



GUILHERME BERGMANN

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO
DE VAZÃO**

Lajeado
2011

GUILHERME BERGMANN

AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário UNIVATES, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Área de concentração: Instrumentação, Controle e Automação de Processos

ORIENTADOR: Prof. M.Sc. Robson Dagmar Schaeffer

Lajeado

2011

GUILHERME BERGMANN

AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação do CETEC e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. M.Sc. Robson Dagmar Schaeffer, UNIVATES

Mestre PPGEE/UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. M.Sc. Robson Dagmar Schaeffer, UNIVATES

Mestre PPGEE/UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Prof. M.Sc. Rodrigo Wolff Porto, UNIVATES

Mestre PPGEE/UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Ronaldo Hüsemann, UNIVATES

Doutor PPGEE/UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Coordenador do Curso de Engenharia de

Controle e Automação : _____

Prof. M.Sc. Rodrigo Wolff Porto

Lajeado, dezembro de 2011.

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. M.Sc. Robson Dagmar Schaeffer, pela atenção e dedicação na orientação deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Automação Industrial, em especial Cirilo Matheus Polidoro, por sua disponibilidade no auxílio das tarefas e pela amizade formada ao longo deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho descreve uma avaliação metrológica de três medidores de vazão, Smar LD302, Emerson 8742 e Applitech AP-7000. Para a realização dos ensaios utilizou-se uma planta piloto de processos com barramento de campo *Foundation Fieldbus*. Tal avaliação consiste na comparação metrológica do desempenho de três medidores de vazão com princípios de funcionamento distintos: pressão diferencial por placa de orifício, eletromagnético e área variável. A motivação para este trabalho surgiu através de estudos e pesquisas sobre o estado da arte de avaliações metrológicas de medidores de vazão. O trabalho tem por objetivo a caracterização dos medidores de vazão Smar LD302, Emerson 8742 e Applitech AP-7000. A avaliação do desempenho de cada um deles é demonstrada através dos resultados obtidos nos ensaios, fazendo-se o levantamento das curvas de calibração e de erro utilizando uma Planta de Líquidos do Laboratório de Automação Industrial (LAI) do Centro Universitário UNIVATES que é baseada no protocolo de comunicação industrial *Foundation Fieldbus*.

Palavras-chave: Sistemas de medição de vazão, Calibração, Incerteza de Medição, Metrologia, Instrumentação, Controle e Automação e Barramentos de campo.

ABSTRACT

This work describes a metrological evaluation of three flowmeters, Smar LD302, Emerson 8742 and Applitech AP-7000. For the tests a pilot process plant with Foundation Fieldbus was used. The evaluation consists on a metrological performance comparison of three flow meters with distinct operating principles: differential pressure with orifice plate, electromagnetic and variable area. The motivation for this work came through studies and research on the state of the art of metrological assessments of flowmeters. This work aims the characterization of flowmeters, Smar LD302, Emerson 8742 and Applitech AP-7000. The evaluating the performance of each one of them is demonstrated by the test results, generating a calibration curve and an error curve using a so called Liquids Plant of the Industrial Automation Laboratory (IAL) of the UNIVATES University Center which is based on the Foundation Fieldbus industrial communication protocol.

Keywords: Systems of flow measurement, Calibration, Uncertainty of Measurement, Metrology, Instrumentation, Control and Automation and Fieldbus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Placa de orifício com os flanges e parafusos	24
Figura 2 Medidor de vazão por placa de orifício.....	24
Figura 3 Princípio de funcionamento do medidor eletromagnético (DELMÉE, 2003)	28
Figura 4 Princípio de funcionamento do rotâmetro (DELMÉE, 2003).....	30
Figura 5 Escala para rotômetros convencionais (DELMÉE, 2003)	31
Figura 6 Calibração por pesagem estática	39
Figura 7 Calibração por pesagem dinâmica	39
Figura 8 Provedor unidirecional.....	40
Figura 9 Curva de erros	47
Figura 10 Relação entre o erro e o ΔP_{real} (SALVIO, 2008).....	49
Figura 11 Relação entre o erro e o ΔP_{real} (SALVIO, 2008).....	49
Figura 12 Relação entre ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (SALVIO, 2008).....	49
Figura 13 Relação entre ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (SALVIO, 2008).....	50
Figura 14 Relação entre o erro e o ΔP_{real} (SALVIO, 2008).....	50
Figura 15 Relação entre o erro e o ΔP_{real} (SALVIO, 2008).....	50
Figura 16 Relação entre ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (SALVIO, 2008).....	51
Figura 17 Relação entre ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (SALVIO, 2008).....	51
Figura 18 Erro x vazão nominal no ensaio C1T1	52
Figura 19 Erro x vazão nominal no ensaio C2T1	53
Figura 20 Erro x Vazão Nominal obtidos no Laboratório B,	54
Figura 21 Esquemático do sistema de calibração - Laboratório fluido água	56
Figura 22 Desvios encontrados na calibração do ASV – laboratório fluido água.....	56
Figura 23 Esquemático do sistema de calibração - Laboratório fluido óleo mineral	57
Figura 24 Desvios encontrados na calibração do ASV – laboratório fluido óleo.	58
Figura 25 Planta de Líquidos do Laboratório de Automação Industrial da Univates	60
Figura 26 Topologia Daisy-Chain	64
Figura 27 Configuração da malha hidráulica em simbologia de instrumentação.....	66
Figura 28 Configuração lógica da planta de líquidos	67
Figura 29 Medidores de vazão em série na tubulação.....	69
Figura 30 Dispositivos de campo distribuídos ao longo do canal Fieldbus1	70
Figura 31 Configuração física e lógica da planta de líquidos no software Syscon	72
Figura 32 Sistema supervisorio	73
Figura 33 Configuração das tags no RSView32 da Rockwell.....	74
Figura 34 Supervisorio com visualização de vídeo do AP-7000	74
Figura 35 Curva de calibração dos medidores 8742 e AP-7000	78
Figura 36 Curva de erros dos medidores 8742 e AP-7000.....	79
Figura 37 Curva de calibração dos medidores 8752 e AP-7000	82
Figura 38 Curva de erros dos medidores 8742 e AP-7000.....	83
Figura 39 Curva de calibração dos medidores 8742 e AP-7000	86
Figura 40 Curva de erros dos medidores 8742 e AP-7000.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação de princípios de medição de vazão.....	23
Tabela 2 Classes de exatidão	38
Tabela 3 Blocos funcionais padrão.....	42
Tabela 4 Valores de velocidade indicados pelo padrão e LDA e suas respectivas incertezas .	46
Tabela 5 Valores da medição de vazão e incertezas, utilizando-se o LDA.....	47
Tabela 6 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor eletromagnético 8742.....	76
Tabela 7 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor por área variável AP-7000..	76
Tabela 8 Balanço de incertezas do medidor eletromagnético 8742	76
Tabela 9 Balanço de incertezas do medidor por área variável AP-7000.....	77
Tabela 10 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor eletromagnético 8742.....	80
Tabela 11 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor por área variável AP-7000	80
Tabela 12 Balanço de incertezas do medidor eletromagnético 8742	81
Tabela 13 Balanço de incertezas do medidor por área variável AP-7000.....	81
Tabela 14 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor eletromagnético 8742.....	84
Tabela 15 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor por área variável AP-7000	84
Tabela 16 Balanço de incertezas do medidor eletromagnético 8742	85
Tabela 17 Balanço de incertezas do medidor por área variável AP-7000.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS

AI: Analog Input

AO: Analog Output

API: American Petroleum Institute

CLP: Controlador Lógico Programável

COM: Component Object Model

DCOM: Distributed Component Object Model

DCS: Distributed Control System

DI: Discrete Input

DN: Diâmetros Nominais

DO: Discrete Output

E/S: Entrada/Saída

EMA: Erro Máximo Admissível

ERP: Enterprise Resource Planning

FB: Function Block

FEM: Força Eletromotriz

FF: Foundation Fieldbus

GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

HSE: High Speed Ethernet

I/O: Input/Output

IHM: Interface Homem Máquina

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ISO: International Organization for Standardization;

LAI: Laboratório de Automação Industrial

LDA: Laser Doppler Anemometry

NMI: Netherland Measurement Institute

OIML: Organização Internacional de Metrologia Legal

OLE: Object Linking and Embedding

OPC: Ole for Process Control

OPC-DA: Ole for Process Control - Data Access

PC: Personal Computer

PIB: Produto Interno Bruto

PID: Proportional/Integral/Drivative

PVC: Polyvinyl Chloride

RBC: Rede Brasileira de Calibração

RTM: Regulamento Técnico de Medição

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition

SI: Sistema Internacional

SMV: Sistemas de Medição de Vazão

TCP/IP: Transmission Control Protocol/Internet Protocol

URL: Upper Range Limit

VIM: Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia

VVC: Valor Verdadeiro Convencional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	Conceitos fundamentais.....	18
2.1.1	Vazão.....	18
2.1.2	Pressão.....	18
2.1.3	Pressão diferencial.....	19
2.1.4	Temperatura.....	19
2.2	Propriedades dos líquidos.....	19
2.2.1	Densidade dos líquidos.....	20
2.2.2	Viscosidade dos líquidos.....	20
2.2.3	Número de Reynolds.....	21
2.3	Classificação dos medidores de vazão.....	22
2.3.1	Medidores geradores de pressão diferencial por placas de orifício.....	23
2.3.2	Medidores Lineares Eletromagnéticos.....	28
2.3.3	Medidores lineares de área variável.....	30
2.4	Incerteza.....	32
2.4.1	Incerteza dos medidores geradores de pressão diferencial por placas de orifício.....	36
2.4.2	Incerteza dos medidores eletromagnéticos.....	37
2.4.3	Incerteza dos medidores lineares de área variável.....	37
2.5	Classes de exatidão dos medidores de vazão.....	38
2.6	Calibração de medidores de vazão de líquidos.....	38
2.6.1	Calibração comparativa.....	38
2.6.2	Calibração absoluta – instalação fixa.....	39
2.6.3	Calibração com provadores.....	40
2.7	O <i>Foundation Fieldbus</i>	41
2.8	OPC (<i>Ole for Process Control</i>).....	42
2.9	Sistemas SCADA.....	44
2.10	Trabalhos relacionados.....	45
2.10.1	Avaliação metrológica de medição de vazão com laser Doppler anemométrico.....	45
2.10.2	Influência da pressão de operação no desempenho de transmissores diferenciais de pressão.....	48
2.10.3	Avaliação metrológica da comparação interlaboratorial da calibração de medidores ultra-sônicos.....	51
2.10.4	Análise metrológica do desempenho de medidores ultra-sônicos de vazão de líquidos.....	54
3	DESENVOLVIMENTO.....	59
3.1	A Planta de líquidos.....	59
3.2	Dispositivos <i>Foundation Fieldbus</i>	63
3.3	Configuração da malha hidráulica.....	65
3.4	Configuração da Rede Industrial <i>Foudation Fieldbus</i> através do Syscon.....	66
3.4.1	Configuração física.....	67

3.4.2	Configuração lógica.....	67
3.5	Sistema <i>SCADA</i>	68
4	EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	69
4.1	Configuração da malha hidráulica.....	69
4.2	Configuração da Rede Industrial Foundation Fieldbus através do Syscon	70
4.3	<i>SCADA</i>	72
4.4	Avaliação metrológica.....	75
4.4.1	Condição de calibração 1.....	75
4.4.2	Condição de calibração 2.....	80
4.4.3	Condição de calibração 3.....	84
5	CONCLUSÕES.....	88

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se medir vazão surgiu há aproximadamente 21 séculos, com a canalização da água. Com o tempo, descobriu-se que o consumo doméstico de líquido poderia ser tarifado, gerando uma fonte de arrecadação para a administração pública. Camargo (2009) cita que o desenvolvimento dos princípios básicos da medição de vazão teve início no império romano, na época do imperador Caio Julio César (101 – 44 a.C.), quando se utilizavam relógios de água que funcionavam por gravidade para a medição do tempo e para a medição da água utilizada pelos habitantes das áreas urbanas.

No século XX, a demanda por medição da vazão de fluídos tornou-se mais presente, devido ao crescimento da aplicação dos processos contínuos¹ na indústria. Em consequência disto, foram desenvolvidos outros medidores também baseados em princípios e resultados de estudos de físicos (DELMÉE, 2003).

Ao longo da história, a medição de vazão foi utilizada apenas como um parâmetro para operar sistemas hidráulicos e fazer a dosagem de produtos químicos, não se preocupando com a exatidão das medições. Mas, num processo industrial onde a medição da vazão que entra ou que sai do sistema é importante para o controle do processo, de forma a parametrizar as dosagens de insumos, a exatidão necessária é a que garanta as condições operacionais do processo (MARTIM, 2005).

Um exemplo da necessidade da exatidão na medição de vazão é em sistemas onde há transferência de custódia, com importação e exportação de água entre empresas permissionárias de saneamento. Neste caso, a medição da vazão é um dos principais parâmetros de alimentação do sistema, visto que tem uma função de balanço onde o erro de medição de cada metro cúbico significa prejuízo para uma das partes. Pode-se citar outros exemplos em que a medição de vazão garante a qualidade operacional do processo, como sistemas hidráulicos, sistemas de gás natural e petróleo.

Com o desenvolvimento da sociedade e a evolução dos processos de produção, a demanda e as disputas pelo uso da água aumentaram, consequentemente levando-se a um aumento na importância da medição de vazão. Com isso, o desenvolvimento de métodos e instrumentos de medição de vazão tornou-se necessário para solucionar estas questões (CAMARGO, 2009).

¹ Processo no qual as interrupções são mínimas em qualquer corrida de produção ou entre corridas de produção de produtos que exibam características de processo, tais como líquidos, fibras, pulverizados, gases.

Esta constante busca pelo aumento da eficiência e redução de custos levou a uma crescente utilização de medidores de vazão na venda de produtos (gasolina, óleo, gás, água), na conservação de energia, na proteção ambiental e em processos industriais. Deste modo, torna-se cada vez mais importante se conhecer as incertezas associadas às medições de vazão (MARTINS, 1998).

A calibração destes medidores torna-se importante, a partir do momento em que os resultados da medição de vazão estão associados à transações comerciais, como a venda de gasolina em um posto de combustível ou até mesmo os testes de desempenho hidráulico de equipamentos, como por exemplo as turbinas de uma usina hidrelétrica.

Conforme (BEGA, 2006) a vazão é a grandeza que requer os mais diversos recursos tecnológicos para a construção de medidores e transmissores. Atualmente, dispõe-se de diversas inovações nos sistemas de medição de vazão, devido à variedade de princípios físicos utilizados. Esse avanço tende a prosseguir em função das crescentes exigências das indústrias de processo e da competição entre os fabricantes (FILHO, 2006; PAULA, 2007).

Com isso, (ARANTES, 2007) destaca que, as empresas que implantarem melhores práticas de medição poderão ser capazes de agregar mais qualidade aos seus processos e produtos, garantindo a conformidade dos mesmos.

A Metrologia, que é, segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia, a ciência da Medição, supre todos os processos, sejam eles administrativos ou técnicos, do conhecimento necessário para tomada de decisões. A importância de uma medição de boa qualidade, quer dizer, com incertezas que satisfaçam às expectativas dos clientes, pode ser observada quando temos pela frente objetivos e metas a serem alcançados.

Atualmente, a metrologia pode ser considerada uma das principais ferramentas para o aumento da produtividade das indústrias. Através dela pode-se melhorar processos, prever perdas e ganhos futuros. A metrologia veio dar relevância às coletas de dados e análises de processos, suprimindo os gestores destes processos de maior credibilidade. Desta forma, a metrologia veio contribuir para a qualidade, dando maior credibilidade aos resultados obtidos (ARANTES, 2007).

Conforme (JORNADA, 2009), estima-se que cerca de 4 a 6% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional dos países industrializados sejam dedicados aos processos de medição. A importância da metrologia vem crescendo devido à constante busca por inovação e à grande necessidade de harmonização nas relações de troca, atualmente intensas e complexas, envolvendo um grande número de grandezas a serem medidas.

Recentemente, diversas avaliações metrológicas² de sistemas de medição de vazão tem sido realizadas (ACCIOLY, 2007; MELO, 2007; OLIVEIRA, 2007). Em especial destacam-se os trabalhos de (ARANTES, 2007; PAULA, 2007; SALVIO, 2008; SILVA, 2008) relacionados à avaliação de sistemas de medição de vazão de fluídos, no que se refere à calibração de medidores e análise das incertezas envolvidas nas medições.

Sendo assim, a proposta deste trabalho é realizar uma avaliação metrológica de Sistemas de Medição de Vazão (SMV), onde são analisados três medidores de vazão de líquidos com diferentes princípios de funcionamento:

- a) pressão diferencial através de placas de orifício, com transmissor Smar LD302;
- b) eletromagnético, com transmissor de vazão Emerson 8742;
- c) área variável, com medidor de vazão Applitech AP-7000.

Os medidores são conectados em série numa tubulação por onde escoar o líquido de teste, no caso a água, tendo como padrão de referência o medidor com maior exatidão dentre os três, que foi denominado como calibrador. Este, por sua vez, indicará a compatibilidade metrológica que serve como referência para calibrar os outros dois medidores. A análise foi feita realizando variações de grandezas físicas como vazão, temperatura e pressão, permitindo-se avaliar a influência de cada uma delas na indicação dos instrumentos de medição.

Em cada ensaio, foram coletados os dados relativos às indicações de cada medidor de vazão em determinados períodos de tempo, para posterior análise do desempenho de cada um deles. De posse destes dados, foi feito o levantamento das curvas de calibração e de erro de cada medidor em relação ao calibrador, fazendo-se uma análise das incertezas envolvidas nas medições.

De acordo com o INMETRO (2003), para cada uma das variáveis de influência foram utilizados cinco pontos de calibração, e, para cada ponto, realizadas 50 medições.

De forma geral, os principais objetivos do trabalho são:

- a) instalação e configuração do medidor com maior exatidão utilizado como padrão de referência para aferir os outros medidores (DELMÉE, 2003);
- b) análise metrológica dos medidores, com a identificação e estimativas das fontes de incertezas envolvidas;

²Avaliações metrológicas neste trabalho refere-se à metrologia, que é a ciência ou estudo que envolve os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação.

- c) caracterização dos medidores, avaliação do desempenho através dos resultados obtidos, fazendo-se o levantamento da curva de calibração e de erro.

A arquitetura do sistema proposto é integrada e dividida em dois níveis:

- a) nível de supervisão;
- b) nível de instrumentação e controle distribuído.

O nível de supervisão, com um sistema supervísório rodando num microcomputador do tipo PC industrial armazena a leitura dos medidores de vazão. Através do supervísório é possível controlar e visualizar variáveis de processo.

O nível de instrumentação e controle distribuído constitui-se de sensores e atuadores inteligentes, responsáveis pela leitura e atuação de variáveis do processo, podendo medir e controlar grandezas físicas como vazão, temperatura e pressão.

Para implementar a proposta foi utilizada uma planta de líquidos do Laboratório de Automação Industrial (LAI) do Centro Universitário UNIVATES. Esta planta de líquidos é constituída basicamente por tanques e reservatórios interligados por tubulações, por onde circula o líquido processado, sendo instrumentada com sensores e atuadores inteligentes, interligados por uma rede *Foundation Fieldbus*.

A topologia da planta foi adaptada de forma a atender aos objetivos propostos neste trabalho, com os 3 medidores em série na tubulação. Os medidores Applitech AP-7000, Emerson 8742 e Smar LD302 estão dispostos nessa ordem, respectivamente, garantindo que a vazão seja a mesma para todos.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta um estudo sobre o estado da arte de sistemas de medição de vazão; o Capítulo 3 descreve a proposta de trabalho, destacando a planta de líquidos e a configuração dos dispositivos na rede; o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de medição vazão; por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre o trabalho, baseadas nos ensaios realizados na parte experimental, assim como propostas para trabalhos futuros decorrentes das pesquisas realizadas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conceitos fundamentais

2.1.1 Vazão

É definida como a quantidade de fluido que passa pela seção reta de um canal, por unidade de tempo. Este fluido pode ser líquido, gás ou vapor. De uma maneira geral, a medição é realizada através do efeito de uma interação física entre o fluido e o medidor.

Também pode ser definida como a quantidade volumétrica (ou mássica) de um fluido que escoar por um elemento primário, que represente o instrumento que interage com o escoamento para produzir uma medida por unidade de tempo (MARTINS, 1998; DELMÉE, 2003; MARTIM, 2005; BEGA, 2006; CASSIOLATO; ALVES, 2008).

2.1.1.1 Vazão mássica

É definida como sendo a quantidade em massa que escoar através de certa seção em um determinado intervalo de tempo (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006; CASSIOLATO; ALVES, 2008). É medida em Kg/h, ou outra unidade que seja massa dividida por tempo.

2.1.1.2 Vazão volumétrica

É a medida de volume transferido por tempo, estando o fluido na pressão e temperatura de referência (MARTINS, 1998). Conforme (CASSIOLATO; ALVES, 2008), as unidades volumétricas mais comuns são: m³/s, m³/h, l/h, l/min, GPM (galões por minuto), Nm³/h (normal metro cúbico por hora), SCFH (normal pé cúbico por hora). No SI a unidade de vazão em volume é m³/s.

2.1.2 Pressão

É a força exercida por um fluido em uma área de qualquer superfície. No SI a unidade de pressão é o Pa (Pascal). Assim, tem-se:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

onde: p é a pressão (Pa);

F é a força aplicada (N);

A é a área da superfície (m^2).

2.1.3 Pressão diferencial

A pressão diferencial (Δp) é a diferença de pressão medida entre dois pontos do elemento primário, em particular, no caso de medição de vazão, para placas de orifício (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006).

2.1.4 Temperatura

Temperatura é a grandeza física associada ao estado de movimento ou a agitação das partículas que compõem os corpos. No SI a unidade de temperatura é o K (kelvin), mas Fahrenheit e Celsius também são muito utilizados.

2.2 Propriedades dos líquidos

Conhecer as principais propriedades dos fluídos (líquidos e gases) é indispensável para a abordagem de qualquer estudo sobre medidores de vazão, tanto para a compreensão dos vários princípios de funcionamento, como para a justificativa dos limites de suas aplicações (DELMÉE, 2003). Associadas à medição de vazão, as variáveis de influência provocam desvios de leitura na maioria dos medidores. Ainda segundo Delmée (2003), pressão e temperatura são as principais variáveis de influência responsáveis pelas alterações das características dos fluídos. Uma vez conhecidas e quantificadas estas alterações, os efeitos podem ser corrigidos e os erros eliminados. Os medidores de vazão que utilizam tecnologia de microprocessadores possuem, em sua maioria, um microcontrolador embarcado como complemento necessário para corrigir estes efeitos. O microcontrolador embarcado mede continuamente variáveis que influenciam na medição, utilizando-as para corrigir o cálculo da vazão.

Outras variáveis de influência como densidade e viscosidade são importantes propriedades dos líquidos, que também interferem nos medidores de vazão.

2.2.1 Densidade dos líquidos

A densidade absoluta (ρ) ou massa específica dos líquidos é medida em massa por unidade de volume (BEGA, 2006).

$$\rho = \frac{M}{v} \quad (2)$$

onde: M é a massa (kg);

v é a volume (m^3);

2.2.2 Viscosidade dos líquidos

A viscosidade pode ser definida como a resistência que o fluído oferece ao deslocamento de suas partículas, ou seja, é a resistência do fluído à deformação (MARTIM 2005).

2.2.2.1 Viscosidade absoluta

A viscosidade absoluta (ou viscosidade dinâmica) é definida na equação de Newton, aplicada a um dispositivo experimental em que o líquido preenche um espaço e entre duas placas, uma fixa e outra, de superfície S , deslocando-se em relação à placa fixa a uma velocidade V , e que aplica à placa móvel uma força F :

$$\mu = \frac{F \cdot e}{S \cdot V} \quad (3)$$

onde: μ é a viscosidade absoluta do fluído (Pa.s);

F é a força aplicada à placa móvel (N);

e é o espaço entre as placas fixa e móvel (m);

S é a superfície da placa móvel (m^2);

V é a velocidade de deslocamento da placa móvel em relação a placa fixa (m/s).

A viscosidade absoluta tem como unidade o Pa.s (pascal-segundo ou poiseuille) no Sistema Internacional (SI). Essa unidade é raramente empregada na indústria, sendo preferido o cP (centipoise). 1 cP equivale a 1 mPa.s (BEGA, 2006).

2.2.2.2 Viscosidade cinemática

A viscosidade cinemática é a relação entre a viscosidade absoluta do fluido (μ) e sua massa específica (ρ), a mesma temperatura.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

onde: v é a viscosidade cinemática (m^2/s);

μ é a viscosidade absoluta do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);

ρ é a massa específica (Kg/m^3);

A viscosidade cinemática tem como unidade o metro quadrado por segundo (m^2/s), no SI. A unidade usualmente empregada na indústria é o centistokes (cSt), onde 1 cSt equivale a $1 \mu\text{m}^2/\text{s}$ (DELMÉE 2003; MARTIM 2005; BEGA, 2006, SILVA, 2008).

2.2.3 Número de Reynolds

Osborne Reynolds desenvolveu um identificador de regime de escoamento baseado em parâmetros cujas unidades se cancelam, resultando num valor adimensional (DELMÉE, 2003):

$$R_e = \frac{V \cdot D}{v} \quad (5)$$

sendo: V a velocidade (m/s);

D o diâmetro (m);

v a viscosidade (m^2/s).

Quando o número de Reynolds se refere a uma secção onde o diâmetro é D , costuma-se escrever R_D . Já nas referências sobre medição de vazão, o número de Reynolds se refere ao diâmetro d e, neste caso, escreve-se R_d .

O número de Reynolds é válido para líquidos, gases e vapores e permite definir três regimes de escoamento:

- a) o regime laminar ocorre e é estável para um número de Reynolds $R_D < 2000$, onde os perfis de velocidade são bem definidos, tendo velocidade maiores no

centro do canal e diminuindo à medida que se aproximam das laterais onde atingem um valor nulo;

- b) o regime transitório é a faixa onde o regime passa de laminar para turbulento, com valores de número de Reynolds $2000 \leq R_D \leq 4000$, pois ao diminuir a vazão (velocidade) as partículas voltam a se ordenar a partir de uma certa velocidade, denominada velocidade crítica inferior;
- c) o regime turbulento, ocorre com um número de Reynolds $R_D > 4000$, devido ao aumento da velocidade do fluido no interior da tubulação, ocorre um aumento na resistência ao escoamento tornando o movimento do líquido altamente irregular e conseqüentemente passando do regime laminar para o turbulento a medida em que essa velocidade excede um determinado valor crítico (GUIMARÃES, 2007).

Os valores 2000 e 4000 são limites aproximados (DELMÉE, 2003).

2.3 Classificação dos medidores de vazão

Sabe-se que a gama de medidores usados para determinar a vazão de um determinado fluido é bastante ampla e abrange os mais diversificados serviços. A escolha entre os possíveis medidores para uma determinada aplicação pode considerar também a perda de carga introduzida pelo medidor na tubulação, ou seja, quando um líquido flui de um determinado ponto até outro dentro de uma canalização, parte da energia inicialmente contida neste líquido se dissipa em forma de calor, pois o escoamento dos líquidos nas tubulações não ocorre sem que haja perda de certa quantidade de energia (GUIMARÃES, 2007). Pode-se escolher medidores considerando os trechos retos disponíveis, os custos de implantação e manutenção, e, ainda, o atendimento às normas aplicáveis (DELMÉE, 2003).

Existem outras formas de classificar medidores de vazão, podendo ser divididos em quatro grupos de acordo com o princípio de medição, conforme a (tabela 1). Para cada um dos princípios de medição existem características que limitam as aplicações a faixas de diâmetros, de pressões, de temperaturas, de viscosidades e de teores de impurezas (DELMÉE 2003; MELO, 2007).

Tabela 1 Classificação de princípios de medição de vazão

Geradores de pressão diferencial	Medidores lineares	Volumétricos	Em canais abertos	Medidores especiais
Placa de orifício Bocal Venturi Inserção - Pitot - Pitot de média Especiais - Centrífugos - Laminares - Jato	Área variável Coriolis Eletromagnético Térmico Turbina Ultrasônico Vórtice	Diafragma Disco de natação Palheta Pistão oscilante Pistões recíprocos Rotor - Lóbulo - Engrenagem - Semi-imerso	Calhas Vertedores	Força Correlação Laser

Fonte: Delmée, 2003

Dentre os diversos medidores existentes no mercado, optou-se utilizar três medidores com princípios de medição distintos: placa de orifício, eletromagnético e área variável.

2.3.1 Medidores geradores de pressão diferencial por placas de orifício

Também chamados de medidores de vazão por pressão diferencial ou medidores deprimogêneos, os medidores de pressão diferencial por placas de orifício são os mais antigos, e, também, os mais utilizados em todo o mundo. Isto se deve ao fato destes medidores serem extremamente versáteis, podendo ser empregados na maioria das aplicações industriais (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006). São constituídos de um elemento primário que fica diretamente em contato com o fluido e um instrumento transmissor de pressão diferencial.

Desta forma, o princípio de funcionamento dos medidores por placa de orifício consiste em introduzir na tubulação uma restrição ao fluxo do fluido, reduzindo-se a seção de passagem (PALADINO, 2005; FILHO, 2006, GUIMARÃES, 2007). O fluxo é medido através da queda de pressão causada pela obstrução inserida no caminho do fluxo (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2007).

A placa de orifício utilizada por este medidor é um obstáculo com uma pequena abertura em relação ao diâmetro da tubulação, o que provoca uma redução da área do fluxo, como mostra no detalhe da Figura 1 (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007). Com isso se produz uma diferença de pressão entre dois pontos de escoamento do fluido (FILHO, 2006).



Figura 1 Placa de orifício com os flanges e parafusos

Neste medidor, dois furos para tomada de pressão são colocados em lados opostos da placa. A diferença de pressão entre os pontos a montante (antes da placa de orifício, no sentido da vazão) e a jusante (depois da placa de orifício, no sentido da vazão) é medida em função do sinal gerado pela diferença de pressão, como ilustra a Figura 2.

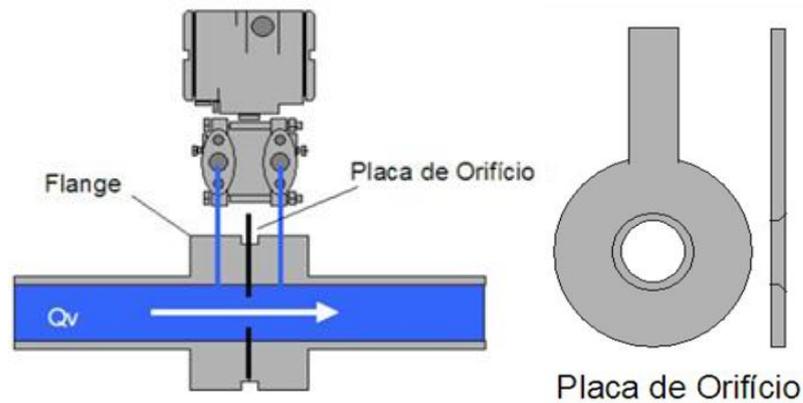


Figura 2 Medidor de vazão por placa de orifício
(CASSIOLATO; ALVES, 2008)

A teoria de medição de vazão por pressão diferencial é fundamentada em leis físicas conhecidas, tais como a equação da continuidade é aplicada a líquidos incompressíveis que fluem em uma tubulação completamente preenchida, cuja seção varia de S_1 para S_2 . Num determinado instante, ao longo da tubulação, a vazão volumétrica Q_v é constante e igual ao produto da velocidade V pela seção S :

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 \quad (6)$$

onde: V_1 é a velocidade do fluido na seção 1 (m/s);

V_2 é a velocidade do fluido na seção 2 (m/s);

S_1 é a área da seção 1 (m²);

S_2 é a área da seção 2 (m²).

Os índices 1 e 2 referem-se à seção 1 e 2, respectivamente.

A equação de Bernoulli foi desenvolvida para estabelecer a relação entre a velocidade do fluido (v), a pressão do fluido (p), a massa específica do fluido (ρ), a gravidade (g) e a altura (h) entre dois pontos de um filete líquido cujo diâmetro varia num certo trecho (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2007). Desta maneira, tem-se:

$$\frac{V_1^2}{2g} \cdot \frac{p_1}{\rho} + h_1 = \frac{V_2^2}{2g} \cdot \frac{p_2}{\rho} + h_2 \quad (7)$$

onde: V é a velocidade do fluido (m/s);

p_1 é a pressão da seção 1 (kgf/m²);

p_2 é a pressão da seção 2 (kgf/m²);

g é a aceleração da gravidade (m/s²);

ρ é a massa específica do fluido (kgf/m³);

h_1 é a altura da seção 1 em relação ao trecho reto horizontal (m);

h_2 é a altura da seção 2 em relação ao trecho reto horizontal (m).

A equação (8) apresenta-se geralmente da seguinte forma simplificada, para um trecho horizontal, ou seja, $h_1 = h_2$.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho} \quad (8)$$

sendo: V_1 é a velocidade do fluido (m/s);

V_2 é a velocidade do fluido (m/s);

p_1 é a pressão correspondente à seção 1 (Pa);

p_2 é a pressão correspondente à seção 2 (Pa);

ρ é a massa específica do fluido (kg/m³);
 g é a aceleração da gravidade (m/s²);

Conforme Delmée (2003), rearranjando a equação anterior para o uso direto em cálculos de elementos geradores de pressão diferencial e empregados os símbolos β e E , usados internacionalmente, tem-se:

$$V_1 = E\beta^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{\rho}\right) \cdot (p_1 - p_2)} \quad (9)$$

onde: β é a relação entre os diâmetros das seções 2 e 1, respectivamente;

E é dado por $1/\sqrt{(1 - \beta^2)}$;

ρ é a massa específica do fluido (Kg/m³);

p_1 é a pressão correspondente à seção 1 (Pa);

p_2 é a pressão correspondente à seção 2 (Pa).

A equação (9) é a equação teórica fundamental, que gera as demais em medição de vazão por pressão diferencial.

A equação de Bernoulli não pode ser aplicada diretamente para escoamentos reais, já que num escoamento real com número de Reynolds superior a 4000 (regime turbulento) a velocidade não é igual à velocidade média em todos os pontos e as linhas fluídas não acompanham o formato geométrico da tubulação, especialmente no caso de placas de orifício.

A fim de permitir o uso prático da equação de Bernoulli, é necessário introduzir o coeficiente de descarga (C). O coeficiente C é estabelecido através do cálculo da vazão teórica a partir de medidas das dimensões do elemento, da massa específica do fluido e da pressão diferencial. A vazão real é medida pelo tempo necessário para se preencher um determinado volume ou para completar um peso definido de líquido. Assim tem-se:

$$Q_{real} = C \cdot Q_{teórica} \quad (10)$$

onde: Q_{real} é a vazão real;

C é o coeficiente de descarga;

$Q_{teórica}$ é a vazão baseada na teoria;

Usando a equação anterior e combinando a equação de Bernoulli com a da continuidade, tem-se:

$$Q_v = CE\beta^2 \cdot S_1 \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (11)$$

onde: C é o coeficiente de descarga;

E é dado por $1\sqrt{(1 - \beta^2)}$;

β é a relação entre os diâmetros das seções 2 e 1, respectivamente.

p_1 é a pressão correspondente à seção 1 (Pa);

p_2 é a pressão correspondente à seção 2 (Pa);

ρ é a massa específica do fluido (Kg/m³);

Substituindo S_1 por $\frac{\pi D^2}{4}$ e considerando que $\frac{\pi\sqrt{2}}{4} = 1,110720$, tem-se:

$$Q_v = 1,1107 \cdot CE\beta^2 \cdot D^2 \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (12)$$

onde: Q_v é a vazão (m³/s);

C é o coeficiente de descarga;

E é dado por $1\sqrt{(1 - \beta^2)}$;

β é a relação entre os diâmetros das seções 2 e 1, respectivamente.

D é o diâmetro da seção 1 (m);

p_1 é a pressão correspondente à seção 1 (Pa);

p_2 é a pressão correspondente à seção 2 (Pa);

ρ é a massa específica do fluido (Kg/m³);

O produto $CE\beta^2$ pode ser tratado em conjunto, sendo C uma característica de cada elemento primário e o produto $E\beta^2$ representativo das dimensões geométricas.

A equação de Bernoulli foi desenvolvida para fluidos incompressíveis. Em decorrência disso, nela consta uma única massa específica de operação.

2.3.2 Medidores Lineares Eletromagnéticos

Os medidores eletromagnéticos ou magnéticos baseiam-se na lei de Faraday. Quando um condutor se desloca num campo magnético, é gerada nas suas extremidades uma força eletromotriz (FEM) proporcional à intensidade do campo magnético, ao seu comprimento e à velocidade de deslocamento.

O princípio básico dos medidores eletromagnéticos é mostrado na Figura 3. O fluido tem suas linhas de velocidade perpendiculares ao campo magnético. De acordo com a lei de Faraday, o movimento do fluido que atravessa o campo magnético, de densidade do fluxo B , com velocidade V , produz uma FEM e , a qual pode ser medida pelos eletrodos, distantes de D , em contato com o fluido. Assim, quando um condutor elétrico se move num campo magnético cortando as linhas de campo forma-se uma FEM no condutor, a qual é proporcional a sua velocidade.

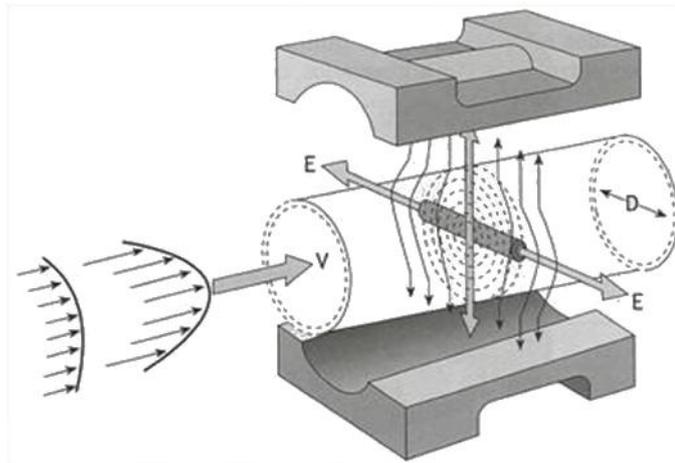


Figura 3 Princípio de funcionamento do medidor eletromagnético (DELMÉE, 2003)

A FEM está relacionada à vazão da seguinte forma (DELMÉE, 2003, BEGA, 2006):

$$e = B \cdot D \cdot V \quad (13)$$

onde: e é a força eletromotriz (volt)

B é o campo magnético (tesla);

D é a distância entre os eletrodos em contato com o fluido (m);

V é a velocidade do fluido (m/s).

Sendo a vazão volumétrica relacionada à velocidade pela equação (14) (DELMÉE, 2003):

$$Q = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \cdot V \quad (14)$$

Deste modo, tem-se:

$$Q = e \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot \frac{D}{B} \quad (15)$$

onde: Q é a vazão (m³/s);

e é a força eletromotriz (volt);

D é a distância entre os eletrodos em contato com o fluído (m);

B é o campo magnético (tesla);

O princípio de funcionamento deste tipo de medidor impõe que o fluído seja condutor de eletricidade, o que reduz sua aplicação aos líquidos condutivos e não magnéticos.

O campo magnético pode ser gerado por um imã permanente ou por bobinas excitadas por corrente alternada. As bobinas são preferidas para gerar o campo magnético, por não apresentarem o efeito da polarização com a formação de sais isolantes depositados nos eletrodos, interrompendo o circuito de medição (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006).

Prefere-se atualmente a geração por corrente contínua pulsante, em baixa frequência, que, além da vantagem do baixo consumo, é distinta da frequência da rede, facilitando a filtragem do sinal elétrico (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006).

A FEM gerada é da ordem de microvolts, necessitando um condicionamento de sinal apropriado para que este seja medido num ambiente industrial com ruídos eletromagnéticos de várias ordens de grandeza superiores em amplitude. O bom aterramento é um dos requisitos essenciais para o funcionamento destes medidores. Quando instalados em tubulações de material isolante cloreto de polivinila (PVC), anéis de aterramento são indispensáveis (DELMÉE, 2003).

Os medidores eletromagnéticos são muito empregados nas indústrias químicas, de papel e celulose e para medir vazão de água e de esgotos (BEGA, 2006).

2.3.3 Medidores lineares de área variável

Os medidores lineares de área variável fornecem uma área de passagem para o fluido em função da vazão. A variação da área ocorre devido ao deslocamento vertical de um flutuador que está inserido dentro de um tubo que pode ter a forma de cone ou pistão, desobstruindo áreas para a passagem do fluido conforme a proporção da vazão.

Segundo (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006) o rotâmetro é o mais conhecido medidor de área variável e possui um princípio de funcionamento extremamente simples. O fluido entra pela parte inferior do tubo cônico no sentido vertical de baixo para cima, produzindo uma força vertical ascendente contra o flutuador, suspendendo-o até desobstruir uma área suficiente para a passagem do fluido. O flutuador assume uma posição de equilíbrio quando as forças às quais está submetido, para cima e para baixo, se anulam (Figura 4):

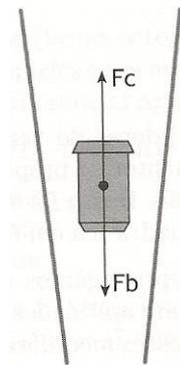


Figura 4 Princípio de funcionamento do rotâmetro (DELMÉE, 2003)

As forças de equilíbrio neste sistema são definidas por:

$$F_c = F_a + F_{pd} = F_b \quad (16)$$

sendo: F_c = força para cima;

F_a = empuxo de Arquimedes;

F_{pd} = pressão diferencial x área;

F_b = peso do flutuador.

Para uma determinada vazão de um fluido, a posição do flutuador é única. Aumentando-se a vazão, aumenta-se a força de arraste e o flutuador sobe. Ao subir, a área

entre o tubo e o flutuador aumenta, porém diminui a força de arraste e um novo equilíbrio dinâmico é atingido para esta nova vazão (FILHO, 2006).

Nos rotômetros convencionais, a vazão é lida diretamente através da posição de uma referência marcada no flutuador, como ilustra a Figura 5. (DELMÉE, 2003).



Figura 5 Escala para rotômetros convencionais (DELMÉE, 2003)

Uma característica importante é que os rotômetros são instrumentos medidores de vazão que não necessitam serem instalados em trechos retos (BEGA, 2006). Entretanto, só podem ser instalados na posição vertical.

De acordo com (BEGA, 2006) no mercado encontram-se rotômetros com diâmetros que variam de 2 a 300 mm. A exatidão varia de $\pm 0,5\%$ do valor lido, para medidores padrões, a $\pm 5\%$ do fim de escala, para indicadores industriais.

Atualmente os rotômetros são empregados principalmente para leituras locais ou em laboratórios (DELMÉE, 2003). Existem rotômetros com elevada exatidão que podem ser usados para aferir outros medidores, ou seja, podem ser usados como padrão de referência para verificar a exatidão das indicações de outros instrumentos de medição (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006).

2.4 Incerteza

O resultado de uma medição é apenas a melhor estimativa do tal valor verdadeiro do mensurando e, na ausência de efeitos sistemáticos, geralmente é obtido pela média aritmética de N medições repetidas do mesmo mensurando (VIM, 2008). A incerteza de medição está relacionada ao resultado da medição, e não ao valor verdadeiro do mensurando, o qual na prática não é conhecido.

A incerteza está relacionada a um valor de medição, que é o resultado da medição, e não ao valor verdadeiro do mensurando, o qual na prática não é conhecido. O resultado da medição é apenas a melhor estimativa de tal valor verdadeiro e, na ausência de efeitos sistemáticos, geralmente é obtido pela média aritmética de N medições repetidas do mesmo mensurando (VIM, 2008).

A incerteza caracteriza uma faixa de dispersão ou intervalo, e não um valor pontual. Nesse sentido, a incerteza não deve ser confundida com erro, pois esse último é um valor pontual e não uma faixa. O erro usualmente pode ser corrigido, quando aplicado um fator de correção adequado. Já a incerteza é a dúvida remanescente associada ao resultado da medição. Ela mede o grau de desconhecimento sobre aquilo que está sendo medido.

Como um resultado de uma medição é uma estimativa do valor verdadeiro do mensurando, a determinação da incerteza expressa o grau de dúvida associado ao resultado da medição. A incerteza corresponde a uma faixa de valores que podem ser atribuídos fundamentadamente ao mensurando (VIM, 2008), isto é, de uma forma fundamentada e realista (JORNADA, 2009).

A incerteza possibilita a comparação das medições e é particularmente útil na tomada de decisões. Quando há um limite de tolerância máximo ou mínimo para o mensurando, seja ele estabelecido por uma legislação ou de alguma outra forma, a incerteza torna-se imprescindível para a interpretação correta do resultado da medição (JORNADA, 2009).

O resultado da medição é uma função das entradas do sistema de medição (variáveis), ou seja, faz-se um modelo matemático relacionado às variáveis que influenciam o sistema de medição, causando alterações no resultado da medição.

As incertezas associadas às variáveis do modelo matemático da medição são classificadas como sendo do Tipo A ou Tipo B (ISO-GUM, 2003).

A avaliação do Tipo A da incerteza é a que emprega uma análise estatística de uma série de observações repetidas no momento do ensaio/calibração, podendo ser expressa pelo desvio padrão experimental da média.

A avaliação do Tipo B é o método que emprega outros meios que não a análise estatística de uma série de observações repetidas no momento do ensaio/calibração. Nesse caso, a avaliação da incerteza é baseada em outros conhecimentos, tais como (JORNADA, 2009):

- a) dados históricos de desempenho do método de medição;
- b) incertezas herdadas da calibração dos equipamentos e padrões;
- c) especificações dos equipamentos e padrões;
- d) faixa de condições ambientais, entre outros.

Para avaliação da incerteza padrão neste trabalho foi utilizado o método de avaliação da incerteza do Tipo A, ou seja, avaliação de uma componente da incerteza de medição por uma análise estatística dos valores medidos sob condições definidas de medição (ISO-GUM, 2003; VIM, 2008).

Na maioria dos casos, a melhor estimativa disponível da esperança ou valor esperado μ_q de uma grandeza q que varia aleatoriamente e para a qual n observações independentes q_k foram obtidas sob as mesmas condições de medição, é a média aritmética ou média \bar{q} das n observações:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (17)$$

onde: \bar{q} é a média aritmética das medições;

n é o número de medições;

q_k é uma medição individual.

Assim, para uma grandeza de entrada Q_i estimada a partir de n observações repetidas independentes $Q_{i,k}$, a média aritmética de Q_i obtida pela equação (17) é usada como estimativa de entrada q_i na equação (18):

$$q = \bar{q} = f(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (18)$$

onde: q é resultado da medição;

\bar{q} é a média aritmética das medições;

f é a função das medições individuais q_k ;

q_k é uma medição individual.

Para determinar o resultado da medição $q = \bar{q}$; isto é, $q_i = \bar{Q}_i$.

As observações individuais q_k diferem em valor por causa de variações aleatórias nas grandezas de influência, ou dos efeitos aleatórios. A variância experimental das observações, que estima a variância σ^2 da distribuição de probabilidade de q , é dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (19)$$

onde: $s^2(q_k)$ é a variância experimental de uma medição individual;

n é o número de medições;

q_k é uma medição individual;

\bar{q} é a média aritmética das medições.

Esta estimativa da variância e sua raiz quadrada positiva $s(q_k)$, denominada desvio padrão experimental, caracteriza a variabilidade dos valores q_k observados ou, mais especificamente, sua dispersão em torno de sua média \bar{q} .

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (20)$$

onde: $s(q_k)$ é o desvio padrão experimental de uma medição individual;

n é o número de medições;

q_k é uma medição individual;

\bar{q} é a média aritmética das medições.

A melhor estimativa de $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$, a variância da média, é dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (21)$$

onde: $s^2(\bar{q})$ é a variância experimental da média das medições;
 $s^2(q_k)$ é a variância experimental de uma medição individual;
 \bar{q} é a média aritmética das medições;
 q_k é uma medição individual;
 n é o número de medições;

A variância experimental da média $s^2(\bar{q})$ e o desvio padrão experimental da média $s(q)$, igual à raiz quadrada positiva de $s^2(\bar{q})$, quantificam quão bem \bar{q} estima a esperança μ_q de q , e qualquer um dentre eles pode ser usado como uma medida da incerteza de \bar{q} .

$$s(\bar{q}) = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}} \quad (22)$$

onde: $s(\bar{q})$ é o desvio padrão experimental da média das medições;
 $s(q_k)$ é o desvio padrão experimental de uma medição individual;
 \bar{q} é a média aritmética das medições;
 q_k é uma medição individual;
 n é o número de medições.

Conforme EA (1999) e também (ISO-GUM, 2003; VIM, 2008) a incerteza expandida de medição U , equação (23), é obtida pela multiplicação da incerteza padrão $u(q) = s(\bar{q})$ da estimativa de saída q por um fator de abrangência k_p , baseado em curvas estatísticas segundo a distribuição t de Student:

$$U = k_p u(q) \quad (23)$$

Onde: U é a incerteza expandida de medição;
 k_p é o fator de abrangência;
 $u(q)$ é a incerteza padrão.

Conforme Jornada (2009) em incerteza de medição os laboratórios usualmente utilizam planilhas eletrônicas do tipo Excel® ou similar. A validação de tais planilhas é fundamental e deve ser atentamente verificada pelo avaliador. Para a validação, empregam-se normalmente uma das seguintes estratégias:

- a) reproduzir os cálculos manualmente e verificar se os resultados obtidos são iguais aos da planilha eletrônica;
- b) conferência de fórmulas; nesse caso, verifica-se se todas as fórmulas constantes na planilha estão corretas e se essas referenciam as células pertinentes da planilha.

Segundo Jornada (2009), ainda que a primeira estratégia seja a mais empregada, ela também é a mais trabalhosa e a mais propensa a erros. Por essa razão, a segunda estratégia é normalmente mais recomendada. Assim, optou-se pela utilização da planilha eletrônica do Microsoft Office Excel® para calcular as incertezas envolvidas nas medições de vazão, realizando dupla conferência das fórmulas.

2.4.1 Incerteza dos medidores geradores de pressão diferencial por placas de orifício

A incerteza combinada na medição dos elementos geradores de pressão diferencial pode ser avaliada na equação (24), que consta nas normas ISO 5167 e ISO 5168.

$$i_{Q_m} = \pm \sqrt{(i_c)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}\right)^2 \cdot (i_D)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4}\right)^2 \cdot (i_d)^2 + (i_\varepsilon)^2 + \frac{1}{4}(i_{\Delta p})^2 + \frac{1}{4}(i_\rho)^2} \% \quad (24)$$

sendo: i_{Q_m} a incerteza sobre a vazão mássica;

i_c a incerteza sobre o coeficiente de descarga;

i_D a incerteza sobre o diâmetro D;

i_d a incerteza sobre o diâmetro d;

i_ε a incerteza sobre o fator isentrópico;

$i_{\Delta p}$ a incerteza sobre a pressão diferencial;

i_ρ a incerteza sobre a massa específica.

A incerteza relativa ao coeficiente de descarga, estabelecida nas normas sobre placas de orifício, é chamada convencionalmente de incerteza aleatória. É estimada estatisticamente e associada a um nível de confiança de 95% (DELMÉE, 2003). Em consequência há uma probabilidade de 95% de que o valor verdadeiro esteja dentro da faixa de mais ou menos o valor percentual da incerteza. Ao aplicar a equação do cálculo da incerteza de um elemento gerador de pressão diferencial objetivando um nível de confiança de 95%, a incerteza de cada

variável deveria ter um grau de confiança de 95%, por coerência com a incerteza i_C , que de fato, é definida pelas normas como tendo esse grau de confiança.

2.4.2 Incerteza dos medidores eletromagnéticos

Na parte de definição das incertezas de medição, é apresentada uma equação para avaliá-las, referida ao desvio padrão. Utilizando-se esta equação, pode-se estabelecer qual a incerteza sobre a vazão i_{qv} corresponde a 95% de nível de confiança, é (DELMÉE, 2003):

$$i_{qv} = \pm \sqrt{i_s^2 + i_R^2 + i_f^2 + i_C^2} \% \quad (25)$$

onde: i_s é a incerteza relacionada aos erros sistemáticos na medição do sinal de saída;
 i_R é a incerteza relacionada aos erros aleatórios na medição do sinal de saída;
 i_f é a incerteza decorrente das condições de escoamento;
 i_C é a incerteza relacionada às condições de calibração.

2.4.3 Incerteza dos medidores lineares de área variável

Para medições precisas, desenvolveram-se curvas de influência da viscosidade baseadas em critério de escoamento semelhante ao número de Reynolds.

Desenvolveu-se uma equação para um número de Reynolds apropriado para rotâmetros, a qual permite estabelecer curvas de influência da viscosidade sobre a indicação do medidor. A equação que introduz a viscosidade é a seguinte (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006):

$$R_e = K(\alpha^2 - \alpha) \sqrt{\frac{8}{\pi} \left(\frac{\sqrt{F \cdot \rho}}{\mu} \right)} \quad (26)$$

sendo: R_e é o número de Reynolds;

K é um coeficiente semelhante ao coeficiente de descarga C para as placas de orifício;

α é o diâmetro do tubo D na posição em que se equilibra o flutuador dividido pelo o diâmetro do flutuador D_f (m);

F é a diferença entre força da gravidade e o empuxo de Arquimedes. Se houver uma mola, a força F incluirá a força desta (N);

ρ é a massa específica do fluído (Kg/m^3);

μ é a viscosidade absoluta do fluído medido (Pa.s).

2.5 Classes de exatidão dos medidores de vazão

A fim de caracterizar e diferenciar os vários tipos de medidores, usa-se a expressão classe de exatidão, considerando o EMA (erro máximo admissível) que inclui os erros de linearidade, histerese e repetitividade, em relação ao valor medido. Os fabricantes costumam referir os erros em relação a um percentual do fundo de escala (DELMÉE, 2003). No caso específico de medidores que utilizam transmissores de pressão diferencial, os fabricantes fazem referência ao erro em relação ao percentual de alcance do medidor (*span*).

A tabela 2 demonstra o EMA em relação ao valor medido. Por exemplo, se um medidor for especificado como sendo de classe 0,1, significa que ele terá um EMA de 0,1%.

Tabela 2 Classes de exatidão

0,1	0,15	0,3	0,5	1,0	1,5	2,5
EMA	EMA	EMA	EMA	EMA	EMA	EMA
$\pm 0,1\%$	$\pm 0,15\%$	$\pm 0,3\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 1,5\%$	$\pm 2,5\%$

Fonte: Delmée, 2003

2.6 Calibração de medidores de vazão de líquidos

Medidores de vazão de líquidos devem ser periodicamente calibrados para que se possa confiar nos resultados das medições ao determinar a relação entre o sinal de saída do instrumento com a vazão que passa por ele. A calibração pode ser feita por comparação com um instrumento calibrado, de exatidão superior, que serve de medidor de referência. Existem outros tipos de calibração, como absoluta e com provadores.

2.6.1 Calibração comparativa

A calibração comparativa, ou seja, a calibração por comparação a um medidor de referência consiste em passar um líquido com determinada vazão por uma tubulação, onde o instrumento a ser calibrado e o de referência estão montados em série. Deve-se tomar os cuidados necessários para que não haja interferência ou perturbação de um sobre o outro. Para a determinação da incerteza nas medições, a exatidão do medidor de referência (mestre) tem

que ser pelo menos quatro vezes maior em relação à exatidão do medidor a ser calibrado (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006). É necessário fazer uma média das indicações para cada ponto de calibração, fazendo-se o levantamento da curva de calibração.

2.6.2 Calibração absoluta – instalação fixa

Nesses casos, trata-se de medir o tempo que leva determinado volume de líquido, ou sua massa, para passar pelo medidor que se está calibrando.

Nas instalações fixas, os equipamentos recomendados consistem num conjunto de bombas, reservatório de altura hidrostática determinada, tubulações de diâmetros compatíveis com os medidores que estão sendo calibrados e reservatórios de volume conhecido ou montados em balanças eletrônicas para se determinar o peso do líquido. A norma ISO 4185, de 1980 detalha os métodos de calibração por pesagem de líquido. Faz-se a distinção entre pesagem estática (Figura 6), que leva em conta o aumento de peso na balança em relação ao tempo que uma válvula de desvio (registro) permanece aberta, e a pesagem dinâmica (Figura 7), que dispensa a válvula de desvio e leva em conta o aumento de peso no reservatório durante o enchimento (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006).

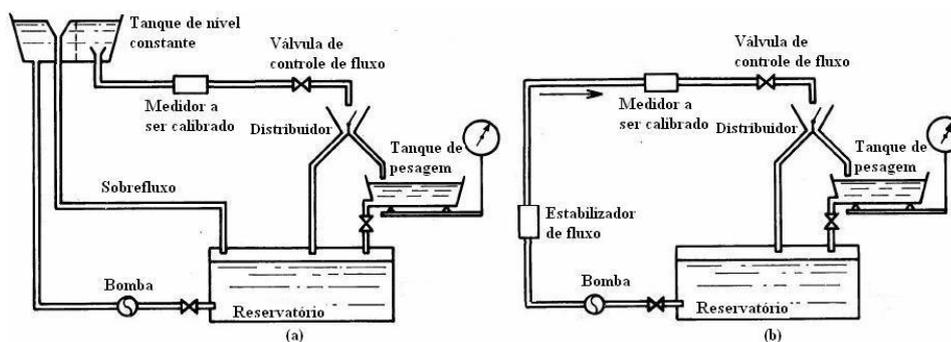


Figura 6 Calibração por pesagem estática

(DELMÉE, 2003)

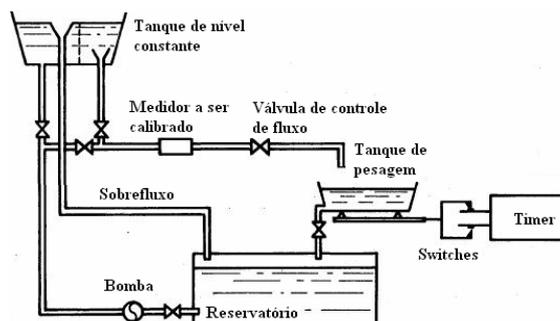


Figura 7 Calibração por pesagem dinâmica

(DELMÉE, 2003; PAULA, 2007)

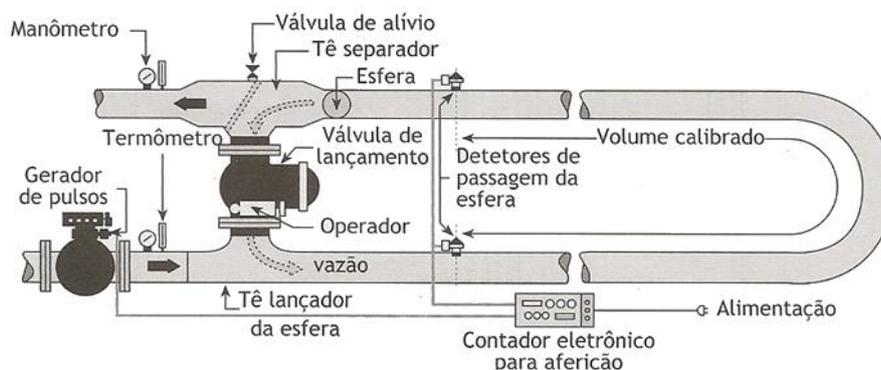
Para estabilizar a pressão do líquido durante a medição, o dispositivo mais confiável é um reservatório de altura determinada. Existe a recomendação para se assegurar que a tubulação seja completamente preenchida pelo líquido e não contenha nem ar nem vapor (do líquido). Com esse método, a incerteza de medição pode ser menor que 0,02% (DELMÉE, 2003).

A norma também faz recomendações sobre a válvula de desvio, dando alguns detalhes que facilitam seu dimensionamento, e os cuidados a serem tomados na sincronização entre a abertura da válvula e o acionamento do cronômetro (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006).

2.6.3 Calibração com provadores

Uma outra forma de calibrar instrumentos de medição de vazão de líquidos consiste em utilizar provadores (*provers*).

Na versão mais básica, o provador pode ser unidirecional ou bidirecional e consiste num tubo com longa curva, de 180°, e um sistema de válvulas para direcionar a esfera, que irá percorrer o tubo durante a calibração (Figura 8). A medição consiste em contar o número de pulsos emitidos pelo medidor em teste, enquanto a esfera passa entre detectores de passagem inicial e final (DELMÉE, 2003; BEGA, 2006).



**Figura 8 Provador unidirecional
(DELMÉE, 2003)**

Conforme a norma API 2531, o volume entre os detectores de passagem é conhecido com exatidão de 0,01%, desde que aplicados os fatores de correção de pressão e temperatura, que alteram suas dimensões. Um sistema eletrônico acopla os detectores de passagem à contagem dos pulsos do medidor sob calibração, e a finalidade é determinar o fator sem o

volume representado por pulso com incerteza inferior a 0,1%. Se, além do volume, o tempo decorrido entre as duas passagens pelos detectores for medido, a vazão poderá ser deduzida (BEGA, 2006).

2.7 O *Foundation Fieldbus*

O protocolo *Foundation Fieldbus* foi originalmente concebido em 1994 por uma associação internacional de fabricantes de sistemas de controle como um conjunto de normas compatibilizadoras para a comunicação de chão de fábrica com uso destinado ao controle de processos típicos de indústrias de natureza contínua, aquelas que, diferente das indústrias de manufatura, têm a produção ininterrupta como, por exemplo, as indústrias petroquímicas, alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose (PANTONI, 2006).

O FF é um barramento de comunicação digital, serial e bidirecional que conecta dispositivos de campo como sensores, atuadores e controladores. Este padrão prevê a descentralização das funções de controle entre os diversos dispositivos de rede, o que se deve à tecnologia de processadores embarcados nos dispositivos de campo, tornando-os inteligentes (ZEILMANN, 2002).

Esta rede incorpora vantagens como: imunidade a ruídos, pré-processamento de dados específicos, transmissão de informações adicionais dos dados capacitando o diagnóstico do dispositivo e a previsão de falhas, redução dos custos de projeto, de fiação, de instalação e de expansão, entre outras.

Os principais barramentos industriais internacionais são independentes de fabricantes, porém a maioria não usa blocos funcionais. Estas funções são chamadas de *Function Block* (FB) (HÜSEMANN, 2003). A interligação desses blocos funcionais é que define a estratégia de controle e programação do processo a ser controlado. Na configuração especifica-se a escolha do FB e em que dispositivo será executado (COSTA, 2006).

Uma listagem destes blocos funcionais é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 Blocos funcionais padrão

Nome do Bloco de Função	Símbolo
Entrada Analógica	AI
Saída Analógica	AO
Bias/Ganho	BG
Seletor de Controle	CS
Entrada Discreta	DI
Saída Discreta	DO
Carregador Manual	ML
Proporcional/Derivativo	PD
Proporcional/Integral/Derivativo	PID
Taxa	RA

Conforme Zeilmann (2002) e Pantoni (2006), pode-se, em primeira análise dividir o FF em:

- a) nível físico, camada que trata das técnicas de interligação dos instrumentos;
- b) nível de aplicação, camada que trata da comunicação digital entre os equipamentos e a camada do usuário;
- c) nível do usuário, camada onde estarão as aplicações de blocos funcionais desenvolvidas para controle de processos.

2.8 OPC (*Ole for Process Control*)

O controle de processos industriais tem se tornado cada vez mais complexo devido à exigência de qualidade dos produtos, rapidez na entrega e concorrência de mercado. Tal complexidade produz grandes quantidades de dados a serem gerenciados pelos três níveis de controle de processos: dispositivos de campo, sistemas de controle e *softwares* para gerenciamento e negócios. A integração desses níveis utilizando efetivamente a informação disponível em cada um deles é de fundamental importância para a indústria (CARVALHO, SILVA, NASCIMENTO, 2001).

Na busca de uma solução para esse problema foi desenvolvida a tecnologia OPC, uma especificação técnica não proprietária que define um conjunto de interfaces baseadas na tecnologia OLE/COM (*Object Linking and Embedding/Component Object Model*) da

Microsoft. A interface OPC torna possível a interoperabilidade entre aplicações de automação e controle, sistemas e dispositivos de campo e aplicações situadas em níveis mais altos na hierarquia de uma planta industrial (CARVALHO, SILVA, NASCIMENTO, 2001; ZEILMANN, 2002).

Os componentes OPC se classificam em duas categorias: clientes OPC e servidores OPC. Um cliente OPC é tipicamente um usuário dos dados, tais como uma interface de operação ou um sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Um servidor OPC é uma fonte de dados que coleta ou gera dados a partir de um processo, disponibilizando-os aos clientes OPC. O cliente OPC interage com o servidor OPC usando uma interface bem definida. Qualquer cliente OPC pode se comunicar com qualquer servidor OPC, independentemente do tipo de dispositivo e do fabricante. Essa comunicação é válida somente para OPC-DA (*Ole for Process Control - Data Access*), uma vez que existem diferentes tecnologias OPC (CARVALHO, SILVA, NASCIMENTO, 2001).

Servidores OPC, portanto proporcionam métodos para diferentes softwares (clientes OPC) acessarem dados de dispositivos de controle como CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) e DCSs (*Distributed Control Systems*). Uma vez que um servidor OPC de dispositivo de controle é criado, não se necessita reescrever softwares com *drivers* que gerenciem este dispositivo, pois isso pode ser feito utilizando-se um cliente OPC conectado ao servidor do dispositivo de controle. Diversas aplicações diferentes, como SCADAs, IHMs (Interfaces Homem Máquina), podem se conectar ao servidor do dispositivo sem necessidade de reprogramação do mesmo (SCHAF, 2006).

O padrão OPC estabelece as regras para que sejam desenvolvidos sistemas com interfaces padrões para comunicação dos dispositivos de campo (CLPs, sensores, atuadores) com sistemas de monitoração, supervisão e gerenciamento como SCADAs e ERPs (*Enterprise Resource Planning*) (RAMALHO; NOGUEIRA, 2009).

Tradicionalmente, em cada *software* ou aplicação era necessária uma interface customizada ou o desenvolvimento de um *driver* para trocar dados com dispositivos de campo. A tecnologia OPC elimina estes requisitos pela definição de uma interface comum de alto desempenho que permite que este trabalho seja feito apenas uma vez, e então facilmente reusado pela IHM, por um sistema SCADA ou aplicações de controle que tenham acesso a uma base de dados OPC (ZEILMANN, 2002).

Cada vez mais se utiliza a rede *Ethernet TCP/IP* (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) com o protocolo OPC para comunicação entre estações de

supervisão e os CLP's e a utilização do OPC com algum meio físico que suporte a conexão de dispositivos no chão de fábrica (ZEILMANN, 2002).

O objetivo fundamental do padrão OPC é desenvolver uma interface padrão aberta e interoperável, baseada em requisitos fundamentais das tecnologias COM, DCOM (*Distributed Component Object Model*) e *ActiveX*, que facilite a troca de informações entre aplicações de automação e controle, dispositivos de campo e aplicações de planejamento e otimização que usem dados do chão-de-fábrica (ZEILMANN, 2002).

Atualmente existem diversos produtos no mercado que utilizam o OPC para comunicação com dispositivos de chão de fábrica, de modo que o OPC está se tornando rapidamente o padrão de comunicação adotado pelo mercado de automação industrial e pela indústria (COSTA, 2006).

2.9 Sistemas SCADA

Os sistemas de controle supervisão e aquisição de dados (SCADAs – *Supervisory Control and Data Acquisition*) são de importância estratégica já que são adotados na maioria das indústrias que compõem a infra-estrutura de um país. As aplicações da tecnologia SCADA alcançam praticamente todo o espectro do setor produtivo. Para exemplificar, esses sistemas são utilizados na indústria química, petroquímica e de cimento, indústria alimentícia, na produção e na distribuição de energia elétrica, no controle de água, no controle de oleodutos, gasodutos, centrais nucleares, edifícios inteligentes e tráfego (MENDES, 2007).

Os sistemas de supervisão, ou simplesmente SCADA, permitem que sejam monitoradas e rastreadas informações do processo produtivo. Tais informações são primeiramente coletadas através de equipamentos de aquisição de dados, seguido da manipulação e análise destes dados e a posterior apresentação ao usuário. Estas informações podem ser visualizadas por intermédio de displays gráficos, com indicações instantâneas das variáveis do processo (temperatura, pressão, vazão, nível, etc.), e armazenadas em bases de dados relacionadas ao processo do cliente. As análises dos dados podem ser feitas dentro do supervisão através de tabelas e gráfico (SILVA *et. al.*, 2005).

Os sistemas SCADA são ferramentas de supervisão, controle e aquisição de dados. Estes sistemas permitem acessar diferentes instrumentos no chão de fábrica conectados através de redes de campo.

Os sistemas SCADA baseiam-se em *tags* que são nomes que associam um endereço ou registrador de um dispositivo ao sistema de supervisão e controle, como unidade básica de

dados. O supervisório trata as variáveis do processo, seja ela oriunda de um CLP ou de uma base de dados industrial OPC como se fossem *tags*. Desta maneira, estratégias de controle, relatórios, tendências, históricos, manipulação de escalas entre outras tarefas são possíveis com as variáveis do processo, gerando uma grande flexibilidade de configuração para o usuário. O sistema de supervisão tem acesso às variáveis de um CLP através de um driver de comunicação, estas variáveis podem ser: analog inputs (AI's), discrete inputs (DI's), analog outputs (AO's) ou ainda discrete inputs (DO's). O mesmo sistema de supervisão também tem acesso às variáveis de uma rede *Foundation Fieldbus* através de uma base de dados OPC. É importante salientar que o sistema de supervisão e controle pode tratar da mesma maneira as variáveis advindas tanto do CLP quanto de uma rede FF (ZEILMANN, 2002).

Os sistemas SCADA possuem a característica de serem clientes OPC. O OPC pode ser uma base de dados disponibilizada por alguma aplicação industrial, como por exemplo uma aplicação industrial que utiliza o FF; esta funciona como o servidor OPC do computador servidor da aplicação. Através do supervisório é possível a importação desta base de dados do processo e sua posterior configuração dentro de uma aplicação supervisória (ZEILMANN, 2002). Esta tecnologia melhora a interface entre as aplicações cliente e servidor fazendo com que exista um mecanismo padrão para comunicação de uma fonte de dados para qualquer aplicação cliente. Em outras palavras, OPC é um mecanismo que habilita no campo a automação e as interfaces homem-máquina (PAULA E SILVA, 2004).

2.10 Trabalhos relacionados

A seguir são apresentados alguns dos principais trabalhos publicados na área de avaliação metrológica de sistemas de medição de vazão de líquidos.

2.10.1 Avaliação metrológica de medição de vazão com laser Doppler anemométrico

O trabalho desenvolvido por (PAULA, 2007) teve dois objetivos principais:

- a) projetou e construiu um dispositivo capaz de calibrar um anemômetro a laser Doppler (LDA), que é um analisador de sinais conectado a uma placa de aquisição. O efeito Doppler é a aparente variação da frequência, devido a um movimento relativo entre um emissor e um receptor de frequências. Em um LDA, a variação de frequência ocorre quando as ondas são refletidas pelas partículas em um fluido em movimento. As calibrações foram realizadas em

uma faixa de velocidade de 1 a 5 m/s, com uma incerteza relativa da velocidade de, no máximo, 0,1%, e uma abrangência de 95%.

- b) utilizar o LDA, calibrado, em conjunto com o método de velocidade e área, para se efetuarem medições de vazão em água, em uma faixa de medição de 11 a 26 l/s. As medições de vazão tiveram por finalidade verificar a aplicabilidade do LDA como padrão primário de vazão, bem como levantar e quantificar as fontes de incertezas. Na medição de vazão com o LDA, o posicionamento do volume de medição, onde a velocidade deve ser medida, é estabelecido por uma das técnicas de medição de vazão. A movimentação do LDA se dá por guias lineares acopladas a parafusos micrométricos.

Um dos objetivos deste trabalho foi verificar a possível utilização do LDA, como um padrão primário de vazão. Seguindo-se as recomendações dos métodos de medição de vazão sugeridos pelas normas ISO, constatou-se que os maiores valores de incerteza relativa seriam de 0,2% da leitura. Foram realizados 9 pontos de calibração, entre as velocidades de 1 a 5 m/s.

Os resultados podem ser vistos na tabela 4, que apresenta os valores de velocidade indicados pelo padrão e LDA com as suas respectivas incertezas.

Tabela 4 Valores de velocidade indicados pelo padrão e LDA e suas respectivas incertezas

Ponto de Calibração	Velocidade média do padrão [m/s]	Incerteza expandida (95%) do padrão [m/s]	Velocidade média do LDA [m/s]	Velocidade média do LDA corrigida [m/s]	Incerteza expandida (95%) do LDA [m/s]
1	4,991	0,004	4,89	4,99	0,07
2	4,482	0,003	4,40	4,48	0,12
3	4,002	0,003	3,89	4,00	0,06
4	3,482	0,002	3,38	3,48	0,06
5	3,037	0,002	2,95	3,04	0,02
6	2,513	0,002	2,48	2,51	0,10
7	1,992	0,001	1,95	1,99	0,09
8	1,518	0,001	1,49	1,52	0,12
9	0,9886	0,0006	0,976	0,989	0,01

Fonte: Paula, 2007

Utilizando-se os balanços de incertezas para os nove pontos de calibração, montou-se a curva de erros do LDA (Figura 9) considerando-se um desalinhamento máximo de 3° com distribuição retangular. Na curva de erros, no lugar da correção está representada a tendência,

que é equivalente à correção multiplicada por menos um. O erro máximo observado na curva de erros é de -0,202 m/s, o que correspondente a 4,5% do valor indicado (4,5 m/s).

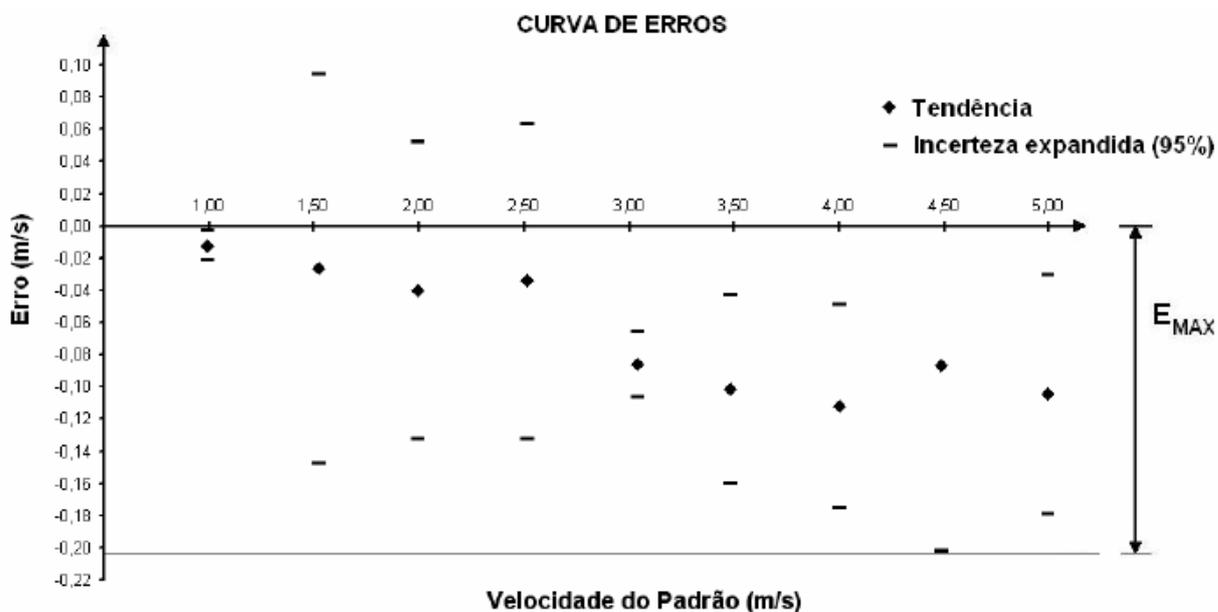


Figura 9 Curva de erros

Os resultados obtidos com o calibrador do LDA mostraram-se muito satisfatórios, com uma incerteza relativa da velocidade inferior a 0,1%.

Nos experimentos de medição de vazão verificou-se que os valores de incertezas relativas na medição de vazão obtidas estão compreendidos entre 11 e 20% (Tabela 5). Uma parcela dessa incerteza é inerente do próprio LDA, a outra parcela tem como fonte o sistema de bombeamento do fluido utilizado no experimento. Nesse sistema a velocidade do fluido sofre variações, que ocasionam uma ampla dispersão nos valores das velocidades indicadas pelo LDA. Com esses resultados, o alvo pretendido não foi alcançado, demonstrando que o LDA não é adequado para ser utilizado como padrão primário de vazão.

Tabela 5 Valores da medição de vazão e incertezas, utilizando-se o LDA

Rotação [rpm]	Vazão [l/s]	Correção [l/s]	Vazão Corrigida [l/s]	Incerteza Expandida 95% [l/s]	Incerteza relativa [%]
750	11,19	0,21	11,40	2,34	20,56
1000	15,02	0,25	15,27	2,16	14,12
1250	18,72	0,46	19,18	2,25	11,74
1500	22,28	0,64	22,92	2,68	11,71
1750	25,77	0,64	26,41	3,17	12,01

Fonte: Paula, 2007

2.10.2 Influência da pressão de operação no desempenho de transmissores diferenciais de pressão

O trabalho de (SALVIO, 2008) apresenta uma metodologia para calibração de transmissores de pressão diferencial na pressão de operação, melhorando a confiabilidade e a incerteza das medições de vazão de líquidos e gases nas indústrias em geral. As faixas estudadas de pressão estática (0 a 20000 KPa) e diferencial (40 a 250 KPa), atendem a utilização interna da área de produção e exploração da Petrobras. A incerteza dos resultados foi estimada e a metodologia foi utilizada para mostrar que a curva de calibração de um transmissor de pressão varia com sua pressão de operação.

Neste trabalho também foram desenvolvidas curvas que relacionam a pressão diferencial medida pelo transmissor e a pressão diferencial real medida pela utilização da máquina de teste, para várias pressões estáticas e cada qual associada com a sua respectiva incerteza. Uma análise teórica e experimental da influência da pressão estática no desempenho da medição de pressão diferencial foi feita com uso de transmissores eletrônicos, dotados de sensores capacitivos ou sensores ressonantes de silício, sendo estes os elementos primários que interagem com o fluido para a medição de pressão diferencial. Os experimentos foram feitos em um laboratório acreditado pela Rede Brasileira de Calibração.

No experimento final foram calibrados dois transmissores diferenciais de pressão, um com sensor de silício ressonante, modelo EJX110A de fabricação YOKOGAWA e o outro com sensor capacitivo, modelo LD 301 de fabricação SMAR.

Adotando-se procedimento usual de calibração de transmissores diferenciais de pressão, com o lado de baixa pressão (L) aberto para a atmosfera e o lado de alta pressão (H) pressurizado para obter-se a pressão diferencial requerida.

Os transmissores ensaiados foram submetidos às pressões estáticas de 100 kgf/cm², 120 kgf/cm², 140 kgf/cm², 160 kgf/cm², 180 kgf/cm² e 200 kgf/cm². A incerteza expandida (U) ao nível de confiabilidade de 95,45% (fator de abrangência $k = 2$) é igual a 0,0042 PSI = 0,0003 kgf/cm². Portanto a incerteza padrão é 0,00015 Kgf/cm².

A partir dos dados gerados na calibração à pressão atmosférica, foi possível levantar-se a curva de erros do transmissor EJX110A (Figura 10).

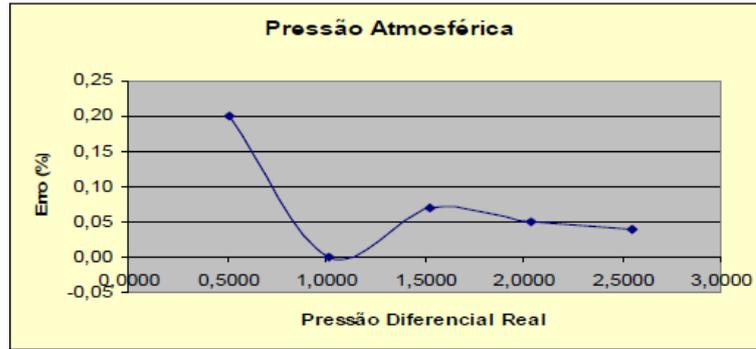


Figura 10 Relação entre o erro e o ΔP_{real} (SALVIO, 2008)

A partir dos dados gerados na calibração à pressão de 200 Kgf/cm², foi possível levantar-se a curva de erros do transmissor EJX110A (Figura 11).

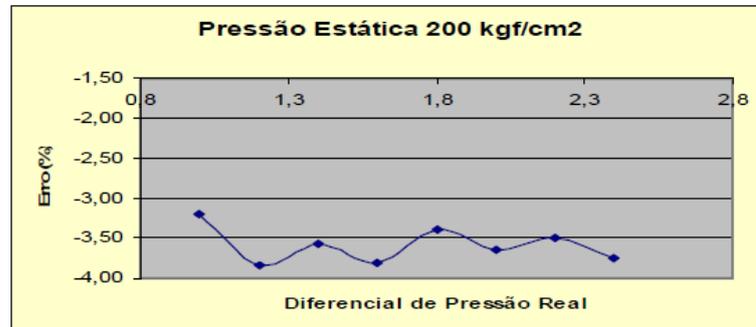


Figura 11 Relação entre o erro e o ΔP_{real} (SALVIO, 2008)

O coeficiente angular da curva de calibração varia de um valor igual a 1,0001 à pressão atmosférica (Figura 12), até 0,9625 à pressão de 200 kgf/cm² (Figura 13). Esta curva relaciona o diferencial de pressão lido pelo transmissor como função do valor real.

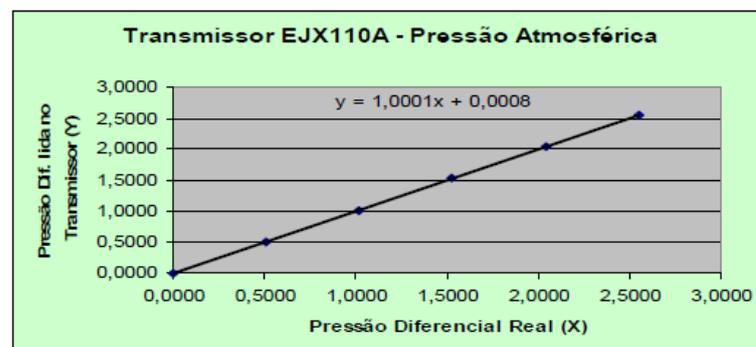


Figura 12 Relação entre ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (SALVIO, 2008)

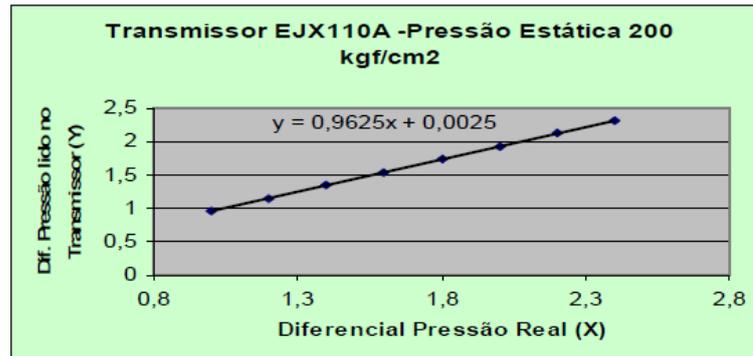


Figura 13 Relação entre ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (SALVIO, 2008)

A partir dos dados gerados na calibração à pressão atmosférica, foi possível levantar-se a curva de erros do transmissor LD301 (Figura 14).

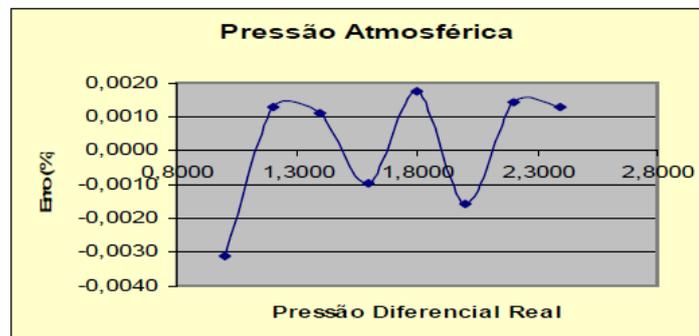


Figura 14 Relação entre o erro e o ΔP_{real} (SALVIO, 2008)

A partir dos dados gerados na calibração à pressão de 200 Kgf/cm², foi possível levantar-se a curva de erros do transmissor LD301 (Figura 15).

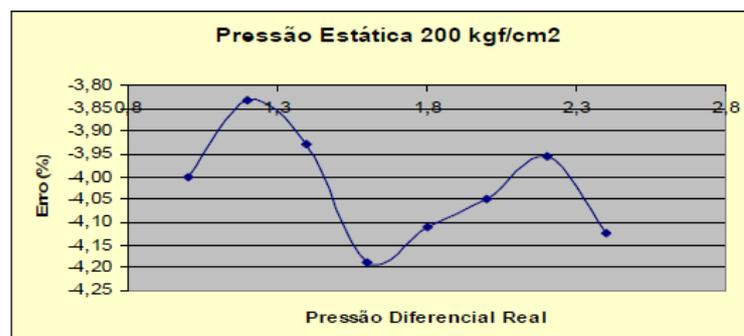


Figura 15 Relação entre o erro e o ΔP_{real} (SALVIO, 2008)

O coeficiente angular da curva de calibração varia de um valor igual a 1,0025 à pressão atmosférica (Figura 16), até 0,9582 à pressão de 200 kgf/cm² (Figura 17). Esta curva relaciona o diferencial de pressão lido pelo transmissor como função do valor real.

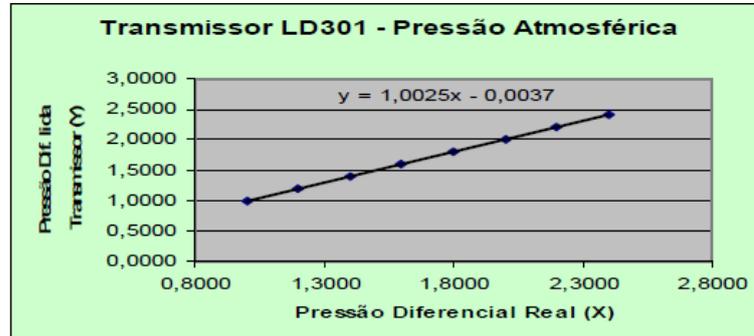


Figura 16 Relação entre ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (SALVIO, 2008)

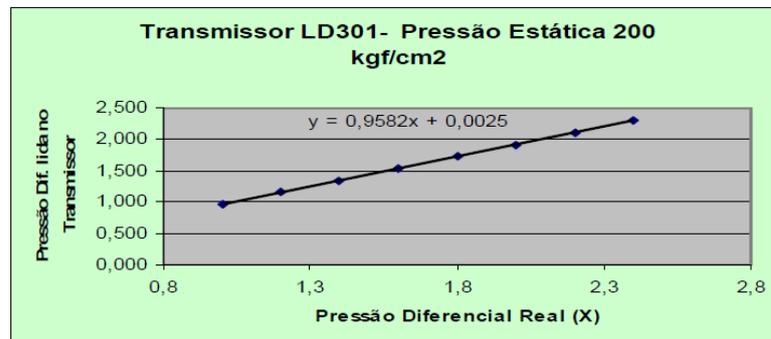


Figura 17 Relação entre ΔP_{real} e ΔP lido pelo transmissor (SALVIO, 2008)

O trabalho de Salvio (2008) demonstrou que os medidores analisados possuem desempenho similar, indicando valores mais baixos da pressão diferencial à medida que a pressão estática aumenta. Esta característica não é desprezível e deve ser considerada quando se deseja medições com níveis elevados de exatidão, tais como os utilizados para medição fiscal. Caso contrário, a incerteza de medição de vazão pode ultrapassar o valor de 1,5% requerido por norma.

2.10.3 Avaliação metrológica da comparação interlaboratorial da calibração de medidores ultra-sônicos

A proposta de (ARANTES, 2007) refere-se à avaliação metrológica de um mesmo medidor ultra-sônico de vazão de líquido pelo método de tempo de trânsito, quando instalado em dois sistemas distintos de calibração, pertencentes, respectivamente, a dois laboratórios acreditados, ambos operando em conformidade com as especificações técnicas de instalação

do fabricante e segundo os requisitos mínimos especificados em normas e recomendações internacionais. A pesquisa investigou o efeito na calibração introduzido por uma válvula e uma curva longa de 90° instaladas imediatamente à montante do trecho reto de medição, que tem o seu comprimento atendendo as condições mínimas especificadas nas normas aplicáveis. Concluiu-se pela necessidade de se utilizar pelo menos 40 diâmetros nominais (40 DN) de comprimento de trecho reto, para que a influência da presença da válvula e da curva longa possa ser considerada desprezível.

Dois aspectos foram observados para analisar a influência das instalações:

- a) a influência do comprimento de tubo reto à montante do trecho de medição;
- b) a presença de acidentes (acessórios, curvas) à montante do trecho reto de medição.

O Método-1 e a condição de calibração denominada C1T1 teve como objetivo avaliar:

- a) Avaliar o efeito da ausência de transiente de vazão, considerando que cada corrida de calibração é iniciada com fluxo em regime permanente;
- b) Avaliar a utilização de 40 DN de tubo reto à montante do medidor;
- c) Avaliar o efeito do volume provado (15 m³).

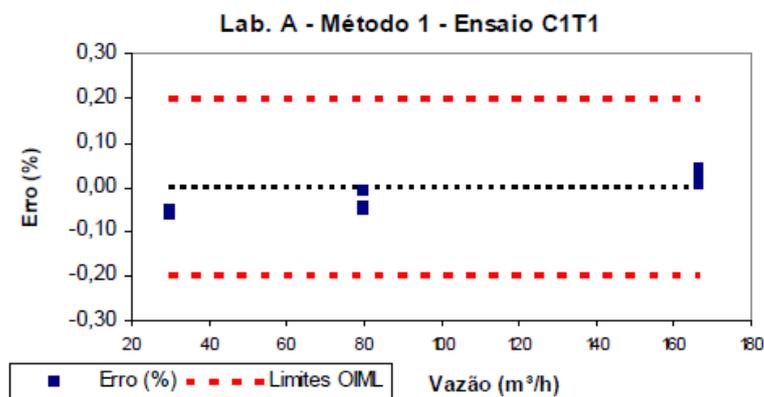


Figura 18 Erro x vazão nominal no ensaio C1T1

Os resultados indicados pela Figura 18 mostraram que utilizando-se 40 diâmetros de trecho de tubo reto à montante do medidor, os erros de medição variaram em torno da linha de base (erro = 0%) e atenderam satisfatoriamente os limites para a classe de exatidão 0,2 da OIML R-117, que é de $\pm 0,2\%$.

O Método-2 e condição de calibração C2T1 teve como objetivo avaliar:

- d) Avaliar o efeito da ausência de transiente de vazão, considerando que cada corrida de calibração é iniciada com fluxo em regime permanente;
- e) Avaliar a utilização de 10 DN de tubo reto à montante do medidor;
- f) Avaliar o efeito do volume provado (15 m³).

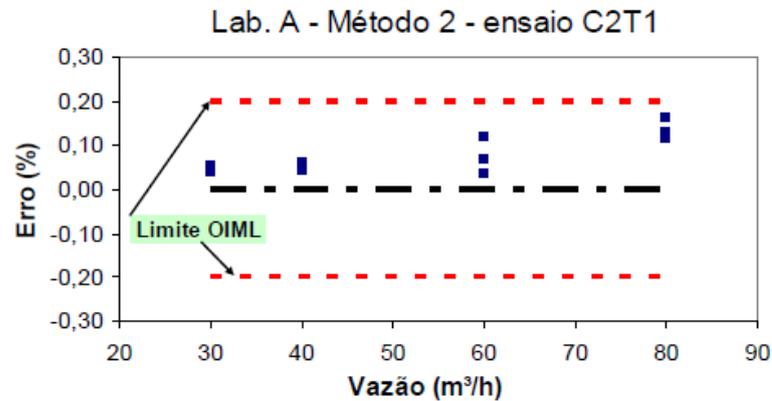


Figura 19 Erro x vazão nominal no ensaio C2T1

Na Figura 19 pode-se observar que o erro atende aos limites da OIML R-117, mas com uma tendência a aumentar o erro em relação ao ensaio C1T1.

Para o Método-3 foi utilizado como padrão um tanque provador com capacidade de 5000 litros (5 m³), contendo água como fluido de calibração. Um medidor ultra-sônico de DN=100 mm foi calibrado por este método. O sistema de calibração foi caracterizado por ser constituído de:

- a) trecho reto de tubulação suficiente para atender aos requisitos mínimos do fabricante e das normas aplicáveis;
- b) válvula esfera do tipo *on-off* para início e término de uma corrida de calibração, localizada a montante do trecho de medição;
- c) válvula reguladora de vazão, localizada a jusante do trecho de medição;

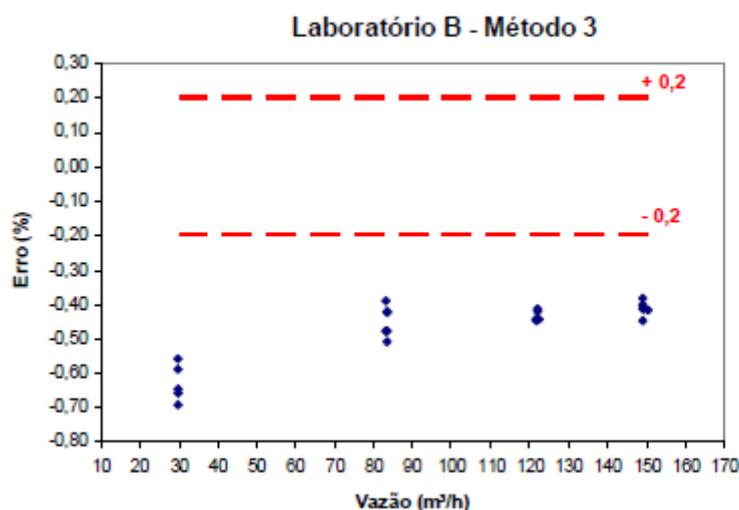


Figura 20 Erro x Vazão Nominal obtidos no Laboratório B, Método-3

Analisando os resultados obtidos nos Laboratórios A e B, quando comparou-se o Método-1 (40 diâmetros de tubo reto à montante do medidor) contra o Método-2 (10 diâmetros de tubo reto à montante do medidor) pode-se evidenciar a influência do comprimento de tubo reto à montante do medidor sobre a sua exatidão. Observa-se ainda que no caso do Método-2 as curvas muito próximas ao trecho de medição podem estar causando distorções no escoamento, o que afeta o fator de distribuição do perfil de velocidade.

Uma outra conclusão a que chegou é que as diferenças entre os resultados dos ensaios do Método-2 no Laboratório A diferem dos resultados do Método-3 do Laboratório B (Figura 20), pelo fato de que no primeiro a curva do tipo joelho 90° imediatamente à montante do trecho de medição está no mesmo plano que este trecho, enquanto que no segundo, a curva é do tipo longa e está em plano perpendicular ao trecho de medição. Para comprovar esta hipótese seria necessária a realização de mais ensaios.

2.10.4 Análise metrológica do desempenho de medidores ultra-sônicos de vazão de líquidos

O trabalho de (SILVA, 2008) objetivou a comprovação experimental de que o diagnóstico de medição e de manutenção do perfil de escoamento é uma ferramenta importante para a garantia de que a vazão de líquido está sendo medida corretamente e dentro dos critérios de medição fiscal estipulados pela legislação em vigor. Para tal, um sistema de aquisição de dados foi acoplado ao medidor ultrasônico de 5 canais, sendo então o medidor

calibrado em dois laboratórios credenciados pelo INMETRO e pertencentes à Rede Brasileira de Calibração, respectivamente com água e óleo mineral registrando estes valores de referência, utilizados também para uma comparação entre as características metrológicas dos dois laboratórios.

O objeto desse estudo é um medidor de vazão de óleo tipo ultrasônico intrusivo, princípio tempo de trânsito, multifeixe, tipo carretel, modelo Altosonic V UFS 500 F/5S TR EEX, cujo fabricante é a KROHNE Altometer.

O medidor tem diâmetro nominal de 8” e classe de pressão de 600 lbs, além do sensor ultra-sônico UFS que acompanha o equipamento, existe sua unidade de conversores UFC e a sua unidade de processamento UFP.

A incerteza para esse medidor atende os preceitos do Regulamento Técnico de Medição (RTM), indicando valores menores que $\pm 0,15\%$ dos valores medidos, abaixo dos critérios para EMA da OIML R-117 que estipula 0,2%.

Testes realizados na Alemanha, acompanhados pelo NMI (*Netherland Measurement Institute*) mostram que além de atender os requisitos da OIML R-117 o medidor está apto à operar para faixa de viscosidade de 0,1 até 150 mPa.s. Esses medidores podem ser encontrados no mercado com diâmetros que vão de 4” até 40”; atendendo a temperaturas de processo até 140 °C e pressões de até 160 bar. Quanto à variação de vazão podem atender de 14 a 28000 m³/h e quanto à velocidade de escoamento podem ser de 0,5 até 10 m/s.

De forma geral, o medidor usa 5 feixes acústicos para reduzir erros de instalação, reduzir a incerteza de medição com grande quantidade de dados e otimização da posição dos feixes acústicos, otimizar o desempenho para toda a faixa do número de Reynolds, reduzir os erros devido ao efeito do escoamento transversal antes da entrada no medidor e diagnosticar o fato de ter-se um escoamento não ideal.

Deste modo inicia-se a corrida de calibração fazendo o fluido escoar num sistema fechado como mostra a Figura 21, visando obter um regime de escoamento permanente. Somente após atingindo esse patamar o divisor é acionado. A massa do fluido é então mensurada pela indicação da balança digital (capacidade de 60 toneladas), como tem-se a densidade da água do sistema (0,9975 kg/l) pode-se determinar o volume do fluido no tanque. As pressões e temperaturas do sistema são monitoradas para que sejam feitas as devidas correções dos volumes totalizados.

O volume totalizado no medidor pode ser obtido através da totalização de pulsos no momento em que é acionado o divisor até o final da corrida. Foram realizadas 3 corridas para cada vazão de 150, 250, 350, 450, 500 e 550 m³/h. Os dados levantados permitem

determinar o erro relativo, bem como a repetitividade do ensaio e ainda fornecer insumos para determinação do diagnóstico desse medidor.

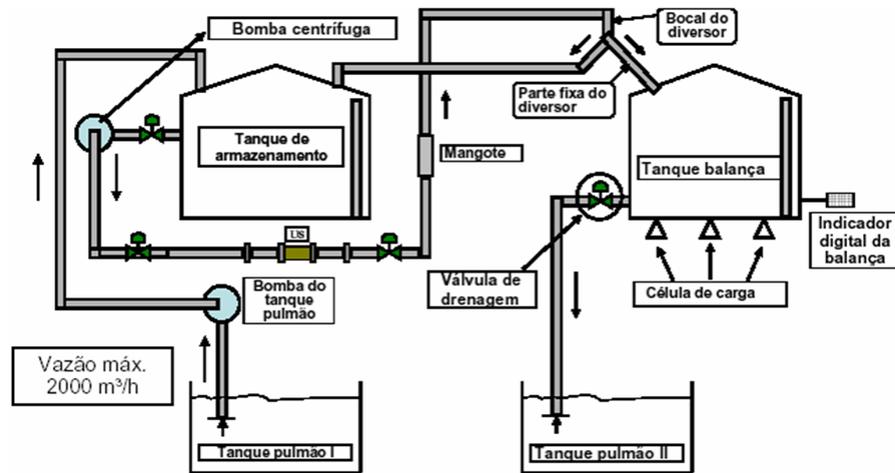


Figura 21 Esquemático do sistema de calibração - Laboratório fluido água

A Figura 22 apresenta os resultados utilizando o circuito com água, através das curvas de calibração obtidas por Silva (2008).

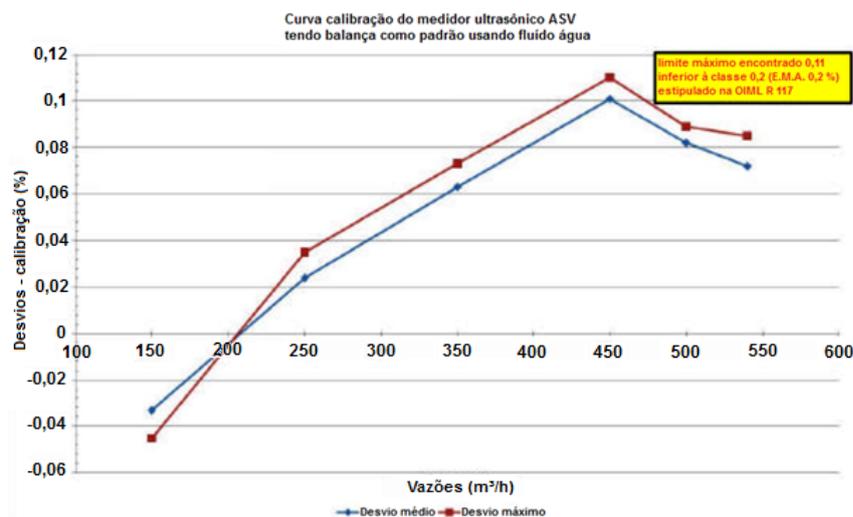


Figura 22 Desvios encontrados na calibração do ASV – laboratório fluido água

O seguinte passo na aquisição de dados foi em laboratório que utiliza óleo mineral como fluido de trabalho, óleo esse denominado Spindura 10 (fabricante Castrol) que a uma temperatura de 25 °C apresenta 15,661 cSt de viscosidade, ou seja, $1,566 \times 10^{-5}$ m²/s no SI.

Esse laboratório é acreditado junto ao INMETRO e pertence à RBC para calibração de medidores de vazão, detém a mesma característica do anterior, sendo o seu padrão primário de tanque aberto, ou seja, operando a pressão atmosférica.

O circuito da Figura 23 mostra a disposição de um tanque provador volumétrico (capacidade de 6000 litros) como padrão primário de referência acompanhado de um medidor padrão de deslocamento positivo que também pode ser usado como parâmetro de comparação junto ao medidor em análise.

Pode-se observar que a bomba fornece energia cinética para que o óleo mineral possa percorrer o circuito. Após a abertura manual da válvula de esfera, o fluido segue pelo medidor ASV e posteriormente pelo medidor de deslocamento positivo para em seguida ir rumo ao tanque provador. Através de uma escala no junto ao corpo do tanque é possível determinar o volume de fluido em seu interior.

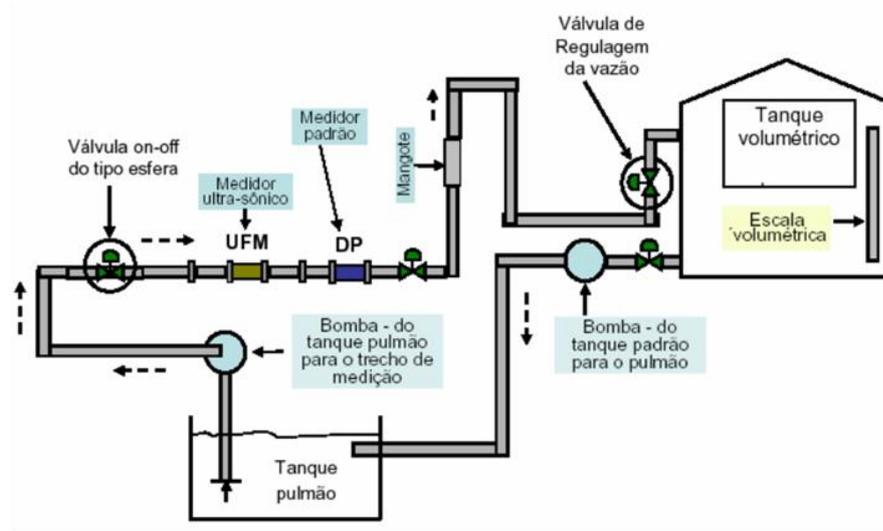


Figura 23 Esquemático do sistema de calibração - Laboratório fluido óleo mineral

Foram realizadas 3 corridas para cada vazão de 150, 250, 350, 450, 500 e 550 m³/h. Os dados levantados permitem determinar o erro relativo, bem como a repetitividade do ensaio e ainda fornecer insumos para determinação do diagnóstico desse medidor.

Os resultados da calibração utilizando óleo mineral são demonstrados pela figura 24, através das curvas de desvios da calibração, para o circuito com óleo.

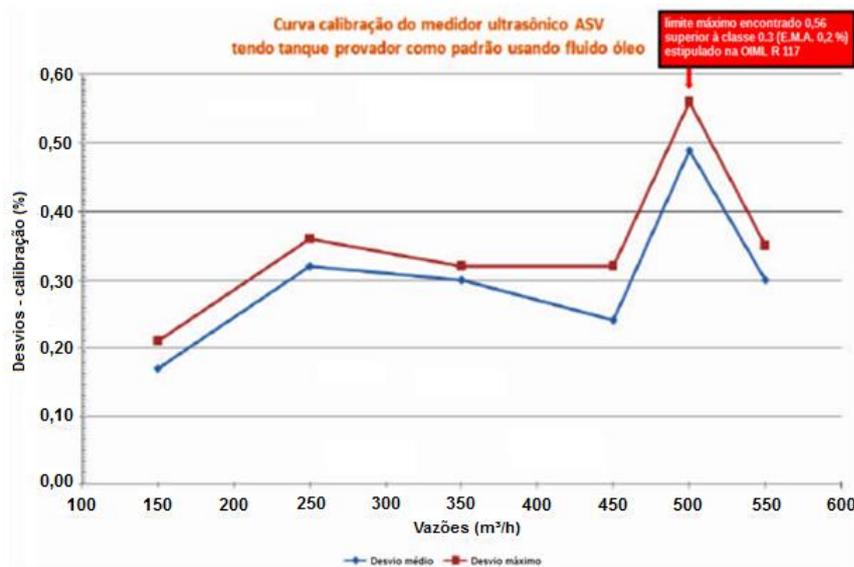


Figura 24 Desvios encontrados na calibração do ASV – laboratório fluido óleo.

É possível estabelecer uma base comparativa dos resultados obtidos em laboratório, durante o processo de calibração do medidor quando comparado aos tanques padrão dispostos em ambos os circuitos, água e óleo mineral, como pode ser visto nas figuras 22 e 24.

Foi verificada uma melhor performance do medidor no laboratório água. Pôde-se observar que nesse laboratório o processo de estabilização de fluxo é conseguido mais rapidamente, com duração mais prolongada da corrida do circuito, permite minimizar discrepâncias e abranger uma coleta maior de dados. O sistema automático do início e término do processo é outro ponto importante, pois é feito de forma sincronizada, sem a intervenção do controle de abertura manual como foi verificado no laboratório de óleo mineral.

Não foram encontrados trabalhos comparativos de três tipos diferentes de medidores, cada um com princípio de medição diferente, o que este trabalho se propõe.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do trabalho, descrevendo a estratégia para avaliação metrológica de medidores de vazão utilizando-se uma planta de líquidos do LAI. Também são descritas a planta de líquidos utilizada, e os equipamentos e metodologias que foram utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

3.1 A Planta de líquidos

A planta de líquidos utilizada possui uma estrutura metálica que suporta a fixação dos dispositivos de campo. Nela são feitas as montagens mecânicas e elétricas: equipamentos para medição e atuação, conversores, tubulação, eletrodutos, tanques e reservatórios (Figura 25).

Para a implementação do projeto, foram utilizados os seguintes dispositivos:

- a) uma motobomba Dankor modelo PRATIKA CP-4RT com potência de $\frac{1}{2}$ cv, que é responsável por promover a circulação de água pela tubulação e tanque;
- b) um inversor de frequência WEG CFW-08.
- c) um rotâmetro modelo AP-7000 da Applitech, com a função de indicador do valor instantâneo da vazão de água no respectivo circuito;
- d) um transmissor de vazão 8742 da *Rosemount – Emerson Process Management*;
- e) um conversor elétrico estático tiristorizado TIRISTHERM fabricado pela Therma, utilizado para alimentar as resistências elétricas responsáveis por aquecer a água;
- f) uma resistência de imersão de 2,2 KW, imersa no tanque e responsável pelo aquecimento da água do tanque;
- g) uma termoresistência tipo Pt100, para medir a temperatura da água no tanque;
- h) uma válvula proporcional, utilizada para variar a seção da tubulação;
- i) um microcomputador do tipo PC industrial da SDC Engenharia e Sistemas.



Figura 25 Planta de Líquidos do Laboratório de Automação Industrial da Univates

Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação metrológica de sistemas de medição de vazão, analisando-se as incertezas envolvidas. Nele serão avaliados três medidores com diferentes princípios de medição: geradores de pressão diferencial por placa de orifício, linear eletromagnético e linear por área variável.

Foi utilizado um microcomputador do tipo PC industrial e um software de supervisão, que efetua a aquisição de dados dos equipamentos e os apresenta por meio de animações de telas. No microcomputador, através do sistema supervisório, tem-se a visão geral e o controle total da planta de líquidos. Pode-se controlar e visualizar todas as variáveis do processo, pois o supervisório permite a visualização da leitura do sensor de temperatura (Pt100) e dos medidores de vazão (pressão diferencial, eletromagnético e área variável). Também é possível controlar a abertura e fechamento da válvula proporcional, a rotação da motobomba e a potência de aquecimento da resistência. Além disso, o supervisório também disponibiliza a geração de históricos de variáveis do processo.

Para gerenciar, monitorar, controlar e operar a planta industrial, foi utilizada a plataforma de controle e automação de processos da Smar, o DFI302. Nele foram conectadas as entradas e saídas do processo como sensores e atuadores, por meio da rede *Foundation Fieldbus*. Assim, os dispositivos de campo têm a função de adquirir dados e atuar nas variáveis de interesse do sistema.

A base de dados utilizada nos processos é OPC. Com esta escolha, muitas aplicações podem ser clientes do servidor OPC localizado na plataforma de controle e automação de processos, pois trata-se de uma base de dados normalizada. A base de dados do servidor OPC é disponibilizada para aplicativos que rodam no servidor da planta, sendo assim, o supervisor importa a base de dados do processo industrial, pois ele é um cliente OPC. O pacote System 302 da Smar contém um servidor OPC para variáveis contínuas (SmarDFIOLEServer) que foi utilizado durante a desenvolvimento deste trabalho. Com isto, através do supervisor, pode-se ler e escrever em variáveis da planta.

Foram instalados os 3 medidores em série numa tubulação, tendo água como fluido processado. A escolha da água foi por ser um fluido amplamente utilizado, por ser facilmente disponível, de baixo custo e que não causa impacto ambiental. Com base nos estudos teóricos, foi utilizado como padrão de referência o medidor de pressão diferencial LD302, cujo modelo disponível no LAI possui exatidão de 0,075% da faixa calibrada. Este, por sua vez, indica o valor verdadeiro convencional (VVC) que serve como referência para comparação com os outros dois medidores. O medidor eletromagnético 8742 tem exatidão declarada de 0,5% da faixa calibrada e o medidor de área variável AP-7000 tem exatidão declarada de 2% do fundo de escala, que é de 100 l/min. Assim, conclui-se que a exatidão do mestre é 6 vezes maior do que a exatidão do medidor eletromagnético e 26 vezes maior que a exatidão do medidor de área variável, onde a exatidão do mestre tem que ser compatível com a do medidor a ser calibrado (DELMÉE, 2003).

De acordo com o INMETRO (2003), a análise foi feita realizando-se 5 pontos de calibração para 3 diferentes condições de medição, dentro de uma faixa de trabalho de 10 à 50 l/min. Não se usou vazões maiores pela limitação do diâmetro da tubulação da planta de líquidos. Para atender a faixa mínima de medição do medidor de vazão AP-7000, não se usou vazões menores que 10 l/min. Escolheu-se, ainda, trabalhar com uma temperatura máxima do fluido de 50 °C, pois o fabricante do transmissor de vazão 8742 especifica a temperatura máxima do fluido de processo em 60 °C, para não ocasionar danos no revestimento interno do tubo de vazão.

As 3 diferentes condições de calibração são:

- a) condição de calibração 1: medição da vazão de líquido ao longo da faixa de calibração, com temperatura da água constante a 25 °C. A abertura da válvula de controle foi de 100%;

- b) condição de calibração 2: medição da vazão de líquido ao longo da faixa de calibração, com temperatura da água constante a 50 °C. A abertura da válvula de controle foi de 100%;
- c) condição de calibração 3: medição da vazão de líquido ao longo de uma faixa de pressão da linha, com vazão inicial de 50 l/min. O controle de vazão se dará através do fechamento da válvula e a temperatura da água é constante a 28 °C.

Foram escolhidas essas condições de calibração para se avaliar a influência da temperatura e da pressão nas indicações dos instrumentos medidores de vazão.

A variação de vazão foi realizada através de um sinal de referência enviado do conversor FI302 a um inversor de frequência que controla a rotação da motobomba, que impulsiona a água pela tubulação. A variação de secção da tubulação ocorre por meio da abertura ou fechamento de uma válvula de controle proporcional, controlada remotamente. Já a variação de temperatura da água foi realizada através de um sinal de referência enviado do conversor FI302 a um conversor elétrico estático tiristorizado, que controla a potência do aquecedor (resistência imersa na água do tanque).

Foram realizados 5 pontos de calibração ao longo da faixa de medição, para cada um dos três diferentes ensaios, e, para cada ponto, feitas 50 medições. Escolheu-se um número significativo de amostras afim de diminuir as incertezas. Desta forma, foi avaliada a influência causada no desempenho dos instrumentos de medição sob diferentes condições de medição, permitindo-se estimar as incertezas envolvidas nas medições de vazão.

Em cada ensaio foram coletados os dados relativos às indicações de cada medidor de vazão, para posterior análise do desempenho de cada um deles. De posse destes dados, foi feita a caracterização de cada medidor, fazendo-se uma análise dos erros nas medições em relação a mudanças nas condições de medição. Através dos dados coletados, foram levantadas as curvas de calibração e de erro dos medidores.

As vazões indicadas pelo medidor eletromagnético e área variável, foram comparadas com a do medidor de pressão diferencial, convencionado como sendo o padrão, ou seja, o VVC. Assim, conforme (SALVIO, 2008) é possível obter-se as incertezas utilizando o método de avaliação tipo A, em que a incerteza padrão é obtida através de análise estatística de uma série de observações.

3.2 Dispositivos *Foundation Fieldbus*

Os dispositivos utilizados para a instrumentação da planta de líquidos são da série 302 da SMAR:

- a) DFI302 – *Fieldbus Universal Bridge* – plataforma de controle e automação de processos;
- b) DC302 – Entradas e saídas remotas *Fieldbus*;
- c) LD302 – Transmissor de Pressão *Fieldbus*;
- d) TT302 – Transmissor de Temperatura *Fieldbus*;
- e) FI302 – Conversor de *Fieldbus* para Corrente 4-20mA;
- f) IF302 – Conversor de Corrente 4-20mA para *Fieldbus*.

O DFI302 (*Fieldbus Universal Bridge*) é um elemento chave na arquitetura distribuída dos sistemas de controle de campo. Este combina características de comunicação com acesso direto de E/S e controle avançado para aplicações contínuas e discretas. Também provê serviços de comunicação para controle, utilizando o OPC (PAULA E SILVA, 2004).

Possui quatro módulos que possibilitam a conexão do sistema com a rede HSE, abrangendo a comunicação para os instrumentos localizados em segmentos diferentes. Além de interligar os canais, a DFI302 conecta todo o sistema a uma rede Ethernet utilizando para isso um *switch*. Pode ser acessado pelo sistema supervisor através da tecnologia OPC. (MARANGONI, 2005).

O DC302 permite uma integração fácil entre o *Fieldbus* e as entradas/saídas convencionais. Os equipamentos discretos como chaves de pressão, botoeiras, válvulas On/Off, bombas e esteiras podem ser integradas ao sistema *Foundation* via barramento, usando o DC302. O DC302 permite que as entradas e saídas discretas e analógicas convencionais possam estar disponíveis e facilitar a configuração das estratégias de controle.

O LD302 é um transmissor para medida de pressão diferencial, de nível e de vazão. Neste trabalho ele será configurado para medição de vazão de líquido, sendo a referência de vazão. Suas especificações de exatidão para condições de referência como alcance (span) iniciando em zero, temperatura de 25 °C, pressão atmosférica, tensão de alimentação em 24 V e fluido de enchimento em óleo silicone e diafragmas isoladores de aço inox 316L são:

- a) $\pm 0,075\%$ do span (para o span $\geq 0,1$ vezes limite da faixa superior (URL));

- b) $\pm 0,0375 [1 + (0,1 \text{ URL}/\text{SPAN})]\%$ do span (para o span $< 0,1$ vezes o URL);

O FI302 é um dispositivo conversor de *Fieldbus* para corrente 4-20mA, este dispositivo possui três canais FF para corrente e foi utilizado para o acionamento de inversores de frequência e conversores eletrostáticos para acionamento de resistências.

Já o TT302 é um dispositivo transmissor de temperatura, utilizado para a medição de temperatura do líquido no tanque da planta. Além dos dispositivos da série 302 da Smar, também foram utilizado dois dispositivos FF de outros fabricantes:

- a) um dispositivo transmissor de vazão eletromagnético, modelo 8742 da Emerson Process Management;
- b) um dispositivo posicionador *fieldbus* para válvulas pneumáticas, modelo DVC6000f da Fisher.

Vários tipos de dispositivos *fieldbus* podem ser conectados no mesmo barramento. Os dispositivos da Série 302 utilizam sinais com 31.25 Kbits/s e são alimentados via barramento. Todos os dispositivos no mesmo barramento devem utilizar a mesma sinalização e são conectados em paralelo no mesmo par de cabos. Para situações em que não é necessário segurança intrínseca, pode-se conectar até 16 dispositivos por barramento.

Os dispositivos serão conectados fisicamente conforme a topologia *Daisy-Chain* (Figura 26).

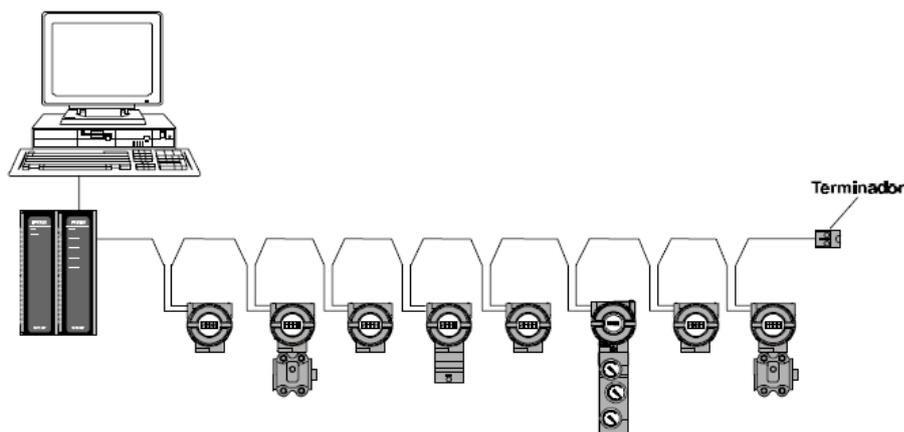


Figura 26 Topologia Daisy-Chain

3.3 Configuração da malha hidráulica

A planta constitui-se em um sistema de tanques interligados por tubulações, formando uma malha hidráulica, onde são possíveis ensaios de vazão. A instrumentação é baseada na utilização de sensores e atuadores inteligentes que utilizam o protocolo de comunicação industrial *Foundation Fieldbus*. Através de um aplicativo supervisão controla-se e visualiza-se os parâmetros de controle da planta bem como a visualização gráfica, em tempo real, das variáveis do sistema.

A malha hidráulica é constituída por:

- a) 1 tanque de reservação;
- b) uma motobomba;
- c) 1 sensor de temperatura Pt100;
- d) uma resistência de aquecimento;
- e) uma válvula de controle proporcional;
- f) 1 medidor de vazão AP-7000;
- g) 1 transmissor de vazão 8742;
- h) 1 transmissor de pressão diferencial LD302;

Deste modo, tem-se uma malha hidráulica com condições operacionais para a realização dos ensaios de vazão.

A Figura 27 ilustra a simbologia da instrumentação da planta de líquidos. Pode-se visualizar os blocos funcionais dos dispositivos com suas respectivas *tags*. São eles:

- a) transmissor de pressão diferencial LD302 referenciado com o bloco de entrada analógica FLT-01;
- b) transmissor de vazão 8742 referenciado com o bloco de entrada analógica FE-01;
- c) medidor de vazão AP-7000 referenciado como FE-02, não possuindo comunicação através do protocolo *Foundation Fieldbus*.
- d) válvula de controle proporcional referenciada como bloco de saída analógica CV-01;
- e) bloco de controle PID referenciado como PID-01, alocado no transmissor LD302;
- f) bloco de saída analógica referenciado como BOMBA, alocado no conversor FI302;

- g) blocos de entrada analógica referenciados como TEMP-01 e TEMP-02, ambos alocados no transmissor de temperatura TT302.

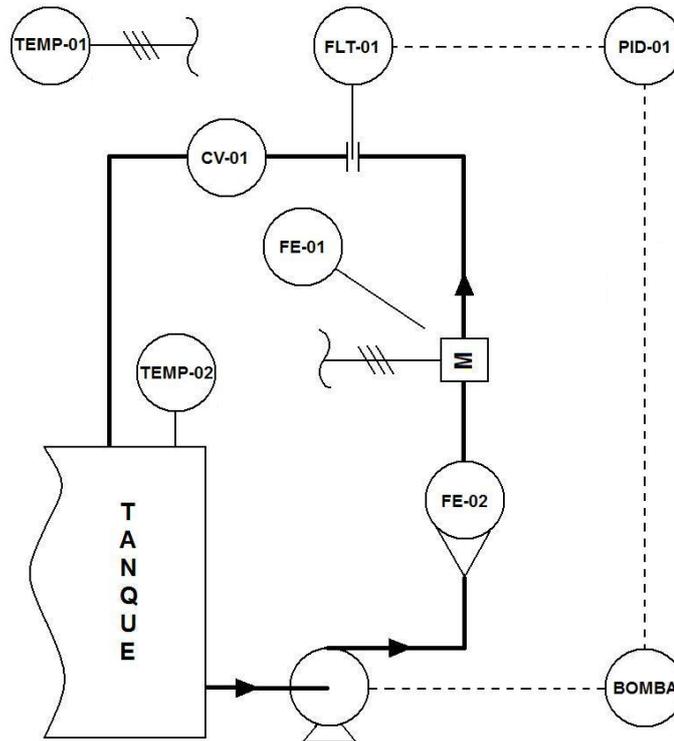


Figura 27 Configuração da malha hidráulica em simbologia de instrumentação

A água circula pela tubulação e tanque impulsionada através da motobomba, que é acionada por um inversor de frequência, o qual é controlado pelo sinal de referência de um conversor FI302. Dentro do tanque estão o sensor de temperatura tipo Pt100 e a resistência de imersão para aquecimento da água. No trecho de circulação da água foram instalados os dispositivos medidores de vazão: transmissor de pressão *fieldbus* LD302, transmissor de vazão 8742 e medidor de vazão AP-7000.

3.4 Configuração da Rede Industrial *Foundation Fieldbus* através do Syscon

Através desta ferramenta, todo o algoritmo de controle e configuração dos dispositivos pertencentes à rede *Foundation Fieldbus* são transmitidos e armazenados nos próprios dispositivos envolvidos no sistema de controle (NETO, 2007).

A configuração da planta de líquidos foi feita através do software configurador, o *Syscon* (*System Configurator*). Esta configuração se divide em três partes básicas: a

configuração física, a configuração lógica e a parametrização dos blocos (ZEILMANN, 2002).

3.4.1 Configuração física

Na configuração física são determinados quais os dispositivos que são conectados ao barramento, quais os blocos de função que são necessários para efetuar o controle do processo e em que dispositivo estes blocos se localizam (Figura 62). É importante enfatizar que a alocação dos blocos que executam o controle da planta pode ser feita em quaisquer um dos dispositivos da rede (ZEILMANN, 2002).

3.4.2 Configuração lógica

De acordo com a Figura 28, na configuração lógica são definidas as estratégias de controle, indicando a maneira como os blocos de funções alocados entre os dispositivos se relacionam. Serão usados os seguintes blocos funcionais:

- a) bloco de entrada analógica (AI) referenciado como FLT-01, alocado no dispositivo LD302. Sua função é fazer a leitura da vazão;
- b) bloco de controle proporcional/integral/derivativo (PID) referenciado como PID-01, também alocado no dispositivo LD302. Sua função é executar as ações de controle da vazão..
- c) bloco de saída analógica (AO) referenciado com BOMBA, alocado no dispositivo FI302. Sua função é enviar um sinal de saída ao inversor de frequência conforme o sinal de controle recebido pelo bloco PID-01.

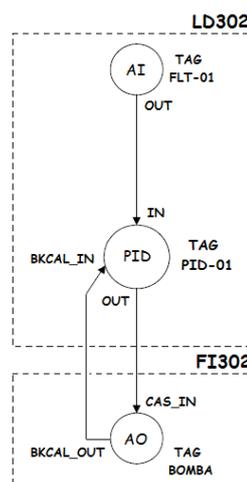


Figura 28 Configuração lógica da planta de líquidos

3.5 Sistema SCADA

O sistema de supervisão, controle e aquisição de dados de processos que foi utilizado para validar a proposta é o *RSView32*, produzido pela *Rockwell Automation*. Escolheu-se o *RSView32* por ser uma ferramenta que disponibiliza diversos recursos que facilitam e agilizam a tarefa de desenvolvimento de aplicações, e, também, o Laboratório de Automação Industrial da Univates possui licença para uso do software, além do autor estar familiarizado com o mesmo, diminuindo o tempo de desenvolvimento.

Através da ferramenta de desenvolvimento da *Rockwell*, foi desenvolvida uma tela para supervisão e controle dos processos que rodam na rede *Foundation Fieldbus*. Foram realizados controles de vazão, temperatura e abertura da válvula para criar as condições necessárias para a realização dos ensaios de calibração. Foram disponibilizadas as leituras dos medidores na tela de supervisão, bem como a possibilidade de controlar o processo inserindo dados de entrada que atuem na variável desejada.

A geração de históricos das medições de vazão foi necessária para posterior análise, em que os dados adquiridos foram utilizados para avaliação e levantamento das curvas de calibração e de erro dos medidores.

4 EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Configuração da malha hidráulica

Para atender os objetivos propostos neste trabalho, foi inserido na tubulação o transmissor de pressão diferencial LD302 da Smar. Foi observada a existência de seção reta de 1200 mm a montante, atendendo a especificação do fabricante (1000 mm) e ao que o trabalho de (ARANTES, 2007) sobre acidentes a montante, apesar deste autor ter observado influências em medidores ultrassônicos.

No mesmo circuito, em série, foi instalado o medidor eletromagnético 8742 da Emerson. As especificações de instalação do fabricante são de 63,5 mm de trecho reto à montante e 25,4 mm à jusante. Assim, o medidor está instalado a 350 mm de tubo reto à montante e 150 mm de tubo reto à jusante do medidor, atendendo os requisitos.

Ainda, na mesma tubulação, encontra-se o medidor linear de área variável AP-7000 da Applitech. A este medidor foi acoplada uma câmera, sendo possível fazer aquisições de imagens das medições de vazão, automatizando a leitura das indicações deste medidor.

Desta forma tem-se os três medidores de vazão em série na tubulação, de acordo com a Figura 29.



Figura 29 Medidores de vazão em série na tubulação

Assim, os medidores estão dispostos da seguinte forma:

- 1) transmissor de pressão diferencial por placa de orifício LD302 da Smar;
- 2) transmissor medidor eletromagnético 8742 da Emerson;
- 3) medidor linear de área variável AP-7000 da Applitech.

Deste modo, tem-se uma malha hidráulica com condições operacionais para a realização dos ensaios de vazão.

4.2 Configuração da Rede Industrial Foundation Fieldbus através do Syscon

O projeto foi dividido em planta lógica e física. A planta lógica é onde todas as partes lógicas do projeto são mantidas, como as conexões entre os blocos funcionais. Já a planta física ou “*Fieldbus Network*” é onde a instalação física é representada, isto é, onde todos os segmentos ou redes *Fieldbus* são configuradas, como a *Bridge* DFI302 e os dispositivos de campo distribuídos ao longo do canal Fieldbus1, do mesmo modo como estão instalados no campo.



Figura 30 Dispositivos de campo distribuídos ao longo do canal Fieldbus1

A Figura 30 ilustra os dispositivos de campo instalados no canal Fieldbus1:

- 1) DVC6000 - Válvula de controle proporcional *Fieldbus*;
- 2) LD302 - Transmissor de pressão *Fieldbus*;
- 3) FI302 – Conversor de *Fieldbus* para Corrente 4-20mA;
- 4) IF302 – Conversor de Corrente 4-20mA para *Fieldbus*;
- 5) TT302 – Transmissor de Temperatura *Fieldbus*;
- 6) IF302 – Conversor de Corrente 4-20mA para *Fieldbus*;
- 7) FI302 – Conversor de *Fieldbus* para Corrente 4-20mA;
- 8) 8742 – Transmissor de vazão eletromagnético *Fieldbus*;

O quadro de comando também possui 2 dispositivos *Fieldbus*. São eles:

- 1) DC302 – Entradas e saídas remotas *Fieldbus*;
- 2) DFI302 – *Fieldbus Universal Bridge* – plataforma de controle e automação de processos.

A Figura 31 demonstra o funcionamento do *Syscon*, a configuração física dos dispositivos *fieldbus* que estão conectados ao canal Fieldbus1, bem como a configuração lógica e os blocos utilizados para fazer o controle da vazão.

Pode-se ver o transmissor de pressão diferencial LD302 instanciado como MEDIDOR_PRESSAO_DIFERENCIAL, onde foram criados um bloco de entrada analógica com a *tag* FLT-01, utilizado para leitura dos valores de vazão do bloco transdutor e, outro bloco de controle PID-01, utilizado para o cálculo das ações de controle da vazão. Da mesma maneira, tem-se o medidor eletromagnético instanciado como MEDIDOR_ELETROMAGNETICO, onde foi criado um bloco funcional de entrada analógica com a *tag* FT-01, para leitura dos valores de vazão do bloco transdutor do transmissor de vazão 8742. A lógica de controle ainda possui um bloco de saída analógico com a *tag* BOMBA, que está alocado no dispositivo FI302.

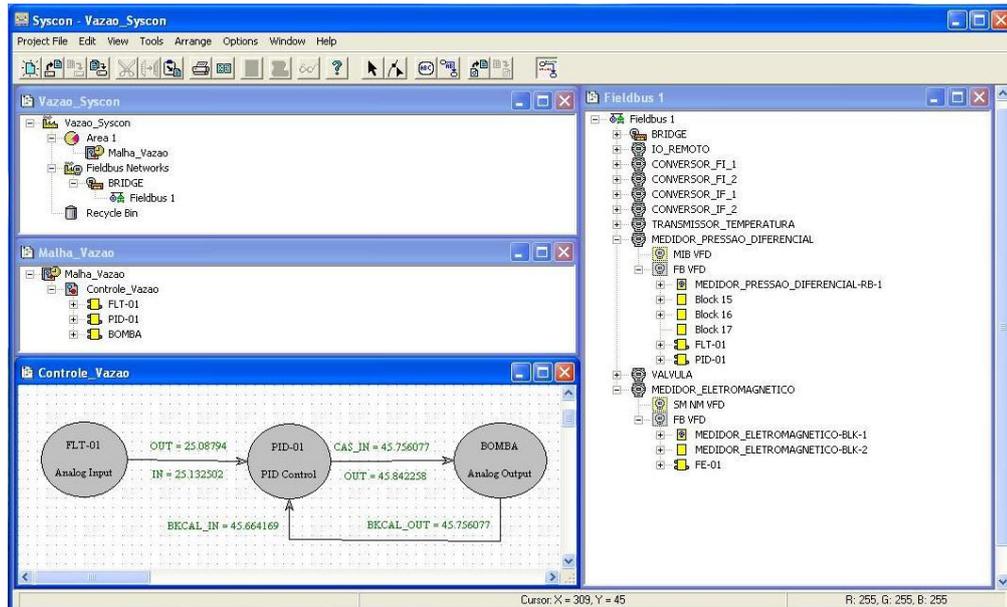


Figura 31 Configuração física e lógica da planta de líquidos no software Syscon

Os dispositivos de potência utilizados no trabalho são os seguintes:

- 1) um inversor de frequência CFW-08 da WEG que recebe um sinal de referência 4-20mA do FI302 para controlar a rotação da motobomba;
- 2) um conversor elétrico estático tiristorizado que recebe um sinal 4-20mA do FI302 para controlar a potência de aquecimento da resistência.

4.3 SCADA

Para o desenvolvimento do sistema supervisor, foi utilizado o RSView32 da Rockwell Automation. Através do supervisor é possível visualizar e controlar a vazão, temperatura do líquido e abertura da válvula.

Foi criada uma tela integrando o controle de vazão, temperatura do líquido e abertura da válvula, facilitando a operação dos sistemas, além de permitir ao usuário controlar e visualizar as funcionalidades numa mesma tela (Figura 32).

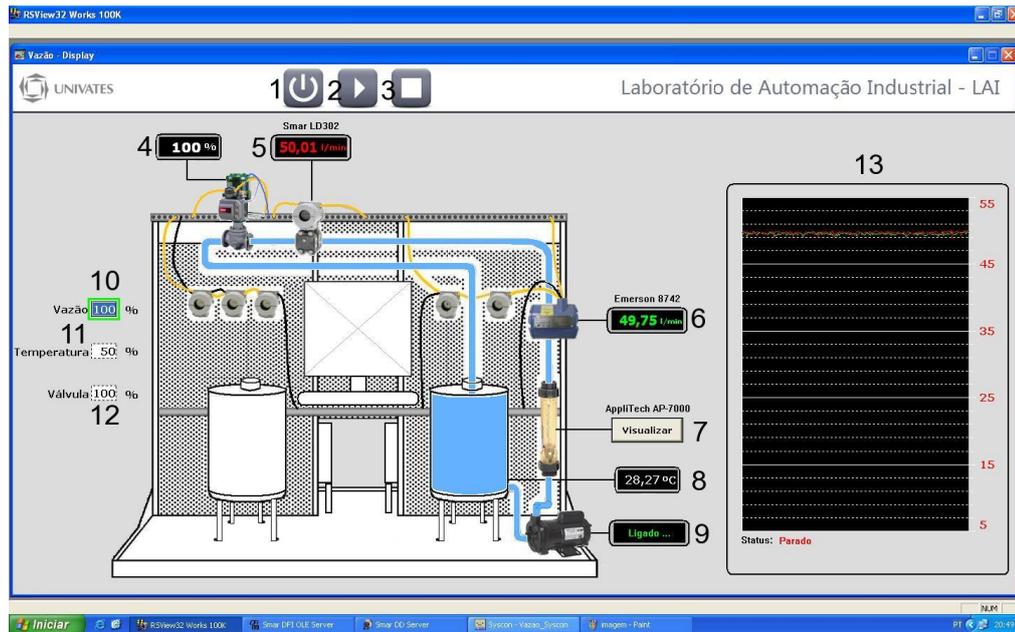


Figura 32 Sistema supervisório

Abaixo tem-se os botões e campos de visualização com suas respectivas funções:

- 1) botão de acionamento da motobomba;
- 2) botão de início de registro de dados dos medidores LD302 e 8742;
- 3) botão de parada de registro de dados dos medidores LD302 e 8742;
- 4) campo de visualização da porcentagem de abertura da válvula;
- 5) campo de visualização da vazão atual do LD302;
- 6) campo de visualização da vazão atual do 8742;
- 7) botão de visualização da vazão atual do AP-7000 via camera;
- 8) campo de visualização da temperatura atual do fluido;
- 9) campo de visualização do estado atual da motobomba;
- 10) controle da vazão de líquido, através do *setpoint* definido pelo usuário, que ajusta a potência da motobomba;
- 11) controle da temperatura do líquido, através do controle de potência da resistência de aquecimento;
- 12) controle da secção da tubulação, através do controle do percentual de abertura da válvula;
- 13) gráfico com os valores em tempo real das medições de vazão do LD302 e do 8742.

Para supervisionar e controlar o processo, foram criadas *tags* para associar o sistema supervisório às variáveis disponibilizadas pelos dispositivos de campo, como ilustra a Figura 33. Deste modo, é possível buscar informações e atuar nas variáveis de campo.

Alm	Tag Name	Type	Description
1	Planta_LiqAquecedor	Analog	Resistência de aquecimento da água
2	Planta_LiqCV1	Analog	Válvula proporcional
3	Planta_LiqIniciar_Aquisicoes	Digital	Botão que inicia as aquisições das medições de vazão
4	Planta_LiqInversor3_ON_OFF	Digital	Liga e desliga a motobomba
5	Planta_LiqSet_Point_Vazao	Analog	Set point da vazão
6	Planta_LiqTemperatura	Analog	Temperatura da água no tanque
7	Planta_LiqTemperatura_ar	Analog	Temperatura do ar
8	Planta_LiqVazao_1	Analog	Leitura do medidor LD302
9	Planta_LiqVazao_2	Analog	Leitura do medidor 8742

Figura 33 Configuração das tags no RSView32 da Rockwell

O registro de histórico de dados dos medidores LD302 e 8742 são salvos em um arquivo de registro de dados próprio do RSView32, com extensão .dbf. Os arquivos gerados podem ser facilmente visualizados em planilhas eletrônicas Microsoft Office ou Open Office. O supervisório foi configurado para fazer aquisições periódicas de vazão a cada 3s.

O registro de históricos de dados do AP-7000 é realizado por meio de captura de imagens através da utilização de uma câmera. O sistema supervisório executa um programa externo chamado WebCam Capture, que permite a visualização de vídeo e configuração de parâmetros como captura e salvamento de imagens em disco a cada 3s (Figura 34).

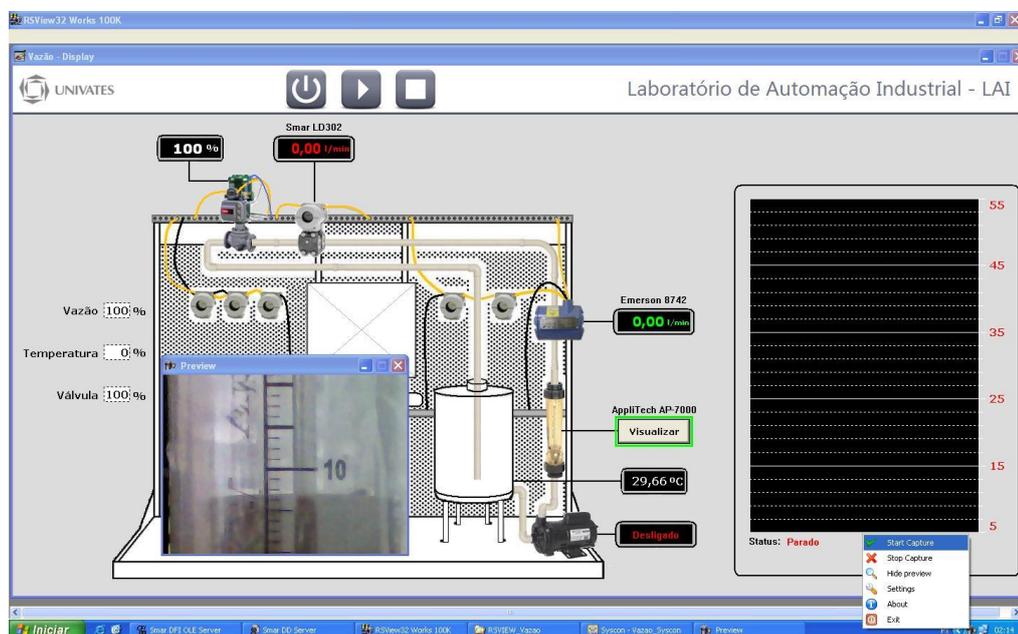


Figura 34 Supervisório com visualização de vídeo do AP-7000

Por fim, tem-se uma planta com condições operacionais para a realização dos ensaios de calibração de vazão.

4.4 Avaliação metrológica

Tendo concluído as configurações, foram feitos os ensaios metrológicos para o levantamento das curvas de calibração e de erros, bem como as incertezas de medição associadas.

4.4.1 Condição de calibração 1

Para a condição de calibração 1 tem-se as seguintes condições de medição:

- a) temperatura ambiente: 24 °C;
- b) temperatura da água: 22 °C;
- c) abertura da válvula de controle: 100%;
- d) método de calibração utilizado: comparação.

As tabelas 6 e 7 demonstram que as corridas neste ensaio foram realizadas nas vazões nominais de 10 l/min, 20 l/min, 30 l/min, 40 l/min e 50 l/min. Para cada ponto de calibração foram realizadas 50 medições, calculando-se a vazão média conforme a equação (17). O erro relativo de indicação é obtido conforme a equação (27), de acordo com Arantes (2007):

$$Erro = \frac{valor\ lido - VVC}{VVC} \times 100 \quad (27)$$

onde: *valor lido* é o valor medido pelo instrumento a ser calibrado;

VVC é o valor verdadeiro convencional (padrão de referência).

A incerteza expandida da medição é obtida de acordo com a equação (23) para um nível de confiança de 95,45% com fator de abrangência $k_p = 2$.

Tabela 6 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor eletromagnético 8742

Ponto de calibração	Vazão média do padrão LD302 [l/min]	Vazão média do 8742 [l/min]	Erro relativo de indicação do 8742 [%]	Incerteza expandida da medição U do 8742 [l/min]	Fator de abrangência $k_{95,45\%}$	Resultado da medição $Q = q \pm U$ [l/min]
1	10,00	10,05	0,50	0,01	2	10,05±0,01
2	20,01	20,04	0,15	0,01	2	20,04±0,01
3	29,87	29,86	-0,03	0,18	2	29,86±0,18
4	40,19	40,23	0,09	0,40	2	40,23±0,40
5	50,01	49,24	-1,53	0,80	2	49,24±0,80

Tabela 7 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor por área variável AP-7000

Ponto de calibração	Vazão média do padrão LD302 [l/min]	Vazão média do AP-7000 [l/min]	Erro relativo de indicação do AP-7000 [%]	Incerteza expandida da medição U do AP-7000 [l/min]	Fator de abrangência $k_{95,45\%}$	Resultado da medição $Q = q \pm U$ [l/min]
1	10,00	7,9	-20,57	0,5	2	7,9±0,5
2	20,01	19,0	-5,03	0,5	2	19,0±0,5
3	29,87	29,9	0,24	0,5	2	29,9±0,5
4	40,19	39,0	-2,99	0,5	2	39,0±0,5
5	50,01	49,1	-1,79	0,5	2	49,1±0,5

Os dados de cada incerteza das tabelas 8 e 9 foram obtidos conforme a equação (19), equação (20), equação (21) e equação (22), respectivamente.

Tabela 8 Balanço de incertezas do medidor eletromagnético 8742

Ponto de calibração	Variância experimental $s^2(q_k)$	Desvio padrão experimental $s(q_k)$	Variância experimental da média $s^2(\bar{q})$	Desvio padrão experimental da média $s(\bar{q})$
1	0,00032	0,01790	$6,40845 \times 10^{-6}$	0,00253
2	0,00092	0,03035	0,00001	0,00429
3	0,39315	0,62702	0,00786	0,08867
4	1,97443	1,40514	0,03948	0,19871
5	8,02760	2,83330	0,16055	0,40068

Tabela 9 Balanço de incertezas do medidor por área variável AP-7000

Ponto de calibração	Variância experimental $s^2(q_k)$	Desvio padrão experimental $s(q_k)$	Variância experimental da média $s^2(\bar{q})$	Desvio padrão experimental da média $s(\bar{q})$
1	0,12897	0,35913	0,00257	0,05078
2	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3	0,02693	0,16413	0,00053	0,02321
4	0,00500	0,07071	0,00010	0,01000
5	0,06418	0,25334	0,00128	0,03582

No ponto 2 do balanço de incertezas do medidor por área variável AP-7000 as incertezas são nulas, devido a pouca resolução deste instrumento, como ocorreu no trabalho de (PAULA, 2007) no ponto de calibração de 0,5 m/s. Como o medidor por área variável AP-7000 tem pouca resolução, ele não é capaz de discernir pequenas variações de vazão.

Assim, de acordo com Silva (2008), a incerteza expandida do medidor por área variável AP-7000 foi calculada como sendo a menor escala (menor divisão) do instrumento, ou seja, 0,5 l/min, pois a incerteza determinada é inferior à resolução do medidor.

A Figura 35 mostra as curvas de calibração do medidor eletromagnético 8742 e do medidor por área variável AP-7000 para o ensaio da condição de calibração 1. Nota-se que o medidor eletromagnético 8742 apresenta valores mais elevados de vazão ao longo da faixa de calibração, quando comparados com as vazões indicadas pelo medidor por área variável AP-7000.

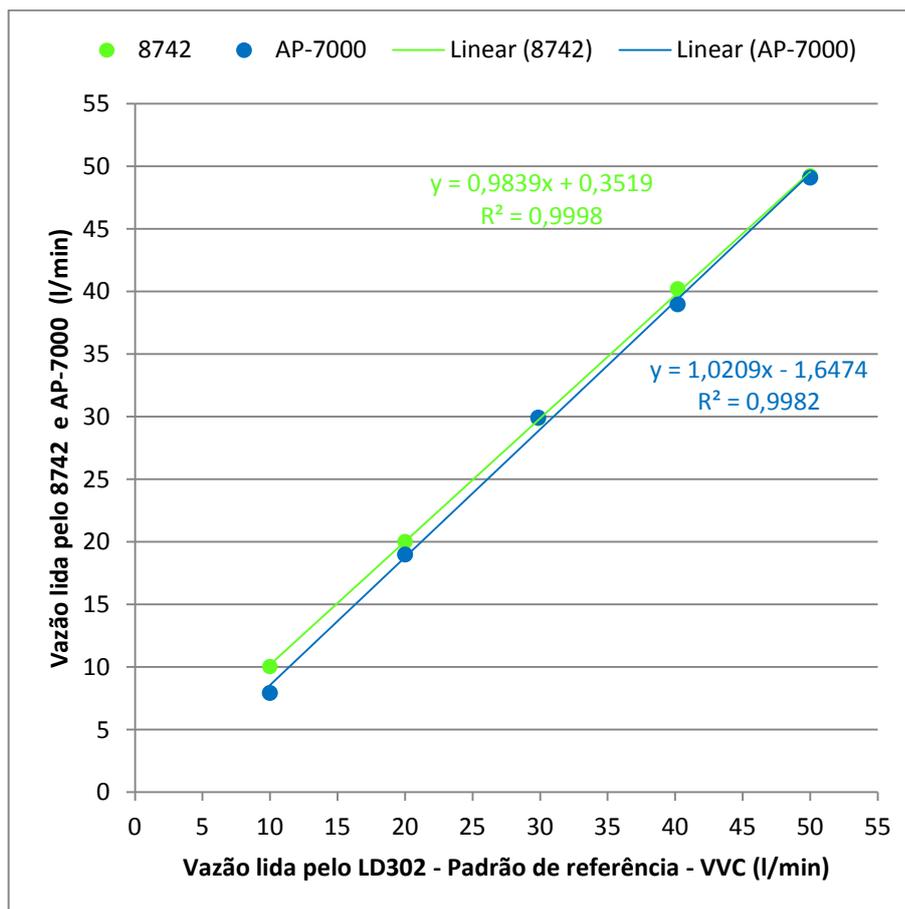


Figura 35 Curva de calibração dos medidores 8742 e AP-7000

Estas curvas relacionam a vazão lida pelo medidor eletromagnético 8742 e pelo medidor por área variável AP-7000 em função do valor lido pelo transmissor LD302, convencionalizado como sendo o valor verdadeiro convencional. Nota-se que, conforme recomendação vigente (INMETRO, 2003), o coeficiente de correlação das curvas de calibração dos medidores 8742 e AP-7000, r , são iguais a 0,9998 e 0,9982, respectivamente, o que segue o critério de aceitação ideal $r > 0,999$ e aceitável $r > 0,90$, de acordo com (INMETRO, 2003).

A Figura 36 ilustra a curva de erros de ambos os medidores em relação ao padrão de referência. Os erros relativos de indicação do medidor 8742 foram satisfatórios em sua maioria, com a curva de erro muito próxima da curva do padrão de referência, do medidor LD302. Para o medidor AP-7000, os erros relativos de indicação foram insatisfatórios, pois erros negativos elevados no início da faixa de calibração.

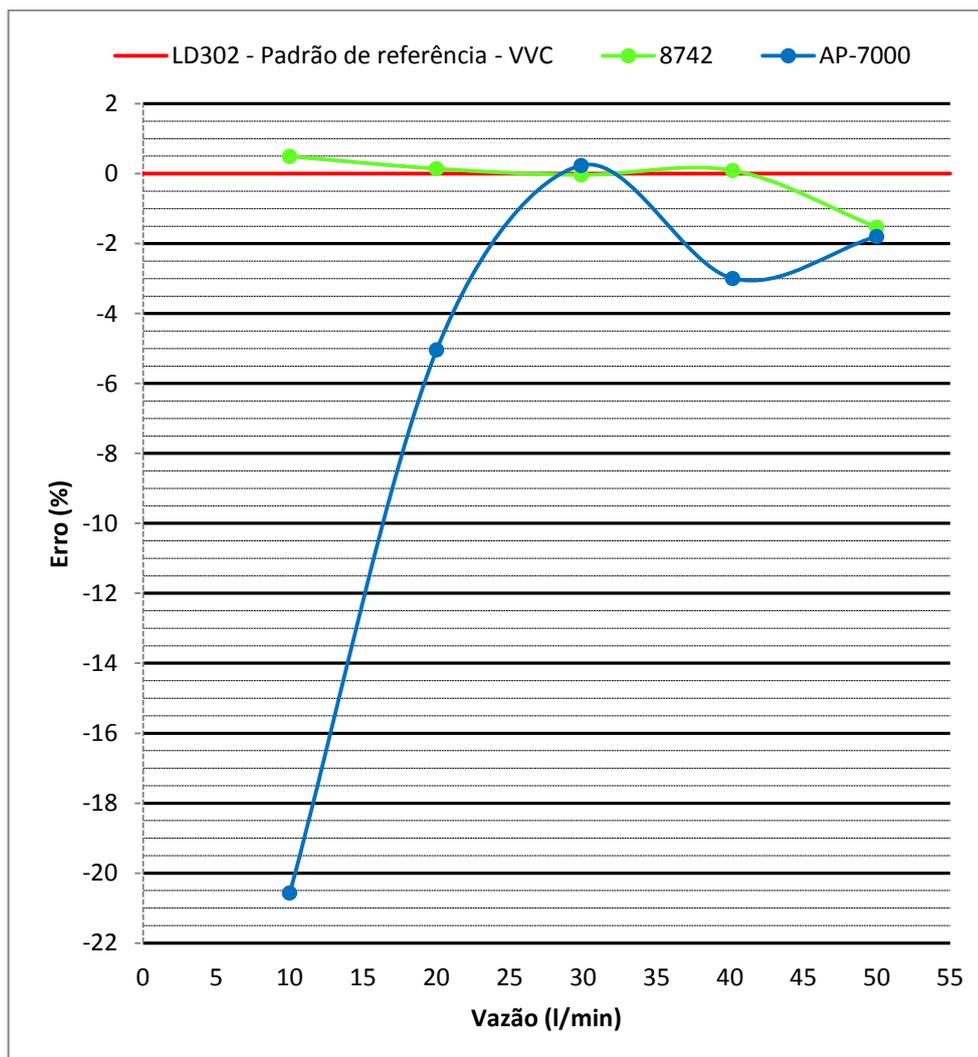


Figura 36 Curva de erros dos medidores 8742 e AP-7000

Pode-se observar na curva em verde que o erro relativo de indicação do eletromagnético 8742 nos pontos 1, 2, 3 e 4 atendem as especificações de EMA do fabricante de 0,5%, com valores de erro relativos de 0,50%, 0,15%, -0,03%, 0,09%, respectivamente. No ponto de calibração 5 o 8742 apresentou um erro relativo de -1,53%, não estando em conformidade com as especificações de EMA do fabricante.

Já o medidor por área variável AP-7000, curva em azul, apresentou erros relativos de 0,24% e -1,79%, nos pontos de calibração 3 e 5, respectivamente, estando em conformidade com as especificações de EMA de $\pm 2\%$ do fundo de escala do instrumento, que é de 100 l/min. Os pontos de calibração 1, 2 e 4 não atenderam as especificações, com valores de erro de -20,57%, -5,03% e -2,99%, respectivamente.

4.4.2 Condição de calibração 2

Para a condição de calibração 2 tem-se as seguintes condições de medição:

- temperatura ambiente: 24 °C;
- temperatura da água: 50 °C;
- abertura da válvula de controle: 100%;
- método de calibração utilizado: comparação.

As tabelas 10 e 11 demonstram que as corridas neste ensaio foram realizadas nas vazões nominais de 10 l/min, 20 l/min, 30 l/min, 40 l/min e 50 l/min. Para cada ponto de calibração foram realizadas 50 medições, calculando-se a vazão média conforme a equação (17). O erro relativo de indicação é obtido conforme a equação (27) e a incerteza expandida da medição é obtida de acordo com a equação (23) para um nível de confiança de 95,45% com fator de abrangência $k_p = 2$.

Tabela 10 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor eletromagnético 8742

Ponto de calibração	Vazão média do padrão LD302 [l/min]	Vazão média do 8742 [l/min]	Erro relativo de indicação do 8742 [%]	Incerteza expandida da medição U do 8742 [l/min]	Fator de abrangência $k_{95,45\%}$	Resultado da medição $Q = q \pm U$ [l/min]
1	10,09	9,87	-2,12	0,02	2	9,87±0,02
2	20,30	20,20	0,52	0,40	2	20,20±0,40
3	30,01	29,96	-0,16	0,02	2	29,96±0,02
4	40,05	39,91	-0,36	0,03	2	39,91±0,03
5	49,80	49,64	-0,32	0,11	2	49,64±0,11

Tabela 11 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor por área variável AP-7000

Ponto de calibração	Vazão média do padrão LD302 [l/min]	Vazão média do AP-7000 [l/min]	Erro relativo de indicação do AP-7000 [%]	Incerteza expandida da medição U do AP-7000 [l/min]	Fator de abrangência $k_{95,45\%}$	Resultado da medição $Q = q \pm U$ [l/min]
1	10,09	7,1	-29,61	0,5	2	7,1±0,5
2	20,30	19,5	-3,95	0,5	2	19,5±0,5
3	30,01	29,0	-3,37	0,5	2	29,0±0,5
4	40,05	38,5	-3,88	0,5	2	38,5±0,5
5	49,80	48,1	-3,47	0,5	2	48,1±0,5

Os dados de cada incerteza das tabelas 12 e 13 foram obtidos conforme a equação (19), equação (20), equação (21) e equação (22), respectivamente.

Tabela 12 Balanço de incertezas do medidor eletromagnético 8742

Ponto de calibração	Variância experimental $s^2(q_k)$	Desvio padrão experimental $s(q_k)$	Variância experimental da média $s^2(\bar{q})$	Desvio padrão experimental da média $s(\bar{q})$
1	0,00406	0,06376	0,00008	0,00901
2	2,02317	1,42238	0,04046	0,20115
3	0,00485	0,06968	0,00009	0,00985
4	0,00829	0,09109	0,00016	0,01288
5	0,14816	0,38492	0,00296	0,05443

Tabela 13 Balanço de incertezas do medidor por área variável AP-7000

Ponto de calibração	Variância experimental $s^2(q_k)$	Desvio padrão experimental $s(q_k)$	Variância experimental da média $s^2(\bar{q})$	Desvio padrão experimental da média $s(\bar{q})$
1	0,04081	0,20203	0,00081	0,02857
2	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
4	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
5	0,04091	0,20228	0,00081	0,02860

Nos pontos de calibração 2, 3 e 4 do balanço de incertezas do medidor por área variável AP-7000 as incertezas são nulas, devido a pouca resolução deste instrumento, como ocorreu no trabalho de (PAULA, 2007) no ponto de calibração de 0,5 m/s. Como o medidor por área variável AP-7000 tem pouca resolução, ele não é capaz de discernir essas pequenas variações de vazão.

Assim, de acordo com Silva (2008), a incerteza expandida do medidor por área variável AP-7000 foi calculada como sendo a menor escala (menor divisão) do instrumento, ou seja, 0,5 l/min, pois a incerteza determinada é inferior à resolução do medidor.

A Figura 37 mostra as curvas de calibração do medidor eletromagnético 8742 e do medidor por área variável AP-7000 para o ensaio da condição de calibração 2. Como na condição de calibração 1, nota-se que o medidor eletromagnético 8742 apresenta valores mais elevados de vazão ao longo da faixa de calibração, quando comparados com as vazões indicadas pelo medidor por área variável AP-7000.

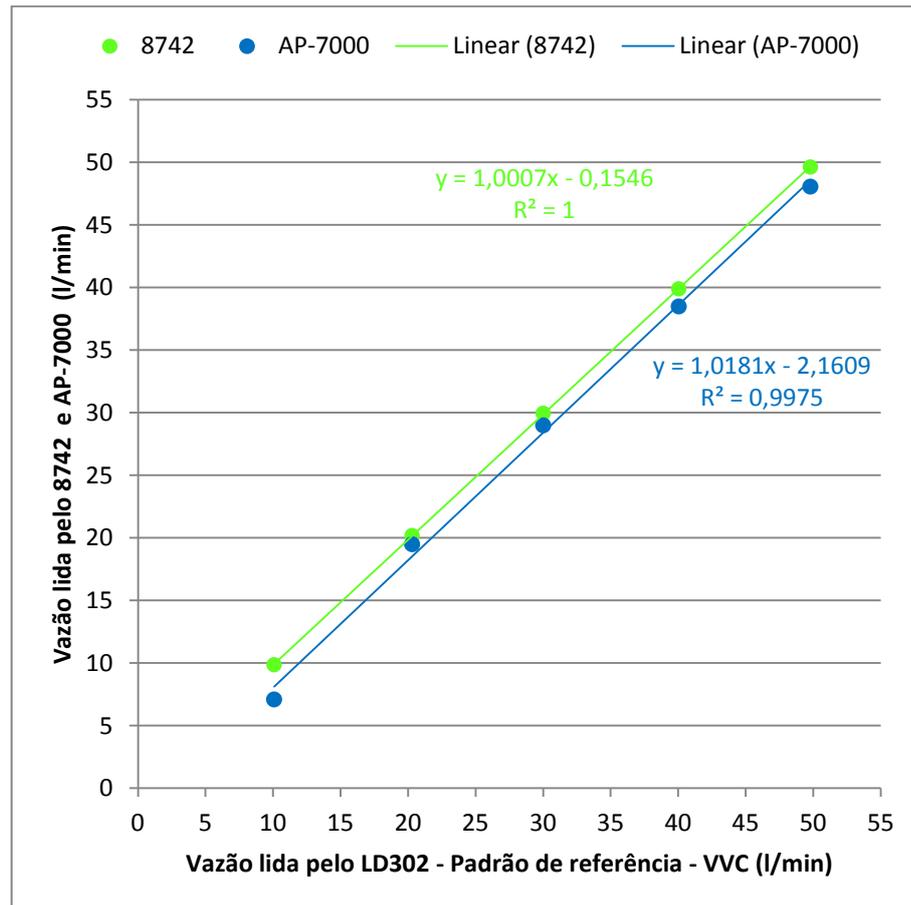


Figura 37 Curva de calibração dos medidores 8752 e AP-7000

Estas curvas relacionam a vazão lida pelo medidor eletromagnético 8742 e pelo medidor por área variável AP-7000 em função do valor lido pelo transmissor LD302, convencionalizado como sendo o valor verdadeiro convencional. Nota-se que, conforme recomendação vigente (INMETRO, 2003), o coeficiente de correlação das curvas de calibração dos medidores 8742 e AP-7000, r , são iguais a 1 e 0,9975, respectivamente, o que segue o critério de aceitação ideal $r > 0,999$ e aceitável $r > 0,90$, de acordo com (INMETRO, 2003).

A Figura 38 ilustra a curva de erros de ambos os medidores em relação ao padrão de referência. Os erros relativos de indicação do medidor 8742 foram satisfatórios em sua maioria, com a curva de erro muito próxima da curva do padrão de referência, do medidor LD302. Para o medidor AP-7000, os erros relativos de indicação foram insatisfatórios em toda a faixa de calibração, apresentando uma curva de erro mais estável. Conclui-se que o aumento de temperatura do líquido tem influência nas medições dos rotâmetros.

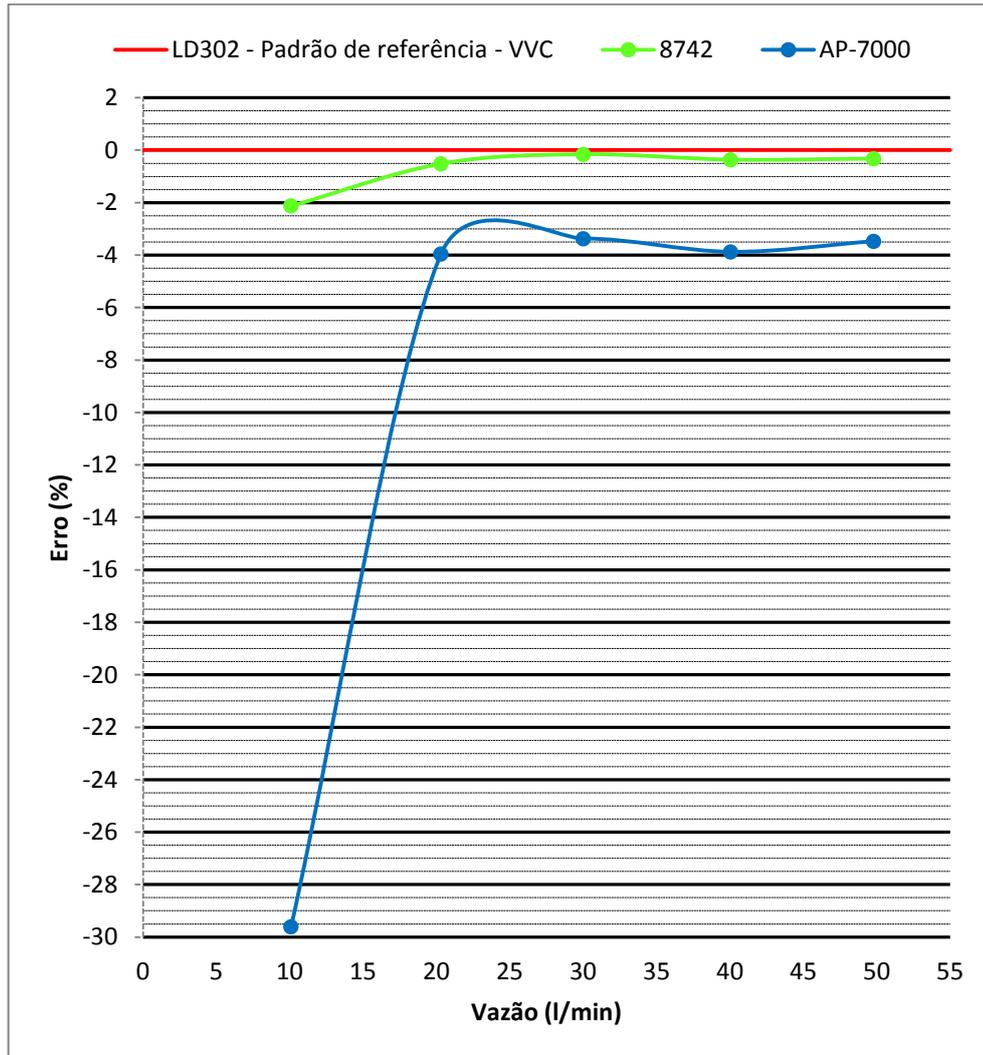


Figura 38 Curva de erros dos medidores 8742 e AP-7000

Pode-se observar na curva em verde que o erro relativo de indicação do medidor eletromagnético 8742 nos pontos 2, 3, 4 e 5 atendem as especificações de EMA do fabricante de 0,5%, com valores de erro relativos de -0,52%, -0,16%, -0,36%, -0,32%, respectivamente. No ponto de calibração 1 o medidor apresentou um erro relativo de -2,12%, não estando em conformidade com as especificações de EMA do fabricante.

Já o medidor por área variável AP-7000, curva em azul, não atendeu as especificações de EMA de $\pm 2\%$ do fundo de escala do instrumento, em nenhum dos 5 pontos de calibração. Os valores de calibração dos pontos 1, 2, 3, 4 e 5 foram de -29,61%, -3,95%, -3,37%, -3,88% e -3,47%, respectivamente.

4.4.3 Condição de calibração 3

Para a condição de calibração 3 tem-se as seguintes condições de medição:

- temperatura ambiente: 20 °C;
- temperatura da água: 28 °C;
- vazão constante: 50 l/min;
- abertura da válvula de controle: 5%, 21%, 35%, 52% e 100%.
- Método de calibração utilizado: comparação.

As tabelas 14 e 15 demonstram que as corridas neste ensaio foram realizadas nas vazões nominais de 10 l/min, 20 l/min, 30 l/min, 40 l/min e 50 l/min. Para cada ponto de calibração foram realizadas 50 medições, calculando-se a vazão média conforme a equação (17). O erro relativo de indicação é obtido conforme a equação (27) e a incerteza expandida da medição é obtida de acordo com a equação (23) para um nível de confiança de 95,45% com fator de abrangência $k_p = 2$.

Tabela 14 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor eletromagnético 8742

Ponto de calibração	Vazão média do padrão LD302 [l/min]	Vazão média do 8742 [l/min]	Erro relativo de indicação do 8742 [%]	Incerteza expandida da medição U do 8742 [l/min]	Fator de abrangência $k_{95,45\%}$	Resultado da medição $Q = q \pm U$ [l/min]
1	10,09	9,87	-2,12	0,02	2	9,87±0,02
2	20,04	20,04	0,01	0,02	2	20,04±0,02
3	30,10	30,07	-0,09	0,02	2	30,07±0,02
4	40,05	40,04	-0,02	0,02	2	40,04±0,02
5	49,88	49,81	-0,15	0,09	2	49,81±0,09

Tabela 15 Valores da medição de vazão e incertezas do medidor por área variável AP-7000

Ponto de calibração	Vazão média do padrão LD302 [l/min]	Vazão média do AP-7000 [l/min]	Erro relativo de indicação do AP-7000 [%]	Incerteza expandida da medição U do AP-7000 [l/min]	Fator de abrangência $k_{95,45\%}$	Resultado da medição $Q = q \pm U$ [l/min]
1	10,09	8,0	-20,68	0,5	2	8,0±0,5
2	20,04	19,0	-5,17	0,5	2	19,0±0,5
3	30,10	29,5	-1,99	0,5	2	29,5±0,5
4	40,05	39,0	-2,51	0,5	2	39,0±0,5
5	49,88	49,3	-1,11	0,5	2	49,3±0,5

Os dados de cada incerteza das tabelas 16 e 17 foram obtidos conforme a equação (19), equação (20), equação (21) e equação (22), respectivamente.

Tabela 16 Balanço de incertezas do medidor eletromagnético 8742

Ponto de calibração	Variância experimental $s^2(q_k)$	Desvio padrão experimental $s(q_k)$	Variância experimental da média $s^2(\bar{q})$	Desvio padrão experimental da média $s(\bar{q})$
1	0,00695	0,08340	0,00013	0,01179
2	0,00326	0,05718	0,00006	0,00808
3	0,00569	0,07548	0,00011	0,01067
4	0,00455	0,06749	0,00009	0,00954
5	0,02310	0,15200	0,00046	0,02149

Tabela 17 Balanço de incertezas do medidor por área variável AP-7000

Ponto de calibração	Variância experimental $s^2(q_k)$	Desvio padrão experimental $s(q_k)$	Variância experimental da média $s^2(\bar{q})$	Desvio padrão experimental da média $s(\bar{q})$
1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
4	0,01877	0,13702	0,00037	0,01937
5	0,05724	0,23925	0,00114	0,03383

Nos pontos de calibração 1, 2 e 3 do balanço de incertezas do medidor por área variável AP-7000 as incertezas são nulas, devido a pouca resolução deste instrumento, como ocorreu no trabalho de (PAULA, 2007) no ponto de calibração de 0,5 m/s. Como o medidor por área variável AP-7000 tem pouca resolução, ele não é capaz de discernir essas pequenas variações.

Assim, de acordo com Silva (2008), a incerteza expandida do medidor por área variável AP-7000 foi calculada como sendo a menor escala (menor divisão) do instrumento, ou seja, 0,5 l/min, pois a incerteza determinada é inferior à resolução do medidor.

A Figura 39 mostra as curvas de calibração do medidor eletromagnético 8742 e do medidor por área variável AP-7000 para o ensaio da condição de calibração 3. Como na condição de calibração 1 e 2, nota-se que o medidor eletromagnético 8742 apresenta valores mais elevados de vazão ao longo da faixa de calibração, quando comparados com as vazões indicadas pelo medidor por área variável AP-7000.

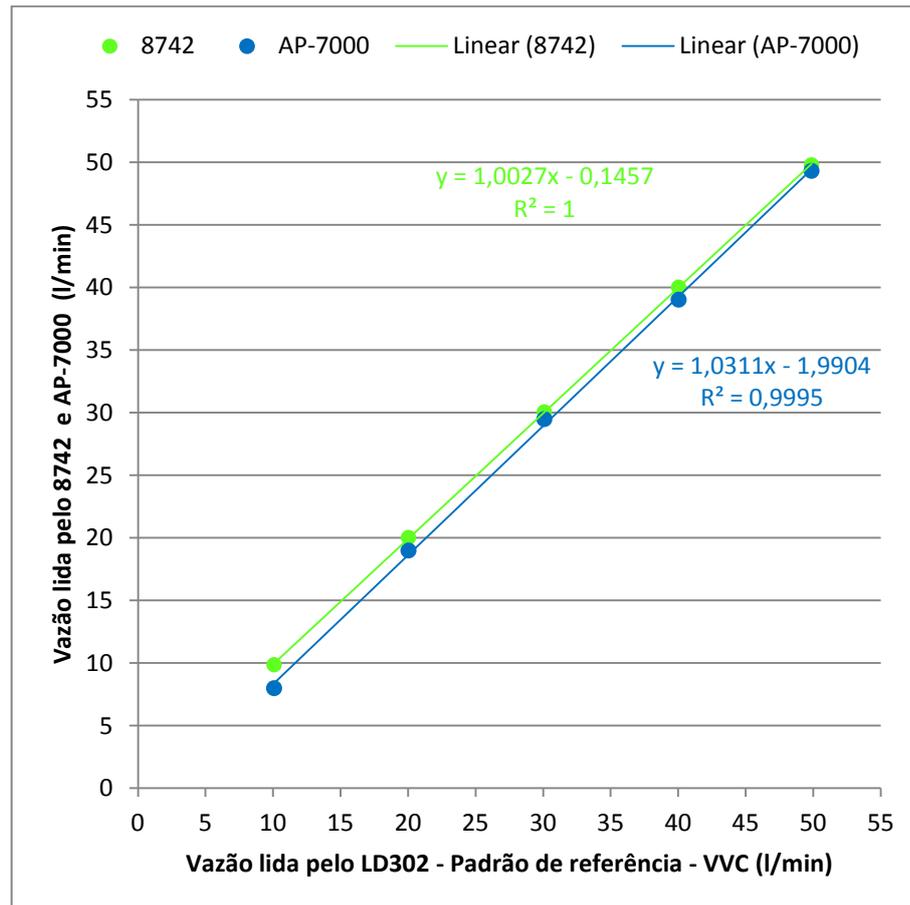


Figura 39 Curva de calibração dos medidores 8742 e AP-7000

Estas curvas relacionam a vazão lida pelo medidor eletromagnético 8742 e pelo medidor por área variável AP-7000 em função do valor lido pelo transmissor LD302, convencionalizado como sendo o valor verdadeiro convencional. Nota-se que, conforme recomendação vigente (INMETRO, 2003), o coeficiente de correlação das curvas de calibração dos medidores 8742 e AP-7000, r , são iguais a 1 e 0,9995, respectivamente, o que segue o critério de aceitação ideal $r > 0,999$ e aceitável $r > 0,90$, de acordo com (INMETRO, 2003).

A Figura 40 ilustra as curvas de erros de ambos os medidores em relação ao padrão de referência. Os erros relativos de indicação do medidor 8742 foram satisfatórios em sua maioria, com a curva de erro muito próxima da curva do padrão de referência, do medidor LD302. Para o medidor AP-7000, os erros relativos de indicação foram insatisfatórios em sua maioria.

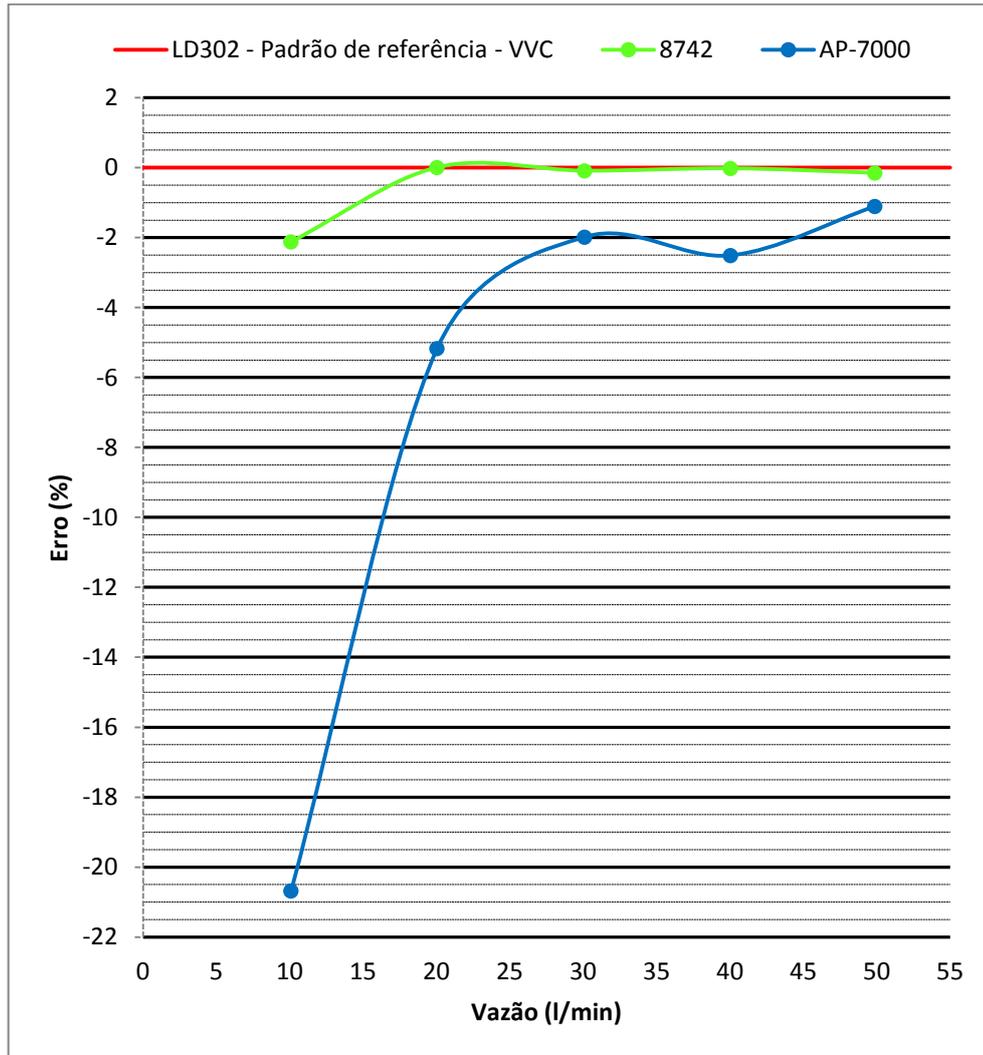


Figura 40 Curva de erros dos medidores 8742 e AP-7000

Pode-se observar na curva em verde que o erro relativo de indicação do medidor eletromagnético 8742 nos pontos 2, 3, 4 e 5 atendem as especificações de EMA do fabricante de 0,5%, com valores de erro relativo de 0,01%, -0,09%, -0,02%, -0,15%, respectivamente. No ponto de calibração 1 o medidor apresentou um erro relativo de -2,12%, não estando em conformidade com as especificações de EMA do fabricante.

Já o medidor por área variável AP-7000, curva em azul, apresentou erros relativos de -1,99% e -1,11%, nos pontos de calibração 3 e 5, respectivamente, estando em conformidade com as especificações de EMA de $\pm 2\%$ do fundo de escala do instrumento, que é de 100 l/min. Os pontos de calibração 1, 2 e 4 não atenderam as especificações, com valores de erro de -20,68%, -5,17% e -2,51%, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de 3 medidores de vazão com princípios de funcionamento distintos. Tal avaliação foi possível através dos dados obtidos nos ensaios, fazendo-se o levantamento da curva de calibração e de erro de cada um dos medidores.

A avaliação metrológica permitiu estimar as incertezas envolvidas nas medições de vazão sob diferentes condições de medição, verificando se os medidores atendem aos limites de EMA especificados por seus fabricantes. Dois medidores de vazão foram calibrados nas vazões de 10 l/min, 20 l/min, 30 l/min, 40 l/min e 50 l/min usando um terceiro como padrão de referência.

Para o medidor eletromagnético 8742 observou-se que, com o aumento da temperatura da água, o medidor passa a indicar valores mais altos de vazão. Este aspecto pode ser comprovado pelo coeficiente angular da curva de calibração do medidor, que relaciona a vazão indicada pelo 8742 em função do valor indicado pelo LD302, o VVC. Assim, para uma temperatura de 25° C, o valor deste coeficiente é igual a 0,9839. A 50°C, seu valor aumenta para 1,0007.

Para uma temperatura de 25 °C (controle de vazão pela motobomba), o erro relativo de indicação do medidor eletromagnético 8742 nos pontos 1, 2, 3 e 4 atende às especificações de EMA do fabricante de 0,5 %, com valores de erro relativos de 0,50%, 0,15%, -0,03%, 0,09%, respectivamente. No ponto de calibração 5 o 8742 apresentou um erro relativo de -1,53%, não estando em conformidade com as especificações de EMA do fabricante.

Para uma temperatura de 50 °C, o erro relativo de indicação do medidor eletromagnético 8742 nos pontos 2, 3, 4 e 5 atende às especificações de EMA do fabricante de 0,5%, com valores de erro relativos de -0,52%, -0,16%, -0,36%, -0,32%, respectivamente. No ponto de calibração 1 o medidor apresentou um erro relativo de -2,12%, não estando em conformidade com as especificações de EMA do fabricante.

Observou-se também que, quando a vazão passou a não ser mais controlada pela rotação da motobomba, mas pela válvula de controle, o medidor 8742 passou a indicar valores mais elevados de vazão. Este aspecto pode ser comprovado pelo coeficiente angular da curva de calibração do medidor, que relaciona a vazão indicada pelo 8742 em função do valor indicado pelo LD302, o VVC. Assim, quando o controle de vazão foi realizado através da rotação motobomba, o valor deste coeficiente é igual a 0,9839. Quando o controle da vazão passou para a válvula de controle, o valor deste coeficiente aumentou para 1,0027.

Com a vazão controlada pela abertura da válvula de controle, o erro relativo de indicação do medidor eletromagnético 8742 nos pontos 2, 3, 4 e 5 atende às especificações de EMA do fabricante de 0,5%, com valores de erro relativo de 0,01%, -0,09%, -0,02%, -0,15%, respectivamente. No ponto de calibração 1 o medidor apresentou um erro relativo de -2,12%, não estando em conformidade com as especificações de EMA do fabricante.

Para o medidor por área variável AP-7000 observou-se que, à medida que a temperatura da água aumenta, o medidor passa a indicar valores mais baixos de vazão. Este aspecto pode ser comprovado pelo coeficiente angular da curva de calibração do medidor, que relaciona a vazão indicada pelo AP-7000 em função do valor indicado pelo LD302, o VVC. Assim, para uma temperatura de 25° C, o valor deste coeficiente é igual a 1,0209. A 50°C, seu valor diminui para 1,0181.

Para uma temperatura de 25 °C, o medidor AP-7000 apresentou erros relativos de 0,24% e -1,79%, nos ponto de calibração 3 e 5, respectivamente, estando em conformidade com as especificações de EMA de $\pm 2\%$ do fundo de escala do instrumento, que é de 100 l/min. Os pontos de calibração 1, 2 e 4 não atenderam as especificações, com valores de erro de -20,57%, -5,03% e -2,99%, respectivamente.

Para uma temperatura de 50 °C, o medidor AP-7000 não atendeu as especificações de EMA de $\pm 2\%$ do fundo de escala do instrumento, em nenhum dos 5 pontos de calibração. Os valores de calibração dos pontos 1, 2, 3, 4 e 5 foram de -29,61%, -3,95%, -3,37%, -3,88% e -3,47%, respectivamente.

Observou-se também que, quando a vazão passou a não ser mais controlada rotação da motobomba, mas pela válvula de controle, o medidor AP-7000 passou a indicar valores mais elevados de vazão. Este aspecto pode ser comprovado pelo coeficiente angular da curva de calibração do medidor, que relaciona a vazão indicada pelo AP-7000 em função do valor indicado pelo LD302, o VVC. Assim, quando o controle de vazão foi realizado através da rotação motobomba, o valor deste coeficiente é igual a 1,0209. Quando o controle da vazão passou para a válvula de controle, o valor deste coeficiente aumentou para 1,0311.

Com a vazão controlada pela rotação da motobomba, o medidor AP-7000 apresentou erros relativos de 0,24% e -1,79%, nos ponto de calibração 3 e 5, respectivamente, estando em conformidade com as especificações de EMA de $\pm 2\%$ do fundo de escala do instrumento, que é de 100 l/min. Os pontos de calibração 1, 2 e 4 não atenderam as especificações, com valores de erro de -20,57%, -5,03% e -2,99%, respectivamente.

Com a vazão controlada pela abertura da válvula de controle, o medidor AP-7000 apresentou erros relativos de -1,99% e -1,11%, nos ponto de calibração 3 e 5,

respectivamente, estando em conformidade com as especificações de EMA de $\pm 2\%$ do fundo de escala do instrumento, que é de 100 l/min. Os pontos de calibração 1, 2 e 4 não atenderam as especificações, com valores de erro de -20,68%, -5,17% e -2,51%, respectivamente.

Através dos dados de medição de vazão obtidos nos ensaios, pode-se fazer um comparativo dos resultados deste trabalho com os resultados dos trabalhos de Arantes (2007), Paula (2007) e Silva (2008).

Utilizando o medidor ultrasônico de vazão no laboratório A, Arantes (2007) obteve resultados satisfatórios, atendendo os limites de exatidão requeridos pela OIML R-117, que é de $\pm 0,2\%$. O trabalho de Silva (2008) realizou ensaios utilizando água como fluido, também obtendo resultados satisfatórios com o medidor ASV, com erros abaixo dos limites especificados pela OIML R-117, que é de $\pm 0,2\%$. Neste trabalho, os resultados do medidor de vazão eletromagnético 8742 atenderam às especificações de EMA do fabricante na maioria da faixa de calibração, que é de $\pm 0,5\%$.

Mas, por outro lado, nas instalações do laboratório B, Arantes (2007) observou que medidor ultrasônico de vazão não atendeu as exigências de EMA da OIML R-117 em nenhum dos pontos de calibração, mostrando erros negativos elevados. Nos experimentos de medição de vazão de Paula (2007), verificou-se que os valores das incertezas relativas estão compreendidas entre 11 e 20%, demonstrando que o LDA não pode ser utilizado para calibrar sistemas de medição de vazão com incertezas entre 2 e 5%. Da mesma forma, os ensaios de Silva (2008) com o medidor ASV utilizando óleo como fluido também apresentaram erros acima dos limites especificados pela OIML R-117, que é de $\pm 0,2\%$. Neste trabalho, o medidor de vazão de área variável AP-7000 apresentou erros negativos elevados em toda a faixa de calibração com o aumento da temperatura, não atendendo os limites de EMA do fabricante, que é de $\pm 2\%$ do fundo de escala.

A avaliação da incerteza contribui para uma maior qualidade da medição, fornecendo informações úteis para quantificação dos erros de medição e para a calibração de instrumentos. Neste trabalho foram avaliadas as incertezas do tipo A, obtidas por métodos estatísticos e não as do tipo B que envolvem conhecimentos e dados não disponíveis no LAI.

Com os dados obtidos neste trabalho podem ser usados os três instrumentos medidores de vazão do LAI para medições que exijam maior acurácia, pois suas curvas de calibração foram determinadas. Estes dados também permitem a prestação de serviços de calibração de medidores de vazão para empresas que não exijam certificação pela RBC, mas que gostariam de ter maior confiabilidade nas suas medições de vazão. Para trabalhos futuros, pode-se sugerir avaliar as influências de outras condições de calibração, tais como variações de

viscosidade do líquido, inserção de uma válvula de controle no trecho reto à montante do padrão, histerese entre as medições de vazão, entre outras.

REFERÊNCIAS

ACCIOLY, C. C. **Confiabilidade Metrológica da Supervisão de Vazão em Sistema de Resfriamento a Água em Usinas Hidrelétricas**. 2007. 68 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ARANTES, W. F. de. **Avaliação Metrológica da Comparação Interlaboratorial da Calibração de Medidores Ultra-sônicos**. 2007. 144 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. v.2. Rio de Janeiro: LTC, 2007. ISBN 978-85-216-1563-7.

BEGA, E. A.; et al. **Instrumentação Industrial**. 2.^a ed. Rio de Janeiro: Interciência: IBP, 2006. ISBN 85-7193-137-2.

CARVALHO, A. S.; SILVA, R. C. da.; NASCIMENTO, D. B. do. Sistema de Comunicação OPC para uma Coluna de Destilação Piloto. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA (SEGeT), 2001, Belo Horizonte. **Proceedings . . .** Belo Horizonte, 2001. p. 170-181.

CASSIOLATO, C.; ALVES, E. O. Medição de Vazão. [S. l.], p. 1-13, 2008. Disponível em: <http://www.profibus.org.br/files/artigos/Artigo_Vazao_CI_2008.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2010.

COSTA, I. M. **Projeto e Implementação em Ambiente Foundation Fieldbus de Filtragem Estocástica Baseada em Análise de Componentes Independentes**. 2006. 68 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

DELMÉE, G. J. **Manual de Medição de Vazão**. 3.^a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. ISBN 85-212-0321-7.

European Co-operation for Accreditation (EA). EA-4/02 – *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*. 1999. 79 p. Disponível em:< www.europeanaccreditation.org/n1/doc/ea-4-02.pdf>. Acesso em: 15 de jun. 2010.

FILHO, J. P. D. **Metodologia para Calibração de Rotâmetro de Água Operando com o Fluido R134A**. 2006. 113 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

GUIMARÃES, A. B. **Medidor de Vazão Proporcional para a Quantificação do Consumo de Água na Irrigação**. 2007. 79 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

HÜSEMANN, R. **Sistema de Validação Temporal para Redes de Barramentos de Campo**. 2003. 144 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

INMETRO: Orientações Sobre Validação de Métodos de Ensaio Químicos, (Brasil). DOQ-CGCRE-008; revisão 01: março de 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-4185*: Measurement of liquid flow in closed – Weighing method, Switzerland, 1980. 26 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-5167-1*: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements, Switzerland, 2003. 40 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-5168*: Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties, Switzerland, 2005. 72 p.

ISO-GUM. Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)**, 131 p., 2003. Disponível em: < <http://www.inmetro.com.br>>. Acesso em: 15 jun. 2010.

JORNADA, D. H. da. **Implantação de um Guia Orientativo de Incerteza de Medição para Avaliadores de Laboratório da Rede Metrológica RS**. 2009. 155 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

JORNADA, D. H. da. **RM 68 - Incerteza de Medição: Guia Prático do Avaliador de Laboratórios**. 32 p., 2009. Disponível em: <http://www.redemetrologica.com.br/ftp/dados/rec/DOC_53.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2011.

MARANGONI, C. **Implementação de uma Estratégia de Controle com Ação Distribuída em uma Coluna de Destilação**. 2005. 115 p. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MARTIM, A. L. S. S. **Avaliação do Desempenho de um Medidor de Vazão Eletromagnético em Situações Práticas Reais de Instalação**. 2005. 199 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MARTINS, N. **Manual de Medição de Vazão: através de placas de orifício, bocais e venturis**. Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras, 1998. ISBN 85-7193-010-4.

MELO, F. B. **Avaliação Metrológica da Incerteza na Medição de Vazão Mássica de Gases com Tecnologias Volumétrica e Pressão Diferencial**. 2007. 74 p. Dissertação

(Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MENDES, F. P. **Automação Residencial baseada em Software Supervisório**. 2007. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação (CECAU), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

NETO, A. Z. **Análise do Impacto da Comunicação em redes Foundation Fieldbus no Desempenho de Sistemas de Controle**. 2007. 144 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

NOGUEIRA, T. A. **Redes de Comunicação para Sistemas de Automação Industrial**. 2009. 83 p. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação (CECAU), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

OLIVEIRA, J. L. G. **Medição de Vazão de Escoamentos Bifásicos utilizando Tubo de Venturi ou Placa de Orifício associados a um Sensor de Vazão de Vazio com Campo Elétrico Girante**. 2007. 129 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PALADINO, E. E. **Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial**. 2005. 263 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

PANTONI, R. P. **Desenvolvimento e Implementação de uma Descrição de Dispositivos Aberta e Não-Proprietária para Equipamentos Foundation Fieldbus baseada em XML**. 2006. 164 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

PAULA E SILVA, D. de. **Modelagem, Análise e Controle Supervisório de Sistemas Híbridos em uma Planta Piloto**. 2004. 113 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PAULA, T. T. de. **Avaliação Metrológica da Medição de Vazão com Laser Doppler Anemométrico**. 2007. 74 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

RAMALHO, L. S. G. **Reconfiguração Dinâmica de Estratégias Distribuídas em Dispositivos Foundation Fieldbus para a Otimização de Processos na Indústria do Petróleo**. 2009. 91 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SALVIO, L. A. di. **Influência da Pressão de Operação no Desempenho de Transmissores Diferenciais de Pressão. Uma Análise Metrológica**. 2008. 140 p. Dissertação (Mestrado em

engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SCHAF, F. M. **Arquitetura para Ambiente de Ensino de Controle e Automação Utilizando Experimentos Remotos de Realidade Mista**. 2006. 207 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SILVA, D. R. C. **Redes Neurais Artificiais no Ambiente de Redes Industriais Foundation Fieldbus Usando Blocos Funcionais Padrões**. 2005. 78 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

SILVA, H. A. da. **Análise Metrológica do Desempenho de Medidores Ultra-sônicos de Vazão de Líquidos como Diagnóstico de Calibração, Instalação e Operação**. 2008. 100 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

VIM. Vocabulário Internacional de Metrologia. **Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO**, 78 p., 2008. Disponível em: <<http://www.inmetro.com.br>>. Acesso em: 15 jun. 2010.

ZEILMANN, R. P. **Uma Estratégia para Controle e Supervisão de Processos Industriais Via Internet**. 2002. 144 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.