( $v_i = 9$ ) |  |                 |                             |                        |
|--|--|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| TRECHO                                   | Estimativa da grandeza de entrada ( $x_i$ )                                      | Média ( $x_i$ ) | Incerteza Absoluta $u(x_i)$ | Incerteza Relativa (%) |
| <b>S1-S2</b>                             | $= \frac{\sum_{n=1}^{n=10} S1-S2}{n}$  | 2,997           | 0,00018                     | 0,00006                |
| <b>S2-S3</b>                             | $= \frac{\sum_{n=1}^{n=10} S2-S2'}{n} + TC + \frac{\sum_{n=1}^{n=10} S3-S3'}{n}$ | 2,999           | 0,00023                     | 0,00008                |
| <b>S3-S4</b>                             | $= \frac{\sum_{n=1}^{n=10} S3-S4}{n}$  | 2,998           | 0,00016                     | 0,00005                |
| <b>S1-S4</b>                             | $= \frac{\sum_{n=1}^{n=10} S1-S4}{n}$  | 8,993           | 0,00033                     | 0,00004                |
| <b>Área</b>                              | $= \frac{\sum_{n=1}^{n=10} \text{Área}}{n}$                                      | 0,002207        | 0,000002                    | 0,0009                 |

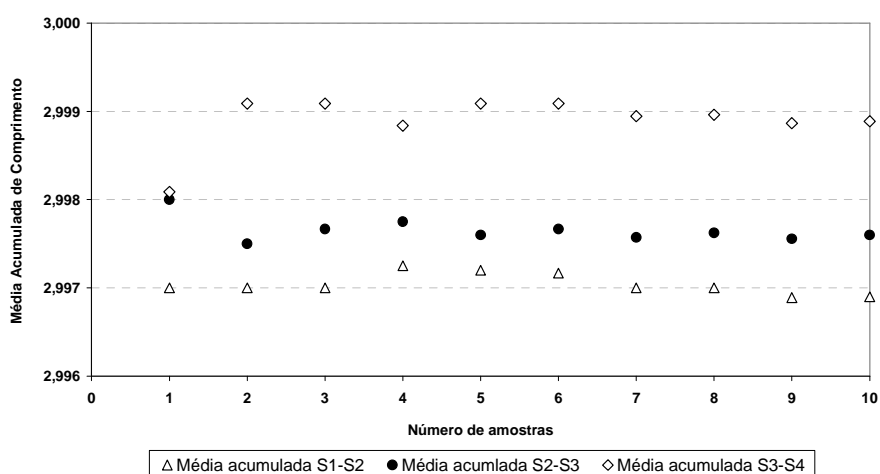


Figura D-2 - Média Acumulada dos sub-trechos



---

### Conclusões e Observações:

Da tabela D-3, podem-se observar as diferentes incertezas obtidas em cada trecho. A menor incerteza relativa é a do trecho S1-S4, como era de se esperar por ter maior comprimento que os demais. Nos subtrechos de S1-S4, a incerteza relativa pode ser classificada, na seguinte forma em ordem crescente: S3-S4, S1-S2, S2-S3.

No entanto, não faz sentido relatar a incerteza com inúmeros algarismos significativos se as limitações dos instrumentos se fazem com 4 algarismos significativos, neste caso. Dessa forma, segundo Ribeiro (2009), a incerteza para os trechos de comprimento deve variar entre 0,01 a 0,1% e de 0,0001 a 0,001% para a área da seção transversal da tubulação.

Portanto, o volume base do provador será dado pela Equação (D-2) e a incerteza combinada do volume do provador será expressa de acordo com a limitação do instrumento de medição de comprimento, e assim sendo, a incerteza relativa é nula quando respeitados os algarismos significativos. Na Tabela D-4, a incerteza relativa é expressa com seis casas decimais exclusivamente para avaliar a magnitude das incertezas nos trechos.

$$Vb = \text{Área} * \text{Comprimento} \quad (\text{D-2})$$

Tabela D-4 - Volumes Base e Expressão da Incerteza

| TRECHO                 | VOLUME<br>(Litros) | Incerteza<br>Absoluta<br>(u) | Incerteza<br>Relativa<br>(%) |
|------------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>Vb<sub>14</sub></b> | 19,85              | 0,02                         | 0,000901                     |
| <b>Vb<sub>12</sub></b> | 6,62               | 0,01                         | 0,000902                     |
| <b>Vb<sub>23</sub></b> | 6,62               | 0,01                         | 0,000904                     |
| <b>Vb<sub>34</sub></b> | 6,62               | 0,01                         | 0,000902                     |

# APÊNDICE E

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO “BALL PROVER”

○ TABELA E.1: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 1-4) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÁXIMO DO SISTEMA ( $U_f = 19$ )

| SENTIDO                              | ESFERA | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER  |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  | TURBINA          |                |                  |                  |          | COMPARATIVO (l/s) |                 |                  |  |   |                                    |
|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------------|---------|----------------------------|--------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|----------|-------------------|-----------------|------------------|--|---|------------------------------------|
|                                      |        |                                     | Anti-Horário | 1       | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                    |                    |                  | VOLUMES (litros) |                |                  | DADOS BRUTOS     |          | INTERPOLAÇÃO      |                 | FATOR k PROPOSTO | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= V <sub>M</sub> / t] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / (K <sub>tab</sub> · t)] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= Indicativa] |
|                                      |        |                                     |              |         |                            |              | C <sub>twd</sub>    | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub> | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>pip</sub> | C <sub>ti</sub>  | V <sub>M</sub> | V <sub>Mst</sub> | V <sub>b,c</sub> | PULSOS   | TEMPO (seg.)      | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO       |  |   |                                    |
| CICLO                                | TRECHO | MEDIDA (°C)                         |              |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  |                |                  |                  |          |                   |                 |                  |  |   |                                    |
| 1                                    | 14     | 29                                  | 60,19        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 10069          | 60,18            | 10069,28         | 10069,04 | 507,34            | 508,80          | 0,330            | 0,334  | 0,425   |                                    |
| 2                                    | 14     | 30                                  | 60,32        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 19,85              | 19,78            | 19,79            | 10046          | 60,32            | 10046,48         | 10046,28 | 506,08            | 507,55          | 0,329            | 0,333  | 0,384   |                                    |
| 3                                    | 14     | 29                                  | 60,29        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 10060          | 60,29            | 10060,35         | 10060,35 | 506,89            | 508,37          | 0,329            | 0,333  | 0,354   |                                    |
| 4                                    | 14     | 29                                  | 60,48        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 10016          | 60,47            | 10016,37         | 10016,41 | 504,67            | 506,15          | 0,328            | 0,331  | 0,329   |                                    |
| 5                                    | 14     | 29                                  | 60,27        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 9997           | 60,27            | 9997,24          | 9997,14  | 503,71            | 505,17          | 0,329            | 0,331  | 0,243   |                                    |
| 6                                    | 14     | 29                                  | 60,37        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 10026          | 60,37            | 10026,51         | 10026,22 | 505,18            | 506,64          | 0,329            | 0,332  | 0,328   |                                    |
| 7                                    | 14     | 29                                  | 60,37        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 10022          | 60,36            | 10023,12         | 10022,73 | 505,01            | 506,46          | 0,329            | 0,332  | 0,244   |                                    |
| 8                                    | 14     | 29                                  | 60,13        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 10051          | 60,12            | 10052,10         | 10051,94 | 506,47            | 507,94          | 0,330            | 0,334  | 0,284   |                                    |
| 9                                    | 14     | 29                                  | 60,15        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 10014          | 60,15            | 10014,48         | 10014,12 | 504,58            | 506,03          | 0,330            | 0,333  | 0,269   |                                    |
| 10                                   | 14     | 29                                  | 60,26        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 10004          | 60,26            | 10004,80         | 10004,64 | 504,09            | 505,55          | 0,329            | 0,332  | 0,325   |                                    |
| 11                                   | 14     | 29                                  | 60,41        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 10049          | 60,41            | 10049,65         | 10049,18 | 506,35            | 507,80          | 0,329            | 0,332  | 0,367   |                                    |
| 12                                   | 14     | 29                                  | 60,34        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 10078          | 60,34            | 10079,01         | 10078,55 | 507,83            | 509,29          | 0,329            | 0,334  | 0,294   |                                    |
| 13                                   | 14     | 30                                  | 60,47        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 19,85              | 19,78            | 19,79            | 9739           | 60,47            | 9739,82          | 9739,64  | 490,63            | 492,06          | 0,328            | 0,322  | 0,369   |                                    |
| 14                                   | 14     | 29                                  | 60,30        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 9771           | 60,30            | 9771,66          | 9771,36  | 492,34            | 493,76          | 0,329            | 0,324  | 0,314   |                                    |
| 15                                   | 14     | 30                                  | 60,29        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 19,85              | 19,78            | 19,79            | 9864           | 60,28            | 9864,78          | 9864,55  | 496,93            | 498,37          | 0,329            | 0,327  | 0,273   |                                    |
| 16                                   | 14     | 30                                  | 60,17        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 19,85              | 19,78            | 19,79            | 9783           | 60,17            | 9783,58          | 9783,29  | 492,84            | 494,26          | 0,330            | 0,325  | 0,281   |                                    |
| 17                                   | 14     | 30                                  | 60,20        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 19,85              | 19,78            | 19,79            | 9777           | 60,19            | 9777,45          | 9777,05  | 492,53            | 493,95          | 0,330            | 0,325  | 0,316   |                                    |
| 18                                   | 14     | 30                                  | 60,21        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 19,85              | 19,78            | 19,79            | 9681           | 60,20            | 9681,96          | 9681,71  | 487,72            | 489,13          | 0,330            | 0,321  | 0,366   |                                    |
| 19                                   | 14     | 29                                  | 60,16        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 9431           | 60,15            | 9432,34          | 9431,93  | 475,24            | 476,61          | 0,330            | 0,313  | 0,265   |                                    |
| 20                                   | 14     | 29                                  | 60,14        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 19,85              | 19,79            | 19,78            | 9382           | 60,13            | 9382,57          | 9382,18  | 472,74            | 474,10          | 0,330            | 0,312  | 0,269   |                                    |
| <b>μ</b>                             |        |                                     | 60,28        |         |                            |              |                     |                    |                    | 19,85              | 19,79            | 19,79            | 9893           | 60,27            | 9893,68          | 9893,42  | 498,46            | 499,90          | 0,329359         | 0,328012                                       | 0,315042  |                                    |
| <b>u (x<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b> |        |                                     | 0,0006       |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  | 2204           | 0,0006           | 2202,02          | 2202,97  | 5,60              | 5,64            | 0,0000           | 0,0000   | 0,0001  |                                    |
| <b>u (x<sub>i</sub>)</b>             |        |                                     | 0,0242       |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  | 47             | 0,0243           | 46,93            | 46,94    | 2,37              | 2,37            | 0,0001           | 0,0015   | 0,0113  |                                    |

### RESULTADOS

| Mensurando (l/s) |              | Absoluta (l/s)                        |        | Relativa (%) | y ± U        |   | Nível de Confiança |                    | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |          |
|------------------|--------------|---------------------------------------|--------|--------------|--------------|---|--------------------|--------------------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| (y)              | <b>0,329</b> | Incerteza Combinada (u <sub>c</sub> ) | 0,0003 | 0,001        | <b>0,329</b> | ± | <b>0,00</b>        | 99%                | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |
|                  |              | Incerteza Expandida (U)               | 0,001  | 0,00         |              |   |                    | k <sub>p</sub> = 3 | 0,41%                           | 4,54%      | 498,46                | 499,90             | 1,004105 |

○ TABELA E.2: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 4-1) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÁXIMO DO SISTEMA ( $v_I = 17$ )

| SENTIDO    |    | ESFERA                     | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER  |                     |            |            |            |           |                  | TURBINA |           |              |        |              |                 | COMPARATIVO (l/s) |                 |  |  |                                   |            |        |
|------------|----|----------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------------|------------|------------|------------|-----------|------------------|---------|-----------|--------------|--------|--------------|-----------------|-------------------|-----------------|--|--|-----------------------------------|------------|--------|
| Horário    | 1  | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C | MEDIDA (°C)                         | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |            |            |            |           | VOLUMES (litros) |         |           | DADOS BRUTOS |        | INTERPOLAÇÃO |                 | FATOR k PROPOSTO  |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / ( $k_{tab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA TURBINA<br>[=Indicativa] |            |        |
|            |    |                            |                                     |              | $C_{hd}$            | $C_{pvcm}$ | $C_{pvcp}$ | $C_{ppvc}$ | $C_{plp}$ | $C_{dl}$         | $V_M$   | $V_{Met}$ | $V_{bc}$     | PULSOS | TEMPO (seg.) | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO        | DOUBLE - TIMING |  |  |                                   | PROCESSADO |        |
| 1          | 41 | 29                         | 60,11                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10051        | 60,10  | 10051,71     | 10051,77        | 506,45            | 507,93          | 0,330                                  | 0,334  | 0,359                             |            |        |
| 2          | 41 | 30                         | 60,07                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99654   | 19,85            | 19,78   | 19,79     | 10062        | 60,06  | 10063,28     | 10062,90        | 506,93            | 508,39          | 0,331                                  | 0,335  | 0,340                             |            |        |
| 3          | 41 | 29                         | 60,39                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10015        | 60,39  | 10015,22     | 10015,05        | 504,61            | 506,08          | 0,329                                  | 0,331  | 0,238                             |            |        |
| 4          | 41 | 29                         | 60,13                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10009        | 60,13  | 10009,79     | 10009,78        | 504,34            | 505,81          | 0,330                                  | 0,333  | 0,308                             |            |        |
| 5          | 41 | 29                         | 60,08                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10055        | 60,08  | 10055,31     | 10055,18        | 506,63            | 508,10          | 0,330                                  | 0,334  | 0,233                             |            |        |
| 6          | 41 | 29                         | 60,15                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10026        | 60,15  | 10026,18     | 10026,05        | 505,17            | 506,63          | 0,330                                  | 0,333  | 0,295                             |            |        |
| 7          | 41 | 29                         | 61,89                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10350        | 61,89  | 10350,51     | 10350,07        | 521,51            | 523,01          | 0,321                                  | 0,334  | 0,291                             |            |        |
| 8          | 41 | 29                         | 60,26                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10058        | 60,26  | 10058,86     | 10058,55        | 506,81            | 508,27          | 0,329                                  | 0,334  | 0,389                             |            |        |
| 9          | 41 | 29                         | 60,54                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10012        | 60,54  | 10012,30     | 10012,26        | 504,47            | 505,94          | 0,328                                  | 0,331  | 0,316                             |            |        |
| 10         | 41 | 29                         | 60,58                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10077        | 60,58  | 10077,57     | 10077,39        | 507,75            | 509,23          | 0,328                                  | 0,332  | 0,337                             |            |        |
| 11         | 41 | 29                         | 62,49                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10433        | 62,49  | 10433,68     | 10433,61        | 525,70            | 527,23          | 0,318                                  | 0,334  | 0,421                             |            |        |
| 12         | 41 | 29                         | 60,35                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 10074        | 60,34  | 10074,66     | 10074,69        | 507,61            | 509,09          | 0,329                                  | 0,334  | 0,259                             |            |        |
| 13         | 41 | 30                         | 60,36                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99654   | 19,85            | 19,78   | 19,79     | 9755         | 60,35  | 9755,25      | 9755,05         | 491,41            | 492,84          | 0,329                                  | 0,323  | 0,342                             |            |        |
| 14         | 41 | 29                         | 60,20                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 9775         | 60,20  | 9775,05      | 9775,66         | 492,56            | 493,98          | 0,330                                  | 0,324  | 0,281                             |            |        |
| 15         | 41 | 30                         | 60,43                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99654   | 19,85            | 19,78   | 19,79     | 9819         | 60,42  | 9819,49      | 9819,08         | 494,65            | 496,07          | 0,329                                  | 0,325  | 0,271                             |            |        |
| 16         | 41 | 30                         | 60,30                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99654   | 19,85            | 19,78   | 19,79     | 9807         | 60,29  | 9807,72      | 9807,55         | 494,05            | 495,49          | 0,329                                  | 0,325  | 0,292                             |            |        |
| 17         | 41 | 30                         | 60,19                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99654   | 19,85            | 19,78   | 19,79     | 9755         | 60,18  | 9756,21      | 9755,98         | 491,46            | 492,88          | 0,330                                  | 0,324  | 0,332                             |            |        |
| 18         | 41 | 30                         | 60,31                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99654   | 19,85            | 19,78   | 19,79     | 9441         | 60,31  | 9441,35      | 9441,05         | 475,60            | 476,97          | 0,329                                  | 0,313  | 0,278                             |            |        |
| 19         | 41 | 29                         | 60,00                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 9400         | 60,00  | 9400,81      | 9400,62         | 473,66            | 475,03          | 0,331                                  | 0,313  | 0,343                             |            |        |
| 20         | 41 | 29                         | 60,48                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294    | 1,00025    | 1,00002    | 0,99684   | 19,85            | 19,79   | 19,78     | 9404         | 60,48  | 9405,07      | 9404,95         | 473,87            | 475,25          | 0,328                                  | 0,311  | 0,278                             |            |        |
| $\mu$      |    |                            |                                     | 60,27        |                     |            |            |            |           |                  |         | 19,85     | 19,79        | 19,79  | 9866         | 60,2699         | 9867,05           | 9866,86         | 497,11                                 | 498,55   | 0,329                             | 0,327      | 0,305  |
| $u(x_i)^2$ |    |                            |                                     | 0,0016       |                     |            |            |            |           |                  |         |           |              |        | 3178         | 0,0016          | 3176,11           | 3177,08         | 8,08                                   | 8,13   | 0,0000                            | 0,0000     | 0,0001 |
| $u(x_i)$   |    |                            |                                     | 0,0400       |                     |            |            |            |           |                  |         |           |              |        | 56           | 0,0401          | 56,36             | 56,37           | 2,84                                   | 2,85   | 0,0002                            | 0,0019     | 0,0101 |

| RESULTADOS       |       |                               |        |              |           |        |                    |                                 |            |                       |                    |          |
|------------------|-------|-------------------------------|--------|--------------|-----------|--------|--------------------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| Mensurando (l/s) |       | Absoluta (l/s)                |        | Relativa (%) | $y \pm U$ |        | Nível de Confiança | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |          |
| (y)              | 0,329 | Incerteza Combinada ( $u_c$ ) | 0,0004 | 0,001        | 0,329     | ± 0,00 | 99%                | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |
|                  |       | Incerteza Expandida (U)       | 0,001  | 0,00         |           |        | $k_p = 3$          | 0,68%                           | 8,01%      | 497,11                | 498,55             | 1,006793 |

○ TABELA E.3: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 1-2) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÁXIMO DO SISTEMA ( $U_T = 17$ )

| SENTIDO                              | ESFERA | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER  |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  | TURBINA          |                |                  |                 |         | COMPARATIVO (l/s) |                 |                  |                 |  |   |                                   |
|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------------|---------|----------------------------|--------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|---------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|--|---|-----------------------------------|
|                                      |        |                                     | Anti-Horário | 1       | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                    |                    |                  | VOLUMES (litros) |                |                  | DADOS BRUTOS    |         | INTERPOLAÇÃO      |                 | FATOR K PROPOSTO |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= V <sub>M</sub> / t] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / (K <sub>tab</sub> * t)] | VAZÃO NA TURBINA<br>[=Indicativa] |
|                                      |        |                                     |              |         |                            |              | C <sub>twd</sub>    | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub> | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub> | C <sub>tl</sub>  | V <sub>M</sub> | V <sub>Met</sub> | V <sub>bC</sub> | PULSOS  | TEMPO (seg.)      | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO       | DOUBLE - TIMING |  |   |                                   |
| 1                                    | 12     | 29                                  | 20,07        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3365           | 20,07            | 3365,20         | 3365,02 | 508,82            | 510,27          | 0,330            | 0,335           | 0,351  |   |                                   |
| 2                                    | 12     | 30                                  | 20,10        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3353           | 20,10            | 3353,77         | 3353,25 | 506,98            | 508,38          | 0,329            | 0,333           | 0,316  |   |                                   |
| 3                                    | 12     | 29                                  | 20,14        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3360           | 20,14            | 3360,70         | 3360,32 | 508,13            | 509,56          | 0,328            | 0,333           | 0,345  |   |                                   |
| 4                                    | 12     | 29                                  | 20,19        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3345           | 20,19            | 3345,37         | 3345,39 | 505,82            | 507,30          | 0,328            | 0,331           | 0,398  |   |                                   |
| 5                                    | 12     | 29                                  | 20,22        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3343           | 20,22            | 3343,24         | 3343,11 | 505,49            | 506,95          | 0,327            | 0,330           | 0,380  |   |                                   |
| 6                                    | 12     | 29                                  | 20,30        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3356           | 20,29            | 3356,76         | 3356,19 | 507,54            | 508,93          | 0,326            | 0,330           | 0,334  |   |                                   |
| 7                                    | 12     | 29                                  | 20,13        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3349           | 20,13            | 3349,28         | 3349,21 | 506,41            | 507,87          | 0,329            | 0,333           | 0,333  |   |                                   |
| 8                                    | 12     | 29                                  | 20,09        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3356           | 20,09            | 3356,98         | 3356,91 | 507,57            | 509,04          | 0,329            | 0,334           | 0,357  |   |                                   |
| 9                                    | 12     | 29                                  | 20,09        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3346           | 20,09            | 3346,50         | 3346,09 | 505,99            | 507,40          | 0,329            | 0,333           | 0,332  |   |                                   |
| 10                                   | 12     | 29                                  | 20,14        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3345           | 20,13            | 3345,30         | 3345,12 | 505,81            | 507,25          | 0,329            | 0,332           | 0,298  |   |                                   |
| 11                                   | 12     | 29                                  | 20,15        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3353           | 20,15            | 3353,63         | 3353,16 | 507,07            | 508,47          | 0,328            | 0,333           | 0,326  |   |                                   |
| 12                                   | 12     | 29                                  | 20,26        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3370           | 20,25            | 3370,91         | 3370,52 | 509,68            | 511,11          | 0,327            | 0,332           | 0,278  |   |                                   |
| 13                                   | 12     | 30                                  | 20,33        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3254           | 20,32            | 3254,97         | 3254,62 | 492,05            | 493,43          | 0,325            | 0,320           | 0,324  |   |                                   |
| 14                                   | 12     | 29                                  | 20,13        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3265           | 20,12            | 3266,01         | 3265,84 | 493,82            | 495,23          | 0,329            | 0,324           | 0,284  |   |                                   |
| 15                                   | 12     | 30                                  | 20,12        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3298           | 20,12            | 3298,18         | 3298,02 | 498,58            | 500,01          | 0,329            | 0,328           | 0,288  |   |                                   |
| 16                                   | 12     | 30                                  | 20,11        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3272           | 20,11            | 3272,39         | 3272,27 | 494,68            | 496,10          | 0,329            | 0,325           | 0,269  |   |                                   |
| 17                                   | 12     | 30                                  | 20,11        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3271           | 20,11            | 3271,09         | 3271,02 | 494,48            | 495,91          | 0,329            | 0,325           | 0,281  |   |                                   |
| 18                                   | 12     | 30                                  | 20,12        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3255           | 20,12            | 3255,40         | 3255,18 | 492,11            | 493,51          | 0,329            | 0,323           | 0,306  |   |                                   |
| 19                                   | 12     | 29                                  | 20,11        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3152           | 20,10            | 3153,37         | 3152,90 | 476,79            | 478,11          | 0,329            | 0,313           | 0,326  |   |                                   |
| 20                                   | 12     | 29                                  | 20,10        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3135           | 20,10            | 3135,21         | 3135,15 | 474,04            | 475,41          | 0,329            | 0,312           | 0,281  |   |                                   |
| <b>μ</b>                             |        |                                     | 20,13        |         |                            |              |                     |                    |                    | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3307           | 20,13            | 3307,92         | 3307,69 | 500,13            | 501,55          | 0,329            | 0,328           | 0,319  |   |                                   |
| <b>u (x<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b> |        |                                     | 0,0001       |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  | 278            | 0,0001           | 277,19          | 277,05  | 6,35              | 6,38            | 0,0000           | 0,0000          | 0,0001   |   |                                   |
| <b>u (x<sub>i</sub>)</b>             |        |                                     | 0,0112       |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  | 17             | 0,0112           | 16,65           | 16,64   | 2,52              | 2,53            | 0,0002           | 0,0016          | 0,0087   |   |                                   |

**RESULTADOS**

| Mensurando (l/s) |              | Absoluta (l/s)                        |        | Relativa (%) | y ± U               | Nível de Confiança | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |          |
|------------------|--------------|---------------------------------------|--------|--------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| (y)              | <b>0,329</b> | Incerteza Combinada (u <sub>c</sub> ) | 0,0003 | 0,001        | <b>0,329 ± 0,00</b> | 99%                | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |
|                  |              | Incerteza Expandida (U)               | 0,001  | 0,00         |                     | k <sub>p</sub> = 3 | 0,08%                           | 2,89%      | 500,13                | 501,55             | 1,000806 |

○ TABELA E.4: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 2-1) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÁXIMO DO SISTEMA ( $v_I=17$ )

| SENTIDO                              |    | ESFERA | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                               |              |                     |                    |                    |                    | TURBINA          |                  |                |                  |                 |         | COMPARATIVO (l/s) |                 |                  |                 |  |   |                                   |
|--------------------------------------|----|--------|-------------------------------------|---|--------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|---------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|--|---|-----------------------------------|
| Horário                              | 1  | CICLO  | TRECHO                              | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C<br>MEDIDA (°C) | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                    |                    |                  | VOLUMES (litros) |                |                  | DADOS BRUTOS    |         | INTERPOLAÇÃO      |                 | FATOR k PROPOSTO |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= V <sub>M</sub> / t] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / (K <sub>tab</sub> * t)] | VAZÃO NA TURBINA<br>[=Indicativa] |
|                                      |    |        |                                     |   |              | C <sub>twd</sub>    | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub> | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub> | C <sub>tl</sub>  | V <sub>M</sub> | V <sub>Met</sub> | V <sub>bC</sub> | PULSOS  | TEMPO (seg.)      | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO       | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO                                     |   |                                   |
| 1                                    | 21 | 29     | 20,11                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3359             | 20,11           | 3358,89 | 3359,02           | 507,86          | 509,36           | 0,329           | 0,334  | 0,331   |                                   |
| 2                                    | 21 | 30     | 20,02                               | 1,00030                                   | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3359             | 20,02           | 3359,53 | 3359,51           | 507,85          | 509,33           | 0,330           | 0,335  | 0,354   |                                   |
| 3                                    | 21 | 29     | 20,07                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3339             | 20,07           | 3339,13 | 3339,01           | 504,87          | 506,33           | 0,330           | 0,333  | 0,246   |                                   |
| 4                                    | 21 | 29     | 20,09                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3341             | 20,08           | 3341,44 | 3341,51           | 505,22          | 506,71           | 0,329           | 0,332  | 0,277   |                                   |
| 5                                    | 21 | 29     | 20,06                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3360             | 20,06           | 3359,56 | 3359,53           | 507,96          | 509,44           | 0,330           | 0,335  | 0,241   |                                   |
| 6                                    | 21 | 29     | 20,09                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3349             | 20,09           | 3348,95 | 3349,02           | 506,36          | 507,85           | 0,329           | 0,333  | 0,296   |                                   |
| 7                                    | 21 | 29     | 20,65                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3457             | 20,65           | 3457,13 | 3457,01           | 522,71          | 524,22           | 0,320           | 0,335  | 0,362   |                                   |
| 8                                    | 21 | 29     | 20,22                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3366             | 20,22           | 3366,24 | 3366,01           | 508,97          | 510,42           | 0,327           | 0,333  | 0,396   |                                   |
| 9                                    | 21 | 29     | 20,19                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3342             | 20,19           | 3341,02 | 3341,52           | 505,16          | 506,71           | 0,328           | 0,331  | 0,319   |                                   |
| 10                                   | 21 | 29     | 20,20                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3367             | 20,20           | 3366,33 | 3366,53           | 508,99          | 510,50           | 0,328           | 0,333  | 0,319   |                                   |
| 11                                   | 21 | 29     | 20,81                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3484             | 20,81           | 3484,07 | 3484,52           | 526,79          | 528,39           | 0,318           | 0,335  | 0,361   |                                   |
| 12                                   | 21 | 29     | 20,28                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3371             | 20,28           | 3370,89 | 3371,01           | 509,68          | 511,18           | 0,326           | 0,332  | 0,291   |                                   |
| 13                                   | 21 | 30     | 20,08                               | 1,00030                                   | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3255             | 20,08           | 3254,54 | 3254,51           | 491,98          | 493,41           | 0,329           | 0,324  | 0,338   |                                   |
| 14                                   | 21 | 29     | 20,10                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3265             | 20,10           | 3265,83 | 3265,51           | 493,79          | 495,18           | 0,329           | 0,325  | 0,301   |                                   |
| 15                                   | 21 | 30     | 20,07                               | 1,00030                                   | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3274             | 20,07           | 3273,73 | 3273,51           | 494,88          | 496,29           | 0,330           | 0,326  | 0,306   |                                   |
| 16                                   | 21 | 30     | 20,08                               | 1,00030                                   | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3275             | 20,08           | 3274,66 | 3275,02           | 495,02          | 496,52           | 0,329           | 0,326  | 0,313   |                                   |
| 17                                   | 21 | 30     | 20,13                               | 1,00030                                   | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3258             | 20,13           | 3257,93 | 3258,02           | 492,49          | 493,94           | 0,329           | 0,323  | 0,298   |                                   |
| 18                                   | 21 | 30     | 20,06                               | 1,00030                                   | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3154             | 20,06           | 3154,05 | 3154,01           | 476,79          | 478,17           | 0,330           | 0,314  | 0,271   |                                   |
| 19                                   | 21 | 29     | 20,05                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3140             | 20,05           | 3139,72 | 3140,01           | 474,72          | 476,15           | 0,330           | 0,313  | 0,337   |                                   |
| 20                                   | 21 | 29     | 20,10                               | 1,00000                                   | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3139             | 20,10           | 3138,66 | 3139,02           | 474,56          | 476,00           | 0,329           | 0,312  | 0,273   |                                   |
| <b>μ</b>                             |    |        |                                     | 20,11                                     |              |                     |                    |                    |                    | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3295             | 20,11           | 3295,06 | 3295,13           | 498,18          | 499,64           | 0,329           | 0,327  | 0,306   |                                   |
| <b>u (x<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b> |    |        |                                     | 0,0002                                    |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  |                | 361              | 0,0003          | 361,48  | 361,14            | 8,28            | 8,32             | 0,0000          | 0,0000   | 0,0001  |                                   |
| <b>u (x<sub>i</sub>)</b>             |    |        |                                     | 0,0158                                    |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  |                | 19               | 0,0159          | 19,01   | 19,00             | 2,88            | 2,89             | 0,0003          | 0,0018   | 0,0090  |                                   |

**RESULTADOS**

| Mensurando (l/s) |              | Absoluta (l/s)                        |        | Relativa (%) | y ± U               | Nível de Confiança | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |          |
|------------------|--------------|---------------------------------------|--------|--------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| (y)              | <b>0,329</b> | Incerteza Combinada (u <sub>c</sub> ) | 0,0004 | 0,001        | <b>0,329 ± 0,00</b> | 99%                | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |
|                  |              | Incerteza Expandida (U)               | 0,001  | 0,00         |                     | k <sub>p</sub> = 3 | 0,46%                           | 7,55%      | 498,18                | 499,64             | 1,004639 |

○ **TABELA E.5: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 2-3) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÁXIMO DO SISTEMA ( $U_T = 19$ )**

| SENTIDO    | ESFERA | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER  |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  | TURBINA          |                |                  |                 |         | COMPARATIVO (l/s) |                 |                  |                 |                                      |  |                                    |
|------------|--------|-------------------------------------|--------------|---------|----------------------------|--------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|---------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|
|            |        |                                     | Anti-Horário | 1       | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                    |                    |                  | VOLUMES (litros) |                |                  | DADOS BRUTOS    |         | INTERPOLAÇÃO      |                 | FATOR k PROPOSTO |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= $V_M/t$ ] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{lab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= Indicativa] |
|            |        |                                     |              |         |                            |              | C <sub>twd</sub>    | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub> | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub> | C <sub>ll</sub>  | V <sub>M</sub> | V <sub>Met</sub> | V <sub>bC</sub> | PULSOS  | TEMPO (seg.)      | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO       | DOUBLE - TIMING |                                      |  |                                    |
| 1          | 23     | 29                                  | 20,07        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3355           | 20,07            | 3355,05         | 3355,01 | 506,94            | 508,42          | 0,330            | 0,334           | 0,315                                |  |                                    |
| 2          | 23     | 30                                  | 20,10        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3346           | 20,09            | 3346,37         | 3346,51 | 505,53            | 507,02          | 0,329            | 0,333           | 0,303                                |  |                                    |
| 3          | 23     | 29                                  | 20,09        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3353           | 20,09            | 3353,68         | 3353,51 | 506,74            | 508,19          | 0,329            | 0,334           | 0,327                                |  |                                    |
| 4          | 23     | 29                                  | 20,17        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3339           | 20,17            | 3339,06         | 3339,01 | 504,53            | 505,99          | 0,328            | 0,331           | 0,335                                |  |                                    |
| 5          | 23     | 29                                  | 20,05        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3329           | 20,05            | 3329,06         | 3329,02 | 503,02            | 504,48          | 0,330            | 0,332           | 0,328                                |  |                                    |
| 6          | 23     | 29                                  | 20,05        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3338           | 20,05            | 3338,20         | 3338,52 | 504,40            | 505,92          | 0,330            | 0,333           | 0,322                                |  |                                    |
| 7          | 23     | 29                                  | 20,14        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3339           | 20,14            | 3339,11         | 3339,01 | 504,54            | 505,99          | 0,329            | 0,331           | 0,304                                |  |                                    |
| 8          | 23     | 29                                  | 20,04        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3353           | 20,04            | 3353,30         | 3353,02 | 506,68            | 508,12          | 0,330            | 0,334           | 0,362                                |  |                                    |
| 9          | 23     | 29                                  | 20,05        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3338           | 20,05            | 3337,82         | 3338,01 | 504,34            | 505,84          | 0,330            | 0,333           | 0,345                                |  |                                    |
| 10         | 23     | 29                                  | 20,09        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3334           | 20,09            | 3334,57         | 3334,51 | 503,85            | 505,31          | 0,329            | 0,332           | 0,302                                |  |                                    |
| 11         | 23     | 29                                  | 20,19        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3353           | 20,19            | 3353,26         | 3353,51 | 506,67            | 508,19          | 0,328            | 0,332           | 0,315                                |  |                                    |
| 12         | 23     | 29                                  | 20,06        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3359           | 20,06            | 3358,94         | 3359,02 | 507,53            | 509,02          | 0,330            | 0,335           | 0,302                                |  |                                    |
| 13         | 23     | 30                                  | 20,14        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3247           | 20,14            | 3246,69         | 3247,01 | 490,47            | 491,95          | 0,329            | 0,322           | 0,303                                |  |                                    |
| 14         | 23     | 29                                  | 20,10        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3257           | 20,10            | 3256,86         | 3257,01 | 492,11            | 493,57          | 0,329            | 0,324           | 0,310                                |  |                                    |
| 15         | 23     | 30                                  | 20,10        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3287           | 20,10            | 3287,31         | 3287,01 | 496,60            | 498,01          | 0,329            | 0,327           | 0,305                                |  |                                    |
| 16         | 23     | 30                                  | 20,06        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3260           | 20,05            | 3260,70         | 3260,51 | 492,58            | 493,99          | 0,330            | 0,325           | 0,277                                |  |                                    |
| 17         | 23     | 30                                  | 20,07        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3259           | 20,07            | 3259,09         | 3259,01 | 492,34            | 493,77          | 0,330            | 0,325           | 0,322                                |  |                                    |
| 18         | 23     | 30                                  | 20,08        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3248           | 20,08            | 3248,16         | 3248,01 | 490,69            | 492,10          | 0,330            | 0,323           | 0,267                                |  |                                    |
| 19         | 23     | 29                                  | 20,05        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3145           | 20,05            | 3145,11         | 3145,01 | 475,22            | 476,59          | 0,330            | 0,313           | 0,313                                |  |                                    |
| 20         | 23     | 29                                  | 20,04        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3127           | 20,04            | 3127,45         | 3127,51 | 472,55            | 473,94          | 0,330            | 0,312           | 0,335                                |  |                                    |
| $\mu$      |        |                                     | 20,09        |         |                            |              |                     |                    |                    | 6,62               | 6,60             | 6,60             | 3298           | 20,09            | 3298,49         | 3298,49 | 498,37            | 499,82          | 0,330            | 0,328           | 0,315                                |  |                                    |
| $u(x_i)^2$ |        |                                     | 0,0001       |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  | 236            | 0,0001           | 236,02          | 236,08  | 5,40              | 5,43            | 0,0000           | 0,0000          | 0,0000                               |  |                                    |
| $u(x_i)$   |        |                                     | 0,0097       |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  | 15             | 0,0097           | 15,36           | 15,37   | 2,32              | 2,33            | 0,0002           | 0,0015          | 0,0049                               |  |                                    |

| RESULTADOS       |              |                               |        |              |  |              |       |                    |           |                                 |            |                       |                    |          |
|------------------|--------------|-------------------------------|--------|--------------|--|--------------|-------|--------------------|-----------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| Mensurando (l/s) |              | Absoluta (l/s)                |        | Relativa (%) |  | $y \pm U$    |       | Nível de Confiança |           | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |          |
| (y)              | <b>0,330</b> | Incerteza Combinada ( $u_c$ ) | 0,0003 | 0,001        |  | <b>0,330</b> | $\pm$ | <b>0,00</b>        | 99%       | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |
|                  |              | Incerteza Expandida (U)       | 0,001  | 0,00         |  |              |       |                    | $k_p = 3$ | 0,43%                           | 4,78%      | 498,37                | 499,82             | 1,004261 |

○ TABELA E.6: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 3-2) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÁXIMO DO SISTEMA ( $v_I=17$ )

| SENTIDO                              |        | ESFERA      | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                |              |                     |                    |                  |                 |                | TURBINA          |                 |        |              |                 |              | COMPARATIVO (l/s) |                  |        |  |   |                                   |
|--------------------------------------|--------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|--------------|---------------------|--------------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|--------|--------------|-----------------|--------------|-------------------|------------------|--------|--|---|-----------------------------------|
| Horário                              | 1      |             |                                     | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                  |                 |                | VOLUMES (litros) |                 |        | DADOS BRUTOS |                 | INTERPOLAÇÃO |                   | FATOR k PROPOSTO |        | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= V <sub>M</sub> / t] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / (k <sub>tab</sub> * t)] | VAZÃO NA TURBINA<br>[=Indicativa] |
| CICLO                                | TRECHO | MEDIDA (°C) | C <sub>twd</sub>                    | C <sub>tpvcM</sub>         |              | C <sub>tpvcP</sub>  | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub> | C <sub>tl</sub> | V <sub>M</sub> | V <sub>Met</sub> | V <sub>bC</sub> | PULSOS | TEMPO (seg.) | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO   | DOUBLE - TIMING   | PROCESSADO       |        |  |   |                                   |
| 1                                    | 32     | 29          | 20,02                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3350   | 20,02        | 3350,48         | 3350,51      | 506,25            | 507,74           | 0,331  | 0,334  | 0,301   |                                   |
| 2                                    | 32     | 30          | 20,01                               | 1,00030                    | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99654         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3356   | 20,02        | 3355,59         | 3355,52      | 506,92            | 508,39           | 0,331  | 0,335  | 0,369   |                                   |
| 3                                    | 32     | 29          | 20,22                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3344   | 20,22        | 3343,82         | 3344,02      | 505,25            | 506,75           | 0,327  | 0,331  | 0,283   |                                   |
| 4                                    | 32     | 29          | 20,04                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3338   | 20,04        | 3338,00         | 3338,02      | 504,37            | 505,84           | 0,330  | 0,333  | 0,287   |                                   |
| 5                                    | 32     | 29          | 20,03                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3353   | 20,03        | 3352,60         | 3353,01      | 506,57            | 508,11           | 0,331  | 0,335  | 0,278   |                                   |
| 6                                    | 32     | 29          | 20,04                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3342   | 20,04        | 3342,06         | 3342,01      | 504,98            | 506,45           | 0,330  | 0,333  | 0,309   |                                   |
| 7                                    | 32     | 29          | 20,61                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3452   | 20,62        | 3451,20         | 3451,52      | 521,47            | 523,04           | 0,321  | 0,335  | 0,372   |                                   |
| 8                                    | 32     | 29          | 20,09                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3353   | 20,09        | 3353,42         | 3353,52      | 506,70            | 508,19           | 0,329  | 0,334  | 0,377   |                                   |
| 9                                    | 32     | 29          | 20,20                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3337   | 20,20        | 3337,09         | 3337,01      | 504,23            | 505,69           | 0,328  | 0,330  | 0,316   |                                   |
| 10                                   | 32     | 29          | 20,24                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3363   | 20,24        | 3363,22         | 3363,01      | 508,18            | 509,63           | 0,327  | 0,332  | 0,313   |                                   |
| 11                                   | 32     | 29          | 20,83                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3480   | 20,83        | 3479,71         | 3479,51      | 525,78            | 527,28           | 0,318  | 0,334  | 0,343   |                                   |
| 12                                   | 32     | 29          | 20,06                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3356   | 20,06        | 3356,04         | 3356,01      | 507,09            | 508,57           | 0,330  | 0,334  | 0,356   |                                   |
| 13                                   | 32     | 30          | 20,05                               | 1,00030                    | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99654         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3246   | 20,05        | 3246,35         | 3246,52      | 490,42            | 491,87           | 0,330  | 0,324  | 0,327   |                                   |
| 14                                   | 32     | 29          | 20,06                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3260   | 20,07        | 3259,54         | 3259,51      | 492,51            | 493,94           | 0,330  | 0,325  | 0,311   |                                   |
| 15                                   | 32     | 30          | 20,14                               | 1,00030                    | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99654         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3268   | 20,14        | 3268,48         | 3268,51      | 493,76            | 495,21           | 0,329  | 0,324  | 0,358   |                                   |
| 16                                   | 32     | 30          | 20,07                               | 1,00030                    | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99654         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3269   | 20,06        | 3269,48         | 3269,01      | 493,91            | 495,28           | 0,330  | 0,326  | 0,283   |                                   |
| 17                                   | 32     | 30          | 20,06                               | 1,00030                    | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99654         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3252   | 20,05        | 3252,66         | 3252,51      | 491,37            | 492,78           | 0,330  | 0,324  | 0,297   |                                   |
| 18                                   | 32     | 30          | 20,04                               | 1,00030                    | 1,00315      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99654         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3146   | 20,04        | 3145,78         | 3145,52      | 475,22            | 476,57           | 0,330  | 0,314  | 0,293   |                                   |
| 19                                   | 32     | 29          | 20,00                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3133   | 19,99        | 3133,54         | 3133,51      | 473,47            | 474,85           | 0,331  | 0,313  | 0,342   |                                   |
| 20                                   | 32     | 29          | 20,20                               | 1,00000                    | 1,00294      | 1,00294             | 1,00025            | 1,00002          | 0,99684         | 6,62           | 6,60             | 6,60            | 3136   | 20,19        | 3136,72         | 3136,51      | 473,95            | 475,31           | 0,328  | 0,310  | 0,259   |                                   |
| <b>μ</b>                             |        |             | 20,09                               |                            |              |                     |                    |                  |                 |                | 6,62             | 6,60            | 6,60   | 3289         | 20,09           | 3289,16      | 3289,12           | 496,95           | 498,40 | 0,330  | 0,327   | 0,314                             |
| <b>u (x<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b> |        |             | 0,0003                              |                            |              |                     |                    |                  |                 |                |                  |                 |        | 359          | 0,0003          | 358,25       | 358,90            | 8,20             | 8,26   | 0,0000   | 0,0000  | 0,0001                            |
| <b>u (x<sub>i</sub>)</b>             |        |             | 0,0180                              |                            |              |                     |                    |                  |                 |                |                  |                 |        | 19           | 0,0180          | 18,93        | 18,94             | 2,86             | 2,87   | 0,0003   | 0,0019  | 0,0080                            |

**RESULTADOS**

| Mensurando (l/s) |              | Absoluta (l/s)                        |        | Relativa (%) | y ± U               |  | Nível de Confiança | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |          |
|------------------|--------------|---------------------------------------|--------|--------------|---------------------|--|--------------------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| (y)              | <b>0,330</b> | Incerteza Combinada (u <sub>c</sub> ) | 0,0004 | 0,001        | <b>0,330 ± 0,00</b> |  | 99%                | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |
|                  |              | Incerteza Expandida (U)               | 0,001  | 0,00         |                     |  | k <sub>p</sub> = 3 | 0,71%                           | 4,85%      | 496,95                | 498,40             | 1,007118 |

○ TABELA E.7: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 3-4) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÁXIMO DO SISTEMA ( $U_l = 19$ )

| SENTIDO    | ESFERA | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER  |         |                            |              |                     |             |             |             |           | TURBINA          |       |           |              |         | COMPARATIVO (l/s) |                 |                  |                 |  |  |                                    |
|------------|--------|-------------------------------------|--------------|---------|----------------------------|--------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------------|-------|-----------|--------------|---------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|--|--|------------------------------------|
|            |        |                                     | Anti-Horário | 1       | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |             |             |             |           | VOLUMES (litros) |       |           | DADOS BRUTOS |         | INTERPOLAÇÃO      |                 | FATOR k PROPOSTO |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{lab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= Indicativa] |
|            |        |                                     |              |         |                            |              | $C_{twd}$           | $C_{tpvcM}$ | $C_{tpvcP}$ | $C_{ppvcP}$ | $C_{pip}$ | $C_{il}$         | $V_M$ | $V_{Met}$ | $V_{bc}$     | PULSOS  | TEMPO (seg.)      | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO       | DOUBLE - TIMING |  |  |                                    |
| 1          | 34     | 29                                  | 20,04        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3349  | 20,04     | 3349,02      | 3349,01 | 506,25            | 507,73          | 0,330            | 0,334           | 0,352                                  |  |                                    |
| 2          | 34     | 30                                  | 20,13        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99654     | 6,62        | 6,59      | 6,60             | 3347  | 20,13     | 3346,34      | 3346,52 | 505,74            | 507,24          | 0,329            | 0,332           | 0,337                                  |  |                                    |
| 3          | 34     | 29                                  | 20,05        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3347  | 20,06     | 3345,98      | 3346,52 | 505,79            | 507,35          | 0,330            | 0,334           | 0,332                                  |  |                                    |
| 4          | 34     | 29                                  | 20,11        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3332  | 20,11     | 3331,95      | 3332,01 | 503,67            | 505,15          | 0,329            | 0,331           | 0,301                                  |  |                                    |
| 5          | 34     | 29                                  | 20,00        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3325  | 20,00     | 3324,95      | 3325,01 | 502,61            | 504,09          | 0,331            | 0,332           | 0,260                                  |  |                                    |
| 6          | 34     | 29                                  | 20,02        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3332  | 20,02     | 3331,55      | 3331,51 | 503,61            | 505,07          | 0,331            | 0,333           | 0,319                                  |  |                                    |
| 7          | 34     | 29                                  | 20,10        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3334  | 20,10     | 3334,73      | 3334,51 | 504,09            | 505,53          | 0,329            | 0,332           | 0,260                                  |  |                                    |
| 8          | 34     | 29                                  | 19,99        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3342  | 19,99     | 3341,82      | 3342,01 | 505,16            | 506,66          | 0,331            | 0,334           | 0,325                                  |  |                                    |
| 9          | 34     | 29                                  | 20,02        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3330  | 20,02     | 3330,17      | 3330,02 | 503,40            | 504,85          | 0,331            | 0,332           | 0,314                                  |  |                                    |
| 10         | 34     | 29                                  | 20,03        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3325  | 20,03     | 3324,93      | 3325,01 | 502,61            | 504,09          | 0,330            | 0,332           | 0,315                                  |  |                                    |
| 11         | 34     | 29                                  | 20,07        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3343  | 20,07     | 3342,76      | 3342,51 | 505,30            | 506,74          | 0,330            | 0,333           | 0,336                                  |  |                                    |
| 12         | 34     | 29                                  | 20,02        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3349  | 20,02     | 3349,16      | 3349,01 | 506,27            | 507,73          | 0,330            | 0,334           | 0,310                                  |  |                                    |
| 13         | 34     | 30                                  | 20,01        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99654     | 6,62        | 6,59      | 6,60             | 3238  | 20,00     | 3238,16      | 3238,01 | 489,39            | 490,79          | 0,331            | 0,323           | 0,325                                  |  |                                    |
| 14         | 34     | 29                                  | 20,08        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3249  | 20,08     | 3248,79      | 3248,51 | 491,10            | 492,49          | 0,330            | 0,323           | 0,324                                  |  |                                    |
| 15         | 34     | 30                                  | 20,07        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99654     | 6,62        | 6,59      | 6,60             | 3279  | 20,07     | 3279,29      | 3279,52 | 495,61            | 497,09          | 0,330            | 0,327           | 0,297                                  |  |                                    |
| 16         | 34     | 30                                  | 20,00        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99654     | 6,62        | 6,59      | 6,60             | 3251  | 20,00     | 3250,50      | 3250,51 | 491,25            | 492,69          | 0,331            | 0,325           | 0,283                                  |  |                                    |
| 17         | 34     | 30                                  | 20,02        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99654     | 6,62        | 6,59      | 6,60             | 3247  | 20,02     | 3247,27      | 3247,02 | 490,77            | 492,16          | 0,330            | 0,324           | 0,339                                  |  |                                    |
| 18         | 34     | 30                                  | 20,00        | 1,00030 | 1,00315                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99654     | 6,62        | 6,59      | 6,60             | 3178  | 20,00     | 3178,40      | 3178,52 | 480,36            | 481,78          | 0,331            | 0,318           | 0,297                                  |  |                                    |
| 19         | 34     | 29                                  | 19,99        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3134  | 19,99     | 3133,86      | 3134,02 | 473,73            | 475,13          | 0,331            | 0,313           | 0,283                                  |  |                                    |
| 20         | 34     | 29                                  | 20,00        | 1,00000 | 1,00294                    | 1,00294      | 1,00025             | 1,00002     | 0,99684     | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3120  | 20,00     | 3119,91      | 3119,52 | 471,62            | 472,93          | 0,331            | 0,312           | 0,329                                  |  |                                    |
| $\mu$      |        |                                     | 20,04        |         |                            |              |                     |             |             | 6,62        | 6,60      | 6,59             | 3288  | 20,04     | 3287,48      | 3287,46 | 496,92            | 498,36          | 0,330            | 0,328           | 0,312                                  |  |                                    |
| $u(x_i)^2$ |        |                                     | 0,0001       |         |                            |              |                     |             |             |             |           |                  | 268   | 0,0001    | 267,95       | 268,34  | 6,14              | 6,18            | 0,0000           | 0,0000          | 0,0000                                 |  |                                    |
| $u(x_i)$   |        |                                     | 0,0094       |         |                            |              |                     |             |             |             |           |                  | 16    | 0,0094    | 16,37        | 16,38   | 2,48              | 2,49            | 0,0002           | 0,0016          | 0,0057                                 |  |                                    |

**RESULTADOS**

| Mensurando (l/s) |              | Absoluta (l/s)                |        | Relativa (%) | $y \pm U$           | Nível de Confiança | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |          |
|------------------|--------------|-------------------------------|--------|--------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| (y)              | <b>0,330</b> | Incerteza Combinada ( $u_c$ ) | 0,0003 | 0,001        | <b>0,330 ± 0,00</b> | 99%                | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |
|                  |              | Incerteza Expandida (U)       | 0,001  | 0,00         |                     | $k_p = 3$          | 0,72%                           | 5,89%      | 496,92                | 498,36             | 1,007205 |



○ TABELA E.8: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 4-3) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÁXIMO DO SISTEMA ( $v_I=17$ )

| SENTIDO                              |              | ESFERA                                | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER  |                     |                    |                    |                    |                    |                                 | TURBINA        |                       |                    |          |              |                 | COMPARATIVO (l/s) |                 |  |   |                                   |
|--------------------------------------|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|----------------|-----------------------|--------------------|----------|--------------|-----------------|-------------------|-----------------|--|---|-----------------------------------|
| Horário                              | 1            | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C            | MEDIDA (°C)                         | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                    |                    |                    | VOLUMES (litros)                |                |                       | DADOS BRUTOS       |          | INTERPOLAÇÃO |                 | FATOR k PROPOSTO  |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= V <sub>M</sub> / t] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / (k <sub>tab</sub> * t)] | VAZÃO NA TURBINA<br>[=Indicativa] |
|                                      |              |                                       |                                     |              | C <sub>twd</sub>    | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub> | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub>   | C <sub>tl</sub>                 | V <sub>M</sub> | V <sub>Met</sub>      | V <sub>bC</sub>    | PULSOS   | TEMPO (seg.) | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO        | DOUBLE - TIMING |  |   |                                   |
| 1                                    | 43           | 29                                    | 19,97                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3342               | 19,97    | 3342,34      | 3342,24         | 505,24            | 506,70          | 0,331  | 0,334   | 0,300                             |
| 2                                    | 43           | 30                                    | 20,03                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59           | 6,60                  | 3347               | 20,02    | 3348,16      | 3347,87         | 506,01            | 507,45          | 0,330  | 0,334   | 0,370                             |
| 3                                    | 43           | 29                                    | 20,10                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3332               | 20,10    | 3332,28      | 3332,02         | 503,72            | 505,15          | 0,329  | 0,331   | 0,312                             |
| 4                                    | 43           | 29                                    | 20,01                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3330               | 20,01    | 3330,35      | 3330,25         | 503,43            | 504,88          | 0,331  | 0,333   | 0,328                             |
| 5                                    | 43           | 29                                    | 20,00                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3342               | 19,99    | 3343,15      | 3342,64         | 505,36            | 506,76          | 0,331  | 0,334   | 0,307                             |
| 6                                    | 43           | 29                                    | 20,02                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3335               | 20,02    | 3335,18      | 3335,02         | 504,16            | 505,60          | 0,330  | 0,333   | 0,322                             |
| 7                                    | 43           | 29                                    | 20,62                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3441               | 20,62    | 3442,19      | 3441,54         | 520,33            | 521,75          | 0,321  | 0,333   | 0,310                             |
| 8                                    | 43           | 29                                    | 19,95                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3339               | 19,95    | 3339,20      | 3339,02         | 504,77            | 506,21          | 0,332  | 0,334   | 0,351                             |
| 9                                    | 43           | 29                                    | 20,16                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3333               | 20,15    | 3334,19      | 3333,73         | 504,01            | 505,41          | 0,328  | 0,331   | 0,310                             |
| 10                                   | 43           | 29                                    | 20,15                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3347               | 20,14    | 3348,03      | 3347,85         | 506,10            | 507,55          | 0,328  | 0,332   | 0,324                             |
| 11                                   | 43           | 29                                    | 20,85                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3469               | 20,85    | 3469,90      | 3469,58         | 524,52            | 526,00          | 0,317  | 0,333   | 0,383                             |
| 12                                   | 43           | 29                                    | 20,01                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3347               | 20,01    | 3347,73      | 3347,67         | 506,05            | 507,52          | 0,331  | 0,334   | 0,389                             |
| 13                                   | 43           | 30                                    | 20,22                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59           | 6,60                  | 3254               | 20,22    | 3254,35      | 3254,02         | 491,84            | 493,22          | 0,327  | 0,322   | 0,320                             |
| 14                                   | 43           | 29                                    | 20,04                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3250               | 20,03    | 3250,68      | 3250,64         | 491,39            | 492,81          | 0,330  | 0,324   | 0,300                             |
| 15                                   | 43           | 30                                    | 20,21                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59           | 6,60                  | 3277               | 20,21    | 3277,28      | 3277,06         | 495,30            | 496,71          | 0,327  | 0,324   | 0,374                             |
| 16                                   | 43           | 30                                    | 20,15                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59           | 6,60                  | 3263               | 20,15    | 3263,57      | 3263,52         | 493,23            | 494,66          | 0,328  | 0,324   | 0,233                             |
| 17                                   | 43           | 30                                    | 20,00                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59           | 6,60                  | 3245               | 20,00    | 3245,62      | 3245,45         | 490,52            | 491,92          | 0,331  | 0,324   | 0,330                             |
| 18                                   | 43           | 30                                    | 20,21                               | 1,00030      | 1,00315             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59           | 6,60                  | 3141               | 20,20    | 3141,51      | 3141,52         | 474,78            | 476,17          | 0,327  | 0,311   | 0,322                             |
| 19                                   | 43           | 29                                    | 19,96                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3127               | 19,96    | 3127,55      | 3127,10         | 472,77            | 474,08          | 0,332  | 0,313   | 0,353                             |
| 20                                   | 43           | 29                                    | 20,19                               | 1,00000      | 1,00294             | 1,00294            | 1,00025            | 1,00002            | 0,99684            | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3129               | 20,19    | 3129,69      | 3129,42         | 473,10            | 474,43          | 0,328  | 0,310   | 0,249                             |
| <b>μ</b>                             |              |                                       |                                     | 20,08        |                     |                    |                    |                    |                    | 6,62                            | 6,60           | 6,59                  | 3282               | 20,07    | 3282,83      | 3282,61         | 496,21            | 497,63          | 0,330  | 0,327   | 0,322                             |
| <b>u (x<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b> |              |                                       |                                     | 0,0005       |                     |                    |                    |                    |                    |                                 |                | 341                   | 0,0005             | 340,96   | 340,96       | 7,81            | 7,85              | 0,0000          | 0,0000   | 0,0001  |                                   |
| <b>u (x<sub>i</sub>)</b>             |              |                                       |                                     | 0,0225       |                     |                    |                    |                    |                    |                                 |                | 18                    | 0,0225             | 18,47    | 18,47        | 2,79            | 2,80              | 0,0004          | 0,0020   | 0,0093  |                                   |
| <b>RESULTADOS</b>                    |              |                                       |                                     |              |                     |                    |                    |                    |                    |                                 |                |                       |                    |          |              |                 |                   |                 |  |   |                                   |
| Mensurando (l/s)                     |              | Absoluta (l/s)                        |                                     | Relativa (%) |                     | y ± U              |                    | Nível de Confiança |                    | Erro sistemático da Turbina (%) |                | Fatores de Correção   |                    |          |              |                 |                   |                 |  |   |                                   |
| (y)                                  | <b>0,330</b> | Incerteza Combinada (u <sub>c</sub> ) | 0,0005                              | 0,001        |                     | <b>0,330</b>       | ±                  | <b>0,00</b>        | 99%                | Contagem de pulsos              | Indicativa     | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |              |                 |                   |                 |  |   |                                   |
|                                      |              | Incerteza Expandida (U)               | 0,001                               | 0,00         |                     |                    |                    |                    | k <sub>p</sub> = 3 | 0,86%                           | 2,41%          | 496,21                | 497,63             | 1,008637 |              |                 |                   |                 |  |   |                                   |

○ TABELA E.9: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 1-4) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÉDIO DO SISTEMA ( $U_T = 11$ )

| SENTIDO     | ESFERA    | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                |              |                     |             |           |          |         | TURBINA          |          |        |              |                 |              | COMPARATIVO (l/s) |                  |        |  |  |                                    |
|-------------|-----------|-------------------------------------|----------------------------|--------------|---------------------|-------------|-----------|----------|---------|------------------|----------|--------|--------------|-----------------|--------------|-------------------|------------------|--------|--|--|------------------------------------|
|             |           |                                     | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |             |           |          |         | VOLUMES (litros) |          |        | DADOS BRUTOS |                 | INTERPOLAÇÃO |                   | FATOR K PROPOSTO |        | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{tab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= Indicativa] |
| MEDIDA (°C) | $C_{twd}$ | $C_{tpvcM}$                         |                            |              | $C_{tpvcP}$         | $C_{ppvcP}$ | $C_{plp}$ | $C_{il}$ | $V_M$   | $V_{Mst}$        | $V_{bc}$ | PULSOS | TEMPO (seg.) | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO   | DOUBLE - TIMING   | PROCESSADO       |        |  |  |                                    |
|             |           |                                     | 1                          | 14           |                     |             |           |          |         |                  |          |        |              |                 |              |                   |                  | 29     | 86,64                                  | 0,99970  | 1,00294                            |
| 2           | 14        | 29                                  | 86,86                      | 0,99970      | 1,00294             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99684 | 19,85            | 19,79    | 19,77  | 10096        | 86,86           | 10096,33     | 10096,06          | 508,85           | 510,43 | 0,229                                  | 0,232  | 0,198                              |
| 3           | 14        | 29                                  | 87,18                      | 0,99970      | 1,00294             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99684 | 19,85            | 19,79    | 19,77  | 9485         | 87,18           | 9485,51      | 9485,37           | 478,07           | 479,55 | 0,228                                  | 0,217  | 0,135                              |
| 4           | 14        | 29                                  | 86,64                      | 0,99970      | 1,00294             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99684 | 19,85            | 19,79    | 19,77  | 9918         | 86,64           | 9918,15      | 9918,12           | 499,87           | 501,43 | 0,229                                  | 0,229  | 0,166                              |
| 5           | 14        | 29                                  | 86,60                      | 0,99970      | 1,00294             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99684 | 19,85            | 19,79    | 19,77  | 9946         | 86,59           | 9947,09      | 9946,78           | 501,33           | 502,88 | 0,229                                  | 0,230  | 0,148                              |
| 6           | 14        | 29                                  | 86,87                      | 0,99970      | 1,00294             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99684 | 19,85            | 19,79    | 19,77  | 9945         | 86,86           | 9946,16      | 9945,82           | 501,28           | 502,83 | 0,229                                  | 0,229  | 0,188                              |
| 7           | 14        | 29                                  | 86,97                      | 0,99970      | 1,00294             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99684 | 19,85            | 19,79    | 19,77  | 9962         | 86,97           | 9962,45      | 9962,34           | 502,10           | 503,67 | 0,228                                  | 0,229  | 0,161                              |
| 8           | 14        | 30                                  | 86,51                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9949         | 86,50           | 9949,56      | 9949,47           | 501,35           | 502,91 | 0,229                                  | 0,230  | 0,243                              |
| 9           | 14        | 30                                  | 86,99                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9964         | 86,98           | 9964,65      | 9964,27           | 502,11           | 503,66 | 0,228                                  | 0,229  | 0,124                              |
| 10          | 14        | 30                                  | 86,75                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9947         | 86,75           | 9947,62      | 9947,25           | 501,25           | 502,80 | 0,229                                  | 0,229  | 0,127                              |
| 11          | 14        | 30                                  | 87,73                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9941         | 87,72           | 9941,75      | 9941,67           | 500,96           | 502,52 | 0,226                                  | 0,226  | 0,164                              |
| 12          | 14        | 30                                  | 87,60                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9932         | 87,59           | 9932,88      | 9932,47           | 500,51           | 502,05 | 0,227                                  | 0,227  | 0,220                              |
| 13          | 14        | 30                                  | 81,08                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9955         | 81,07           | 9955,74      | 9955,34           | 501,66           | 503,21 | 0,245                                  | 0,245  | 0,289                              |
| 14          | 14        | 30                                  | 82,42                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9941         | 82,41           | 9941,97      | 9941,56           | 500,97           | 502,51 | 0,241                                  | 0,241  | 0,191                              |
| 15          | 14        | 30                                  | 82,59                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9952         | 82,58           | 9952,58      | 9952,07           | 501,50           | 503,04 | 0,240                                  | 0,241  | 0,179                              |
| 16          | 14        | 30                                  | 82,27                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9954         | 82,27           | 9954,29      | 9954,04           | 501,59           | 503,14 | 0,241                                  | 0,242  | 0,182                              |
| 17          | 14        | 30                                  | 82,90                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9965         | 82,89           | 9965,51      | 9965,09           | 502,15           | 503,70 | 0,239                                  | 0,240  | 0,132                              |
| 18          | 14        | 30                                  | 82,45                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9942         | 82,44           | 9942,65      | 9942,61           | 501,00           | 502,57 | 0,241                                  | 0,241  | 0,258                              |
| 19          | 14        | 30                                  | 82,40                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9944         | 82,39           | 9944,42      | 9944,36           | 501,09           | 502,65 | 0,241                                  | 0,241  | 0,242                              |
| 20          | 14        | 30                                  | 83,06                      | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025   | 1,00002  | 0,99654 | 19,85            | 19,78    | 19,78  | 9964         | 83,06           | 9964,39      | 9964,16           | 502,10           | 503,66 | 0,239                                  | 0,240  | 0,256                              |
| $\mu$       |           |                                     | 86,94                      |              |                     |             |           |          |         | 19,85            | 19,79    | 19,78  | 9922         | 86,94           | 9923,10      | 9922,87           | 500,08           | 501,63 | 0,228                                  | 0,228  | 0,171                              |
| $u(x_i)^2$  |           |                                     | 0,0124                     |              |                     |             |           |          |         |                  |          |        | 1753         | 0,0124          | 1753,66      | 1752,84           | 4,45             | 4,47   | 0,0000                                 | 0,0000   | 0,0001                             |
| $u(x_i)$    |           |                                     | 0,1113                     |              |                     |             |           |          |         |                  |          |        | 42           | 0,1112          | 41,88        | 41,87             | 2,11             | 2,11   | 0,0003                                 | 0,0011   | 0,0106                             |

**RESULTADOS**

| Mensurando (l/s) |              | Absoluta            |           | Relativa (%) |       | $y \pm U$    |                   | Nível de Confiança |  | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |          |
|------------------|--------------|---------------------|-----------|--------------|-------|--------------|-------------------|--------------------|--|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| (y)              | <b>0,228</b> | Incerteza Combinada | ( $u_c$ ) | 0,0004       | 0,002 | <b>0,228</b> | $\pm$ <b>0,00</b> | 99%                |  | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |
|                  |              | Incerteza Expandida | (U)       | 0,001        | 0,00  |              |                   | $k_p = 3$          |  | 0,11%                           | 33,62%     | 500,08                | 501,63             | 1,001098 |

○ TABELA E.10: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 4-1) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÉDIO DO SISTEMA ( $U_f = 10$ )

| SENTIDO                              | ESFERA                        | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER     |                     |                    |                    |                  |                 |                |                     |                 | TURBINA |                 |                    |              |                    |                  | COMPARATIVO (l/s) |   |   |                                       |        |        |        |
|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|-----------------|----------------|---------------------|-----------------|---------|-----------------|--------------------|--------------|--------------------|------------------|-------------------|---|---|---------------------------------------|--------|--------|--------|
|                                      |                               |                                     | TEMPO<br>(seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                    |                  |                 |                | VOLUMES<br>(litros) |                 |         | DADOS BRUTOS    |                    | INTERPOLAÇÃO |                    | FATOR K PROPOSTO |                   | VAZÃO NO<br>BALL PROVER<br>[= V <sub>M</sub> / t] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= pulsos / (K <sub>tab</sub> *<br>t)] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= Indicativa] |        |        |        |
| Horário                              | TEMPERATURA<br>INICIAL: 29 °C | C <sub>twd</sub>                    |                 | C <sub>tpvcM</sub>  | C <sub>tpvcP</sub> | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub> | C <sub>il</sub> | V <sub>M</sub> | V <sub>Mst</sub>    | V <sub>bc</sub> | PULSOS  | TEMPO<br>(seg.) | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO   | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO       |                   |   |   |                                       |        |        |        |
| CICLO                                | TRECHO                        | MEDIDA (°C)                         |                 |                     |                    |                    |                  |                 |                |                     |                 |         |                 |                    |              |                    |                  |                   |   |   |                                       |        |        |        |
| 1                                    | 41                            | 29                                  | 86,99           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684        | 19,85               | 19,79           | 19,77   | 10087           | 86,99              | 10087,30     | 10087,26           | 508,40           | 509,98            | 0,228   | 0,232   | 0,287                                 |        |        |        |
| 2                                    | 41                            | 29                                  | 86,79           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684        | 19,85               | 19,79           | 19,77   | 10186           | 86,79              | 10186,64     | 10186,31           | 513,40           | 514,99            | 0,229   | 0,235   | 0,241                                 |        |        |        |
| 3                                    | 41                            | 29                                  | 86,82           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684        | 19,85               | 19,79           | 19,77   | 9399            | 86,81              | 9399,79      | 9399,38            | 473,75           | 475,21            | 0,229   | 0,216   | 0,164                                 |        |        |        |
| 4                                    | 41                            | 29                                  | 86,48           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684        | 19,85               | 19,79           | 19,77   | 9915            | 86,47              | 9915,79      | 9915,45            | 499,75           | 501,30            | 0,230   | 0,229   | 0,221                                 |        |        |        |
| 5                                    | 41                            | 29                                  | 86,47           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684        | 19,85               | 19,79           | 19,77   | 9940            | 86,47              | 9940,79      | 9940,66            | 501,01           | 502,57            | 0,230   | 0,230   | 0,203                                 |        |        |        |
| 6                                    | 41                            | 29                                  | 86,57           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684        | 19,85               | 19,79           | 19,77   | 9951            | 86,56              | 9951,85      | 9951,39            | 501,57           | 503,12            | 0,229   | 0,230   | 0,154                                 |        |        |        |
| 7                                    | 41                            | 29                                  | 86,78           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684        | 19,85               | 19,79           | 19,77   | 9953            | 86,77              | 9954,00      | 9953,87            | 501,68           | 503,24            | 0,229   | 0,229   | 0,217                                 |        |        |        |
| 8                                    | 41                            | 30                                  | 86,52           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9954            | 86,51              | 9955,38      | 9954,97            | 501,64           | 503,19            | 0,229   | 0,230   | 0,284                                 |        |        |        |
| 9                                    | 41                            | 30                                  | 87,05           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9949            | 87,04              | 9949,65      | 9949,48            | 501,35           | 502,91            | 0,228   | 0,228   | 0,143                                 |        |        |        |
| 10                                   | 41                            | 30                                  | 86,55           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9941            | 86,54              | 9941,94      | 9941,55            | 500,97           | 502,51            | 0,229   | 0,230   | 0,144                                 |        |        |        |
| 11                                   | 41                            | 30                                  | 88,05           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9950            | 88,04              | 9951,18      | 9950,70            | 501,43           | 502,98            | 0,225   | 0,226   | 0,130                                 |        |        |        |
| 12                                   | 41                            | 30                                  | 84,02           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9945            | 84,02              | 9945,44      | 9945,38            | 501,14           | 502,71            | 0,236   | 0,237   | 0,243                                 |        |        |        |
| 13                                   | 41                            | 30                                  | 82,40           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9961            | 82,40              | 9961,85      | 9961,48            | 501,97           | 503,52            | 0,241   | 0,242   | 0,117                                 |        |        |        |
| 14                                   | 41                            | 30                                  | 82,17           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9942            | 82,16              | 9942,65      | 9942,54            | 501,00           | 502,56            | 0,242   | 0,242   | 0,251                                 |        |        |        |
| 15                                   | 41                            | 30                                  | 82,29           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9948            | 82,28              | 9948,92      | 9948,96            | 501,32           | 502,89            | 0,241   | 0,242   | 0,135                                 |        |        |        |
| 16                                   | 41                            | 30                                  | 82,31           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9945            | 82,31              | 9945,41      | 9945,20            | 501,14           | 502,70            | 0,241   | 0,241   | 0,212                                 |        |        |        |
| 17                                   | 41                            | 30                                  | 82,20           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9944            | 82,19              | 9944,66      | 9944,41            | 501,10           | 502,66            | 0,242   | 0,242   | 0,131                                 |        |        |        |
| 18                                   | 41                            | 30                                  | 82,93           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9957            | 82,92              | 9957,86      | 9957,37            | 501,77           | 503,31            | 0,239   | 0,240   | 0,193                                 |        |        |        |
| 19                                   | 41                            | 30                                  | 82,72           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9957            | 82,72              | 9957,99      | 9957,92            | 501,77           | 503,34            | 0,240   | 0,241   | 0,250                                 |        |        |        |
| 20                                   | 41                            | 30                                  | 82,91           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654        | 19,85               | 19,78           | 19,78   | 9978            | 82,90              | 9978,73      | 9978,57            | 502,82           | 504,38            | 0,239   | 0,241   | 0,263                                 |        |        |        |
| <b>μ</b>                             |                               |                                     | 86,82           |                     |                    |                    |                  |                 |                |                     |                 |         | 19,85           | 19,79              | 19,78        | 9930               | 86,82            | 9930,39           | 9930,09   | 500,45  | 502,00                                | 0,229  | 0,229  | 0,199  |
| <b>u (x<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b> |                               |                                     | 0,0188          |                     |                    |                    |                  |                 |                |                     |                 |         |                 |                    |              | 3408               | 0,0187           | 3406,54           | 3408,19   | 8,65  | 8,70                                  | 0,0000 | 0,0000 | 0,0003 |
| <b>u (x<sub>i</sub>)</b>             |                               |                                     | 0,1370          |                     |                    |                    |                  |                 |                |                     |                 |         |                 |                    |              | 58                 | 0,1369           | 58,37             | 58,38   | 2,94  | 2,95                                  | 0,0004 | 0,0014 | 0,0169 |

**RESULTADOS**

| Mensurando (l/s) |              | Absoluta                              |        | Relativa (%) |  | y ± U        |               | Nível de Confiança |  | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção      |                       |          |
|------------------|--------------|---------------------------------------|--------|--------------|--|--------------|---------------|--------------------|--|---------------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|----------|
| (y)              | <b>0,229</b> | Incerteza Combinada (u <sub>c</sub> ) | 0,0004 | 0,002        |  | <b>0,229</b> | ± <b>0,01</b> | 99%                |  | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k<br>DOUBLE-TIMING | FATOR-k<br>PROCESSADO | MF       |
|                  |              | Incerteza Expandida (U)               | 0,001  | 0,01         |  |              |               | k <sub>p</sub> = 3 |  | 0,04%                           | 14,85%     | 500,45                   | 502,00                | 1,000387 |

○ TABELA E.11: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 1-2) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÉDIO DO SISTEMA ( $v_I = 11$ )

| SENTIDO                              | ESFERA | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER  |         |                            |              |                     |                    |                    | TURBINA            |                  |                  |                |                  |                 | COMPARATIVO (l/s) |              |                 |                  |                 |  |   |                                    |
|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------------|---------|----------------------------|--------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------|-----------------|------------------|-----------------|--|---|------------------------------------|
|                                      |        |                                     | Anti-Horário | 1       | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                    |                    |                  | VOLUMES (litros) |                |                  | DADOS BRUTOS    |                   | INTERPOLAÇÃO |                 | FATOR K PROPOSTO |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= V <sub>M</sub> / t] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / (k <sub>tab</sub> · t)] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= Indicativa] |
|                                      |        |                                     |              |         |                            |              | C <sub>twd</sub>    | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub> | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub> | C <sub>il</sub>  | V <sub>M</sub> | V <sub>Mst</sub> | V <sub>bc</sub> | PULSOS            | TEMPO (seg.) | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO       | DOUBLE - TIMING |  |   |                                    |
| 1                                    | 12     | 29                                  | 28,98        | 0,99970 | 1,00294                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3337           | 28,97            | 3337,91         | 3337,76           | 504,84       | 506,40          | 0,228            | 0,230           | 0,276  |   |                                    |
| 2                                    | 12     | 29                                  | 28,91        | 0,99970 | 1,00294                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3371           | 28,90            | 3371,48         | 3371,03           | 509,92       | 511,44          | 0,229            | 0,233           | 0,185  |   |                                    |
| 3                                    | 12     | 29                                  | 29,06        | 0,99970 | 1,00294                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3171           | 29,05            | 3172,15         | 3171,84           | 479,77       | 481,22          | 0,228            | 0,218           | 0,171  |   |                                    |
| 4                                    | 12     | 29                                  | 29,07        | 0,99970 | 1,00294                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3318           | 29,06            | 3318,77         | 3318,59           | 501,94       | 503,49          | 0,228            | 0,228           | 0,271  |   |                                    |
| 5                                    | 12     | 29                                  | 28,95        | 0,99970 | 1,00294                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3324           | 28,95            | 3324,81         | 3324,76           | 502,86       | 504,42          | 0,228            | 0,229           | 0,210  |   |                                    |
| 6                                    | 12     | 29                                  | 29,27        | 0,99970 | 1,00294                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3332           | 29,26            | 3332,85         | 3332,79           | 504,07       | 505,64          | 0,226            | 0,228           | 0,190  |   |                                    |
| 7                                    | 12     | 29                                  | 29,16        | 0,99970 | 1,00294                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99684            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3333           | 29,15            | 3333,82         | 3333,31           | 504,22       | 505,72          | 0,227            | 0,228           | 0,170  |   |                                    |
| 8                                    | 12     | 30                                  | 28,89        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3325           | 28,89            | 3325,91         | 3325,44           | 502,92       | 504,42          | 0,229            | 0,230           | 0,269  |   |                                    |
| 9                                    | 12     | 30                                  | 29,14        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3333           | 29,13            | 3333,66         | 3333,24           | 504,09       | 505,60          | 0,227            | 0,229           | 0,132  |   |                                    |
| 10                                   | 12     | 30                                  | 29,05        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3327           | 29,04            | 3328,07         | 3327,72           | 503,25       | 504,77          | 0,228            | 0,229           | 0,205  |   |                                    |
| 11                                   | 12     | 30                                  | 29,41        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3323           | 29,41            | 3323,59         | 3323,15           | 502,57       | 504,07          | 0,225            | 0,226           | 0,248  |   |                                    |
| 12                                   | 12     | 30                                  | 29,27        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3317           | 29,26            | 3317,49         | 3317,45           | 501,65       | 503,21          | 0,226            | 0,227           | 0,244  |   |                                    |
| 13                                   | 12     | 30                                  | 27,00        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3328           | 26,99            | 3328,52         | 3328,31           | 503,31       | 504,86          | 0,245            | 0,246           | 0,274  |   |                                    |
| 14                                   | 12     | 30                                  | 27,63        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3322           | 27,62            | 3322,79         | 3322,54           | 502,45       | 503,98          | 0,239            | 0,240           | 0,212  |   |                                    |
| 15                                   | 12     | 30                                  | 27,74        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3330           | 27,73            | 3330,88         | 3330,55           | 503,67       | 505,20          | 0,238            | 0,240           | 0,245  |   |                                    |
| 16                                   | 12     | 30                                  | 27,49        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3327           | 27,48            | 3327,69         | 3327,52           | 503,19       | 504,74          | 0,241            | 0,242           | 0,163  |   |                                    |
| 17                                   | 12     | 30                                  | 27,72        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3330           | 27,71            | 3330,58         | 3330,56           | 503,63       | 505,20          | 0,239            | 0,240           | 0,216  |   |                                    |
| 18                                   | 12     | 30                                  | 27,55        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3323           | 27,55            | 3323,40         | 3323,08           | 502,54       | 504,06          | 0,240            | 0,241           | 0,175  |   |                                    |
| 19                                   | 12     | 30                                  | 27,54        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3322           | 27,53            | 3323,13         | 3322,82           | 502,50       | 504,02          | 0,240            | 0,241           | 0,196  |   |                                    |
| 20                                   | 12     | 30                                  | 27,78        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3333           | 27,78            | 3333,44         | 3333,13           | 504,06       | 505,59          | 0,238            | 0,240           | 0,163  |   |                                    |
| <b>μ</b>                             |        |                                     | 29,10        |         |                            |              |                     |                    |                    |                    | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3318             | 29,09           | 3318,38           | 3318,09      | 501,84          | 503,37           | 0,227           | 0,228  | 0,214   |                                    |
| <b>u (x<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b> |        |                                     | 0,0021       |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  |                | 194              | 0,00            | 193,07            | 192,98       | 4,41            | 4,43             | 0,0000          | 0,0000   | 0,0002  |                                    |
| <b>u (x<sub>i</sub>)</b>             |        |                                     | 0,0459       |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  |                | 14               | 0,05            | 13,89             | 13,89        | 2,10            | 2,11             | 0,0004          | 0,0010   | 0,0136  |                                    |

| RESULTADOS       |              |                                       |        |              |  |              |   |                    |                    |                                 |            |                       |                    |          |
|------------------|--------------|---------------------------------------|--------|--------------|--|--------------|---|--------------------|--------------------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| Mensurando (l/s) |              | Absoluta                              |        | Relativa (%) |  | y ± U        |   | Nível de Confiança |                    | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |          |
| (y)              | <b>0,227</b> | Incerteza Combinada (u <sub>c</sub> ) | 0,0004 | 0,002        |  | <b>0,227</b> | ± | <b>0,01</b>        | 99%                | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |
|                  |              | Incerteza Expandida (U)               | 0,001  | 0,01         |  |              |   |                    | k <sub>p</sub> = 3 | -0,23%                          | 6,10%      | 501,84                | 503,37             | 0,997651 |

○ TABELA E.12: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 2-1) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÉDIO DO SISTEMA ( $U_f = 10$ )

| SENTIDO           | ESFERA       | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                   |                     |              |              |             |             |                     | TURBINA            |                                 |                          |                       |                 |                    | COMPARATIVO (l/s) |                    |   |   |                                       |            |
|-------------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|--------------------|---|---|---------------------------------------|------------|
|                   |              |                                     | TEMPO<br>(seg.)               | FATORES DE CORREÇÃO |              |              |             |             | VOLUMES<br>(litros) |                    |                                 | DADOS BRUTOS             |                       | INTERPOLAÇÃO    |                    | FATOR K PROPOSTO  |                    | VAZÃO NO<br>BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{tab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= Indicativa] |            |
| Horário           | 1            | TEMPERATURA<br>INICIAL: 29 °C       |                               | $C_{twd}$           | $C_{tpvcM}$  | $C_{tpvcP}$  | $C_{ppvcP}$ | $C_{plp}$   | $C_{il}$            | $V_M$              | $V_{Met}$                       | $V_{bc}$                 | PULSOS                | TEMPO<br>(seg.) | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO        | DOUBLE -<br>TIMING |   |   |                                       | PROCESSADO |
| CICLO             | TRECHO       | MEDIDA (°C)                         |                               |                     |              |              |             |             |                     |                    |                                 |                          |                       |                 |                    |                   |                    |   |   |                                       |            |
| 1                 | 21           | 29                                  | 28,95                         | 0,99970             | 1,00294      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99684             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3371                  | 28,95           | 3370,95            | 3371,01           | 509,84             | 511,44                                    | 0,229   | 0,233                                 | 0,266      |
| 2                 | 21           | 29                                  | 29,15                         | 0,99970             | 1,00294      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99684             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3416                  | 29,16           | 3415,65            | 3415,50           | 516,60             | 518,19                                    | 0,227   | 0,234                                 | 0,191      |
| 3                 | 21           | 29                                  | 28,89                         | 0,99970             | 1,00294      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99684             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3137                  | 28,89           | 3137,04            | 3137,02           | 474,46             | 475,94                                    | 0,229   | 0,217                                 | 0,172      |
| 4                 | 21           | 29                                  | 28,88                         | 0,99970             | 1,00294      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99684             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3316                  | 28,88           | 3316,29            | 3316,02           | 501,57             | 503,10                                    | 0,229   | 0,229                                 | 0,235      |
| 5                 | 21           | 29                                  | 28,88                         | 0,99970             | 1,00294      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99684             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3323                  | 28,88           | 3323,55            | 3323,52           | 502,67             | 504,24                                    | 0,229   | 0,230                                 | 0,258      |
| 6                 | 21           | 29                                  | 28,96                         | 0,99970             | 1,00294      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99684             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3331                  | 28,96           | 3330,96            | 3331,02           | 503,79             | 505,37                                    | 0,228   | 0,230                                 | 0,149      |
| 7                 | 21           | 29                                  | 28,87                         | 0,99970             | 1,00294      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99684             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3324                  | 28,87           | 3324,08            | 3324,01           | 502,75             | 504,31                                    | 0,229   | 0,230                                 | 0,229      |
| 8                 | 21           | 30                                  | 28,92                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3328                  | 28,91           | 3328,74            | 3328,52           | 503,35             | 504,89                                    | 0,229   | 0,230                                 | 0,265      |
| 9                 | 21           | 30                                  | 28,98                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3323                  | 28,98           | 3322,68            | 3322,52           | 502,43             | 503,98                                    | 0,228   | 0,229                                 | 0,154      |
| 10                | 21           | 30                                  | 28,90                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3322                  | 28,90           | 3322,02            | 3322,02           | 502,33             | 503,90                                    | 0,229   | 0,230                                 | 0,144      |
| 11                | 21           | 30                                  | 29,27                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3320                  | 29,26           | 3320,64            | 3320,51           | 502,12             | 503,67                                    | 0,226   | 0,227                                 | 0,194      |
| 12                | 21           | 30                                  | 26,96                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3324                  | 26,97           | 3323,19            | 3323,52           | 502,51             | 504,13                                    | 0,245   | 0,246                                 | 0,230      |
| 13                | 21           | 30                                  | 27,37                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3326                  | 27,37           | 3326,09            | 3326,02           | 502,95             | 504,51                                    | 0,242   | 0,243                                 | 0,202      |
| 14                | 21           | 30                                  | 27,42                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3322                  | 27,42           | 3322,17            | 3322,51           | 502,35             | 503,98                                    | 0,241   | 0,242                                 | 0,253      |
| 15                | 21           | 30                                  | 27,49                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3326                  | 27,49           | 3325,57            | 3326,01           | 502,87             | 504,51                                    | 0,241   | 0,242                                 | 0,188      |
| 16                | 21           | 30                                  | 27,45                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3323                  | 27,45           | 3322,93            | 3323,01           | 502,47             | 504,05                                    | 0,241   | 0,242                                 | 0,238      |
| 17                | 21           | 30                                  | 27,46                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3325                  | 27,46           | 3324,51            | 3324,52           | 502,71             | 504,28                                    | 0,241   | 0,242                                 | 0,187      |
| 18                | 21           | 30                                  | 27,55                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3322                  | 27,55           | 3322,25            | 3322,01           | 502,37             | 503,90                                    | 0,240   | 0,241                                 | 0,223      |
| 19                | 21           | 30                                  | 27,54                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3325                  | 27,53           | 3325,51            | 3325,52           | 502,86             | 504,43                                    | 0,240   | 0,241                                 | 0,218      |
| 20                | 21           | 30                                  | 27,67                         | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315      | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654             | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3333                  | 27,67           | 3333,53            | 3333,51           | 504,07             | 505,65                                    | 0,239   | 0,241                                 | 0,245      |
| $\mu$             |              |                                     | 28,97                         |                     |              |              |             |             |                     | 6,62               | 6,59                            | 6,59                     | 3319                  | 28,97           | 3319,33            | 3319,24           | 501,99             | 503,55                                    | 0,228   | 0,229                                 | 0,205      |
| $u(x_i)^2$        |              |                                     | 0,0015                        |                     |              |              |             |             |                     |                    |                                 |                          | 414                   | 0,0015          | 413,33             | 413,15            | 9,45               | 9,51                                      | 0,0000  | 0,0000                                | 0,0002     |
| $u(x_i)$          |              |                                     | 0,0383                        |                     |              |              |             |             |                     |                    |                                 |                          | 20                    | 0,0383          | 20,33              | 20,33             | 3,07               | 3,08                                      | 0,0003  | 0,0013                                | 0,0143     |
| <b>RESULTADOS</b> |              |                                     |                               |                     |              |              |             |             |                     |                    |                                 |                          |                       |                 |                    |                   |                    |   |   |                                       |            |
| Mensurando (l/s)  |              |                                     | Absoluta                      |                     | Relativa (%) |              | $y \pm U$   |             | Nível de Confiança  |                    | Erro sistemático da Turbina (%) |                          | Fatores de Correção   |                 |                    |                   |                    |   |   |                                       |            |
| (y)               | <b>0,228</b> |                                     | Incerteza Combinada ( $u_c$ ) | 0,0004              | 0,002        | <b>0,228</b> | $\pm$       | <b>0,00</b> | 99%                 | Contagem de pulsos | Indicativa                      | FATOR-k<br>DOUBLE-TIMING | FATOR-k<br>PROCESSADO | MF              |                    |                   |                    |   |   |                                       |            |
|                   |              |                                     | Incerteza Expandida (U)       | 0,001               | 0,00         |              |             |             | $k_p = 3$           | -0,27%             | 11,31%                          | 501,99                   | 503,55                | 0,997336        |                    |                   |                    |   |   |                                       |            |

○ TABELA E.13: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 2-3) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÉDIO DO SISTEMA ( $U_I = 11$ )

| SENTIDO           | ESFERA             | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                   |                 |                     |                  |                    |                                 | TURBINA            |                     |                          |                       |                    |            | COMPARATIVO (l/s)  |            |                  |        |   |   |                                       |
|-------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------|------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|------------------|--------|---|---|---------------------------------------|
|                   |                    |                                     | TEMPERATURA<br>INICIAL: 29 °C | TEMPO<br>(seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                  |                    |                                 |                    | VOLUMES<br>(litros) |                          |                       | DADOS BRUTOS       |            | INTERPOLAÇÃO       |            | FATOR K PROPOSTO |        | VAZÃO NO<br>BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= pulsos / ( $k_{tab} \cdot$<br>t)] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= Indicativa] |
| C <sub>twd</sub>  | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub>                  |                               |                 | C <sub>ppvcP</sub>  | C <sub>plp</sub> | C <sub>il</sub>    | V <sub>M</sub>                  | V <sub>Mst</sub>   | V <sub>b_c</sub>    | PULSOS                   | TEMPO<br>(seg.)       | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO |                  |        |   |   |                                       |
| 1                 | 23                 | 29                                  | 28,87                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684            | 6,62                | 6,60                     | 6,59                  | 3330               | 28,87      | 3329,94            | 3330,01    | 503,30           | 504,88 | 0,229                                     | 0,230   | 0,275                                 |
| 2                 | 23                 | 29                                  | 28,90                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684            | 6,62                | 6,60                     | 6,59                  | 3364               | 28,90      | 3363,63            | 3364,01    | 508,39           | 510,04 | 0,229                                     | 0,233   | 0,197                                 |
| 3                 | 23                 | 29                                  | 29,04                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684            | 6,62                | 6,60                     | 6,59                  | 3163               | 29,05      | 3162,71            | 3162,51    | 478,02           | 479,49 | 0,228                                     | 0,218   | 0,206                                 |
| 4                 | 23                 | 29                                  | 28,83                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684            | 6,62                | 6,60                     | 6,59                  | 3304               | 28,83      | 3303,53            | 3303,52    | 499,31           | 500,87 | 0,230                                     | 0,229   | 0,267                                 |
| 5                 | 23                 | 29                                  | 28,87                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684            | 6,62                | 6,60                     | 6,59                  | 3316               | 28,87      | 3316,15            | 3316,01    | 501,22           | 502,76 | 0,229                                     | 0,230   | 0,227                                 |
| 6                 | 23                 | 29                                  | 28,84                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684            | 6,62                | 6,60                     | 6,59                  | 3310               | 28,84      | 3310,15            | 3310,01    | 500,31           | 501,85 | 0,230                                     | 0,229   | 0,206                                 |
| 7                 | 23                 | 29                                  | 29,04                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684            | 6,62                | 6,60                     | 6,59                  | 3321               | 29,04      | 3321,44            | 3321,51    | 502,02           | 503,60 | 0,228                                     | 0,229   | 0,176                                 |
| 8                 | 23                 | 30                                  | 28,85                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3315               | 28,84      | 3315,53            | 3315,51    | 501,02           | 502,58 | 0,229                                     | 0,230   | 0,236                                 |
| 9                 | 23                 | 30                                  | 29,07                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3324               | 29,07      | 3324,18            | 3324,51    | 502,32           | 503,95 | 0,228                                     | 0,229   | 0,182                                 |
| 10                | 23                 | 30                                  | 28,88                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3315               | 28,88      | 3314,61            | 3314,52    | 500,88           | 502,43 | 0,229                                     | 0,229   | 0,212                                 |
| 11                | 23                 | 30                                  | 29,18                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3314               | 29,18      | 3313,88            | 3314,01    | 500,77           | 502,35 | 0,227                                     | 0,227   | 0,203                                 |
| 12                | 23                 | 30                                  | 29,19                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3310               | 29,18      | 3310,59            | 3310,52    | 500,27           | 501,82 | 0,227                                     | 0,227   | 0,247                                 |
| 13                | 23                 | 30                                  | 26,96                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3318               | 26,96      | 3318,77            | 3318,51    | 501,51           | 503,04 | 0,246                                     | 0,246   | 0,225                                 |
| 14                | 23                 | 30                                  | 27,42                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3314               | 27,42      | 3313,41            | 3313,52    | 500,70           | 502,28 | 0,241                                     | 0,242   | 0,204                                 |
| 15                | 23                 | 30                                  | 27,46                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3315               | 27,46      | 3314,55            | 3314,52    | 500,87           | 502,43 | 0,241                                     | 0,241   | 0,237                                 |
| 16                | 23                 | 30                                  | 27,43                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3318               | 27,43      | 3317,40            | 3317,51    | 501,30           | 502,88 | 0,241                                     | 0,242   | 0,197                                 |
| 17                | 23                 | 30                                  | 27,63                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3323               | 27,63      | 3322,79            | 3322,52    | 502,11           | 503,64 | 0,240                                     | 0,240   | 0,241                                 |
| 18                | 23                 | 30                                  | 27,48                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3314               | 27,48      | 3314,07            | 3314,01    | 500,80           | 502,35 | 0,241                                     | 0,241   | 0,202                                 |
| 19                | 23                 | 30                                  | 27,47                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3315               | 27,47      | 3314,68            | 3314,51    | 500,89           | 502,43 | 0,241                                     | 0,241   | 0,193                                 |
| 20                | 23                 | 30                                  | 27,71                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315          | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3318               | 27,71      | 3318,63            | 3318,51    | 501,49           | 503,04 | 0,239                                     | 0,239   | 0,208                                 |
| $\mu$             |                    |                                     | 28,96                         |                 |                     |                  |                    |                                 |                    | 6,62                | 6,60                     | 6,59                  | 3307               | 28,96      | 3307,19            | 3307,22    | 499,82           | 501,39 | 0,229                                     | 0,228   | 0,219                                 |
| $u(x_i)^2$        |                    |                                     | 0,0015                        |                 |                     |                  |                    |                                 |                    |                     |                          |                       | 192                | 0,0015     | 192,06             | 192,93     | 4,38             | 4,42   | 0,0000                                    | 0,0000  | 0,0001                                |
| $u(x_i)$          |                    |                                     | 0,0386                        |                 |                     |                  |                    |                                 |                    |                     |                          |                       | 14                 | 0,0384     | 13,86              | 13,89      | 2,09             | 2,10   | 0,0003                                    | 0,0011  | 0,0091                                |
| <b>RESULTADOS</b> |                    |                                     |                               |                 |                     |                  |                    |                                 |                    |                     |                          |                       |                    |            |                    |            |                  |        |   |   |                                       |
| Mensurando (l/s)  |                    |                                     | Absoluta                      | Relativa (%)    | $y \pm U$           |                  | Nível de Confiança | Erro sistemático da Turbina (%) |                    | Fatores de Correção |                          |                       |                    |            |                    |            |                  |        |   |   |                                       |
| (y)               | <b>0,229</b>       | Incerteza Combinada ( $u_c$ )       | 0,0004                        | 0,002           | <b>0,229</b>        | $\pm$            | <b>0,00</b>        | 99%                             | Contagem de pulsos | Indicativa          | FATOR-k<br>DOUBLE-TIMING | FATOR-k<br>PROCESSADO | MF                 |            |                    |            |                  |        |   |   |                                       |
|                   |                    | Incerteza Expandida (U)             | 0,001                         | 0,00            |                     |                  | $k_p = 3$          |                                 | 0,16%              | 4,19%               | 499,82                   | 501,39                | 1,001585           |            |                    |            |                  |        |   |   |                                       |

○ TABELA E.14: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 3-2) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÉDIO DO SISTEMA ( $U_f = 10$ )

| SENTIDO                      |              | ESFERA | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                               |              |                     |              |             |             | TURBINA            |                  |                                 |            |                       |                    | COMPARATIVO (l/s) |                 |                  |                 |  |  |                                    |
|------------------------------|--------------|--------|-------------------------------------|---|--------------|---------------------|--------------|-------------|-------------|--------------------|------------------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|--|--|------------------------------------|
| Horário                      | 1            | CICLO  | TRECHO                              | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C<br>MEDIDA (°C) | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |              |             |             |                    | VOLUMES (litros) |                                 |            | DADOS BRUTOS          |                    | INTERPOLAÇÃO      |                 | FATOR K PROPOSTO |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{tab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= Indicativa] |
|                              |              |        |                                     |   |              | $C_{twd}$           | $C_{tpvcM}$  | $C_{tpvcP}$ | $C_{ppvcP}$ | $C_{plp}$          | $C_{il}$         | $V_M$                           | $V_{Met}$  | $V_{bc}$              | PULSOS             | TEMPO (seg.)      | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO       | DOUBLE - TIMING |  |  |                                    |
| 1                            | 32           | 29     | 29,09                               | 0,99970                                   | 1,00294      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99684     | 6,62               | 6,60             | 6,59                            | 3368       | 29,09                 | 3367,25            | 3367,52           | 508,94          | 510,57           | 0,228           | 0,231                                  | 0,244  |                                    |
| 2                            | 32           | 29     | 28,87                               | 0,99970                                   | 1,00294      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99684     | 6,62               | 6,60             | 6,59                            | 3391       | 28,87                 | 3391,30            | 3391,52           | 512,57          | 514,21           | 0,229           | 0,235                                  | 0,196  |                                    |
| 3                            | 32           | 29     | 28,85                               | 0,99970                                   | 1,00294      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99684     | 6,62               | 6,60             | 6,59                            | 3130       | 28,85                 | 3129,74            | 3129,51           | 473,04          | 474,49           | 0,229           | 0,217                                  | 0,198  |                                    |
| 4                            | 32           | 29     | 28,83                               | 0,99970                                   | 1,00294      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99684     | 6,62               | 6,60             | 6,59                            | 3305       | 28,84                 | 3304,17            | 3304,51           | 499,41          | 501,02           | 0,230           | 0,229                                  | 0,191  |                                    |
| 5                            | 32           | 29     | 28,83                               | 0,99970                                   | 1,00294      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99684     | 6,62               | 6,60             | 6,59                            | 3314       | 28,83                 | 3313,41            | 3313,51           | 500,80          | 502,38           | 0,230           | 0,230                                  | 0,270  |                                    |
| 6                            | 32           | 29     | 28,86                               | 0,99970                                   | 1,00294      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99684     | 6,62               | 6,60             | 6,59                            | 3318       | 28,86                 | 3318,34            | 3318,01           | 501,55          | 503,07           | 0,229           | 0,230                                  | 0,168  |                                    |
| 7                            | 32           | 29     | 28,82                               | 0,99970                                   | 1,00294      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99684     | 6,62               | 6,60             | 6,59                            | 3315       | 28,82                 | 3315,07            | 3315,01           | 501,05          | 502,61           | 0,230           | 0,230                                  | 0,203  |                                    |
| 8                            | 32           | 30     | 28,86                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3320       | 28,86                 | 3319,86            | 3320,01           | 501,67          | 503,26           | 0,229           | 0,230                                  | 0,255  |                                    |
| 9                            | 32           | 30     | 29,09                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3320       | 29,09                 | 3319,81            | 3320,01           | 501,66          | 503,26           | 0,228           | 0,228                                  | 0,200  |                                    |
| 10                           | 32           | 30     | 28,86                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3314       | 28,85                 | 3314,55            | 3314,51           | 500,87          | 502,43           | 0,229           | 0,230                                  | 0,184  |                                    |
| 11                           | 32           | 30     | 29,46                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3322       | 29,46                 | 3321,56            | 3321,52           | 501,93          | 503,49           | 0,225           | 0,225                                  | 0,250  |                                    |
| 12                           | 32           | 30     | 27,69                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3315       | 27,69                 | 3314,94            | 3315,02           | 500,93          | 502,51           | 0,239           | 0,239                                  | 0,241  |                                    |
| 13                           | 32           | 30     | 27,35                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3318       | 27,36                 | 3317,43            | 3317,51           | 501,30          | 502,88           | 0,242           | 0,242                                  | 0,279  |                                    |
| 14                           | 32           | 30     | 27,40                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3315       | 27,40                 | 3315,08            | 3315,01           | 500,95          | 502,51           | 0,242           | 0,242                                  | 0,253  |                                    |
| 15                           | 32           | 30     | 27,43                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3316       | 27,43                 | 3316,35            | 3316,01           | 501,14          | 502,66           | 0,241           | 0,242                                  | 0,244  |                                    |
| 16                           | 32           | 30     | 27,40                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3315       | 27,40                 | 3314,60            | 3314,51           | 500,88          | 502,43           | 0,242           | 0,242                                  | 0,270  |                                    |
| 17                           | 32           | 30     | 27,40                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3315       | 27,40                 | 3314,74            | 3315,01           | 500,90          | 502,51           | 0,242           | 0,242                                  | 0,198  |                                    |
| 18                           | 32           | 30     | 27,75                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3324       | 27,75                 | 3323,80            | 3324,01           | 502,27          | 503,87           | 0,239           | 0,239                                  | 0,271  |                                    |
| 19                           | 32           | 30     | 27,61                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3320       | 27,61                 | 3319,75            | 3320,01           | 501,65          | 503,26           | 0,240           | 0,240                                  | 0,167  |                                    |
| 20                           | 32           | 30     | 27,65                               | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025      | 1,00002     | 0,99654     | 6,62               | 6,60             | 6,60                            | 3328       | 27,66                 | 3327,76            | 3328,01           | 502,87          | 504,48           | 0,239           | 0,240                                  | 0,236  |                                    |
| <b><math>\mu</math></b>      |              |        |                                     |   | 28,95        |                     |              |             |             |                    | 6,62             | 6,60                            | 6,59       | 3311                  | 28,95              | 3310,46           | 3310,51         | 500,32           | 501,89          | 0,229                                  | 0,229  | 0,215                              |
| <b><math>u(x_i)^2</math></b> |              |        |                                     |   | 0,0035       |                     |              |             |             |                    |                  |                                 |            | 389                   | 0,0035             | 389,70            | 391,03          | 8,89             | 8,98            | 0,0000                                 | 0,0000   | 0,0001                             |
| <b><math>u(x_i)</math></b>   |              |        |                                     |   | 0,0589       |                     |              |             |             |                    |                  |                                 |            | 20                    | 0,0592             | 19,74             | 19,77           | 2,98             | 3,00            | 0,0005                                 | 0,0014   | 0,0102                             |
| <b>RESULTADOS</b>            |              |        |                                     |   |              |                     |              |             |             |                    |                  |                                 |            |                       |                    |                   |                 |                  |                 |  |  |                                    |
| Mensurando (l/s)             |              |        |                                     | Absoluta                                  |              | Relativa (%)        |              | $y \pm U$   |             | Nível de Confiança |                  | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |                   |                 |                  |                 |  |  |                                    |
| (y)                          | <b>0,229</b> |        |                                     | Incerteza Combinada ( $u_c$ )             | 0,0005       | 0,002               | <b>0,229</b> | $\pm$       | <b>0,01</b> | 99%                |                  | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF                |                 |                  |                 |  |  |                                    |
|                              |              |        |                                     | Incerteza Expandida (U)                   | 0,002        | 0,01                |              |             |             | $k_p = 3$          |                  | 0,06%                           | 6,61%      | 500,32                | 501,89             | 1,000625          |                 |                  |                 |  |  |                                    |

○ TABELA E.15: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 3-4) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÉDIO DO SISTEMA ( $U_I = 11$ )

| SENTIDO           | ESFERA             | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                   |                 |                     |                   |                    |                                 | TURBINA          |                          |                       |                 |                    |            | COMPARATIVO (l/s)  |            |                  |        |   |  |  |
|-------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|------------|--------------------|------------|------------------|--------|---|--|--|
|                   |                    |                                     | TEMPERATURA<br>INICIAL: 29 °C | TEMPO<br>(seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                   |                    |                                 |                  | VOLUMES<br>(litros)      |                       |                 | DADOS BRUTOS       |            | INTERPOLAÇÃO       |            | FATOR K PROPOSTO |        | VAZÃO NO<br>BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{tab} \cdot t$ ) ] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= Indicativa ] |
| C <sub>twd</sub>  | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub>                  |                               |                 | C <sub>ppvcP</sub>  | C <sub>plp</sub>  | C <sub>il</sub>    | V <sub>M</sub>                  | V <sub>Mst</sub> | V <sub>bc</sub>          | PULSOS                | TEMPO<br>(seg.) | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO |                  |        |   |  |  |
| 1                 | 34                 | 29                                  | 28,79                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684          | 6,62                     | 6,60                  | 6,59            | 3317               | 28,79      | 3317,17            | 3317,02    | 501,59           | 503,13 | 0,230                                     | 0,230  | 0,226                                  |
| 2                 | 34                 | 29                                  | 29,06                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684          | 6,62                     | 6,60                  | 6,59            | 3361               | 29,05      | 3361,22            | 3361,02    | 508,25           | 509,81 | 0,228                                     | 0,231  | 0,203                                  |
| 3                 | 34                 | 29                                  | 29,08                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684          | 6,62                     | 6,60                  | 6,59            | 3151               | 29,08      | 3150,64            | 3151,02    | 476,40           | 477,95 | 0,228                                     | 0,217  | 0,188                                  |
| 4                 | 34                 | 29                                  | 28,75                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684          | 6,62                     | 6,60                  | 6,59            | 3296               | 28,75      | 3295,85            | 3296,01    | 498,36           | 499,94 | 0,230                                     | 0,229  | 0,214                                  |
| 5                 | 34                 | 29                                  | 28,77                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684          | 6,62                     | 6,60                  | 6,59            | 3306               | 28,77      | 3306,13            | 3306,01    | 499,92           | 501,46 | 0,230                                     | 0,230  | 0,196                                  |
| 6                 | 34                 | 29                                  | 28,76                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684          | 6,62                     | 6,60                  | 6,59            | 3303               | 28,76      | 3303,15            | 3303,02    | 499,47           | 501,01 | 0,230                                     | 0,230  | 0,205                                  |
| 7                 | 34                 | 29                                  | 28,77                         | 0,99970         | 1,00294             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99684          | 6,62                     | 6,60                  | 6,59            | 3308               | 28,78      | 3307,19            | 3307,52    | 500,08           | 501,69 | 0,230                                     | 0,230  | 0,171                                  |
| 8                 | 34                 | 30                                  | 28,76                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3309               | 28,77      | 3308,12            | 3308,52    | 500,11           | 501,74 | 0,230                                     | 0,230  | 0,223                                  |
| 9                 | 34                 | 30                                  | 28,78                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3307               | 28,78      | 3306,81            | 3306,52    | 499,91           | 501,43 | 0,230                                     | 0,230  | 0,178                                  |
| 10                | 34                 | 30                                  | 28,82                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3305               | 28,82      | 3304,94            | 3305,01    | 499,63           | 501,20 | 0,230                                     | 0,229  | 0,173                                  |
| 11                | 34                 | 30                                  | 29,13                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3304               | 29,13      | 3304,28            | 3304,51    | 499,53           | 501,13 | 0,227                                     | 0,227  | 0,161                                  |
| 12                | 34                 | 30                                  | 29,14                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3305               | 29,14      | 3304,80            | 3304,50    | 499,61           | 501,13 | 0,227                                     | 0,227  | 0,235                                  |
| 13                | 34                 | 30                                  | 27,12                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3309               | 27,13      | 3308,44            | 3308,52    | 500,16           | 501,74 | 0,244                                     | 0,244  | 0,232                                  |
| 14                | 34                 | 30                                  | 27,37                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3305               | 27,37      | 3305,77            | 3305,50    | 499,76           | 501,28 | 0,242                                     | 0,241  | 0,193                                  |
| 15                | 34                 | 30                                  | 27,39                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3307               | 27,39      | 3307,15            | 3307,00    | 499,97           | 501,51 | 0,242                                     | 0,241  | 0,204                                  |
| 16                | 34                 | 30                                  | 27,36                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3309               | 27,35      | 3309,20            | 3309,01    | 500,28           | 501,81 | 0,242                                     | 0,242  | 0,207                                  |
| 17                | 34                 | 30                                  | 27,55                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3312               | 27,55      | 3312,13            | 3312,01    | 500,72           | 502,27 | 0,240                                     | 0,240  | 0,199                                  |
| 18                | 34                 | 30                                  | 27,42                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3305               | 27,42      | 3305,17            | 3305,52    | 499,67           | 501,28 | 0,241                                     | 0,241  | 0,244                                  |
| 19                | 34                 | 30                                  | 27,40                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3307               | 27,40      | 3306,60            | 3307,03    | 499,88           | 501,51 | 0,242                                     | 0,241  | 0,217                                  |
| 20                | 34                 | 30                                  | 27,57                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315           | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654          | 6,62                     | 6,59                  | 6,59            | 3313               | 27,58      | 3312,32            | 3312,52    | 500,75           | 502,34 | 0,240                                     | 0,240  | 0,255                                  |
| $\mu$             |                    |                                     | 28,88                         |                 |                     |                   |                    |                                 |                  | 6,62                     | 6,60                  | 6,59            | 3297,7             | 28,89      | 3297,52            | 3297,56    | 498,57           | 500,14 | 0,229                                     | 0,228  | 0,198                                  |
| $u(x_i)^2$        |                    |                                     | 0,0022                        |                 |                     |                   |                    |                                 |                  |                          |                       |                 | 200,5              | 0,0022     | 201,30             | 200,27     | 4,59             | 4,60   | 0,0000                                    | 0,0000   | 0,0000                                 |
| $u(x_i)$          |                    |                                     | 0,0470                        |                 |                     |                   |                    |                                 |                  |                          |                       |                 | 14,2               | 0,0468     | 14,19              | 14,15      | 2,14             | 2,14   | 0,0004                                    | 0,0011   | 0,0069                                 |
| <b>RESULTADOS</b> |                    |                                     |                               |                 |                     |                   |                    |                                 |                  |                          |                       |                 |                    |            |                    |            |                  |        |   |  |  |
| Mensurando (l/s)  |                    |                                     | Absoluta                      | Relativa (%)    | $y \pm U$           |                   | Nível de Confiança | Erro sistemático da Turbina (%) |                  | Fatores de Correção      |                       |                 |                    |            |                    |            |                  |        |   |  |  |
| (y)               | <b>0,229</b>       | Incerteza Combinada ( $u_c$ )       | 0,0004                        | 0,002           | <b>0,229</b>        | $\pm$ <b>0,01</b> | 99%                | Contagem de pulsos              | Indicativa       | FATOR-k<br>DOUBLE-TIMING | FATOR-k<br>PROCESSADO | MF              |                    |            |                    |            |                  |        |   |  |  |
|                   |                    | Incerteza Expandida (U)             | 0,001                         | 0,01            |                     |                   | $k_p = 3$          | 0,41%                           | 15,91%           | 498,57                   | 500,14                | 1,004083        |                    |            |                    |            |                  |        |   |  |  |



○ TABELA E.16: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 4-3) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÉDIO DO SISTEMA ( $U_l = 11$ )

| SENTIDO                              | ESFERA                        | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER     |                     |                    |                    |                  |                 |                     | TURBINA          |                 |              |                 |                    |            | COMPARATIVO (l/s)  |            |   |   |                                       |        |       |
|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|-----------------|---------------------|------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------------|------------|--------------------|------------|---|---|---------------------------------------|--------|-------|
|                                      |                               |                                     | TEMPO<br>(seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                    |                  |                 | VOLUMES<br>(litros) |                  |                 | DADOS BRUTOS |                 | INTERPOLAÇÃO       |            | FATOR K PROPOSTO   |            | VAZÃO NO<br>BALL PROVER<br>[= V <sub>M</sub> / t] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= pulsos / (k <sub>tab</sub> ·<br>t)] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= Indicativa] |        |       |
| Horário                              | TEMPERATURA<br>INICIAL: 29 °C | C <sub>twd</sub>                    |                 | C <sub>tpvcM</sub>  | C <sub>tpvcP</sub> | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub> | C <sub>il</sub> | V <sub>M</sub>      | V <sub>Mst</sub> | V <sub>bc</sub> | PULSOS       | TEMPO<br>(seg.) | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO |   |   |                                       |        |       |
| CICLO                                | TRECHO                        | MEDIDA (°C)                         |                 |                     |                    |                    |                  |                 |                     |                  |                 |              |                 |                    |            |                    |            |   |   |                                       |        |       |
| 1                                    | 43                            | 29                                  | 28,96           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684             | 6,62             | 6,60            | 6,59         | 3348            | 28,95              | 3349,10    | 3348,73            | 506,41     | 507,94  | 0,229   | 0,231                                 | 0,242  |       |
| 2                                    | 43                            | 29                                  | 28,77           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684             | 6,62             | 6,60            | 6,59         | 3379            | 28,76              | 3379,69    | 3379,29            | 511,04     | 512,58  | 0,230   | 0,235                                 | 0,252  |       |
| 3                                    | 43                            | 29                                  | 29,08           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684             | 6,62             | 6,60            | 6,59         | 3132            | 29,07              | 3133,02    | 3132,85            | 473,74     | 475,20  | 0,228   | 0,215                                 | 0,216  |       |
| 4                                    | 43                            | 29                                  | 28,77           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684             | 6,62             | 6,60            | 6,59         | 3294            | 28,76              | 3295,33    | 3294,92            | 498,28     | 499,78  | 0,230   | 0,229                                 | 0,133  |       |
| 5                                    | 43                            | 29                                  | 28,76           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684             | 6,62             | 6,60            | 6,59         | 3303            | 28,76              | 3303,83    | 3303,63            | 499,57     | 501,10  | 0,230   | 0,230                                 | 0,228  |       |
| 6                                    | 43                            | 29                                  | 28,75           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684             | 6,62             | 6,60            | 6,59         | 3302            | 28,75              | 3302,55    | 3302,36            | 499,38     | 500,91  | 0,230   | 0,230                                 | 0,193  |       |
| 7                                    | 43                            | 29                                  | 29,08           | 0,99970             | 1,00294            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99684             | 6,62             | 6,60            | 6,59         | 3314            | 29,07              | 3314,86    | 3314,85            | 501,24     | 502,80  | 0,228   | 0,228                                 | 0,164  |       |
| 8                                    | 43                            | 30                                  | 28,75           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3306            | 28,74              | 3306,78    | 3306,44            | 499,91     | 501,42  | 0,230   | 0,230                                 | 0,264  |       |
| 9                                    | 43                            | 30                                  | 28,98           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3306            | 28,97              | 3307,16    | 3306,95            | 499,97     | 501,50  | 0,228   | 0,228                                 | 0,236  |       |
| 10                                   | 43                            | 30                                  | 28,79           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3305            | 28,79              | 3305,37    | 3305,02            | 499,70     | 501,21  | 0,230   | 0,229                                 | 0,225  |       |
| 11                                   | 43                            | 30                                  | 29,33           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3308            | 29,32              | 3308,97    | 3308,67            | 500,24     | 501,76  | 0,226   | 0,225                                 | 0,241  |       |
| 12                                   | 43                            | 30                                  | 29,38           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3306            | 29,37              | 3307,30    | 3306,84            | 499,99     | 501,48  | 0,225   | 0,225                                 | 0,264  |       |
| 13                                   | 43                            | 30                                  | 27,68           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3317            | 27,67              | 3318,33    | 3317,95            | 501,66     | 503,17  | 0,239   | 0,240                                 | 0,271  |       |
| 14                                   | 43                            | 30                                  | 27,34           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3305            | 27,34              | 3305,40    | 3305,02            | 499,70     | 501,21  | 0,242   | 0,242                                 | 0,250  |       |
| 15                                   | 43                            | 30                                  | 27,36           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3306            | 27,36              | 3307,00    | 3306,94            | 499,94     | 501,50  | 0,242   | 0,242                                 | 0,248  |       |
| 16                                   | 43                            | 30                                  | 27,46           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3307            | 27,45              | 3307,87    | 3307,68            | 500,07     | 501,61  | 0,241   | 0,241                                 | 0,276  |       |
| 17                                   | 43                            | 30                                  | 27,35           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3304            | 27,33              | 3305,41    | 3304,88            | 499,70     | 501,19  | 0,242   | 0,242                                 | 0,153  |       |
| 18                                   | 43                            | 30                                  | 27,63           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3311            | 27,62              | 3311,80    | 3311,35            | 500,67     | 502,17  | 0,239   | 0,240                                 | 0,289  |       |
| 19                                   | 43                            | 30                                  | 27,58           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3312            | 27,57              | 3312,73    | 3312,39            | 500,81     | 502,32  | 0,240   | 0,240                                 | 0,148  |       |
| 20                                   | 43                            | 30                                  | 27,58           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002         | 0,99654             | 6,62             | 6,59            | 6,59         | 3317            | 27,58              | 3317,44    | 3317,05            | 501,52     | 503,03  | 0,240   | 0,240                                 | 0,244  |       |
| <b>μ</b>                             |                               |                                     | 28,95           |                     |                    |                    |                  |                 |                     |                  | 6,62            | 6,60         | 6,59            | 3300,3             | 28,94      | 3301,16            | 3300,88    | 499,12  | 500,64  | 0,229                                 | 0,228  | 0,222 |
| <b>u (x<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b> |                               |                                     | 0,0043          |                     |                    |                    |                  |                 |                     |                  |                 |              | 281,9           | 0,0042             | 281,46     | 281,01             | 6,43       | 6,46  | 0,0000  | 0,0000                                | 0,0001 |       |
| <b>u (x<sub>i</sub>)</b>             |                               |                                     | 0,0655          |                     |                    |                    |                  |                 |                     |                  |                 |              | 16,8            | 0,0651             | 16,78      | 16,76              | 2,54       | 2,54  | 0,0005  | 0,0014                                | 0,0115 |       |

**RESULTADOS**

| Mensurando (l/s) |              | Absoluta                              |        | Relativa (%) |              | y ± U |             | Nível de Confiança |                    | Erro sistemático da Turbina (%) |                          | Fatores de Correção   |          |  |
|------------------|--------------|---------------------------------------|--------|--------------|--------------|-------|-------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------|--|
| (y)              | <b>0,229</b> | Incerteza Combinada (u <sub>c</sub> ) | 0,0006 | 0,002        | <b>0,229</b> | ±     | <b>0,01</b> | 99%                | Contagem de pulsos | Indicativa                      | FATOR-k<br>DOUBLE-TIMING | FATOR-k<br>PROCESSADO | MF       |  |
|                  |              | Incerteza Expandida (U)               | 0,002  | 0,01         |              |       |             | k <sub>p</sub> = 3 | 0,31%              | 3,11%                           | 499,12                   | 500,64                | 1,003065 |  |

○ TABELA E.17: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 1-4) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÍNIMO DO SISTEMA ( $U_l = 14$ )

| SENTIDO           | ESFERA             | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                   |                 |                     |                     |                 |                |                    | TURBINA                       |                                 |                          |                       |            |                    | COMPARATIVO (l/s) |                  |        |   |   |                                       |
|-------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|----------------|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|--------------------|-------------------|------------------|--------|---|---|---------------------------------------|
|                   |                    |                                     | TEMPERATURA<br>INICIAL: 29 °C | TEMPO<br>(seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                     |                 |                |                    | VOLUMES<br>(litros)           |                                 |                          | DADOS BRUTOS          |            | INTERPOLAÇÃO       |                   | FATOR K PROPOSTO |        | VAZÃO NO<br>BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{tab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= Indicativa] |
| C <sub>twd</sub>  | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub>                  |                               |                 | C <sub>ppvcP</sub>  | C <sub>plp</sub>    | C <sub>il</sub> | V <sub>M</sub> | V <sub>Mst</sub>   | V <sub>bc</sub>               | PULSOS                          | TEMPO<br>(seg.)          | DOUBLE -<br>TIMING    | PROCESSADO | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO        |                  |        |   |   |                                       |
| 1                 | 14                 | 30                                  | 139,72                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10262                 | 139,70     | 10262,82           | 10262,74          | 517,13           | 518,75 | 0,142                                     | 0,147   | 0,108                                 |
| 2                 | 14                 | 30                                  | 140,83                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10313                 | 140,82     | 10313,97           | 10313,94          | 519,71           | 521,34 | 0,141                                     | 0,146   | 0,115                                 |
| 3                 | 14                 | 30                                  | 139,73                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10313                 | 139,72     | 10313,79           | 10313,99          | 519,70           | 521,31 | 0,142                                     | 0,148   | 0,044                                 |
| 4                 | 14                 | 30                                  | 140,37                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10329                 | 140,36     | 10329,76           | 10329,39          | 520,51           | 522,12 | 0,141                                     | 0,147   | 0,090                                 |
| 5                 | 14                 | 30                                  | 140,42                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10331                 | 140,42     | 10331,25           | 10331,27          | 520,58           | 522,21 | 0,141                                     | 0,147   | 0,119                                 |
| 6                 | 14                 | 30                                  | 141,40                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10359                 | 141,38     | 10360,11           | 10359,80          | 522,04           | 523,65 | 0,140                                     | 0,146   | 0,068                                 |
| 7                 | 14                 | 30                                  | 141,77                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10343                 | 141,75     | 10344,00           | 10343,92          | 521,23           | 522,85 | 0,140                                     | 0,146   | 0,182                                 |
| 8                 | 14                 | 30                                  | 142,33                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10365                 | 142,32     | 10365,44           | 10365,11          | 522,31           | 523,92 | 0,139                                     | 0,146   | 0,100                                 |
| 9                 | 14                 | 30                                  | 143,17                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10382                 | 143,16     | 10382,83           | 10382,46          | 523,18           | 524,80 | 0,139                                     | 0,145   | 0,138                                 |
| 10                | 14                 | 30                                  | 144,38                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10460                 | 144,36     | 10461,36           | 10461,01          | 527,14           | 528,77 | 0,137                                     | 0,145   | 0,158                                 |
| 11                | 14                 | 30                                  | 146,15                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10463                 | 146,13     | 10463,86           | 10463,57          | 527,26           | 528,90 | 0,136                                     | 0,143   | 0,163                                 |
| 12                | 14                 | 30                                  | 146,43                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10491                 | 146,42     | 10491,79           | 10491,76          | 528,67           | 530,32 | 0,136                                     | 0,143   | 0,128                                 |
| 13                | 14                 | 30                                  | 145,70                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10456                 | 145,69     | 10457,29           | 10456,95          | 526,93           | 528,56 | 0,136                                     | 0,143   | 0,172                                 |
| 14                | 14                 | 30                                  | 146,77                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10471                 | 146,77     | 10471,50           | 10471,54          | 527,65           | 529,30 | 0,135                                     | 0,143   | 0,144                                 |
| 15                | 14                 | 30                                  | 148,23                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10497                 | 148,22     | 10497,44           | 10497,30          | 528,96           | 530,60 | 0,134                                     | 0,142   | 0,108                                 |
| 16                | 14                 | 30                                  | 156,81                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10546                 | 156,80     | 10546,18           | 10546,07          | 531,41           | 533,07 | 0,127                                     | 0,134   | 0,146                                 |
| 17                | 14                 | 30                                  | 156,60                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10519                 | 156,58     | 10520,35           | 10519,96          | 530,11           | 531,75 | 0,127                                     | 0,134   | 0,177                                 |
| 18                | 14                 | 30                                  | 157,82                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10522                 | 157,81     | 10522,70           | 10522,28          | 530,23           | 531,87 | 0,126                                     | 0,133   | 0,097                                 |
| 19                | 14                 | 30                                  | 157,51                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10536                 | 157,50     | 10536,54           | 10536,11          | 530,93           | 532,57 | 0,126                                     | 0,134   | 0,077                                 |
| 20                | 14                 | 30                                  | 157,69                        | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025         | 1,00002        | 0,99654            | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10538                 | 157,68     | 10538,61           | 10538,30          | 531,03           | 532,68 | 0,126                                     | 0,134   | 0,125                                 |
| $\mu$             |                    |                                     | 143,16                        |                 |                     |                     |                 |                |                    | 19,85                         | 19,78                           | 19,78                    | 10389                 | 143,15     | 10389,81           | 10389,61          | 523,53           | 525,16 | 0,139                                     | 0,145   | 0,122                                 |
| $u(x_i)^2$        |                    |                                     | 0,5544                        |                 |                     |                     |                 |                |                    |                               |                                 |                          | 391                   | 0,5544     | 391,09             | 391,12            | 0,99             | 1,00   | 0,0000                                    | 0,0000  | 0,0001                                |
| $u(x_i)$          |                    |                                     | 0,7446                        |                 |                     |                     |                 |                |                    |                               |                                 |                          | 20                    | 0,7446     | 19,78              | 19,78             | 1,00             | 1,00   | 0,0007                                    | 0,0005  | 0,0099                                |
| <b>RESULTADOS</b> |                    |                                     |                               |                 |                     |                     |                 |                |                    |                               |                                 |                          |                       |            |                    |                   |                  |        |   |   |                                       |
| Mensurando (l/s)  |                    |                                     | Absoluta                      |                 | Relativa (%)        |                     | $y \pm U$       |                | Nível de Confiança |                               | Erro sistemático da Turbina (%) |                          | Fatores de Correção   |            |                    |                   |                  |        |   |   |                                       |
| (y)               | <b>0,139</b>       |                                     | Incerteza Combinada ( $u_c$ ) | 0,0007          | 0,005               | <b>0,139 ± 0,02</b> |                 | 99%            |                    | Contagem de pulsos Indicativa |                                 | FATOR-k<br>DOUBLE-TIMING | FATOR-k<br>PROCESSADO | MF         |                    |                   |                  |        |   |   |                                       |
|                   |                    |                                     | Incerteza Expandida (U)       | 0,002           | 0,02                |                     |                 | $k_p = 3$      |                    | -4,37%                        |                                 | 523,53                   | 525,16                | 0,956265   |                    |                   |                  |        |   |   |                                       |

○ TABELA E.18: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 4-1) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÍNIMO DO SISTEMA ( $U_T = 17$ )

| SENTIDO                      |    | ESFERA | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                               |              |                     |             |             |             |           | TURBINA          |       |           |              |          |              | COMPARATIVO (l/s) |                  |                 |  |  |                                    |            |
|------------------------------|----|--------|-------------------------------------|---|--------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------------|-------|-----------|--------------|----------|--------------|-------------------|------------------|-----------------|--|--|------------------------------------|------------|
| Horário                      | 1  | CICLO  | TRECHO                              | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C<br>MEDIDA (°C) | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |             |             |             |           | VOLUMES (litros) |       |           | DADOS BRUTOS |          | INTERPOLAÇÃO |                   | FATOR K PROPOSTO |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{tab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= Indicativa] |            |
|                              |    |        |                                     |   |              | $C_{twd}$           | $C_{tpvcM}$ | $C_{tpvcP}$ | $C_{ppvcP}$ | $C_{plp}$ | $C_{il}$         | $V_M$ | $V_{Mst}$ | $V_{bc}$     | PULSOS   | TEMPO (seg.) | DOUBLE - TIMING   | PROCESSADO       | DOUBLE - TIMING |  |  |                                    | PROCESSADO |
| 1                            | 41 | 30     | 140,20                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10280     | 140,18       | 10280,86 | 10280,59     | 518,04            | 519,65           | 0,142           | 0,147                                  | 0,016  |                                    |            |
| 2                            | 41 | 30     | 140,74                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10339     | 140,73       | 10339,77 | 10339,65     | 521,01            | 522,64           | 0,141           | 0,147                                  | 0,232  |                                    |            |
| 3                            | 41 | 30     | 139,97                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10321     | 139,96       | 10321,78 | 10321,64     | 520,11            | 521,72           | 0,142           | 0,147                                  | 0,072  |                                    |            |
| 4                            | 41 | 30     | 140,75                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10338     | 140,74       | 10338,92 | 10338,52     | 520,97            | 522,58           | 0,141           | 0,147                                  | 0,148  |                                    |            |
| 5                            | 41 | 30     | 139,95                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10332     | 139,95       | 10332,27 | 10332,04     | 520,63            | 522,25           | 0,142           | 0,148                                  | 0,215  |                                    |            |
| 6                            | 41 | 30     | 141,55                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10342     | 141,55       | 10342,39 | 10342,23     | 521,14            | 522,77           | 0,140           | 0,146                                  | 0,131  |                                    |            |
| 7                            | 41 | 30     | 152,00                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 11028     | 151,99       | 11029,21 | 11028,87     | 555,75            | 557,47           | 0,131           | 0,145                                  | 0,161  |                                    |            |
| 8                            | 41 | 30     | 143,74                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10388     | 143,73       | 10388,80 | 10388,77     | 523,48            | 525,12           | 0,138           | 0,144                                  | 0,123  |                                    |            |
| 9                            | 41 | 30     | 144,75                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10464     | 144,75       | 10464,65 | 10464,15     | 527,30            | 528,93           | 0,137           | 0,144                                  | 0,140  |                                    |            |
| 10                           | 41 | 30     | 145,42                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10447     | 145,41       | 10447,42 | 10447,20     | 526,44            | 528,07           | 0,137           | 0,144                                  | 0,153  |                                    |            |
| 11                           | 41 | 30     | 145,86                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10461     | 145,85       | 10461,73 | 10461,54     | 527,16            | 528,80           | 0,136           | 0,143                                  | 0,061  |                                    |            |
| 12                           | 41 | 30     | 147,20                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10497     | 147,19       | 10497,65 | 10497,55     | 528,97            | 530,62           | 0,135           | 0,143                                  | 0,126  |                                    |            |
| 13                           | 41 | 30     | 146,91                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10478     | 146,90       | 10479,24 | 10478,85     | 528,04            | 529,67           | 0,135           | 0,143                                  | 0,149  |                                    |            |
| 14                           | 41 | 30     | 154,82                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10983     | 154,82       | 10983,32 | 10983,17     | 553,44            | 555,16           | 0,128           | 0,142                                  | 0,156  |                                    |            |
| 15                           | 41 | 30     | 160,90                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 11056     | 160,89       | 11057,20 | 11056,67     | 557,16            | 558,88           | 0,123           | 0,137                                  | 0,143  |                                    |            |
| 16                           | 41 | 30     | 156,22                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10528     | 156,21       | 10529,16 | 10528,93     | 530,56            | 532,20           | 0,127           | 0,135                                  | 0,151  |                                    |            |
| 17                           | 41 | 30     | 157,77                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10529     | 157,77       | 10529,24 | 10529,23     | 530,56            | 532,22           | 0,126           | 0,133                                  | 0,130  |                                    |            |
| 18                           | 41 | 30     | 157,50                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10518     | 157,49       | 10518,48 | 10518,04     | 530,02            | 531,65           | 0,126           | 0,133                                  | 0,164  |                                    |            |
| 19                           | 41 | 30     | 156,91                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 10537     | 156,90       | 10537,66 | 10537,43     | 530,98            | 532,63           | 0,127           | 0,134                                  | 0,120  |                                    |            |
| 20                           | 41 | 30     | 167,01                              | 1,00000                                   | 1,00315      | 1,00315             | 1,00025     | 1,00002     | 0,99654     | 19,85     | 19,78            | 19,78 | 11139     | 167,01       | 11139,22 | 11139,13     | 561,30            | 563,05           | 0,119           | 0,133                                  | 0,081  |                                    |            |
| <b><math>\mu</math></b>      |    |        |                                     | 147,35                                    |              |                     |             |             |             |           |                  | 19,85 | 19,78     | 19,78        | 10489    | 147,34       | 10490,14          | 10489,91         | 528,59          | 530,23                                 | 0,135  | 0,142                              | 0,136      |
| <b><math>u(x_i)^2</math></b> |    |        |                                     | 2,5043                                    |              |                     |             |             |             |           |                  |       |           | 2346         | 2,50     | 2346,56      | 2346,28           | 5,96             | 5,99            | 0,0000                                 | 0,0000   | 0,0001                             |            |
| <b><math>u(x_i)</math></b>   |    |        |                                     | 1,5825                                    |              |                     |             |             |             |           |                  |       |           | 48           | 1,58     | 48,44        | 48,44             | 2,44             | 2,45            | 0,0014                                 | 0,0012   | 0,0118                             |            |

| RESULTADOS       |       |                     |           |              |       |           |        |                    |                    |                                 |        |                     |               |            |          |
|------------------|-------|---------------------|-----------|--------------|-------|-----------|--------|--------------------|--------------------|---------------------------------|--------|---------------------|---------------|------------|----------|
| Mensurando (l/s) |       | Absoluta            |           | Relativa (%) |       | $y \pm U$ |        | Nível de Confiança |                    | Erro sistemático da Turbina (%) |        | Fatores de Correção |               |            |          |
| (y)              | 0,135 | Incerteza Combinada | ( $u_c$ ) | 0,0015       | 0,011 | 0,135     | ± 0,03 | 99%                | Contagem de pulsos | Indicativa                      | -5,25% | -0,85%              | FATOR-k       | FATOR-k    | MF       |
|                  |       | Incerteza Expandida | (U)       | 0,004        | 0,03  |           |        |                    |                    |                                 |        |                     | DOUBLE-TIMING | PROCESSADO |          |
|                  |       |                     |           |              |       |           |        | $k_p = 3$          |                    |                                 |        |                     | 528,59        | 530,23     | 0,947505 |

○ **TABELA E.19:** DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 1-2) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÍNIMO DO SISTEMA ( $U_I = 14$ )

| SENTIDO                              | ESFERA | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER  |         |                            |              |                     |                    |                    | TURBINA            |                  |                  |                |                  |                 | COMPARATIVO (l/s) |              |                 |                  |                 |  |   |                                    |
|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------------|---------|----------------------------|--------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------|-----------------|------------------|-----------------|--|---|------------------------------------|
|                                      |        |                                     | Anti-Horário | 1       | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                    |                    |                  | VOLUMES (litros) |                |                  | DADOS BRUTOS    |                   | INTERPOLAÇÃO |                 | FATOR K PROPOSTO |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= V <sub>M</sub> / t] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / (k <sub>tab</sub> · t)] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= Indicativa] |
|                                      |        |                                     |              |         |                            |              | C <sub>twd</sub>    | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub> | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub> | C <sub>il</sub>  | V <sub>M</sub> | V <sub>Mst</sub> | V <sub>bc</sub> | PULSOS            | TEMPO (seg.) | DOUBLE - TIMING | PROCESSADO       | DOUBLE - TIMING |  |   |                                    |
| 1                                    | 12     | 30                                  | 46,65        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3427           | 46,64            | 3427,64         | 3427,21           | 518,30       | 519,86          | 0,142            | 0,147           | 0,156  |   |                                    |
| 2                                    | 12     | 30                                  | 46,90        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3445           | 46,89            | 3445,80         | 3445,41           | 521,05       | 522,62          | 0,141            | 0,147           | 0,164  |   |                                    |
| 3                                    | 12     | 30                                  | 46,68        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3445           | 46,67            | 3445,40         | 3445,37           | 520,99       | 522,61          | 0,142            | 0,148           | 0,198  |   |                                    |
| 4                                    | 12     | 30                                  | 46,99        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3449           | 46,99            | 3449,37         | 3449,36           | 521,59       | 523,22          | 0,141            | 0,147           | 0,214  |   |                                    |
| 5                                    | 12     | 30                                  | 47,10        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3456           | 47,09            | 3456,60         | 3456,24           | 522,68       | 524,26          | 0,140            | 0,147           | 0,127  |   |                                    |
| 6                                    | 12     | 30                                  | 47,05        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3456           | 47,04            | 3456,74         | 3456,27           | 522,70       | 524,27          | 0,141            | 0,147           | 0,190  |   |                                    |
| 7                                    | 12     | 30                                  | 47,36        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3456           | 47,35            | 3456,71         | 3456,38           | 522,70       | 524,28          | 0,140            | 0,146           | 0,136  |   |                                    |
| 8                                    | 12     | 30                                  | 47,62        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3467           | 47,62            | 3467,28         | 3467,08           | 524,30       | 525,91          | 0,139            | 0,145           | 0,096  |   |                                    |
| 9                                    | 12     | 30                                  | 47,79        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3466           | 47,77            | 3467,43         | 3466,93           | 524,32       | 525,88          | 0,138            | 0,145           | 0,103  |   |                                    |
| 10                                   | 12     | 30                                  | 48,15        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3490           | 48,14            | 3490,58         | 3490,48           | 527,82       | 529,46          | 0,137            | 0,145           | 0,144  |   |                                    |
| 11                                   | 12     | 30                                  | 48,84        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3501           | 48,83            | 3501,55         | 3501,55           | 529,48       | 531,13          | 0,135            | 0,143           | 0,238  |   |                                    |
| 12                                   | 12     | 30                                  | 49,29        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3524           | 49,27            | 3525,08         | 3524,73           | 533,04       | 534,65          | 0,134            | 0,143           | 0,097  |   |                                    |
| 13                                   | 12     | 30                                  | 48,65        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3493           | 48,63            | 3494,26         | 3493,93           | 528,38       | 529,98          | 0,136            | 0,144           | 0,156  |   |                                    |
| 14                                   | 12     | 30                                  | 48,87        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3498           | 48,86            | 3498,87         | 3498,51           | 529,07       | 530,67          | 0,135            | 0,143           | 0,103  |   |                                    |
| 15                                   | 12     | 30                                  | 49,52        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3503           | 49,51            | 3503,71         | 3503,27           | 529,80       | 531,40          | 0,134            | 0,141           | 0,127  |   |                                    |
| 16                                   | 12     | 30                                  | 52,18        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3519           | 52,18            | 3519,10         | 3519,04           | 532,13       | 533,79          | 0,127            | 0,135           | 0,026  |   |                                    |
| 17                                   | 12     | 30                                  | 52,16        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3515           | 52,14            | 3516,11         | 3515,93           | 531,68       | 533,32          | 0,127            | 0,135           | 0,123  |   |                                    |
| 18                                   | 12     | 30                                  | 52,80        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3515           | 52,79            | 3515,44         | 3515,26           | 531,58       | 533,21          | 0,125            | 0,133           | 0,031  |   |                                    |
| 19                                   | 12     | 30                                  | 52,80        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3528           | 52,79            | 3528,74         | 3528,58           | 533,59       | 535,23          | 0,125            | 0,134           | 0,146  |   |                                    |
| 20                                   | 12     | 30                                  | 52,82        | 1,00000 | 1,00315                    | 1,00315      | 1,00025             | 1,00002            | 0,99654            | 6,62               | 6,59             | 6,59             | 3520           | 52,81            | 3521,20         | 3520,76           | 532,45       | 534,05          | 0,125            | 0,133           | 0,038  |   |                                    |
| <b>μ</b>                             |        |                                     | 47,83        |         |                            |              |                     |                    |                    |                    | 6,62             | 6,59             | 6,59           | 3472             | 47,82           | 3472,47           | 3472,18      | 525,08          | 526,68           | 0,138           | 0,145  | 0,150   |                                    |
| <b>u (x<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b> |        |                                     | 0,0646       |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  |                | 51               | 0,0644          | 51,79             | 51,81        | 1,18            | 1,19             | 0,0000          | 0,0000   | 0,0001  |                                    |
| <b>u (x<sub>i</sub>)</b>             |        |                                     | 0,2542       |         |                            |              |                     |                    |                    |                    |                  |                  |                | 7                | 0,2537          | 7,20              | 7,20         | 1,09            | 1,09             | 0,0007          | 0,0005   | 0,0114  |                                    |

| RESULTADOS       |              |                                       |        |              |  |              |   |                    |                    |                                 |            |                       |                    |          |
|------------------|--------------|---------------------------------------|--------|--------------|--|--------------|---|--------------------|--------------------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| Mensurando (l/s) |              | Absoluta                              |        | Relativa (%) |  | y ± U        |   | Nível de Confiança |                    | Erro sistemático da Turbina (%) |            | Fatores de Correção   |                    |          |
| (y)              | <b>0,138</b> | Incerteza Combinada (u <sub>c</sub> ) | 0,0007 | 0,005        |  | <b>0,138</b> | ± | <b>0,02</b>        | 99%                | Contagem de pulsos              | Indicativa | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF       |
|                  |              | Incerteza Expandida (U)               | 0,002  | 0,02         |  |              |   |                    | k <sub>p</sub> = 3 | -4,65%                          | -7,74%     | 525,08                | 526,68             | 0,953521 |

○ TABELA E.20: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 2-1) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÍNIMO DO SISTEMA ( $U_T = 17$ )

| SENTIDO           | ESFERA       | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER     |                     |              |             |             |                    |                     | TURBINA                         |                       |                     |          |                 |                    | COMPARATIVO (l/s) |                    |   |   |                                       |            |
|-------------------|--------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------|-------------|-------------|--------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|----------|-----------------|--------------------|-------------------|--------------------|---|---|---------------------------------------|------------|
|                   |              |                                     | TEMPO<br>(seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |              |             |             |                    | VOLUMES<br>(litros) |                                 |                       | DADOS BRUTOS        |          | INTERPOLAÇÃO    |                    | FATOR K PROPOSTO  |                    | VAZÃO NO<br>BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{tab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= Indicativa] |            |
| Horário           | 1            | TEMPERATURA<br>INICIAL: 29 °C       |                 | $C_{twd}$           | $C_{tpvcM}$  | $C_{tpvcP}$ | $C_{ppvcP}$ | $C_{plp}$          | $C_{il}$            | $V_M$                           | $V_{Mst}$             | $V_{bc}$            | PULSOS   | TEMPO<br>(seg.) | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO        | DOUBLE -<br>TIMING |   |   |                                       | PROCESSADO |
| CICLO             | TRECHO       | MEDIDA (°C)                         |                 |                     |              |             |             |                    |                     |                                 |                       |                     |          |                 |                    |                   |                    |   |   |                                       |            |
| 1                 | 21           | 30                                  | 46,62           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3432     | 46,61           | 3432,78            | 3432,52           | 519,08             | 520,66                                    | 0,142   | 0,147                                 | 0,085      |
| 2                 | 21           | 30                                  | 46,64           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3445     | 46,64           | 3445,11            | 3445,01           | 520,94             | 522,56                                    | 0,142   | 0,148                                 | 0,137      |
| 3                 | 21           | 30                                  | 46,72           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3449     | 46,71           | 3449,61            | 3449,52           | 521,62             | 523,24                                    | 0,142   | 0,148                                 | 0,080      |
| 4                 | 21           | 30                                  | 46,76           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3449     | 46,76           | 3448,82            | 3448,53           | 521,50             | 523,09                                    | 0,141   | 0,147                                 | 0,128      |
| 5                 | 21           | 30                                  | 46,73           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3454     | 46,74           | 3453,22            | 3453,51           | 522,17             | 523,85                                    | 0,142   | 0,148                                 | 0,163      |
| 6                 | 21           | 30                                  | 47,26           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3456     | 47,27           | 3455,57            | 3455,51           | 522,53             | 524,15                                    | 0,140   | 0,146                                 | 0,164      |
| 7                 | 21           | 30                                  | 50,76           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3678     | 50,76           | 3678,41            | 3678,52           | 556,22             | 557,98                                    | 0,130   | 0,145                                 | 0,124      |
| 8                 | 21           | 30                                  | 48,06           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3469     | 48,05           | 3469,16            | 3469,51           | 524,58             | 526,27                                    | 0,138   | 0,144                                 | 0,163      |
| 9                 | 21           | 30                                  | 48,02           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3490     | 48,02           | 3489,90            | 3489,51           | 527,72             | 529,31                                    | 0,138   | 0,145                                 | 0,153      |
| 10                | 21           | 30                                  | 48,36           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3489     | 48,36           | 3488,51            | 3488,51           | 527,51             | 529,16                                    | 0,137   | 0,144                                 | 0,144      |
| 11                | 21           | 30                                  | 48,61           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3495     | 48,62           | 3494,75            | 3495,02           | 528,45             | 530,14                                    | 0,136   | 0,144                                 | 0,097      |
| 12                | 21           | 30                                  | 49,17           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3506     | 49,16           | 3506,47            | 3506,52           | 530,22             | 531,89                                    | 0,135   | 0,143                                 | 0,133      |
| 13                | 21           | 30                                  | 49,04           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3500     | 49,04           | 3500,22            | 3500,02           | 529,28             | 530,90                                    | 0,135   | 0,143                                 | 0,153      |
| 14                | 21           | 30                                  | 51,41           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3651     | 51,41           | 3651,12            | 3651,02           | 552,10             | 553,81                                    | 0,129   | 0,142                                 | 0,187      |
| 15                | 21           | 30                                  | 54,48           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3690     | 54,47           | 3690,55            | 3690,51           | 558,06             | 559,80                                    | 0,121   | 0,135                                 | 0,115      |
| 16                | 21           | 30                                  | 51,92           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3515     | 51,91           | 3515,52            | 3515,51           | 531,59             | 533,25                                    | 0,127   | 0,135                                 | 0,126      |
| 17                | 21           | 30                                  | 52,55           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3517     | 52,56           | 3516,31            | 3516,51           | 531,71             | 533,40                                    | 0,126   | 0,134                                 | 0,104      |
| 18                | 21           | 30                                  | 52,46           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3515     | 52,45           | 3515,45            | 3515,01           | 531,58             | 533,18                                    | 0,126   | 0,134                                 | 0,148      |
| 19                | 21           | 30                                  | 52,32           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3521     | 52,32           | 3520,63            | 3520,51           | 532,36             | 534,01                                    | 0,126   | 0,134                                 | 0,108      |
| 20                | 21           | 30                                  | 55,17           | 1,00000             | 1,00315      | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3690     | 55,18           | 3689,40            | 3689,52           | 557,88             | 559,65                                    | 0,120   | 0,134                                 | 0,090      |
| $\mu$             |              |                                     | 49,08           |                     |              |             |             |                    |                     | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3502     | 49,08           | 3501,75            | 3501,71           | 529,51             | 531,16                                    | 0,135   | 0,143                                 | 0,133      |
| $u(x_i)^2$        |              |                                     | 0,2778          |                     |              |             |             |                    |                     |                                 |                       |                     | 241      | 0,2778          | 241,48             | 241,63            | 5,52               | 5,56                                      | 0,0000  | 0,0000                                | 0,0000     |
| $u(x_i)$          |              |                                     | 0,5271          |                     |              |             |             |                    |                     |                                 |                       |                     | 16       | 0,5270          | 15,54              | 15,54             | 2,35               | 2,36                                      | 0,0014  | 0,0012                                | 0,0069     |
| <b>RESULTADOS</b> |              |                                     |                 |                     |              |             |             |                    |                     |                                 |                       |                     |          |                 |                    |                   |                    |   |   |                                       |            |
| Mensurando (l/s)  |              | Absoluta                            |                 | Relativa (%)        |              | $y \pm U$   |             | Nível de Confiança |                     | Erro sistemático da Turbina (%) |                       | Fatores de Correção |          |                 |                    |                   |                    |   |   |                                       |            |
| ( $y$ )           | <b>0,135</b> | Incerteza Combinada ( $u_c$ )       | 0,0015          | 0,011               | <b>0,135</b> | $\pm$       | <b>0,03</b> | 99%                | Contagem de pulsos  | Indicativa                      | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO  | MF       |                 |                    |                   |                    |   |   |                                       |            |
|                   |              | Incerteza Expandida ( $U$ )         | 0,004           | 0,03                |              |             |             | $k_p = 3$          | -5,42%              | 1,44%                           | 529,51                | 531,16              | 0,945845 |                 |                    |                   |                    |   |   |                                       |            |

○ TABELA E.21: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 2-3) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÍNIMO DO SISTEMA ( $U_I = 14$ )

| SENTIDO          | ESFERA             | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                   |                 |                     |                     |                    |                                 |                    | TURBINA             |                          |                       |                    |            |                    | COMPARATIVO (l/s) |                  |        |   |   |                                       |
|------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|------------|--------------------|-------------------|------------------|--------|---|---|---------------------------------------|
|                  |                    |                                     | TEMPERATURA<br>INICIAL: 29 °C | TEMPO<br>(seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                     |                    |                                 |                    | VOLUMES<br>(litros) |                          |                       | DADOS BRUTOS       |            | INTERPOLAÇÃO       |                   | FATOR K PROPOSTO |        | VAZÃO NO<br>BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{tab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= Indicativa] |
| C <sub>twd</sub> | C <sub>tpvcM</sub> | C <sub>tpvcP</sub>                  |                               |                 | C <sub>ppvcP</sub>  | C <sub>plp</sub>    | C <sub>il</sub>    | V <sub>M</sub>                  | V <sub>Mst</sub>   | V <sub>bc</sub>     | PULSOS                   | TEMPO<br>(seg.)       | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO        |                  |        |   |   |                                       |
| 1                | 23                 | 30                                  | 46,59                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3422               | 46,60      | 3421,65            | 3422,02           | 517,05           | 518,73 | 0,142                                     | 0,147   | 0,140                                 |
| 2                | 23                 | 30                                  | 47,08                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3444               | 47,08      | 3444,51            | 3444,51           | 520,51           | 522,14 | 0,141                                     | 0,146   | 0,161                                 |
| 3                | 23                 | 30                                  | 46,56                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3436               | 46,55      | 3436,77            | 3436,50           | 519,34           | 520,92 | 0,142                                     | 0,147   | 0,163                                 |
| 4                | 23                 | 30                                  | 46,67                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3442               | 46,66      | 3442,64            | 3442,52           | 520,23           | 521,83 | 0,142                                     | 0,147   | 0,195                                 |
| 5                | 23                 | 30                                  | 46,77                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3441               | 46,78      | 3440,78            | 3441,02           | 519,94           | 521,61 | 0,142                                     | 0,147   | 0,156                                 |
| 6                | 23                 | 30                                  | 46,95                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3454               | 46,95      | 3453,95            | 3454,02           | 521,93           | 523,58 | 0,141                                     | 0,147   | 0,159                                 |
| 7                | 23                 | 30                                  | 47,23                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3448               | 47,24      | 3447,69            | 3448,02           | 520,99           | 522,67 | 0,140                                     | 0,146   | 0,128                                 |
| 8                | 23                 | 30                                  | 47,41                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3452               | 47,40      | 3452,80            | 3452,51           | 521,76           | 523,35 | 0,140                                     | 0,146   | 0,106                                 |
| 9                | 23                 | 30                                  | 47,71                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3458               | 47,72      | 3457,24            | 3457,51           | 522,43           | 524,11 | 0,139                                     | 0,145   | 0,093                                 |
| 10               | 23                 | 30                                  | 48,11                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3486               | 48,11      | 3486,32            | 3486,01           | 526,83           | 528,43 | 0,138                                     | 0,145   | 0,133                                 |
| 11               | 23                 | 30                                  | 48,73                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3488               | 48,73      | 3487,98            | 3488,01           | 527,08           | 528,73 | 0,136                                     | 0,143   | 0,205                                 |
| 12               | 23                 | 30                                  | 48,73                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3493               | 48,73      | 3492,55            | 3492,51           | 527,77           | 529,41 | 0,136                                     | 0,143   | 0,109                                 |
| 13               | 23                 | 30                                  | 48,53                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3484               | 48,53      | 3484,17            | 3484,01           | 526,50           | 528,12 | 0,136                                     | 0,143   | 0,159                                 |
| 14               | 23                 | 30                                  | 48,96                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3490               | 48,96      | 3489,50            | 3489,52           | 527,31           | 528,96 | 0,135                                     | 0,142   | 0,137                                 |
| 15               | 23                 | 30                                  | 49,27                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3500               | 49,28      | 3499,63            | 3500,01           | 528,84           | 530,55 | 0,134                                     | 0,142   | 0,117                                 |
| 16               | 23                 | 30                                  | 52,13                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3512               | 52,13      | 3512,08            | 3512,01           | 530,72           | 532,37 | 0,127                                     | 0,135   | 0,061                                 |
| 17               | 23                 | 30                                  | 52,22                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3507               | 52,23      | 3506,55            | 3506,52           | 529,88           | 531,54 | 0,127                                     | 0,134   | 0,110                                 |
| 18               | 23                 | 30                                  | 52,57                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3508               | 52,57      | 3508,10            | 3508,01           | 530,12           | 531,76 | 0,126                                     | 0,133   | 0,075                                 |
| 19               | 23                 | 30                                  | 52,53                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3509               | 52,53      | 3509,03            | 3509,02           | 530,26           | 531,91 | 0,126                                     | 0,133   | 0,122                                 |
| 20               | 23                 | 30                                  | 52,50                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315             | 1,00025            | 1,00002                         | 0,99654            | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3514               | 52,50      | 3514,11            | 3514,01           | 531,02           | 532,67 | 0,126                                     | 0,134   | 0,084                                 |
| $\mu$            |                    |                                     | 47,69                         |                 |                     |                     |                    |                                 |                    | 6,62                | 6,60                     | 6,60                  | 3463               | 47,69      | 3462,54            | 3462,58           | 523,23           | 524,87 | 0,139                                     | 0,145   | 0,144                                 |
| $u(x_i)^2$       |                    |                                     | 0,0606                        |                 |                     |                     |                    |                                 |                    |                     |                          |                       | 42                 | 0,0609     | 41,10              | 40,99             | 0,94             | 0,94   | 0,0000                                    | 0,0000  | 0,0001                                |
| $u(x_i)$         |                    |                                     | 0,2461                        |                 |                     |                     |                    |                                 |                    |                     |                          |                       | 6                  | 0,2468     | 6,41               | 6,40              | 0,97             | 0,97   | 0,0007                                    | 0,0005  | 0,0081                                |
| RESULTADOS       |                    |                                     |                               |                 |                     |                     |                    |                                 |                    |                     |                          |                       |                    |            |                    |                   |                  |        |   |   |                                       |
| Mensurando (l/s) |                    |                                     | Absoluta                      | Relativa (%)    | $y \pm U$           |                     | Nível de Confiança | Erro sistemático da Turbina (%) |                    | Fatores de Correção |                          |                       |                    |            |                    |                   |                  |        |   |   |                                       |
| ( $y$ )          | <b>0,139</b>       |                                     | Incerteza Combinada ( $u_c$ ) | 0,0007          | 0,005               | <b>0,139 ± 0,02</b> |                    | 99%                             | Contagem de pulsos | Indicativa          | FATOR-k<br>DOUBLE-TIMING | FATOR-k<br>PROCESSADO | MF                 |            |                    |                   |                  |        |   |   |                                       |
|                  |                    |                                     | Incerteza Expandida ( $U$ )   | 0,002           | 0,02                |                     | $k_p = 3$          |                                 | -4,32%             | -3,64%              | 523,23                   | 524,87                | 0,956781           |            |                    |                   |                  |        |   |   |                                       |

○ TABELA E.22: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 3-2) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÍNIMO DO SISTEMA ( $U_T = 17$ )

| SENTIDO                              | ESFERA                                       | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup>   | BALL PROVER     |                     |                    |                    |                  |                    |                     | TURBINA                         |                       |                     |                 |                    |            | COMPARATIVO (l/s)  |            |   |   |  |         |
|--------------------------------------|--|---------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|--------------------|------------|--------------------|------------|---|---|--|---------|
|                                      |  |                                       | TEMPO<br>(seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                    |                  |                    | VOLUMES<br>(litros) |                                 |                       | DADOS BRUTOS        |                 | INTERPOLAÇÃO       |            | FATOR K PROPOSTO   |            | VAZÃO NO<br>BALL PROVER<br>[= V <sub>M</sub> / t] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= pulsos / (k <sub>tab</sub> *<br>t)] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= Indicativa ] |         |
| Horário<br><b>1</b>                  | TEMPERATURA<br>INICIAL: 29 °C<br>MEDIDA (°C) | C <sub>twd</sub>                      |                 | C <sub>tpvcM</sub>  | C <sub>tpvcP</sub> | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub> | C <sub>il</sub>    | V <sub>M</sub>      | V <sub>Mst</sub>                | V <sub>bz</sub>       | PULSOS              | TEMPO<br>(seg.) | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO |   |   |  |         |
|                                      |  |                                       | 1               |                     |                    |                    |                  |                    |                     |                                 |                       |                     |                 |                    |            |                    |            | 32  | 30  | 46,90                                  | 1,00000 |
| 2                                    | 32   | 30                                    | 47,25           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3457            | 47,25              | 3457,05    | 3457,51            | 522,40     | 524,11  | 0,140   | 0,146                                  | 0,079   |
| 3                                    | 32   | 30                                    | 46,60           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3439            | 46,60              | 3439,04    | 3439,01            | 519,68     | 521,30  | 0,142   | 0,147                                  | 0,104   |
| 4                                    | 32   | 30                                    | 46,90           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3446            | 46,90              | 3445,86    | 3446,01            | 520,71     | 522,36  | 0,141   | 0,147                                  | 0,136   |
| 5                                    | 32   | 30                                    | 46,67           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3445            | 46,67              | 3445,35    | 3445,02            | 520,63     | 522,21  | 0,142   | 0,148                                  | 0,138   |
| 6                                    | 32   | 30                                    | 47,22           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3449            | 47,22              | 3448,73    | 3449,02            | 521,15     | 522,82  | 0,140   | 0,146                                  | 0,213   |
| 7                                    | 32   | 30                                    | 50,79           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3686            | 50,79              | 3686,27    | 3686,01            | 557,04     | 558,74  | 0,130   | 0,145                                  | 0,116   |
| 8                                    | 32   | 30                                    | 47,96           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3464            | 47,96              | 3464,01    | 3464,02            | 523,45     | 525,09  | 0,138   | 0,144                                  | 0,171   |
| 9                                    | 32   | 30                                    | 48,53           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3498            | 48,52              | 3498,62    | 3498,52            | 528,68     | 530,32  | 0,136   | 0,144                                  | 0,138   |
| 10                                   | 32   | 30                                    | 48,64           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3480            | 48,64              | 3480,04    | 3480,02            | 525,88     | 527,52  | 0,136   | 0,143                                  | 0,105   |
| 11                                   | 32   | 30                                    | 48,52           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3486            | 48,51              | 3486,45    | 3486,01            | 526,85     | 528,43  | 0,136   | 0,144                                  | 0,122   |
| 12                                   | 32   | 30                                    | 49,01           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3500            | 49,01              | 3500,06    | 3500,02            | 528,90     | 530,55  | 0,135   | 0,143                                  | 0,153   |
| 13                                   | 32   | 30                                    | 49,15           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3501            | 49,14              | 3501,52    | 3501,51            | 529,12     | 530,78  | 0,135   | 0,142                                  | 0,153   |
| 14                                   | 32   | 30                                    | 52,05           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3683            | 52,05              | 3682,91    | 3683,01            | 556,53     | 558,29  | 0,127   | 0,141                                  | 0,179   |
| 15                                   | 32   | 30                                    | 54,20           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3689            | 54,21              | 3688,50    | 3688,52            | 557,38     | 559,12  | 0,122   | 0,136                                  | 0,108   |
| 16                                   | 32   | 30                                    | 52,13           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3514            | 52,14              | 3513,47    | 3513,52            | 530,93     | 532,60  | 0,127   | 0,135                                  | 0,120   |
| 17                                   | 32   | 30                                    | 52,83           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3515            | 52,83              | 3514,92    | 3515,01            | 531,15     | 532,82  | 0,125   | 0,133                                  | 0,075   |
| 18                                   | 32   | 30                                    | 52,58           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3508            | 52,59              | 3507,20    | 3507,52            | 529,98     | 531,69  | 0,126   | 0,133                                  | 0,088   |
| 19                                   | 32   | 30                                    | 52,30           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3513            | 52,30              | 3513,57    | 3513,51            | 530,94     | 532,60  | 0,127   | 0,134                                  | 0,112   |
| 20                                   | 32   | 30                                    | 55,23           | 1,00000             | 1,00315            | 1,00315            | 1,00025          | 1,00002            | 0,99654             | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3691            | 55,23              | 3690,79    | 3691,01            | 557,72     | 559,50  | 0,120   | 0,134                                  | 0,112   |
| <b>μ</b>                             |  |                                       | 49,22           |                     |                    |                    |                  |                    |                     | 6,62                            | 6,60                  | 6,60                | 3501            | 49,22              | 3500,65    | 3500,68            | 528,99     | 530,65  | 0,135   | 0,142                                  | 0,130   |
| <b>u (x<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b> |  |                                       | 0,3430          |                     |                    |                    |                  |                    |                     |                                 |                       |                     | 382             | 0,3435             | 381,43     | 380,99             | 8,71       | 8,75  | 0,0000  | 0,0000                                 | 0,0001  |
| <b>u (x<sub>i</sub>)</b>             |  |                                       | 0,5857          |                     |                    |                    |                  |                    |                     |                                 |                       |                     | 20              | 0,5861             | 19,53      | 19,52              | 2,95       | 2,96  | 0,0016  | 0,0012                                 | 0,0083  |
| <b>RESULTADOS</b>                    |  |                                       |                 |                     |                    |                    |                  |                    |                     |                                 |                       |                     |                 |                    |            |                    |            |   |   |  |         |
| Mensurando (l/s)                     |  | Absoluta                              |                 | Relativa (%)        |                    | y ± U              |                  | Nível de Confiança |                     | Erro sistemático da Turbina (%) |                       | Fatores de Correção |                 |                    |            |                    |            |   |   |  |         |
| (y)                                  | <b>0,135</b>                                 | Incerteza Combinada (u <sub>c</sub> ) | 0,0016          | 0,012               | <b>0,135</b>       | ±                  | <b>0,04</b>      | 99%                | Contagem de pulsos  | Indicativa                      | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO  | MF              |                    |            |                    |            |   |   |  |         |
|                                      |  | Incerteza Expandida (U)               | 0,005           | 0,04                |                    |                    |                  | k <sub>p</sub> = 3 | -5,32%              | 3,46%                           | 528,99                | 530,65              | 0,946798        |                    |            |                    |            |   |   |  |         |

○ TABELA E.23: DADOS COLETADOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO (TRECHO 3-4) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÍNIMO DO SISTEMA ( $U_l = 14$ )

| SENTIDO          | ESFERA           | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER                   |                 |                     |                    |                     |                 |                    | TURBINA             |                                 |        |                       |                    |              | COMPARATIVO (l/s)  |                  |        |   |   |                                       |
|------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------|---------------------|---------------------------------|--------|-----------------------|--------------------|--------------|--------------------|------------------|--------|---|---|---------------------------------------|
|                  |                  |                                     | TEMPERATURA<br>INICIAL: 29 °C | TEMPO<br>(seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |                    |                     |                 |                    | VOLUMES<br>(litros) |                                 |        | DADOS BRUTOS          |                    | INTERPOLAÇÃO |                    | FATOR K PROPOSTO |        | VAZÃO NO<br>BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{tab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA<br>TURBINA<br>[= Indicativa] |
| MEDIDA (°C)      | C <sub>twd</sub> | C <sub>tpvcM</sub>                  |                               |                 | C <sub>tpvcP</sub>  | C <sub>ppvcP</sub> | C <sub>plp</sub>    | C <sub>il</sub> | V <sub>M</sub>     | V <sub>Mst</sub>    | V <sub>bc</sub>                 | PULSOS | TEMPO<br>(seg.)       | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO   | DOUBLE -<br>TIMING | PROCESSADO       |        |   |   |                                       |
|                  |                  |                                     | 1                             | 34              |                     |                    |                     |                 |                    |                     |                                 |        |                       |                    |              |                    |                  | 30     | 46,48                                     | 1,00000   | 1,00315                               |
| 2                | 34               | 30                                  | 46,85                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3424                  | 46,85              | 3423,67      | 3424,02            | 517,58           | 519,25 | 0,141                                     | 0,146   | 0,136                                 |
| 3                | 34               | 30                                  | 46,49                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3432                  | 46,49              | 3431,61      | 3431,52            | 518,78           | 520,39 | 0,142                                     | 0,148   | 0,086                                 |
| 4                | 34               | 30                                  | 46,71                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3438                  | 46,71              | 3437,75      | 3437,51            | 519,71           | 521,30 | 0,142                                     | 0,147   | 0,133                                 |
| 5                | 34               | 30                                  | 46,55                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3434                  | 46,55              | 3433,87      | 3434,01            | 519,12           | 520,77 | 0,142                                     | 0,147   | 0,152                                 |
| 6                | 34               | 30                                  | 47,40                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3449                  | 47,39              | 3449,41      | 3449,51            | 521,47           | 523,12 | 0,140                                     | 0,145   | 0,098                                 |
| 7                | 34               | 30                                  | 47,17                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3439                  | 47,16              | 3439,60      | 3439,52            | 519,99           | 521,60 | 0,140                                     | 0,146   | 0,151                                 |
| 8                | 34               | 30                                  | 47,30                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3446                  | 47,30              | 3445,36      | 3445,52            | 520,86           | 522,51 | 0,140                                     | 0,146   | 0,108                                 |
| 9                | 34               | 30                                  | 47,67                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3458                  | 47,67              | 3458,16      | 3458,02            | 522,79           | 524,41 | 0,139                                     | 0,145   | 0,110                                 |
| 10               | 34               | 30                                  | 48,13                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3484                  | 48,12              | 3484,46      | 3484,52            | 526,77           | 528,43 | 0,137                                     | 0,145   | 0,140                                 |
| 11               | 34               | 30                                  | 48,58                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3474                  | 48,57              | 3474,33      | 3474,01            | 525,24           | 526,83 | 0,136                                     | 0,143   | 0,167                                 |
| 12               | 34               | 30                                  | 48,42                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3474                  | 48,41              | 3474,16      | 3474,52            | 525,21           | 526,91 | 0,137                                     | 0,143   | 0,124                                 |
| 13               | 34               | 30                                  | 48,52                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3479                  | 48,52              | 3478,86      | 3479,01            | 525,92           | 527,59 | 0,136                                     | 0,143   | 0,167                                 |
| 14               | 34               | 30                                  | 48,94                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3483                  | 48,94              | 3483,13      | 3483,51            | 526,57           | 528,27 | 0,135                                     | 0,142   | 0,158                                 |
| 15               | 34               | 30                                  | 49,44                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3494                  | 49,44              | 3494,11      | 3494,02            | 528,23           | 529,87 | 0,134                                     | 0,141   | 0,108                                 |
| 16               | 34               | 30                                  | 52,49                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3515                  | 52,49              | 3515,00      | 3515,02            | 531,39           | 533,05 | 0,126                                     | 0,134   | 0,121                                 |
| 17               | 34               | 30                                  | 52,22                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3497                  | 52,21              | 3497,69      | 3497,51            | 528,77           | 530,40 | 0,127                                     | 0,134   | 0,137                                 |
| 18               | 34               | 30                                  | 52,45                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3499                  | 52,45              | 3499,16      | 3499,01            | 528,99           | 530,63 | 0,126                                     | 0,133   | 0,108                                 |
| 19               | 34               | 30                                  | 52,17                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3499                  | 52,18              | 3498,77      | 3498,51            | 528,93           | 530,55 | 0,127                                     | 0,134   | 0,087                                 |
| 20               | 34               | 30                                  | 52,36                         | 1,00000         | 1,00315             | 1,00315            | 1,00025             | 1,00002         | 0,99654            | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3504                  | 52,37              | 3503,30      | 3503,53            | 529,62           | 531,31 | 0,126                                     | 0,134   | 0,128                                 |
| $\mu$            |                  |                                     | 47,64                         |                 |                     |                    |                     |                 |                    | 6,62                | 6,59                            | 6,59   | 3455                  | 47,64              | 3454,80      | 3454,85            | 522,29           | 523,93 | 0,139                                     | 0,145   | 0,130                                 |
| $u(x_i)^2$       |                  |                                     | 0,0627                        |                 |                     |                    |                     |                 |                    |                     |                                 |        | 42                    | 0,0626             | 42,20        | 42,25              | 0,96             | 0,97   | 0,0000                                    | 0,0000  | 0,0000                                |
| $u(x_i)$         |                  |                                     | 0,2504                        |                 |                     |                    |                     |                 |                    |                     |                                 |        | 6                     | 0,2501             | 6,50         | 6,50               | 0,98             | 0,99   | 0,0007                                    | 0,0005  | 0,0066                                |
| RESULTADOS       |                  |                                     |                               |                 |                     |                    |                     |                 |                    |                     |                                 |        |                       |                    |              |                    |                  |        |   |   |                                       |
| Mensurando (l/s) |                  |                                     | Absoluta                      |                 | Relativa (%)        |                    | $y \pm U$           |                 | Nível de Confiança |                     | Erro sistemático da Turbina (%) |        | Fatores de Correção   |                    |              |                    |                  |        |   |   |                                       |
| ( $y$ )          | <b>0,139</b>     |                                     | Incerteza Combinada ( $u_c$ ) | 0,0007          | 0,005               |                    | <b>0,139 ± 0,02</b> |                 | 99%                |                     | Contagem de pulsos Indicativa   |        | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO | MF           |                    |                  |        |   |   |                                       |
|                  |                  |                                     | Incerteza Expandida ( $U$ )   | 0,002           | 0,02                |                    |                     |                 | $k_p = 3$          |                     | -4,15%                          |        | 6,62%                 | 522,29             | 523,93       | 0,958513           |                  |        |   |   |                                       |



○ TABELA E.24: DADOS COLETADOS NO SENTIDO HORÁRIO (TRECHO 4-3) PARA O NÍVEL DE VAZÃO MÍNIMO DO SISTEMA ( $U_T = 16$ )

| SENTIDO          |       | ESFERA                        | Pressão:<br>0,5 kgf/cm <sup>2</sup> | BALL PROVER  |                     |             |             |                    |                    | TURBINA                         |                       |                     |              |        |              | COMPARATIVO (l/s) |                  |                 |  |  |                                    |
|------------------|-------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------|---------------------|-------------|-------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------|--------|--------------|-------------------|------------------|-----------------|--|--|------------------------------------|
| Horário          | 1     | TEMPERATURA INICIAL: 29 °C    | MEDIDA (°C)                         | TEMPO (seg.) | FATORES DE CORREÇÃO |             |             |                    |                    | VOLUMES (litros)                |                       |                     | DADOS BRUTOS |        | INTERPOLAÇÃO |                   | FATOR K PROPOSTO |                 | VAZÃO NO BALL PROVER<br>[= $V_M / t$ ] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= pulsos / ( $K_{tab} \cdot t$ )] | VAZÃO NA TURBINA<br>[= Indicativa] |
|                  |       |                               |                                     |              | $C_{twd}$           | $C_{tpvcM}$ | $C_{tpvcP}$ | $C_{ppvcP}$        | $C_{plp}$          | $C_{ll}$                        | $V_M$                 | $V_{Mst}$           | $V_{bc}$     | PULSOS | TEMPO (seg.) | DOUBLE - TIMING   | PROCESSADO       | DOUBLE - TIMING |  |  |                                    |
| 1                | 43    | 30                            | 46,67                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3421         | 46,67  | 3421,41      | 3421,06           | 517,24           | 518,80          | 0,142                                  | 0,146  | 0,132                              |
| 2                | 43    | 30                            | 46,84                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3437         | 46,84  | 3437,60      | 3437,13           | 519,69           | 521,24          | 0,141                                  | 0,147  | 0,116                              |
| 3                | 43    | 30                            | 46,65                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3433         | 46,65  | 3433,13      | 3433,11           | 519,01           | 520,63          | 0,142                                  | 0,147  | 0,119                              |
| 4                | 43    | 30                            | 47,10                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3443         | 47,08  | 3444,24      | 3443,98           | 520,69           | 522,28          | 0,141                                  | 0,146  | 0,164                              |
| 5                | 43    | 30                            | 46,55                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3433         | 46,54  | 3433,70      | 3433,51           | 519,10           | 520,69          | 0,142                                  | 0,147  | 0,166                              |
| 6                | 43    | 30                            | 47,07                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3437         | 47,05  | 3438,09      | 3437,70           | 519,76           | 521,33          | 0,141                                  | 0,146  | 0,229                              |
| 7                | 43    | 30                            | 50,45                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3664         | 50,44  | 3664,53      | 3664,34           | 553,99           | 555,70          | 0,131                                  | 0,145  | 0,144                              |
| 8                | 43    | 30                            | 47,72                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3455         | 47,72  | 3455,63      | 3455,24           | 522,41           | 523,99          | 0,139                                  | 0,145  | 0,140                              |
| 9                | 43    | 30                            | 48,21                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3476         | 48,20  | 3476,13      | 3476,12           | 525,51           | 527,15          | 0,137                                  | 0,144  | 0,110                              |
| 10               | 43    | 30                            | 48,42                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3478         | 48,41  | 3478,87      | 3478,67           | 525,93           | 527,54          | 0,137                                  | 0,144  | 0,074                              |
| 11               | 43    | 30                            | 48,73                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3480         | 48,72  | 3480,54      | 3480,51           | 526,18           | 527,82          | 0,136                                  | 0,143  | 0,111                              |
| 12               | 43    | 30                            | 49,03                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3491         | 49,03  | 3491,12      | 3491,01           | 527,78           | 529,41          | 0,135                                  | 0,142  | 0,166                              |
| 13               | 43    | 30                            | 48,72                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3477         | 48,72  | 3477,51      | 3477,32           | 525,72           | 527,34          | 0,136                                  | 0,143  | 0,151                              |
| 14               | 43    | 30                            | 51,36                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3649         | 51,36  | 3649,29      | 3649,14           | 551,69           | 553,39          | 0,129                                  | 0,142  | 0,139                              |
| 15               | 43    | 30                            | 52,22                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3677         | 52,21  | 3678,15      | 3677,64           | 556,05           | 557,71          | 0,127                                  | 0,141  | 0,128                              |
| 16               | 43    | 30                            | 52,17                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3499         | 52,15  | 3500,17      | 3499,90           | 529,15           | 530,76          | 0,127                                  | 0,134  | 0,139                              |
| 17               | 43    | 30                            | 52,40                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3497         | 52,38  | 3498,02      | 3497,71           | 528,82           | 530,43          | 0,126                                  | 0,133  | 0,072                              |
| 18               | 43    | 30                            | 52,46                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3495         | 52,45  | 3495,84      | 3495,51           | 528,49           | 530,09          | 0,126                                  | 0,133  | 0,045                              |
| 19               | 43    | 30                            | 52,29                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3503         | 52,28  | 3503,46      | 3503,41           | 529,64           | 531,29          | 0,127                                  | 0,134  | 0,129                              |
| 20               | 43    | 30                            | 56,62                               | 1,00000      | 1,00315             | 1,00315     | 1,00025     | 1,00002            | 0,99654            | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3758         | 56,60  | 3759,03      | 3758,60           | 568,28           | 569,99          | 0,117                                  | 0,133  | 0,123                              |
| $\mu$            |       |                               |                                     | 49,52        |                     |             |             |                    |                    | 6,62                            | 6,59                  | 6,59                | 3505         | 49,51  | 3505,33      | 3505,08           | 529,93           | 531,55          | 0,134                                  | 0,142  | 0,129                              |
| $u(x_i)^2$       |       |                               |                                     | 0,2867       |                     |             |             |                    |                    |                                 |                       |                     | 374          | 0,2863 | 373,55       | 373,57            | 8,54             | 8,59            | 0,0000                                 | 0,0000   | 0,0001                             |
| $u(x_i)$         |       |                               |                                     | 0,5354       |                     |             |             |                    |                    |                                 |                       |                     | 19           | 0,5351 | 19,33        | 19,33             | 2,92             | 2,93            | 0,0014                                 | 0,0012   | 0,0101                             |
| RESULTADOS       |       |                               |                                     |              |                     |             |             |                    |                    |                                 |                       |                     |              |        |              |                   |                  |                 |  |  |                                    |
| Mensurando (l/s) |       | Absoluta                      |                                     | Relativa (%) |                     | $y \pm U$   |             | Nível de Confiança |                    | Erro sistemático da Turbina (%) |                       | Fatores de Correção |              |        |              |                   |                  |                 |  |  |                                    |
| ( $y$ )          | 0,134 | Incerteza Combinada ( $u_c$ ) | 0,0015                              | 0,011        | 0,134               | $\pm$       | 0,03        | 99%                | Contagem de pulsos | Indicativa                      | FATOR-k DOUBLE-TIMING | FATOR-k PROCESSADO  | MF           |        |              |                   |                  |                 |  |  |                                    |
|                  |       | Incerteza Expandida ( $U$ )   | 0,004                               | 0,03         |                     |             |             | $k_p = 3$          | -5,48%             | 3,90%                           | 529,93                | 531,55              | 0,945216     |        |              |                   |                  |                 |  |  |                                    |