

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Centro Tecnológico

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Carlos Alberto Flesch

Estruturação de um sistema de simulação de instrumentos de medição

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.

Florianópolis, 2001

Estruturação de um sistema de simulação de instrumentos de medição

Carlos Alberto Flesch

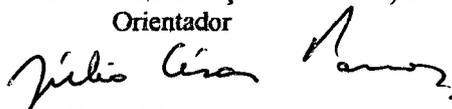
Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de

“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

e aprovada em sua forma final pelo
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA UFSC

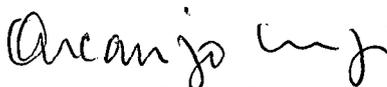


Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Orientador



Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC

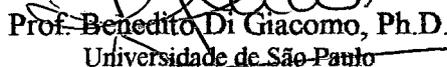
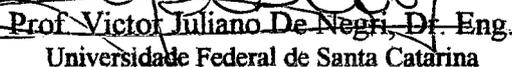
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina


~~Prof. Benedito Di Giacomo, Ph.D.
Universidade de São Paulo~~
~~Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina~~

Prof. Volnei Andersson, Dr. Eng.
Fundação Universidade Federal do Rio Grande

À minha mulher, Natália.

Aos meus filhos, Filipe Augusto e Rodolfo César.

Agradecimentos

Ao Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior pela orientação.

Aos membros da banca examinadora pelas contribuições.

À minha família pelo irrestrito apoio.

Ao meu irmão Rogerio Flesch pelas muitas contribuições ao aprimoramento do texto.

Aos professores Marco Antonio Martins Cavaco e Frank Hrebabetzky por terem assumido, durante a realização deste trabalho, parte dos meus encargos de professor da UFSC.

Aos alunos por mim orientados, pelos conhecimentos que de seus trabalhos foram adquiridos.

Às empresas citadas ao longo do texto pelas valiosas informações prestadas.

À UFSC por ter me concedido a oportunidade de realização do doutorado.

À Capes que através do Programa de Integração Graduação/Pós-graduação propiciou os recursos financeiros necessários.

A todos que atuaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho, especialmente ao acadêmico Alberto Régio Gomes e aos ex-mestrandos Antonio Carlos Xavier de Oliveira, Carlos Aurélio Pezzotta e Sílvia Regina Darrigo.

Resumo

Garantir confiabilidade metrológica é uma necessidade nos sistemas da qualidade; avaliar incertezas de medições é imprescindível no processo de garantia da confiabilidade metrológica. A metodologia de avaliação de incertezas proposta pela ISO – International Organization for Standardization é a do “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”. Sua aplicação exige perfeita caracterização do processo metrológico e é bastante trabalhosa, mesmo que sejam poucos os instrumentos de medição envolvidos.

Cada vez mais, os instrumentos são eletrônicos e modulares. Nas medições feitas com cadeias modulares, a caracterização dos processos requer conhecimentos simultâneos de metrologia e de instrumentação eletrônica. Nesses casos, a falta de pessoal especializado tem sido o maior fator limitante à obtenção da garantia da confiabilidade metrológica.

A atividade experimental pode contribuir de forma muito significativa, tanto para se conhecer o comportamento metrológico de processos de medição quanto para formação de recursos humanos. Porém a experimentação, além de ter alto custo, esbarra na impossibilidade prática de variação controlada de muitos dos parâmetros envolvidos. Identifica-se aí um cenário apropriado para aplicação de simuladores.

Neste trabalho está estruturado um sistema de simulação digital de instrumentos, congregando o estado-da-arte em metrologia, instrumentação, qualidade industrial e informática. O sistema consiste de ambientes, modelos e procedimentos de simulação direcionados à análise do comportamento metrológico de cadeias modulares de medição formadas por instrumentos elétricos. São propostas alternativas inéditas, empregadas no desenvolvimento em Labview de ambientes de simulação e de modelos de características metrológicas estáticas e dinâmicas.

Palavras-chave: Metrologia. Simulação. Instrumentos de medição. Instrumentação eletrônica. Modelagem.

Abstract

Ensuring metrological reliability is a requirement in the quality assuring; the evaluation of measurement uncertainty is paramount in the process of ensuring metrological reliability. The methodology for evaluating uncertainties proposed by the International Organization for Standardization (ISO) is found in the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement". Its usage requires perfect characterization of the metrological process and is quite complex, even when there are only few measurement instruments involved.

More and more the instruments are electronic and modular. The characterization of the processes where the measurements are taken with modular chains requires simultaneous knowledge of metrology and electronic instrumentation. In such cases the lack of qualified personnel has been the limiting factor on the achievement of ensured metrological reliability.

The experimental activity can substantially improve the situation by developing the knowledge of the metrological behaviour of the measurement process and by training human resources. Nevertheless, the experimental activities are expensive and impossible to have their many surrounding factors under controlled variation. Simulators are the ideal solution to this problem.

In this work we structure a system for digital simulation of instruments, combining the state-of-the-art in metrology, instrumentation, industrial quality and informatics. This system is made of simulation environments, models and procedures. It is directed to the analysis of the metrological behaviour of measurement modular chains formed by electric instruments. We propose novel alternatives in the development of simulation environments and of models for static and dynamic metrological characterization, under Labview.

Keywords: Metrology. Simulation. Measurement instruments. Electric instruments. Modeling.

Sumário

Lista de figuras.....	9
Lista de abreviaturas	10
1 Introdução.....	11
1.1 Terminologia e simbologia	11
1.2 Identificação do problema.....	14
1.3 Proposta de tese.....	19
1.4 Estrutura deste documento.....	20
2 Garantia da qualidade metrológica industrial.....	22
2.1 Situação atual	22
2.2 Proposta de estrutura para um sistema da qualidade metrológica.....	24
2.3 Avaliação da incerteza no contexto da qualidade metrológica.....	32
3 Qualidade metrológica auxiliada por computador.....	35
3.1 Sistemas de informação	35
3.2 Automação da medição.....	36
3.3 Inteligência artificial.....	39
3.4 Simuladores.....	40
4 Modelos empregados em análise de incertezas	45
4.1 Características metrológicas básicas de um sistema de medição.....	45
4.2 Estrutura da cadeia de medição.....	51
4.3 Parâmetros típicos da instrumentação modular.....	53
4.4 Modelos elétricos das interligações de instrumentos	64
4.5 Interligações usuais em instrumentação de medição.....	68

5	Estrutura do sistema de simulação	72
5.1	Diretrizes para o desenvolvimento do sistema.....	72
5.1.1	Estabelecimento dos requisitos básicos	72
5.1.2	Aspectos cognitivos, ergonômicos e de utilização considerados	74
5.2	Estrutura proposta para o sistema.....	75
5.2.1	Estrutura operacional	75
5.2.2	Softwares empregados	78
5.2.3	Interligação dos softwares.....	81
5.2.4	Descrição dos módulos do sistema	82
6	Desenvolvimento de modelos de instrumentos	86
6.1	Estrutura proposta para os modelos.....	86
6.2	Modelo do comportamento metrológico estático individual	90
6.2.1	Comparação com modelos para avaliação de incertezas	90
6.2.2	Modelos convencionais.....	94
6.2.3	Modelos neurais.....	95
6.3	Modelo do comportamento metrológico dinâmico individual.....	99
6.3.1	Características dinâmicas de instrumentos analógicos	99
6.3.2	Características dinâmicas de instrumentos que têm conversor A/D.....	107
6.4	Módulo de análise de circuitos.....	108
6.5	Definição dos parâmetros representativos dos modelos.....	113
7	Consolidação do sistema de simulação	117
7.1	Ambientes de simulação	117
7.1.1	Ambiente para simulação estática – InstruSim.....	118
7.1.2	Ambiente para simulação dinâmica – InstruSim-D	119
7.2	Instrumentos atendidos.....	120
7.3	Estrutura da paleta de recursos.....	123
7.4	Considerações finais.....	126
8	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	129
8.1	Conclusões	129
8.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	132
	Referências bibliográficas	134

Lista de figuras

Figura 2.1 – Ações para implementação da garantia da qualidade metrológica.....	27
Figura 4.1 – Especificações e sua relação com distribuições de fabricação.....	56
Figura 4.2 – Método da caixa para determinação da deriva com a temperatura.....	59
Figura 4.3 – Método da borboleta para determinação da deriva com a temperatura	59
Figura 4.4 – Gráfico típico do ruído em tensão de instrumentos.....	63
Figura 4.5 – Modelo elétrico equivalente para arquiteturas de chaveamento com relés.....	66
Figura 5.1 – Estrutura operacional do sistema de simulação.....	76
Figura 5.2 – Estrutura física do sistema de simulação	83
Figura 6.1 – Esboço do modelo de um instrumento.....	87
Figura 6.2 – Estrutura do modelo de um instrumento.....	89
Figura 6.3 – Exemplo de padrão de erro de histerese para treinamento de rede neural.....	97
Figura 6.4 – Erro entre equação de diferenças e equação diferencial para um sistema de primeira ordem submetido a uma entrada degrau	106
Figura 6.5 – Interligações do módulo meia ponte de Wheatstone no ambiente de simulação.....	111
Figura 6.6 – Esquema elétrico empregado no equacionamento do módulo de análise de circuitos para meia ponte de Wheatstone.....	112
Figura 7.1 – Paleta de recursos do InstruSim – Seleção de gelo eletrônico tipo J.....	123
Figura 7.2 – Diagrama de blocos no ambiente InstruSim-D/ED	126
Figura 7.3 – Exemplo de simulação no ambiente InstruSim	128

Lista de abreviaturas

A/D	– Analógico - digital
C_{HL}	– Capacitância em paralelo
CMOS	– <i>Complementary metal-oxide-semiconductor</i>
Emad	– Erro máximo admissível
Emav	– Erro máximo avaliado
FET	– <i>Field-effect transistor</i>
GUM	– <i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
IEEE-488	– Padrão de comunicação para instrumentos
I_{off}	– Corrente de <i>offset</i> ; corrente de fuga
k	– Fator de abrangência
Labmetro	– Laboratório de Metrologia e Automação da UFSC
N	– Número de canais de um multiplexador
PCI	– <i>Peripheral Component Interconnect</i>
PXI	– <i>PCI extensions for instrumentation</i>
R_C	– Resistência de contato
R_{HL}	– Resistência em paralelo
RS232	– Padrão de comunicação serial
RS485	– Padrão de comunicação serial
s	– Desvio-padrão de uma amostra
T_d	– Tendência
TOL	– Tolerância
u	– Incerteza padrão
U	– Incerteza padrão combinada
$U_{95\%}$	– Incerteza padrão combinada (para nível da confiança de 95%)
USB	– <i>Universal Serial Bus</i>
VIM	– Vocabulário Internacional de Metrologia
VME	– <i>Virtual Machine Environment</i>
V_{off}	– Tensão de <i>offset</i> ; tensão termelétrica
VXI	– <i>VME Extensions for Instrumentation</i>

1 Introdução

Este documento apresenta a estruturação da modelagem e o desenvolvimento de um protótipo de um sistema de simulação de cadeias de medição. O sistema tem enfoque metrológico direcionado pelas necessidades da garantia da qualidade industrial. Permite análise do comportamento de cadeias formadas por instrumentos elétricos. É destinado a usuários com diferentes níveis de conhecimentos de metrologia, de eletrônica, de instrumentação e de computação.

1.1 Terminologia e simbologia

Os termos necessários ao perfeito entendimento dos objetivos gerais deste trabalho são apresentados a seguir. Termos adicionais são referidos à bibliografia e, quando necessário, descritos ao longo do texto.

a) Termos relativos à simulação.

- **Experimento:** “ensaio científico para a verificação de relações entre fatos bem definidos” (MICHAELLIS, 1998).
- **Experimentar:** “submeter a experimento” (MICHAELLIS, 1998).
- **Modelo:** “representação física ou abstrata de aspectos relevantes de um elemento, sistema ou processo, que é empregada como uma base para cálculos, previsões e avaliações” (ECSS, 1997).
- **Simular.** O termo simular aparece com diversos significados na bibliografia analisada. A interpretação dada no âmbito deste trabalho é “experimentar sobre modelos”.
- **Simulador.** Definição adaptada de uma das definições dadas em (ISA, 1995), que se julgou mais adequada aos objetivos deste trabalho: “programa de computador que representa certas propriedades das características de um sistema físico ou abstrato”.
- **Sistema de simulação de instrumentos de medição:** “conjunto de recursos, formado por simuladores, modelos e procedimentos, destinados a simular o comportamento metrológico de instrumentos individuais e de cadeias de medição”.

b) Termos relativos à metrologia.

- **Metrologia:** “ciência da medição. Observação: a metrologia abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza, em quaisquer campos da ciência ou da tecnologia” (INMETRO, 1995).
- **Medir:** operação experimental que resulta numa estimativa do valor de uma grandeza. Definição adaptada de “Medição: conjunto de operações que tem por objetivo determinar um valor de uma grandeza” (INMETRO, 1995).
- **Instrumento de medição:** “dispositivo utilizado para uma medição, sozinho ou em conjunto com dispositivo(s) complementar(es)” (INMETRO, 1995). É considerado instrumento somente o dispositivo que tenha como aplicação principal a realização de medições. Não estão aí incluídos dispositivos com aplicação geral, tais como fontes, componentes elétricos e eletrônicos individuais, conectores, cabos etc. (IEEE, 1996).
- **Cadeia de medição:** “seqüência de elementos de um instrumento ou sistema de medição que constitui o trajeto do sinal de medição desde o estímulo até a resposta” (INMETRO, 1995). Instrumentos podem ser interligados formando uma cadeia de medição, chamada neste trabalho de cadeia modular.
- **Sistema de medição:** “conjunto completo de instrumentos de medição e outros equipamentos acoplados para executar uma medição específica” (INMETRO, 1995).
- **Processo de medição:** conjunto formado por sistemas de medição, operações e condições de contorno concernentes a uma medição. Essa definição foi adaptada da definição geral de processo. Segundo ISO/ABNT (1994a): “processo é um conjunto de fontes e atividades inter-relacionadas que transformam entradas em saídas”. A ECSS (1997) complementa: “fontes: incluem pessoal, finanças, facilidades, equipamentos, técnicas e métodos”.
- **Procedimento de medição:** “conjunto de operações, descritas especificamente, usadas na execução de medições particulares, de acordo com um dado método” (INMETRO, 1995).
- **Incerteza de medição:** “parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando” (INMETRO, 1995).
- **Garantia da qualidade metrológica:** “conjunto de atividades planejadas e sistematicamente implementadas para garantir e comprovar a confiabilidade dos resultados das medições” (ISO/ABNT, 1994a).

O Vocabulário Internacional de Termos Gerais e Fundamentais de Metrologia – VIM (INMETRO, 1995) foi integralmente adotado neste trabalho. Infelizmente o vocabulário internacional é bastante pobre, o que exigiu complementação por outras fontes. Como existe grande divergência entre autores de livros técnicos da área de metrologia, foi dada preferência a normas e recomendações de instituições internacionalmente reconhecidas. Foram consideradas adicionalmente, listadas por ordem de prioridade:

- Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: Probability and general statistical terms. (ISO, 1993a);
- Gestão da qualidade e garantia da qualidade – Terminologia (ISO/ABNT, 1994a);
- Statistics – Vocabulary and symbols – Part 2: Statistical quality control. (ISO, 1993b);
- Space Product Assurance – Glossary of Terms – (ECSS, 1997);
- Process Instrumentation Terminology. (ANSI/ISA, 1993);
- Glossary of Time and Frequency Terms (NIST, 1999);
- DOE Fundamentals Handbook: Instrumentation and Control. (DOE, 1992b,c);
- Manual of Measurement Standards, Chapter 13 – Statistical Aspects of Measuring and Sampling. Section 1 – Statistical Concepts and Procedures in Measurement (API, 1985);
- ISA Dictionary of Measurement & Control (ISA, 1995);
- IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms (IEEE, 1996).

Mesmo tendo muita aplicação no meio técnico-científico, os dicionários do IEEE e da ISA só foram utilizados neste trabalho como forma de ratificação de termos empregados. Sua característica de dicionário faz com que geralmente apresentem muitas diferentes interpretações para um mesmo termo, dificultando sua perfeita caracterização.

c) Simbologia

Para escolha da simbologia gráfica, empregou-se como principal critério a máxima compatibilidade com a prática usual em livros técnicos e em informações de fabricantes de instrumentos. Manteve-se, a exemplo do que foi feito com a terminologia, a preferência por normas e recomendações de instituições internacionalmente reconhecidas. As que melhor se enquadraram, sendo assim adotadas, por ordem de prioridade foram:

- Graphical symbols for diagrams – Part 5: Measurement and control devices. (ISO, 1996);
- DOE Fundamentals Handbook: Engineering Symbology, Print and Drawings. (DOE, 1993b).

1.2 Identificação do problema

Atualmente grande parte do estudo da metrologia é dedicada à avaliação e à minimização de incertezas (STEIN, 1999). Quando integrante dos sistemas da qualidade industrial, a metrologia precisa ser tratada como uma atividade da cadeia produtiva, devendo ser gerenciada nos mesmos moldes dos demais elementos que compõem a produção (KOCHSIEK, 1998; ROSSI, 1998; BRIDGET, 2000).

Até a década de 70 a metrologia foi tratada como uma atividade essencialmente laboratorial. Na década de 80 observou-se migração da metrologia para dentro dos sistemas produtivos. Isso se deu especialmente através dos sistemas de controle estatístico de processos e da instrumentação de medição que foi incorporada aos meios de produção. No meio industrial o tratamento das questões metrológicas, no entanto, foi extremamente superficial até o início dos anos 90 (DIAS, 1998). Somente com a consolidação internacional da aplicação de normas de garantia da qualidade (PEARCH, 2000), especialmente ISO 9000 (ISO/ABNT, 1994b,c,d,e,f) e QS 9000 (CHRYSLER, 1995), a metrologia passou a ser tratada de uma maneira formal em aplicações industriais. Esse distanciamento entre cadeia produtiva e metrologia provavelmente tenha sido um dos grandes responsáveis pela pequena atenção dada à formação metrológica em escolas técnicas e em universidades pelo mundo afora. A falta de cultura metrológica fez com que muitos dos sistemas da qualidade industrial apresentassem procedimentos extremamente vagos e muitas vezes até inconsistentes (SOARES JR., 1999a).

Somente na década de 90 foi elaborado o Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – GUM, traduzido oficialmente para português em 1997 como “Guia para expressão da incerteza de medição” (BIPM, 1998). É um documento que se propõe a impor um grande formalismo ao processo de avaliação das incertezas das medições, não só no setor industrial, mas em todos os setores que fazem uso da metrologia (THEISEN, 1997).

Evidências mostram que a ISO 9000 tende a se consolidar como referência nos sistemas da qualidade. Outras normas e procedimentos estão se adequando para manter consistência integral com a ISO 9000. Na indústria automotiva, por exemplo, QS 9000 e VDA 6.1 são, respectivamente, as referências das indústrias americanas e alemãs. Elas devem ser substituídas, em breve, pela ISO/TS 16949, norma baseada na ISO 9000, em fase de elaboração (HEINLOTH, 2000).

Para se garantir a qualidade metrológica em um sistema da qualidade industrial é necessário que se trate o problema de forma global, abrangendo instrumentação, procedimentos de medição e ações de gerenciamento da qualidade (NIELSEN, 2000). Dissertações de mestrado orientadas pelo autor deste texto (SOARES JR., 1999a; LISKA, 1999; BARP, 2000) mostraram que garantir a qualidade metrológica passa obrigatoriamente pela avaliação da incerteza de medição. Tal avaliação precisa ser formal, seguindo procedimentos consistentes e internacionalmente reconhecidos.

O GUM é ainda desconhecido por muitos profissionais envolvidos com os sistemas da qualidade (SOARES, 1999a). Porém é tido como a melhor opção para servir de referência para avaliação da incerteza das medições em sistemas da qualidade (STEIN, 1999; SOARES, 1999). É procedimento resultante de trabalho internacional que envolveu as principais instituições de metrologia durante quase 10 anos. Embora ainda seja pouco difundido no meio industrial, o GUM é adotado hoje por praticamente toda a estrutura metrológica formal internacional (RASSA, 1999; KOCHSIEK, 1998), aí incluídos todos os laboratórios da Rede Brasileira de Calibração (INMETRO, 1997).

Contribui para dificultar a disseminação do conhecimento em metrologia a inexistência de uma terminologia bem estabelecida. O que se observa na prática é uma enorme confusão de termos e de definições entre documentos formais. Até para os termos mais básicos de metrologia e de instrumentação existe divergência entre VIM, GUM, normas das áreas de metrologia e de qualidade, manuais de fabricantes e publicações técnicas em geral (STEIN, 2000).

Os fabricantes mais tradicionais de instrumentos, reconhecidamente aceitos como líderes no mercado de instrumentos, demonstram muito pouca intimidade com as questões metrológicas. Um livro da coleção da ISA (DIECK, 1997 p.36), já na segunda edição, e publicações institucionais de dois dos principais fabricantes de instrumentação para automação da medição (HEWLETT PACKARD, 2000; NATIONAL, 1999), ao descreverem o GUM, erram de forma grosseira: descrevem incerteza padrão tipo A como incerteza de caráter sistemático e incerteza padrão tipo B como incerteza de caráter aleatório!

Em congressos e revistas especializadas também ainda são poucos os artigos em que tem sido feita análise de incertezas para apresentação de resultados de medição. O número de publicações específicas da área de metrologia também ainda é bastante pequeno. No COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, em 1999, dentre mais de 5000 trabalhos publicados, apenas quatro foram na seção metrologia e desses, apenas um simultaneamente fazia uso do procedimento do GUM e relacionava metrologia e qualidade. O reflexo da falta

de disseminação da cultura metrológica pode ser visto na forma superficial, fragmentada e muitas vezes pouco fundamentada, com que a metrologia é tratada dentro dos sistemas da qualidade.

Em paralelo à lenta evolução e disseminação da metrologia, pode-se observar uma vertiginosa evolução da eletrônica, especialmente a digital. Instrumentos de medição vêm incorporando muitas dessas evoluções e atualmente já têm, na sua grande maioria, elementos de processamento eletrônico, analógico e digital, de sinais. Instrumentos microcontrolados podem apresentar, por exemplo, maior imunidade a grandezas de influência (FUJIMOTO, 1995; TRYLING, 2000).

Uma cadeia de medição, de acordo com a abordagem já consagrada historicamente (DOEBELIN, 1990), pode ser dividida em três etapas funcionais: transdução, condicionamento de sinais e apresentação.

A etapa de transdução, realizada pelos transdutores (INMETRO, 1995), foi a que menos evoluiu nas últimas décadas, sendo que a maioria dos atualmente empregados, especialmente na indústria, é semelhante aos empregados há duas ou três décadas. É o caso dos termopares, dos termorresistores, dos indutivos de deslocamento, dos extensométricos de pressão e força e de quase todos os outros largamente empregados. Exceções podem ser observadas em aplicações bem características, para as quais estão sendo desenvolvidos transdutores especiais (WOLINSKI, 1995).

Muitos desenvolvimentos recentes na área da microeletromecânica têm possibilitado a implementação de transdutores baseados em sensores semicondutores (RASMUSSEN, 1998). Contudo, alguns princípios de transdução desse tipo estão disponíveis há mais de duas décadas (OHTE, 1977) e sua exploração comercial ainda é extremamente modesta se comparada à de transdutores convencionais (OMEGA, 1995). Com a contínua evolução da eletrônica, espera-se para a próxima década significativo crescimento da utilização comercial da eletrônica em todos os instrumentos, mas de forma destacada nos transdutores (HABBADI, 1995; TRYLING, 2000; WARRIOR, 1997).

Cabe à etapa de condicionamento a conversão do sinal de saída do transdutor em um sinal adequadamente configurado para ser apresentado em mostradores. A etapa de condicionamento foi a que mais incorporou recursos da eletrônica. Em KOLEN (1994) são analisados resultados positivos obtidos experimentalmente na compensação automática dos efeitos da temperatura na medição de deformação com extensômetros resistivos. Em GOES (1997) esse tipo de compensação é estendido para outros transdutores resistivos configurados em circuito de ponte, além de serem implementadas facilidades adicionais,

como compensação de *off-set* e aumento da imunidade a ruídos. As próprias limitações construtivas dos transdutores podem ser parcialmente compensadas pelo aumento da capacidade de processamento dentro da cadeia de medição; como exemplo: erros decorrentes de imperfeições geométricas em transdutor capacitivo de deslocamento angular (LI, 1997).

Embora as idéias de compensação por software sejam bastante simples, a implementação prática geralmente não é trivial. Por exemplo, a compensação de efeitos da variação da temperatura sobre transdutores exige que esse efeito e sua correlação com outras grandezas de influência sejam perfeitamente conhecidos ao longo da faixa de medição e que se mantenham estáveis ao longo do tempo.

Circuitos de compensação que atuam apenas sobre circuitos eletrônicos internos ao próprio instrumento são muito mais facilmente implementados. Em função disso se dispõe no mercado de unidades eletrônicas de processamento de sinais de transdutores com erro máximo individual que chega a ser menor do que 0,001% da faixa de medição especificada (KREUZER, 1999). Deve-se, no entanto, ressaltar que nessa característica não estão incluídos erros devidos a interligações e nem mesmo às grandezas de influências, tais como temperatura e tensão de modo comum. Isso faz com que a parcela da incerteza devida a tais unidades, em aplicações reais, cresça por dezenas ou centenas de vezes (BLANK, 1996). Sistemas de compensação mais simples, alguns puramente analógicos (FREIRE, 1999), já são comuns em instrumentos disponíveis no mercado, especialmente em unidades de processamento de sinais.

Em algumas situações a forma histórica de subdivisão da cadeia de medição, embora aplicável, não traz a desejável associação entre etapas funcionais e disposição física dos instrumentos. Por exemplo: é grande o número de transdutores disponíveis no mercado que incorporam alguma eletrônica de processamento e também é grande o número de sistemas de aquisição de sinais em que a presença do computador mescla atividades de apresentação e de processamento (SPOELDER, 1999). O uso do computador para tarefas de medição pode levar a realimentações do sistema de medição como um todo. Isso pode influenciar no comportamento de instrumentos e na própria concepção da medição, tanto em termos de procedimento quanto de inter-relação com o meio em que está inserido o processo de medição (TRUCHARD, 1999; CRISTALDI, 1999; LEE, 1999).

O aprimoramento do processamento tem permitido também o desenvolvimento de novas arquiteturas em circuitos de conversão de transdutores passivos (MOCHIZUKI, 1998). O tradicional circuito de ponte de Wheatstone (DOEBELIN, 1990), por exemplo, para o qual ainda se desenvolvem aperfeiçoamentos (NAKAMURA, 1999; LÖTTERS, 1999) vem sendo substituído, em algumas de suas aplicações mais típicas, pelo *Anderson loop*, desenvolvido

pelo Flight Loads Laboratory, da NASA (ANDERSON, 1997; ANDERSON, 1998a,c; ONNEY, 1997).

Blindagens multipotenciais são implementadas atualmente através de circuitos relativamente simples e de baixo custo, garantindo alta imunidade a interferências causadas por campos elétricos (ANDERSON, 1998b; ANGRISANI, 1998). A redução dos preços tem viabilizado a utilização de circuitos redundantes, permitindo aumento da confiabilidade da instrumentação eletrônica (BACCIGALUPI, 1997).

Há uma clara tendência à modularização dos sistemas de medição. Observa-se hoje uma grande, e crescente, disponibilidade de diferentes instrumentos destinados ao condicionamento de sinais de transdutores. Tais instrumentos se apresentam na forma de unidades autônomas ou de placas eletrônicas encaixáveis em barramentos, com funções preestabelecidas ou programáveis (TRUCHARD, 2000; SPOELDER, 1999). A possibilidade de programação ocorre nos mais diferentes níveis. Por exemplo, em placas de sistemas de aquisição de sinais que têm função de filtragem é normal que se possa programar, em tempo real, além das frequências de corte, o tipo de filtro que melhor se aplica a uma situação particular.

Já são padrões usuais de barramento de sistemas de aquisição de sinais: VXI – Virtual eXtended Interface, do VXIbus Consortium (ARPAIA, 1995; HILL, 1999); PXI, liderado pela National Instruments (TRUCHARD, 1999). No mercado, porém, ainda predominam as soluções proprietárias. Para comunicação entre computador e instrumentação de medição, a adoção de interfaces padrões representa a quase totalidade dos casos. As mais usuais são: IEEE 488 – GPIB (SPOELDER, 1999) e as seriais RS 485, RS 232 (STUDT, 2000) e USB (RUNYON, 1998). No entanto essa padronização está voltada à interligação física e lógica de módulos para viabilizar a troca de informações digitais. Não são considerados os aspectos metroológicos inerentes às interligações por onde fluem sinais analógicos. Cabe ressaltar que a quase totalidade das fontes de incerteza de uma cadeia de medição reside na sua parte analógica.

A modularização, no caso de sistemas de medição, conduz à obtenção de sistemas mais adequados operacionalmente e metrologicamente. Instrumentos modulares são também menos sujeitos à rápida obsolescência, em função das suas inerentes flexibilidade e maior facilidade de atualização. Porém, para que haja significativo aumento na utilização de configurações modulares, há necessidade de maior padronização e melhor formação do usuário. A falta de conhecimento do usuário é, provavelmente, o maior fator limitante à adoção de soluções modulares em instrumentação de medição. Ainda é muito mais cômodo

para o usuário comprar o sistema de medição como um todo, mesmo que isso custe dependência de fornecedores, mais baixa qualidade do sistema de medição e maior dificuldade de atualização.

Aplicar o GUM a processos de medição que envolvam cadeias formadas por um só instrumento já é tarefa bastante trabalhosa. Exige domínio da metrologia e conhecimento das particularidades do processo de medição, de forma que se estabeleça qual a contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza global. A aplicação do GUM a processos de medição que empreguem cadeias configuradas a partir de instrumentos modulares é uma tarefa que exige, além dos conhecimentos anteriormente citados, um conhecimento relativamente profundo de instrumentação eletrônica de medição. Nesse caso, além do comportamento metrológico indicado pelas características individuais dos instrumentos, é necessário que se considere o efeito da interligação dos módulos (BARP, 2000). Na prática, essa avaliação tem se mostrado extremamente difícil. Ela geralmente exige conhecimento simultâneo de duas frentes em que o conhecimento ainda é tratado de forma desconexa: metrologia e instrumentação eletrônica. Observa-se essa limitação nos profissionais da indústria, nos de empresas fabricantes de instrumentos e até nos pesquisadores de institutos e de universidades. Normalmente os currículos dos cursos técnicos de níveis médio e superior, no mundo todo, tratam de forma isolada os conhecimentos de metrologia e de instrumentação eletrônica (BARWICZ, 1999; WATANABE, 1999; HOOVER, 1999; SCHMALZEL, 1999a; LAOPOULOS, 1999).

1.3 Proposta de tese

O presente documento apresenta a estruturação e o desenvolvimento do protótipo de um sistema de simulação de instrumentos direcionado à observação do comportamento metrológico de instrumentos e de cadeias de medição. O sistema serve para auxiliar no entendimento de como características individuais de módulos interferem na resposta de uma cadeia de medição constituída a partir deles.

O sistema se comporta como se fosse um laboratório real, com grande disponibilidade de instrumentos e grande facilidade de controle de grandezas de influência. Possibilita a simulação de condições reais de operação de instrumentos aplicados a processos industriais e a simulação de experimentos destinados ao ensino da metrologia, aí incluídos os instrumentos de medição.

O sistema é operacionalmente simples e acessível para usuários que tenham poucos conhecimentos de eletrônica. Buscou-se, porém, que o sistema fosse suficientemente exato nas simulações para que essas espelhem comportamento quantitativamente próximo ao que instrumentos reais teriam em tais condições. Deu-se preferência a modelos formais e para os quais seja viável a avaliação da incerteza inerente à simulação (ALFAGENME, 1998; WHITMORE, 1994).

1.4 Estrutura deste documento

No capítulo 2 são enfatizadas as questões ligadas à garantia da qualidade metrológica, destacando a importância da avaliação da incerteza e da perfeita caracterização metrológica das cadeias envolvidas nos processos de medição.

No capítulo 3 é feito um resumo das aplicações da informática como forma de auxílio aos sistemas de garantia da qualidade metrológica. O computador digital tem sido usado de várias formas no sentido de contribuir para a obtenção da qualidade assegurada nos processos de medição inseridos nos sistemas da qualidade industrial. Uma das formas é a simulação digital, que pode ser empregada para auxiliar na avaliação de fontes de incerteza de medição e na formação de recursos humanos para metrologia e instrumentação. No entanto, os sistemas disponíveis no mercado não foram desenvolvidos para esse fim; os mais próximos foram desenvolvidos para simular circuitos eletrônicos. Tais sistemas, além de não usarem modelos adequados para aplicação à metrologia, exigem do usuário conhecimentos razoáveis de eletrônica.

No capítulo 4 é detalhada a estrutura de uma cadeia de medição formada por instrumentos elétricos. São apresentados os parâmetros característicos mais importantes dos instrumentos de medição bem como as respectivas formas mais usadas de modelagem.

No capítulo 5 são apresentadas: as diretrizes adotadas no desenvolvimento do sistema de simulação; a estrutura operacional proposta; a estrutura física prevista, baseada na integração dos softwares Labview e Visual Basic.

No capítulo 6 é descrito o desenvolvimento dos modelos dos instrumentos. Para efeito de modelagem, as características dos instrumentos são divididas em: características individuais dos instrumentos e características que têm influência nas interligações de módulos. São analisadas particularidades dos modelos de características estáticas e dinâmicas. São propostos modelos convencionais e modelos neurais.

No capítulo 7 é apresentada a consolidação do sistema de simulação através da transformação em protótipo integralmente operacional, dos recursos de modelagem e de simulação desenvolvidos ao longo do trabalho.

No capítulo 8 são apresentadas conclusões e sugestões de temas que futuramente possam ser mais explorados dentro da linha de desenvolvimento deste trabalho.

2 Garantia da qualidade metrológica industrial

2.1 Situação atual

Os aspectos metrológicos têm sido tratados de forma inadequada nos sistemas da qualidade. Isso é reflexo do baixo nível de cultura metrológica, tanto do pessoal das empresas quanto dos auditores de organizações certificadoras. Em muitas empresas há falta de coerência e até erros conceituais grosseiros nos procedimentos metrológicos (SOARES JR., 1999a). Por isso, certificação segundo as normas ISO 9000 não implica necessariamente que procedimentos metrológicos tecnicamente aceitáveis estejam sendo empregados. A forma superficial com que são tratados os requisitos metrológicos nas normas ISO 9000 contribui para que isso ocorra.

Diagnóstico foi feito junto às quinze maiores empresas certificadas ISO 9000 do estado do Ceará. Os resultados foram apresentados em dissertação de mestrado (SOARES JR., 1999a) orientada pelo autor deste trabalho. Comprovou-se que um dos principais entraves para implementação dos requisitos metrológicos da ISO 9000 é a falta de pessoal com conhecimentos básicos de metrologia e de instrumentação. Isso ficou perfeitamente caracterizado em quatorze das quinze empresas visitadas. Contatos com profissionais, diretamente ligados com aspectos metrológicos de sistemas da qualidade em suas empresas, mostraram que os resultados não seriam muito diferentes em outras regiões do Brasil. Tais contatos se deram através de cursos ministrados, de visitas a empresas e do envolvimento do autor deste trabalho com a estruturação do sistema da qualidade metrológica das unidades da Petrobras em Santa Catarina nos anos de 1998 e 1999.

Documentos mostram que no cenário internacional a situação também não é muito diferente. A série ISO 9000:94 (ISO/ABNT NBR 9000-1, 1994) é extremamente sucinta no que concerne aos aspectos metrológicos, focando a garantia da confiabilidade metrológica quase totalmente na realização de calibrações (ISO/ABNT, 1993; THEISEN, 1997; STEPHENS, 1994; JORNADA, 2000).

Documentos analisados (API, 1985; API, 1995; API, 1999; DOE, 1993c; CHRYSLER, 1995; IEEE 1990; ISO, 1997a,b; DOD, 1988; NAMAS, 1994; NASA 1996; ECSS, 1996; NIST, 1995) certamente seriam referências inquestionáveis na elaboração de

procedimentos técnicos industriais e de laboratório. No entanto, todos tratam a incerteza de medição como um parâmetro único do sistema de medição como um todo, não enfocando o tratamento metrológico das incertezas decorrentes das interligações de instrumentos.

Nos documentos NIST (1995) e NAVY (1981) é destacada a importância da correta seleção e instalação de instrumentos, para minimizar erros introduzidos por muitos dos parâmetros característicos enfocados no presente trabalho. No entanto nenhuma referência é feita à quantificação de incertezas decorrentes.

O documento Measurement Systems Analysis - MSA (CHRYSLER, 1995) foi elaborado em conjunto pelas três maiores indústrias automobilísticas dos Estados Unidos – Chrysler, Ford e GM – e serve de referência para parte significativa desse segmento industrial em todo o mundo. O setor automobilístico já faz uso de instrumentação modular pelo menos desde a década de 70. Isso ocorre especialmente em bancadas de ensaios e em estações de controle da qualidade, por exemplo, para medição de peças, através de dispositivos mecânicos eletronicamente instrumentados. Na década de 80, o autor deste trabalho participou do desenvolvimento de mais de uma dezena de sistemas de automação empregando instrumentação modular para as empresas Metal Leve, Cofap, Mercedes-Benz, Volvo, entre outras. Visitas a várias unidades industriais das empresas do setor durante a década de 90 – Metal Leve, Cofap, Mercedes-Benz, Volkswagen, Ford, General Motors, TRW, Fiat –, mostraram que a quantidade de instrumentos modulares ainda é insignificante se comparada ao número total de instrumentos controlados num sistema da qualidade. Talvez isso explique o porquê da pouca atenção dispensada à instrumentação modular nas normas e nas recomendações técnicas.

Nas unidades da Petrobras em Santa Catarina também é pequeno o número de medições que empregam cadeias formadas pela interligação de instrumentos metrologicamente caracterizados de forma independente. As únicas identificadas foram as medições automatizadas de temperatura com termorresistores. Elas representam pouco em termos de quantidade, porém exercem papel de extrema importância por medirem a temperatura que serve de referência para transformar vazão em volume de produto, para efeito de faturamento.

Diversos autores têm ressaltado a importância da metrologia dentro de um sistema da qualidade industrial (KOCHSIEK, 1998; BOROVICKA, 1998; BENNICH, 1997; DIETRICH, 1998). No entanto, as propostas relativas a formas de tratamento das questões metrológicas dentro dos sistemas da qualidade são raras e enfocam aspectos particulares de

um segmento industrial ou da medição de uma grandeza específica (BENNICH, 1997; ROSSI, 1998; THEISEN, 2000).

No que concerne aos aspectos metrológicos, a nova ISO 9000: 2000 (ISO, 2000; SEAVER, 1998) é ainda mais sucinta e mais flexível do que a versão anterior (HOUTEN, 2000; KAYE, 2000; BRIDGET 2000; SEAVER, 1998; THEISEN, 2000; ZUCKERMANN, 2000). O usuário passa a ter mais liberdade na fixação dos procedimentos metrológicos, porém a ISO 9000: 2000 estabelece que os resultados das medições sejam empregados no processo de aprimoramento da qualidade. Isso implica maior responsabilidade sobre as medições, exigindo do usuário compreensão das condições em que as medições são feitas e das respectivas incertezas inerentes aos resultados. Mesmo sem considerar os novos aspectos da ISO 9000: 2000, diversas publicações já destacavam a importância da avaliação da incerteza das medições (NIELSEN, 2000; WECKENMANN, 1998; BENNICH, 1997; PFEIFER, 1998) e do conhecimento das características dos instrumentos (MICT/INMETRO, 1996; JORNADA, 1996; NIELSEN, 1997; KOCHSIEK, 1998; DOE, 1993c) como imprescindíveis para a garantia da confiabilidade metrológica.

Dentro das dissertações de mestrado de LISKA (1999) e de SOARES JR. (1999a), orientadas pelo autor deste trabalho, foram feitos contatos com responsáveis por sistemas da qualidade de várias empresas. Não foi identificada nenhuma publicação que tenha embasamento metrológico e que sirva de guia para empresas estabelecerem seus sistemas da qualidade metrológica. Em função disso é apresentada a seguir uma proposta de estrutura de um sistema de garantia da qualidade metrológica. O objetivo da sua apresentação neste documento é evidenciar a importância do conhecimento das características de todos os elementos que compõem o processo de medição.

2.2 Proposta de estrutura para um sistema da qualidade metrológica

A estrutura proposta é baseada nos resultados de três dissertações de mestrado orientadas que se complementam: BARP (2000), LISKA (1999) e SOARES JR. (1999a) e de participação do autor deste trabalho na estruturação do sistema da qualidade das unidades da Petrobras em Santa Catarina.

Ao planejar as ações que devam ser empreendidas para garantir a qualidade metrológica dentro de um sistema de garantia da qualidade industrial, é necessário que o processo de medição esteja bem caracterizado. Para facilitar a apresentação das ações

necessárias para que a qualidade metrológica seja garantida, os processos de medição foram aqui classificados em:

- processos de medição a serem implantados;
- processos de medição já existentes.

O primeiro caso ocorre quando um processo produtivo ainda não está em operação ou quando novas medições passam a integrar um processo produtivo já existente. O segundo corresponde àquele em que as medições já são realizadas, mas não estão garantidas quanto a sua qualidade; por exemplo: empresas que passam a buscar certificação.

A seguinte seqüência de ações é proposta para as situações que se enquadram no primeiro caso - processos de medição a serem implantados:

- a) Estabelecimento dos limites de incerteza admissíveis para os processos de medição.
- b) Seleção iterativa dos processos de medição, no molde da ISO 14253-2 (ISO 1997b), considerando instrumentos, procedimentos de medição, grandezas de influência, processamentos específicos e demais itens aplicáveis.
- c) Subdivisão, perfeitamente identificada quanto ao caráter e aos limites máximos admissíveis, de todas as fontes significativas de incerteza.
- d) Definição de meios de acompanhamento de cada uma das fontes de incerteza para assegurar que a sua contribuição permanece ao longo do tempo dentro dos limites admissíveis.
- e) Efetivação das ações relativas ao acompanhamento ao longo do tempo dos valores da contribuição de cada uma das fontes.

Para o segundo caso – processos de medição já existentes, a seqüência de ações continua a mesma, havendo alteração somente no item “b”, que passa a ter a seguinte redação: “Avaliação da incerteza dos processos de medição, através de análise teórica complementada, quando viável, por dados de calibrações e ensaios”.

Em ambos os casos a avaliação da incerteza é fundamental para que seja viável a efetivação das demais ações relativas à garantia da qualidade metrológica (BOROVICKA, 1998). No primeiro caso, a avaliação a priori (FLESCHE, 1999b) é atividade indispensável. No segundo caso, uma análise superficial do problema poderia levar à falsa conclusão de que a análise a priori seria substituível por uma calibração do sistema (BICH, 1993). Uma análise mais detalhada mostra, no entanto, que se não for feita uma

avaliação completa da incerteza, fica mais difícil estabelecer que parâmetros do processo de medição devam ser controlados ao longo do tempo e que valores limites podem assumir.

É comum também a realização de calibrações no campo, junto ao processo produtivo. Aí o principal problema está na dificuldade de se garantir a validade do processo de calibração. Toda a rede internacional de calibração é baseada em calibrações realizadas em laboratórios dentro dos quais devem ser garantidas a rastreabilidade aos padrões internacionais (RASSA, 1999) e a adequação de instalações e procedimentos (MICT/INMETRO, 1997; NAMAS, 1995; EAL, 1996; ABNT, 1993). Através da calibração em campo é difícil comprovar se os resultados apresentados por instrumentos, aparentemente conformes, são representativos e válidos. No entanto, muitas das ações que complementam o processo de garantia da qualidade metrológica, como por exemplo: análise de repetitividade e reprodutibilidade – R&R (CHRYSLER, 1995; ASTM, 1998), dependem de operações que são realizadas em campo. Essas, no entanto, não substituem, mas complementam, as calibrações em laboratório.

As ações para garantir confiabilidade metrológica em um sistema da qualidade podem ser divididas em três grupos de atividades: seleção de instrumentos de medição (FLESCHE, 1993a), avaliação de conformidade (SOARES JR, 1999a; BARP, 2000) e garantia de que, ao longo do tempo, as incertezas das medições se mantêm dentro de limites admissíveis (CAMARANO, 1994; LISKA, 1999).

Ratifica-se proposta apresentada em SOARES JR. (1999) e LISKA (1999), de que a metodologia do GUM (BIPM, 1998) seja aplicada em todas as atividades que exijam avaliações de incertezas. O mesmo ocorre com relação ao documento ISO/FDIS 14253-1 (ISO, 1997a) no tocante à avaliação de conformidade de instrumentos com suas respectivas especificações, sempre que não existir procedimento específico aplicável.

Justifica-se a adoção do GUM por ser a referência oficial da ISO para análise de incertezas.

Justifica-se a adoção do ISO/FDIS 14253-1 com base em:

- ele pode ser formalmente adotado dentro do sistema de garantia da qualidade como método para comprovação da conformidade nas relações fornecedor-cliente;
- o documento prevê que a incerteza de medição seja avaliada conforme o GUM;
- as regras definidas no ISO/FDIS 14253-1 não são específicas da área dimensional, podendo ser diretamente aplicadas em outras áreas.

A Figura 2.1 mostra a seqüência proposta de ações para implementação da garantia da confiabilidade metrológica dos processos de medição, destacando a seleção dos instrumentos de forma iterativa.

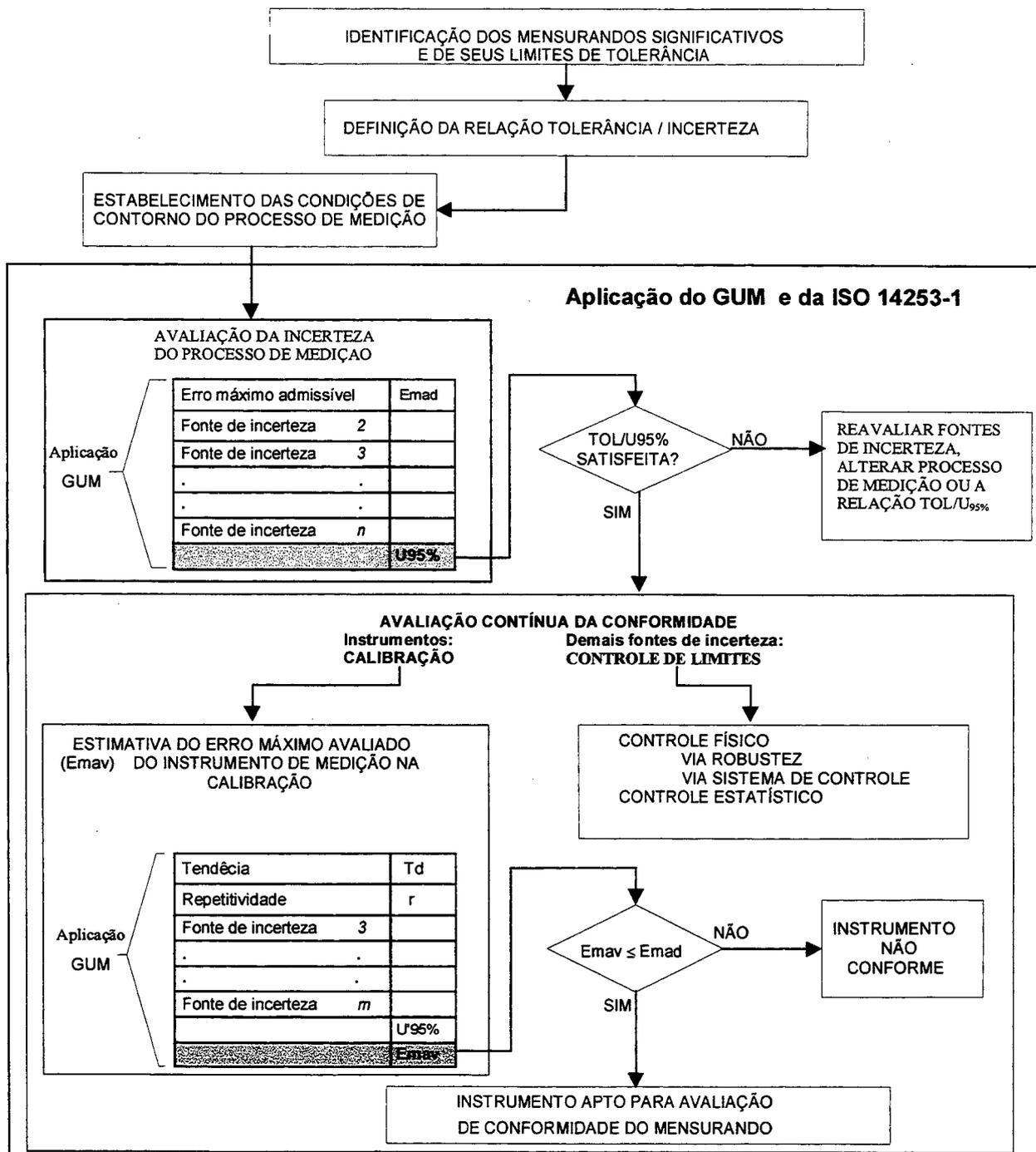


Figura 2.1 – Ações para implementação da garantia da qualidade metrológica.

Sob o enfoque dos requisitos exigidos pelas normas da série ISO 9000 (FLESCHE, 1999a; LARSON, 1999), a empresa deve identificar mensurandos críticos e seus respectivos limites de tolerância. Esses limites de tolerância serão empregados para definir os limites de incerteza admissíveis para os processos de medição. Para tanto a empresa deve fixar um valor mínimo para a relação entre tolerância do mensurando e a incerteza admissível para o processo de medição (KEY, 1996; MATHIESEN, 1997).

Diferentes valores para essa relação, geralmente entre três e dez, têm sido adotados nas empresas (WECKENMANN, 1998; SOARES JR., 1999a). O valor de tal relação, embora normalmente estabelecido de forma empírica, deveria considerar as informações técnicas disponíveis e os custos envolvidos. São exemplos de informações técnicas a considerar: tipo de mensurando e respectiva tolerância especificada; estrutura do processo de medição e características metrológicas dos instrumentos de medição passíveis de utilização; condições das grandezas de influência, como por exemplo as ambientais.

Para que um processo de medição seja adequado é necessário que a sua incerteza avaliada seja menor do que a incerteza admissível. É então necessário avaliar a incerteza do processo de medição como um todo. Isso envolve uma perfeita caracterização do mensurando e das condições de contorno do processo de medição (FLESCHE, 1999a). Na composição da incerteza do processo de medição, cabe aos erros máximos admissíveis dos instrumentos de medição (INMETRO, 1995) apenas uma parcela.

No entanto, a maioria das empresas analisadas em SOARES JR. (1999a) assume o erro máximo admissível dos instrumentos como se fosse a incerteza do processo de medição. Isso pode levar à falsa conclusão de que o processo de medição é capaz de avaliar a conformidade do mesurando. Tal conclusão errada ocorre sempre que o erro máximo admissível não for a parcela predominante na composição da incerteza global do processo de medição. Essa é uma situação freqüente, uma vez que o erro máximo admissível é característica do instrumento e não do processo (INMETRO, 1995). Além disso, usualmente o erro máximo admissível refere-se à utilização do instrumento de medição sob condições de referência e, como agravante, não considera os efeitos devidos à interligação com outros instrumentos.

A adoção da resolução do instrumento como parâmetro de comparação com a incerteza admissível do processo de medição, prática ainda comum no meio industrial (SOARES JR., 1999a), é totalmente inaceitável. São freqüentes as situações em que instrumentos, principalmente os digitais, contribuem para a incerteza de medição com um valor muito maior do que a sua resolução. O próprio erro máximo admissível

(INMETRO, 1995), num instrumento digital pode ser centenas de vezes maior do que a sua resolução (FLESCH, 1997).

Após a comprovação analítica da adequação dos instrumentos de medição, deve ser feita a comprovação da conformidade das suas respectivas especificações. As normas da série ISO 9000 estabelecem que a avaliação de conformidade seja realizada através da calibração, segundo a ISO 10012 (ISO, 1993).

A realização de calibrações também é a principal forma estabelecida para comprovação da adequação dos instrumentos de medição ao longo do tempo, pelas normas ISO 9000, e por diversas outras normas e recomendações técnicas (ISO, 1993; CHRYSLER, 1995; DOD, 1988; ECSS, 1996; NASA, 1996). Há necessidade de que sejam estabelecidos os parâmetros dos instrumentos que serão observados na calibração e quais são os seus respectivos limites aceitáveis.

As normas da série ISO 9000, assim como as da QS 9000, estabelecem que deva existir “procedimento formal” definido e embasado de calibração e que possa ser demonstrada a rastreabilidade aos padrões internacionais. As normas técnicas que especificam procedimentos de calibração, salvo raras exceções, o fazem para instrumentos individuais e para condições de referência estabelecidas. Essas condições de referência são geralmente condições laboratoriais. Os próprios procedimentos das redes nacionais de calibração e de todo o sistema metrológico internacional funcionam dessa forma. Tais condições de referência não são uniformes. Quanto à temperatura, por exemplo, normas aplicáveis à calibração de instrumentos de controle geométrico fixam a referência em 20 °C. Para a área de petróleo, a (ISO, 1998) altera e unifica para 15 °C as temperaturas de referência para medições, até então de 20 °C e 60 °F, dependendo da aplicação. Para um mesmo instrumento, diferentes normas estabelecem valores diferentes de temperatura de referência. Para calibração de manômetro, por exemplo, são condições estabelecidas:

- a) DIN 16 005 (DIN, 1987): (20 ± 2) °C;
- b) ANSI/ASME B40.1 (ASME, 1985): 23 °C;
- c) ABNT 11968 (ABNT, 1992b): 25 °C.

Para que a calibração possa ser empregada como critério de comprovação da adequação do instrumento é necessário que seja feita diferenciação entre fontes de incerteza inerentes diretamente a cada instrumento particular e demais fontes de incerteza do processo de medição. Propõe-se a adoção do termo erro máximo admissível (Emad) de cada instrumento (INMETRO, 1995) como parâmetro a monitorar nas calibrações que objetivam

qualificar instrumentos dentro de um sistema da qualidade. Isso é baseado no fato de tal parâmetro ser característico do próprio instrumento de medição e poder caracterizar seu comportamento metrológico individual nas condições de referência. O erro máximo admissível é extraído de normas, especificações de fabricantes, ou outras fontes de informação, conforme o caso.

É proposta como metodologia geral a adoção da calibração individual de instrumentos, com a monitoração dos respectivos erros máximos admissíveis. Logicamente deverá haver coerência entre as condições de referência relativas às especificações e à calibração. Situações particulares, em que se disponha de procedimentos tecnicamente embasados, de padrões e de condições de calibração adequadas, poderão receber tratamento diferenciado. Por exemplo, sendo viável técnica e operacionalmente, poderão ser feitas calibrações de sistemas de medição, ou mesmo de processos de medição completos.

Dessa forma, os erros máximos do instrumento de medição, avaliados no processo de calibração (E_{mav}), são comparados com os erros máximos admissíveis (E_{mad}) adotados de normas, especificações de fabricantes ou outras formas documentadas e justificadas. O GUM pode perfeitamente ser empregado também para a avaliação da incerteza do erro máximo avaliado. Normas e recomendações técnicas mais recentes (ISO, 1997a,b,c; INMETRO, 1997; EAL, 1996) têm adotado o GUM para avaliação de incertezas em calibrações.

O termo erro máximo avaliado (E_{mav}) foi adotado neste trabalho uma vez que não existe termo correspondente no VIM (INMETRO, 1995), nem nas demais fontes consultadas.

Na metodologia proposta, o critério de aceitação do instrumento de medição calibrado é baseado no documento ISO/FDIS 14253-1 (ISO, 1997a), a menos que haja regulamento legal ou acordo específico entre fornecedor e cliente definindo outro critério de aceitação. Assim, o critério para aceitação é:

$$|E_{mav}| \leq |E_{mad}| \quad (2.1)$$

onde:

E_{mav} : erro máximo avaliado do instrumento de medição na calibração;

E_{mad} : erro máximo admissível do instrumento de medição nas condições especificadas.

O erro máximo avaliado pode ser determinado da seguinte forma:

$$Emav = \pm \max_{i=1}^n (|Td_i| + U'_{95\% i}) \quad (2.2)$$

onde:

Td_i : tendência do instrumento de medição em cada ponto calibrado;

$U'_{95\% i}$: incerteza resultante da combinação da repetitividade do instrumento com os componentes de incerteza da calibração.

A incerteza $U'_{95\% i}$ é determinada por (SOARES JR., 1999a):

$$U'_{95\% i} = (s_i^2 + \sum_{j=1}^m u_j^2)^{1/2} \cdot k \quad (2.3)$$

onde:

s_i : desvio-padrão experimental das respostas do instrumento de medição, em cada i-ésimo ponto calibrado;

u_j : cada um dos “m” componentes da incerteza, adicionais ao “ s_i ”, em cada i-ésimo ponto calibrado;

k : fator de abrangência para nível da confiança de 95%.

Além da comprovação da conformidade dos instrumentos de medição com suas especificações, há necessidade de que todos os demais componentes significativos da incerteza sejam mantidos dentro dos limites aceitáveis considerados na estimativa da incerteza global do processo de medição. Para tanto deve-se analisar caso a caso qual o método mais adequado. É recomendada (ISO, 1994b,c; ISO/ABNT, 1993; API, 1994; DOE, 1993a,c; ECS, 1996; ISO, 1997a,b) a adoção de técnicas estatísticas na quase totalidade dos casos práticos. Em LISKA (2000) é proposta uma metodologia semelhante à aplicada no controle estatístico de processos, adaptada para o controle das grandezas de influência.

A metodologia aqui exposta foi implantada a partir de 1998 nas unidades da Petrobras em Santa Catarina. Sua aplicação mostrou-se viável e recebeu aprovação ao ser submetida à auditoria por empresa certificadora, em agosto de 1999. Embora isso não seja suficiente para comprovar a sua validade metrológica, é indicativo de que a metodologia é satisfatória em termos de formalidade exigida pela ISO 9000.

2.3 Avaliação da incerteza no contexto da qualidade metrológica

O gerenciamento da incerteza de medição é a base do processo de garantia da qualidade metrológica. Para que as ações relativas ao gerenciamento da incerteza sejam planejadas e implementadas, há necessidade da avaliação prévia da incerteza de medição. É através dela que são identificadas as fontes críticas de incerteza, para as quais deverão estar voltadas as ações relativas à garantia da confiabilidade metrológica. A falta de padronização para realizar avaliação da incerteza leva a resultados que não permitem intercomparação nem transposição de valores para outros balanços de incerteza.

A necessidade de um procedimento de aceitação internacional para caracterizar a incerteza de medição levou ao desenvolvimento do GUM. Foram estabelecidas regras gerais para avaliar e expressar a incerteza de medição que podem ser seguidas em vários níveis de exatidão e em vários tipos de aplicações. Entretanto, por causa dessa sua característica de generalidade, sua aplicação dentro das diversas áreas requer um trabalho de compatibilização para que seja possível contemplar as particularidades de cada processo de medição.

O GUM está provocando revisão em normas da ISO que incluem avaliação de incertezas (ISO, 1997c) e está sendo adotado por grande número de instituições muito representativas da metrologia (TAYLOR, 1994; SINGLAS, 1995). Sendo procedimento formal de larga aceitação internacional, o GUM se apresenta atualmente como o procedimento mais adequado para servir de referência para tal avaliação.

Embora o procedimento de avaliação de incertezas estabelecido pelo GUM seja considerado por usuários da indústria como bastante trabalhoso, sua utilização parece viável, senão inevitável. O processamento dos cálculos e o registro de informações podem ser bastante facilitados com os recursos computacionais atualmente disponíveis (ISGMAX, 2000).

Pode causar estranheza o fato de o GUM ainda ser tão pouco difundido e por vezes não ser usado como referência nem por documentos normativos da própria ISO. A explicação provavelmente está na demora na elaboração e na falta de articulação entre grupos de trabalho que elaboram normas técnicas. Por exemplo, o documento “Gerenciamento da incerteza na calibração e uso de medidores de vazão...” (ISO, 1997) substitui a norma ISO 7066-1:88. O documento ISO (1997), na sua apresentação, inclui a observação de que não foi editado como norma por não estar conforme com o GUM, devendo ser em breve novamente editado. Destaca-se que tal documento é de 1997, enquanto que a primeira edição do GUM é de 1993.

O rigor no cômputo dos componentes de incertezas pelo GUM depende da incerteza requerida para o processo de medição, podendo-se em geral adotar simplificações, tais como: admitir somente correlação integral ou nula; admitir infinito o número de graus de liberdade equivalente ao processo de medição como um todo, especialmente se intervalos da confiança da ordem de 95% forem suficientes; adotar distribuição retangular para incertezas tipo B.

A identificação das fontes de incerteza a serem consideradas na avaliação da incerteza do processo de medição precisa ser feita com muito cuidado. Uma fonte de incerteza expressiva não considerada pode comprometer todo o processo de avaliação. O GUM recomenda que, para uma primeira estimativa, a maior quantidade possível de fontes sejam relacionadas e avaliadas. Somente após avaliar a contribuição de cada fonte à incerteza combinada pode-se desprezar as incertezas menos significativas como forma de simplificação em avaliações futuras. Uma forma sistematizada de listar as fontes de incerteza consiste em agrupá-las de acordo com os blocos funcionais da cadeia de medição (FLESCHE, 1999b).

A contribuição de cada fonte de incerteza pode ser avaliada de três formas: conhecimento *a priori* (MUGINOV, 1997; FLESCHE, 1999b), experimentação (FARAR, 1995; RAFFALDI, 2000; SCAVONE, 1998) e simulação numérica (GAJDA, 1997; BACCIGALUPI, 1994).

Fica evidente que um instrumento de medição é apenas um dos componentes da incerteza total do processo de medição. Em qualquer processo de medição, mas especialmente quando cadeias de medição são formadas a partir da interligação de instrumentos que têm especificações individuais, garantir a qualidade do processo de medição exige um minucioso trabalho de identificação e quantificação das fontes de incerteza. Para tanto há necessidade de se dispor de conhecimento especializado em três frentes: metrologia, instrumentação e aplicação. Da metrologia é necessário o pleno domínio da metodologia proposta pelo GUM, o que tem como pré-requisito o conhecimento de técnicas estatísticas e da fundamentação da teoria de erros. Da instrumentação é necessário o domínio das características metroológicas típicas de instrumentos elétricos e eletrônicos, da forma de modelagem das interligações e do tratamento formal das grandezas de influência. Da aplicação é necessário o conhecimento que permita definir exatamente qual é o real mensurando, como é o modelo do resultado da medição, quais são as grandezas de influência e que valores podem assumir, dentre outros.

No emprego da instrumentação modular, tanto a avaliação da incerteza quanto a efetivação das demais ações para garantir a qualidade metroológica podem ser muito trabalhosas e exigem conhecimentos mais aprofundados do processo de medição.

O processo de garantia da qualidade metrológica requer ainda o gerenciamento de grande volume de informações acerca de procedimentos e de instrumentos (FLESCH, 1993b), o que implica ser quase imprescindível o emprego de recursos computacionais.

3 Qualidade metrológica auxiliada por computador

A contínua evolução da eletrônica está trazendo novos elementos que devem ser considerados nos sistemas de garantia da qualidade metrológica. Os fabricantes desenvolvem instrumentos mais baratos, mais robustos e com melhores características metrológicas, através da eletrônica analógica e, especialmente, da digital (CRISTALDI, 1999; ALIPPI, 1999). Além da modernização dos instrumentos, muitos recursos da informática podem ser empregados no aprimoramento dos sistemas de garantia da qualidade metrológica. Técnicas específicas de desenvolvimento e de manutenção de software para a área da metrologia vêm sendo propostas (STEENPUT, 1997; RICHTER, 1993; DOBROWIECKI, 1997).

Este capítulo apresenta um resumo das principais aplicações da informática na garantia da qualidade metrológica. Para efeito de apresentação, os sistemas informatizados empregados foram classificados em: sistemas de informação; automação da medição; inteligência artificial; simuladores. Foi adotada essa classificação porque assim cada classe coincide com uma especialidade acadêmica e, ao mesmo tempo, com uma classe comercial de produto. Não foram enquadrados na subdivisão os softwares matemáticos e estatísticos de uso geral (FORBES, 1993; COX, 1993), nem as linguagens de programação (KALE, 1998), aplicados em todos os quatro grupos. Destaca-se, também, que os softwares enquadrados no grupo inteligência artificial estariam distribuídos pelos outros três grupos, se fossem classificados quanto à função que têm no processo de garantia da qualidade metrológica.

3.1 Sistemas de informação

O sistema da qualidade requer gerenciamento de grande quantidade de documentos formais, especialmente referências, procedimentos e relatórios. Embora a diversidade e o volume de informações envolvidas sejam bastante grandes, o atual estágio do desenvolvimento tecnológico dos sistemas de informação possibilita a efetivação de sistemas que atendem às expectativas dos usuários típicos.

O que os auditores mais têm cobrado das empresas é que elas disponham de procedimentos coerentes, disseminados, acessíveis e efetivamente usados em todos os níveis

da empresa. Empresas de todos os portes dispõem hoje de sistemas informatizados capazes de atender satisfatoriamente os requisitos mínimos necessários ao gerenciamento dos dados do sistema da qualidade.

Todas as empresas contatadas durante a realização deste trabalho e de LISKA (2000), bem como as quinze que participaram do estudo de caso tratado em SOARES JR. (1999a), fazem uso de recursos da informática para apoio ao gerenciamento do sistema de qualidade, aí incluído o sistema de garantia da qualidade metrológica. É típica a utilização de bancos de dados.

O gerenciamento das calibrações dos instrumentos e o gerenciamento de procedimentos de medição se caracterizam como as mais típicas aplicações de sistemas de informação na garantia da qualidade metrológica (SOARES JR., 1999a). Em dissertação de mestrado (FRANÇA, 1993), orientada pelo autor deste trabalho, foi proposto um sistema específico para gerenciamento de instrumentos de controle geométrico.

3.2 Automação da medição

O segmento da automação é seguramente o que mais cresce, dentro da instrumentação de medição. Principalmente a utilização de bancadas automatizadas tem aumentado de forma bastante significativa. Os sistemas de automação da medição mais típicos podem ser: individuais (SOCORRO, 1995); distribuídos localmente (ARPAIA, 1995; CRIATALDI, 1999; TRUCHARD, 1999; SPOELDER, 1999); remotos, por exemplo, acessados via Internet (LEE, 1999; CRISTALDI, 1999).

Além de todas as vantagens operacionais e metrológicas inerentes às capacidades de aquisição, armazenamento, processamento e atuação em tempo real decorrentes do uso do computador associado (SCHOUKENS, 1999), o custo está ficando cada vez mais atrativo (TRYLING, 2000). Atualmente o custo de uma bancada automatizada, usando computador, é igual, ou por vezes até menor, do que o custo de uma empregando instrumentos convencionais. Isso se deve à:

- possibilidade de compartilhamento de módulos de processamento de sinais, em decorrência da multiplexação de transdutores (CAMARANO, 1992; KEITHLEY, 1997);
- eliminação de módulos mostradores, pelo emprego de instrumentos virtuais (SPOELDER, 1999);

- possibilidade de emprego de transdutores mais simples, já que características normalmente indesejáveis, como o comportamento exponencial de termistores, não são limitações significativas na automação da medição (SCAVONE, 1994; GROSH, 1992).

O adjetivo “virtual” para o substantivo “instrumentação” é empregado pelos fabricantes para designar uma forma de interação com o usuário. Nos instrumentos convencionais, a interação com o usuário ocorre através de controles e de mostradores incorporados aos próprios instrumentos. Nos instrumentos virtuais ela se dá através de painéis apresentados em telas de monitores de vídeo, acessadas pelo usuário usando os recursos disponíveis no sistema computacional particular de cada usuário (NATIONAL INSTRUMENTS 2000; SPOELDER, 1999; CRISTALDI, 1999). Através do software emula-se o comportamento operacional de instrumentos reais. Por exemplo, uma placa de aquisição de sinais instalada em um computador pode ser comandada, via teclado e *mouse*, empregando uma interface gráfica em um vídeo, idêntica ao painel frontal de um instrumento convencional qualquer, por exemplo de um multímetro digital. Dessa forma a instrumentação é “real”, do transdutor ao conversor A/D.

Os softwares dirigidos ao desenvolvimento de aplicativos que empregam a filosofia de instrumentos virtuais, como HPVEE, Labwindows e Labview, são formas amigáveis de programação de controle de operação e de aquisição de sinais de instrumentos (CRISTALDI, 1999). Tais instrumentos usualmente se apresentam na forma de:

- placas de aquisição de sinais para barramento de microcomputadores, por exemplo, PCI (TRUCHARD, 1999);
- placas de sistemas modulares, tais como VXI (ARPAIA, 1995) e PXI (NATIONAL INSTRUMENTS, 2000);
- instrumentos convencionais com interfaces proprietárias ou padronizadas, tais como os padrões IEEE-488 (SPOELDER, 1999), RS232, RS485, RS422 (LUTZ, 1998) e USB (RUNYON, 1998).

A opção pela arquitetura de sistemas modulares, empregando a filosofia de instrumentação virtual, é clara nos catálogos dos principais fabricantes (NATIONAL INSTRUMENTS, 2000; HEWLETT PACKARD, 1999) e em publicações recentes (SPOELDER, 1999; CRISTALDI, 1999; LEE, 1999; TRUCHARD, 1999; LUTZ, 1998).

Além da crescente modularização dos sistemas de automação da medição, através de publicações técnicas e comerciais, percebe-se grande enfoque em:

- padronização, principalmente no hardware dos sistemas digitais e nos softwares de comunicação e de controle de instrumentos (BOGUSLAVSKY, 2000; RUNYON, 1998);
- aumento da imunidade a ruídos e interferências (ANGRISANI, 1998);
- aumento das taxas de transferência de dados, na parte digital dos sistemas (ARPAIA, 1995).

A padronização é fundamental para disseminação do uso de arquiteturas modulares. O aumento da imunidade torna os sistemas mais adequados para uso em ambientes industriais. O aumento das taxas de transferência torna os sistemas mais adequados para medições dinâmicas e para o controle de processos.

O crescimento do uso de bancadas automatizadas para ensaios industriais certamente irá acelerar a revisão de normas que regulamentam ensaios, principalmente em decorrência do aumento do potencial para realização de controles e para análise de fenômenos dinâmicos (XI, 1996; SCHOUKENS, 1997).

Diagnóstico (SOARES JR., 1999), contatos com empresas e busca em publicações mostram que atualmente a automação tem sido empregada:

- incorporada aos instrumentos, para melhorar as suas características metrológicas individuais ou para aumentar as suas flexibilidade e facilidades operacionais;
- para automatizar processos de medição em bancadas de ensaios e em estações de controle da qualidade, geralmente numa visão puramente operacional, sem aproveitar o potencial de processamento para aprimorar o tratamento dos aspectos metrológicos dos sistemas da qualidade;
- para automatizar processos de calibração de instrumentos, às vezes controlando as condições de ensaio; quase sempre, porém, somente realizando processamento dos dados e documentação dos resultados.

Dissertação de mestrado (SCAVONE, 1994), orientada pelo autor deste trabalho, mostrou que se pode empregar os recursos de processamento e de armazenamento disponíveis em uma bancada automatizada para aumentar a sua confiabilidade metrológica. Mostrou também a viabilidade de utilização de recursos de inteligência artificial, mais especificamente

sistemas especialistas, para aplicações bem específicas como, por exemplo, o estabelecimento de intervalos de calibração.

3.3 Inteligência artificial

Dissertação de mestrado (HECKMANN, 1999), orientada pelo autor deste trabalho, e estudo complementar do estado-da-arte mostraram grande potencial de aplicação da inteligência artificial à metrologia. Mostraram também algumas aplicações nas quais os resultados são relatados como muito positivos, por exemplo, em sistemas de visão (ALIPPI, 1999; ZHANG, 1997; RUSSO, 1994; RUSSO, 1998). Aplicação de algoritmos genéticos para otimização de circuitos de linearização de termistores foi feita, com pleno sucesso, em HECKMANN (1999).

As técnicas de inteligência artificial mais empregadas na área da engenharia são:

- sistemas especialistas (BARRETO, 1997; FATHI, 1996);
- lógica difusa (BORTOLAN, 1993; MENDEL, 1995; CHEN, 1997; EARTHERLEY, 1995; RUSSO, 1998);
- redes neurais artificiais (CHANG, 1994; BARRETO, 1997);
- algoritmos genéticos (HECKMANN, 1998).

Existe uma grande quantidade de ferramentas disponíveis no mercado para implementação de aplicativos baseados em técnicas de inteligência artificial. Softwares, como Matlab e Labview, dispõem de *toolboxes* de lógica difusa (EICHHORN, 1996). Em PNL (2000) é apresentado um resumo descritivo de mais de cinquenta redes neurais artificiais disponíveis no mercado, com as quais se pode implementar sistemas específicos.

Muitas aplicações práticas da inteligência artificial são descritas na literatura. Tais aplicações, no entanto, são específicas para resolver problemas bem localizados e quase todas são propostas de desenvolvimento, ou eventualmente protótipos, e não produtos consolidados. Resultados positivos de aplicações da inteligência artificial na metrologia já eram relatados no início da década de 90 (ZINGALES, 1991; ADACHI, 1991). A utilização efetiva nessa área, no entanto, é pouco expressiva se comparada com as de outras áreas, tais como economia, biomédica e engenharia de controle (HECKMANN, 1999).

As técnicas de inteligência artificial que têm demonstrado maior potencial para aplicação em instrumentação de medição e em instrumentação de controle são redes neurais

artificiais (ALIPPI, 1998; ONAT, 1997; MOU, 1997; BOCK, 1994) e lógica difusa (MENDEL, 1997; RUSSO, 1998; WARRIOR, 1997). O desenvolvimento dos circuitos integrados que incorporam redes neurais universais abre grandes perspectivas para aplicação dessa tecnologia na construção de instrumentos, tendendo a substituir etapas convencionais de processamento analógico e digital (CHUA, 1996).

Muitos sistemas híbridos, com a utilização simultânea de mais de uma das técnicas, são relatados (PETRIU, 1999; GEDEON, 1996; HEIDER, 1996; FATHI, 1996).

Dissertação de mestrado (HECKMANN, 1999) mostrou muitas possibilidades de utilização de técnicas de inteligência artificial na garantia da confiabilidade metrológica. Mostrou que utilizando sistemas especialistas pode-se incorporar conhecimentos multidisciplinares, hoje raramente encontráveis nos especialistas humanos. Esses conhecimentos são essenciais na identificação e quantificação de fontes de incerteza e em sistemas de suporte à decisão, como por exemplo, para seleção de instrumentos medição (DURAKBASA, 1998; FLESCHE, 1998; KOCHSIEK, 1998). A citada dissertação (HECKMANN, 1999) mostrou, porém, dificuldades para implementação de sistemas abrangentes. A literatura tem sido unânime em afirmar que, quanto mais delimitadas as fronteiras da aplicação, maior a probabilidade de êxito na utilização de técnicas de inteligência artificial (HECKMANN, 1999 p.126).

Acredita-se que redes neurais artificiais possam ser usadas para representar o comportamento de parâmetros característicos de instrumentos (YANG, 1995; PETRIU, 1999; MOU, 1997; ALIPPI, 1998). Essa poderá vir a ser uma eficiente maneira de extrair características de um sistema físico para incorporá-las automaticamente ao modelo a ser empregado em simuladores.

3.4 Simuladores

O emprego de recursos de simulação para representar o comportamento de componentes, sistemas e processos já é comum há décadas. Objetivando ser sintético, qualquer componente, sistema ou processo, seja físico ou abstrato, será aqui denominado entidade.

A simulação pode ocorrer sobre eventos contínuos ou discretos. Um mesmo sistema de simulação pode operar de forma parcialmente contínua e parcialmente discreta.

Uma simulação é realizada sobre um modelo de uma entidade. Entende-se por modelo a representação de uma entidade através de qualquer forma que não seja a própria forma em que a entidade existe. Um modelo pode ser material ou imaterial (KOTTMANN, 1997).

Os modelos materiais podem estar no próprio domínio de energia do sistema físico que representam ou noutro domínio de energia. Estar no mesmo domínio de energia ocorre, por exemplo, na aplicação de modelos reduzidos; em outro domínio de energia, no caso da conversão força-tensão para representar o comportamento de sistemas mecânicos através de circuitos elétricos (HOLOU, 1998). A simulação usando conversão de sistemas de domínios energéticos quaisquer para circuitos equivalentes no domínio elétrico foi a principal aplicação dos computadores analógicos.

Um modelo imaterial é uma representação não física de uma entidade. No âmbito deste trabalho os modelos de interesse são os imateriais implementados por softwares. Os modelos imateriais podem ser formais ou informais (KOTTMANN, 1997). Se o modelo é formal, isto é, se ele emprega representação formal, existe a possibilidade de se aplicar técnicas de verificação para demonstrar que as propriedades da entidade estão sendo satisfatoriamente modeladas (COPSTEIN, 2000). Um modelo é dito informal quando ele emprega representação informal. Nesse caso ele pode ter funcionamento aparentemente satisfatório, porém não se dispõe de recursos formais para demonstrar que as propriedades do sistema físico estão sendo satisfatoriamente modeladas. Modelos informais podem ser verbais ou gráfico-descritivos. Na visão do autor deste trabalho, para as definições de modelos formais e informais, existe a possibilidade de se dar uma interpretação baseada na viabilidade da análise de incerteza. No âmbito deste trabalho, modelo formal será considerado aquele para o qual é viável fazer-se uma análise teórica de incertezas. Modelo informal, aquele para o qual não é viável uma análise teórica de incertezas.

A maioria dos modelos baseados em inteligência artificial é informal. Os modelos baseados em sistemas especialistas geralmente são verbais, implementados a partir de regras de produção do tipo “se... então...”. Os modelos baseados em redes neurais artificiais são gráfico-descritivos. As características do sistema a ser modelado estão contidas nos pesos das interligações entre os neurônios. Através de experimentação pode-se comprovar que o sistema funciona adequadamente nas condições testadas. Inúmeros estudos mostram que tais modelos podem ter desempenhos altamente satisfatórios, porém a demonstração formal disso é geralmente inviável.

Quanto ao enfoque, segundo RASSP (2000), os modelos podem ser divididos em externos e internos. Quando o modelo é externo, a entidade é modelada como uma caixa

preta, na qual não há preocupação em modelar detalhes internos. Quando o modelo é interno, a preocupação é com a representação interior da entidade.

Ainda segundo RASSP (2000), quanto ao objetivo, os modelos podem ser divididos nas categorias abaixo:

- comportamental – modelo que descreve função e temporização;
- funcional – modelo que descreve exclusivamente função, sem temporização;
- estrutural – modelo que representa um componente ou sistema em termos de interconexão de seus elementos.

É comum que um modelo não se enquadre especificamente em uma das categorias e sim que pertença de forma difusa a diferentes categorias, com diferentes graus de pertinência. Isso também ocorre com a divisão em modelo interno ou externo; muitas vezes um modelo pode ser parcialmente interno e parcialmente externo, embora seja normal que haja predominância de um dos enfoques.

Um dos primeiros pacotes de softwares voltados exclusivamente para simulação foi o CSMP – *Continuous systems modeling program*, da IBM. Tanto o CSMP quanto um computador analógico disponível no Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC foram empregados pelo autor deste trabalho, no início da década de 80, para simulação de curto-circuitos em reatores de barra de subestações, para o Departamento de Engenharia de Sistemas da Eletrosul, em Florianópolis. Tais recursos eram extremamente limitados, especialmente no concernente à interface homem-máquina.

Atualmente existe uma grande quantidade de softwares para simulação de sistemas físicos. Alguns são ambientes dedicados à simulação em geral; outros para certas classes de sistemas. Exemplos são: Spice (AL-HASHIMI, 1995) e EWB (WORKBENCH, 1999) para simulação do comportamento de circuitos elétricos e eletrônicos; SIMULINK (VANDOREN, 1998; SIMAS, 1998) para simulação de sistemas de controle; ARENA (KELTON, 1998), para simulação de processos seqüenciais. A literatura relata o contínuo desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de simulação (VANDOREN, 1998; KOTTMANN, 1997; MACIEL, 1998). Outros softwares não se caracterizam como sistemas de simulação, mas são bastante adequados para uso na implementação de simulações. Exemplo é o Matlab, empregado em DAMATO (1998) para simulação de processos, no ensino da Engenharia Química. Uma rede neural artificial é, intrinsecamente, um ambiente de simulação; simula o comportamento dos neurônios humanos.

Os ambientes de simulação dirigidos à instrumentação foram divididos, dentro deste trabalho, em dois grupos: simuladores para auxílio à avaliação de incertezas e simuladores para treinamento em instrumentação.

a) Simuladores para auxílio na avaliação de incertezas

Para avaliação da incerteza, existem vários sistemas comerciais (ISGMAX, 2000; GRACHANEN, 1997). Esses sistemas se constituem em simples planilhas pré-programadas para avaliação de incertezas segundo os moldes estabelecidos pelo GUM. Todo o trabalho de estabelecimento das fontes de incerteza e de fornecimento dos valores dos respectivos parâmetros representativos fica a cargo do usuário. Muitas empresas têm desenvolvido sistemas próprios, adequados às particularidades dos seus sistemas da qualidade. Como parte do trabalho de consultoria à Petrobras, prestada pelo autor deste trabalho, foi acompanhado o desenvolvimento de um sistema de avaliação da incerteza usando o Excel.

Embora tenham crescido muito a disponibilidade e o uso de instrumentos modulares, analisando-se o atual estado-da-arte pode-se concluir pela inexistência de recursos direcionados à avaliação a priori da incerteza quando cadeias de medição são formadas a partir da justaposição de instrumentos. Dissertação de mestrado (BARP, 2000), orientada pelo autor deste trabalho, explorou a possibilidade de utilização de simuladores voltados ao projeto de sistemas eletrônicos, em especial o PSpice (MICROSIM, 1996; PETRIU, 1999). A utilização conjunta do PSpice e do Excel, realizada na dissertação, mostrou-se de extrema valia para auxiliar na análise da incerteza durante a fase de projeto de instrumentos de medição. Os resultados mostraram que, embora viável, a simulação aplicada à avaliação da incerteza inerente a cadeias de medição configuradas a partir de módulos instrumentais requer, além de conhecimentos de metrologia, grande conhecimento de instrumentação e de eletrônica. Na situação atual, raramente esses conhecimentos estão presentes de forma simultânea em um mesmo usuário. Quando presentes ao mesmo tempo em usuários distintos, a integração costuma ser difícil, porque esses conhecimentos são tradicionalmente tratados de forma isolada.

b) Simuladores para treinamento em instrumentação

O uso da simulação tem enorme potencial para treinamento (BARBATA, 1998; SIMAS, 1998; STAKOS, 1998; PATRICK, 2000; OBEYSEKARE, 1997; MOURE, 1999). O documento DOE (1994 p. 18-19), recomenda sua utilização quando o treinamento requer um alto grau de interação entre treinados e sistemas físicos, mas o treinamento *on-the-job* não é

apropriado ou não é viável. Mesmo no treinamento *on-the-job*, o uso dos simuladores assume grande importância como instrumento complementar, frente a questões de custos e de segurança operacional (DOE, 1998 p. 5-6). Dentre os simuladores voltados ao treinamento, provavelmente o tipo mais conhecido seja o simulador de vôo para treinamento de pilotos.

Existem diversas propostas de empresas e de instituições de ensino visando à união dos potenciais da Internet e da simulação para treinamento (JANDRE, 1998; SALZMANN, 1998; DOMINGUES, 1998; MARCHIORO, 1997; STEGAWSKI, 1998; NG, 1998; LEE, 1999; SEIXAS, 1998).

Prevê-se que no futuro haja uma integração muito maior do ensino da engenharia com o de outras áreas (SCHMALZEL, 1999a; SHEU, 1998). Prevê-se também aumento da importância da metrologia na formação do engenheiro (HOOVER, 1999), além de um maior enfoque nos sistemas da qualidade (SCHMALZEL, 1999a; WATANABE, 1999). É tida como certa uma aproximação muito maior do que hoje entre os ensinamentos de metrologia e de instrumentação mecatrônica (BARWICZ, 1999; DYER, 1998). Essa composição de conhecimentos certamente exigirá um tratamento da instrumentação eletrônica, intermediário ao de um curso de circuitos eletrônicos e a forma com que tal assunto é tratado nos cursos de metrologia (CHOMA JR., 1998). Deverá ser buscado equilíbrio entre os conhecimentos especialista e generalista (SCHMALZEL, 1999b; LAOPOULOS, 1999; WITTE, 1999; DYER, 1998).

A literatura relata grande número de aplicações de simuladores no ensino de instrumentação, em especial de controle. Exemplos estão em MARCHIORO (1997), OBEYSEKARE (1997), STRAKOS (1998), JANDRE (1998), MACIEL (1998), SEIXAS (1998), SALZMANN (1998), SIMAS (1998), BARBETA (1998), PATRICK (2000), VANDOREN (1998), TUC (2000). Diversos simuladores disponíveis no mercado são apresentados em ANACOM (2000). Os sistemas que puderam ser identificados no mercado e as publicações relativas a possibilidades de emprego de recursos de simulação exploram as características operacionais ou as construtivas dos instrumentos, e não aspectos metrológicos. Não foi identificado nenhum simulador de instrumentos em que fossem exploradas características metrológicas de cadeias de medição ou mesmo de instrumentos individuais.

Identifica-se então uma lacuna no âmbito dos simuladores: um sistema de simulação que una conceitos de instrumentação modular de medição e conceitos fundamentais de metrologia, dirigido a usuários não especialistas em eletrônica. Estruturar esse sistema é proposta deste trabalho.

4 Modelos empregados em análise de incertezas

Para que uma simulação consiga representar de forma satisfatória o comportamento de um sistema físico, é necessário que sejam empregados modelos adequados (BELLOMO, 1993; KAYSSI, 1998). A definição do modelo deve levar em consideração o objetivo da simulação. O termo “modelo” é bastante genérico, de forma que um mesmo sistema físico pode ter diferentes modelos, de acordo com o que se pretende representar (ECSS, 1998). Dentro do sistema de simulação, espera-se dos modelos a capacidade de representação satisfatória do comportamento metrológico de cadeias de medição formadas a partir de instrumentos individuais.

Dentre os modelos conhecidos, aqueles que apresentam maior afinidade com o objetivo deste trabalho são os empregados em análise de incertezas: modelos de características metrológicas (GONÇALVES JR., 1997; BIPM, 1998; VOULO, 1996; ARRY, 1995; FLESCHE, 1999b) e os macromodelos de sistemas elétricos (KAYSSI, 1998; DYER, 1998; ST, 2000; TUINENGA, 1995; MICROSIM, 1996a,b; NASH, 1999; BAGGI, 1995; JUNG, 1991). No caso dos macromodelos, o enfoque de particular interesse está na interligação de elementos na cadeia de medição.

4.1 Características metrológicas básicas de um sistema de medição

Quando não se está trabalhando com instrumentação modular, ou seja, quando um instrumento corresponde a uma cadeia de medição completa, um conjunto relativamente reduzido de parâmetros pode ser empregado para descrever o seu comportamento metrológico. Esses parâmetros estão definidos no Vocabulário Internacional de Termos Gerais e Fundamentais de Metrologia – VIM (INMETRO, 1995). Adicionalmente aos parâmetros definidos no VIM, há necessidade de se considerar, no mínimo, histerese e linearidade, como características básicas dos instrumentos (CHRYSLER, 1997).

Para diferenciar de características adicionais, o conjunto de parâmetros definido no VIM, acrescido de linearidade e de histerese, será chamado neste trabalho de características

metrológicas básicas. Tais características estão diretamente relacionadas à característica de resposta de um instrumento. São elas:

a) Tendência

Segundo o VIM: “Erro sistemático da indicação de um instrumento de medição”. Assume-se que a definição de tendência possa ser estendida para qualquer instrumento, além daqueles que têm indicação, substituindo-se o termo indicação pelo termo resposta.

A tendência de um instrumento pode variar significativamente ao longo de sua faixa de medição especificada. A menos que as especificações decorram de uma calibração detalhada do instrumento, a tendência não é conhecida ponto a ponto ao longo da faixa de medição especificada. Para instrumentos com característica de resposta nominalmente linear é usual que a especificação da tendência seja feita subdividida em duas partes, nas formas de limites de erro de zero e limites de erro de ganho.

O mais usual, no entanto, é que já venha computada no erro máximo admissível, e que seu valor não seja informado explicitamente pelo fabricante.

b) Linearidade

Para instrumentos cuja característica de resposta nominal é linear, o desvio da linearidade (ou erro de linearidade) especifica o máximo desvio do comportamento linear que tal instrumento poderá apresentar. É especificação fundamental para instrumentos com característica de resposta nominal linear, em que haja alguma forma de ajuste de zero e de ganho, seja por controles incorporados, seja por correção matemática. Considerando que fosse possível fazer ajustes de zero e de ganho com incertezas iguais a zero, o limite de erro de linearidade corresponderia à tendência máxima do instrumento. Na prática há necessidade de se considerar tanto o erro de linearidade quanto as incertezas inerentes aos ajustes, na composição da incerteza combinada do processo de medição em que o instrumento esteja inserido.

Para um mesmo instrumento, o erro de linearidade pode assumir diferentes valores dependendo da forma como é especificado. As formas mais usuais de especificação do limite de erro de linearidade são: linearidade terminal e linearidade pelo método dos mínimos quadrados. A linearidade terminal é especificação usual em instrumentos para os quais é definido o procedimento ajuste de zero e de ganho, baseado em padrões com valores iguais aos de início e de final da faixa de medição especificada.

c) Histerese

A diferença entre tendências, quando aplicados valores decrescentes e crescentes da grandeza a medir, caracteriza numericamente a histerese do instrumento. É parâmetro para o qual, a menos que seja feita uma calibração detalhada do instrumento, só é fornecido o valor máximo ao longo da faixa de medição especificada. É típico que os instrumentos apresentem variação significativa de valor de histerese ao longo da faixa de medição. Seu valor é também extremamente dependente da amplitude das variações da grandeza num sentido antes que haja inversão de sentido.

É, portanto, parâmetro cujo efeito, na prática, dificilmente pode ser compensado. Para instrumentos apropriados para medições tanto em valores crescentes quanto decrescentes da grandeza de entrada, é desejável que a histerese seja incluída como uma parcela do erro máximo admissível do instrumento.

d) Repetitividade

Aplicações sucessivas de um sinal de mesmo valor na entrada de um instrumento poderão corresponder a diferentes respostas, mesmo que todas as condições que revestem a medição permaneçam inalteradas. A variabilidade do sinal de saída é assumida como tendo uma distribuição normal (MANDEL, 1987). Seu valor pode então ser caracterizado pelo desvio-padrão da distribuição. Na prática são adotadas diferentes formas de especificação da repetitividade.

Segundo o VIM, repetitividade é definida como “Aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações do mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição”.

A norma ISO 3435 na sua versão de 1977 (ISO, 1977) especificava *repeatability* (repetitividade) como “valor abaixo do qual está situado, com uma dada probabilidade, o valor absoluto da diferença entre duas medições consecutivas obtidas sob condições de repetitividade”. Complementa ainda: “Na falta de outra indicação a probabilidade é de 95%”.

A mesma ISO 3435 na sua versão 1993 (ISO, 1993 a) passa a empregar essa definição para o termo de *repeatability limit* (limite da repetitividade), fixando a probabilidade em 95%. Adicionalmente, redefine repetitividade como sinônimo de *precision* (precisão), termo não recomendado pelo VIM. As definições de precisão na ISO 3435/93 e de repetitividade no VIM, são idênticas.

A ISO 3435/93 define ainda o desvio-padrão da repetitividade, como: “desvio-padrão de resultados de testes sob condições de repetitividade”.

Propõe-se neste trabalho que os termos limite da repetitividade e desvio-padrão da repetitividade sejam adotados na metrologia. Seus usos complementarizam o VIM, sem com ele conflitar. Além disso, está de acordo com o vocabulário de estatística da ISO. Propõe-se que o termo limite da repetitividade seja o parâmetro do instrumento que caracterize, em especificações, o seu comportamento quanto a erros aleatórios. O termo desvio-padrão da repetitividade é adequado para caracterizar o mesmo comportamento quando determinado experimentalmente. Por exemplo, de uma calibração do instrumento, será obtido o desvio-padrão da repetitividade.

Nos sistemas da qualidade, o limite da repetitividade (r) pode ser representado pela sua equivalente incerteza padrão (u) (BIPM, 1998). Esta última pode ser comparada com o desvio-padrão da repetitividade (s_r), para verificar se o instrumento é conforme ou não-conforme com especificações do fabricante.

Observe-se que a especificação baseada no desvio-padrão da distribuição de valores é mais indicada para aplicação ao procedimento do GUM (BIPM, 1998).

A especificação baseada no limite para a diferença entre duas medições consecutivas é mais prática para se verificar, de forma simplificada, se a repetitividade de um instrumento se mantém dentro de limites estabelecidos. É o caso, por exemplo de análises de repetitividade feitas junto ao chão de fábrica (ISO, 1994b; CHRYSLER, 1997).

Portanto, há condições de fazer com que as duas especificações coexistam em um mesmo sistema da qualidade.

e) Erro máximo

Parâmetro reduzido representativo do comportamento metrológico básico do instrumento.

O erro máximo admissível – *maximum permissible error* é, segundo o VIM: “Valores extremos de um erro admissível por especificações, regulamentos etc., para um dado instrumento de medição”.

O erro de um instrumento numa dada condição de medição pode ser decomposto em duas parcelas: uma que representa os erros sistemáticos e outra que representa os erros aleatórios (DOEBELIN, 1990).

Pode-se então definir o erro máximo como sendo o valor máximo da soma dos módulos da tendência e da repetitividade para cada ponto ao longo da faixa de medição especificada do instrumento. O erro máximo determinado dessa forma deve ser menor ou igual ao parâmetro erro máximo admissível.

O erro máximo admissível deveria ser o parâmetro mais usual na especificação das características metrológicas de um instrumento. Há, no entanto, grande divergência entre procedimentos normativos, recomendações técnicas e informações de fabricantes. A versão mais empregada pelos fabricantes de instrumentos e pela literatura técnica é *accuracy* (LEWIS, 1998), termo cujo uso como especificação de instrumento é condenada pelas principais referências adotadas (INMETRO, 1995; ANSI, 1993). *Accuracy* é geralmente empregado como forma abreviada dos termos *reference accuracy*, ou *rating accuracy* os quais a ANSI (1993) define como limite simultâneo dos efeitos de linearidade, histerese e repetitividade, sob condições especificadas. Observe-se que para emprego correto dessa definição há necessidade de que seja feita, pelo usuário, correção de tendências, o que implica, na mais simples das hipóteses, em regulagem de zero e de ganho do instrumento. Observe-se ainda que tal definição não é aplicável para instrumentos com característica de resposta nominal não linear.

Outros termos largamente empregados em substituição a erro máximo admissível são: *precision* (precisão) e *combined error* (erro combinado). Contatos com fabricantes e raros glossários apresentados em catálogos de fabricantes e em manuais de instrumentos levaram à conclusão de que tais termos estavam sendo empregados em substituição ao *reference accuracy* da ANSI (1993).

Outros termos correlatos seguidamente empregados são *relative accuracy* e *absolute accuracy* (LEWIS, 1998; NATIONAL INSTRUMENTS, 1999; CRISP, 1997). *Relative accuracy* corresponde ao erro máximo de um instrumento que tenha sido ajustado, ou regulado, empregando-se padrão e procedimento ideais, ou seja: com incerteza igual a zero (LEWIS, 1998; CRISP, 1997). *Absolute accuracy* engloba a parcela de incerteza devida ao padrão, nenhuma referência sendo feita ao procedimento.

Não foi identificada nenhuma referência ao VIM, por fabricantes.

f) Resolução

Segundo o VIM: “Menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida”.

Ainda são encontrados procedimentos de seleção de instrumentos em que a resolução é o parâmetro empregado para fim de comprovação da adequação do comportamento metrológico. Tal prática é totalmente inaceitável. É usual encontrar instrumentos em que o erro máximo admissível seja dezenas, centenas ou até milhares de vezes maior do que a sua resolução. Para o multímetro modelo HP 3456 A, da Hewlett Pacard, a resolução para

medição de tensões alternadas de 60 Hz, na faixa nominal de (0 a 10) V é de 10 μ V. O erro máximo especificado pelo fabricante para esse instrumento nessas condições é 1500 vezes a sua resolução (FLESCHE, 1997).

A resolução não deve, portanto, ser empregada pelo usuário como parâmetro diretamente associado à incerteza da medição. É, no entanto, parâmetro adicional importante, sob condições específicas. Exemplo está no emprego do instrumento num sistema de controle estatístico de processos, em que a resolução é desejável para melhor caracterização da variabilidade do processo. Observe-se que mesmo nessa situação deve-se tomar muito cuidado para que o instrumento não conduza a conclusões erradas, o que poderá ocorrer se a repetitividade do instrumento for da ordem de grandeza da sua resolução, ou maior do que essa. A variabilidade observada pode ser devida mais ao sistema de medição do que ao processo.

Boa resolução é também desejável se o processo de medição prevê a correção de tendência e a realização de repetidas medições de um mensurando com objetivo de minimizar a influência do comportamento aleatório do instrumento.

g) Estabilidade

Segundo o VIM: “Aptidão de um instrumento de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo”.

Representa o limite de variabilidade do característico de resposta do instrumento. O termo estabilidade pode estar associado a qualquer parâmetro representativo do comportamento metrológico do instrumento. É usualmente empregado para expressar as variações do zero e do ganho de um instrumento, não só como função do tempo, mas também da temperatura.

h) Tempo de resposta

Segundo o VIM: “Intervalo de tempo entre o instante em que um estímulo é submetido a uma variação brusca e o instante em que a resposta atinge e permanece dentro de limites especificados em torno do seu valor final estável”. Este é o único parâmetro contemplado pelo VIM diretamente associado ao comportamento dinâmico do instrumento.

4.2 Estrutura da cadeia de medição

Existe uma quantidade extremamente grande de tipos diferentes de instrumentos de medição disponíveis no mercado. O sistema de simulação deve contemplar instrumentos que sejam representativos das aplicações industriais e didaticamente interessantes.

De acordo com o VIM: “Cadeia de medição é o caminho percorrido pelo sinal de medição, desde o estímulo até a resposta”. Procurou-se manter a subdivisão tradicional adotada pela literatura e aceita pela maioria dos usuários. Nela, as cadeias são subdivididas em três grupos básicos de instrumentos: transdutores, condicionadores de sinais e dispositivos mostradores (ou registradores). Para facilitar o processo de obtenção do modelo, procurou-se, desde que não conflitante com a terminologia definida pelo VIM, manter compatibilidade com a terminologia adotada por fabricantes e por usuários de instrumentos. Foram consideradas, dentre outras, as informações constantes em ANALOG DEVICES (2000), FLUKE (1994), HART SCIENTIFIC (2000), HBM (1999), HERAEUS (2000), HEWLETT PACKARD (1999), KEITHLEY (1997), NATIONAL INSTRUMENTS (2000), OMEGA (1995) e COOK (1993). Embora as divergências por vezes sejam gritantes, procurou-se também compatibilizar a terminologia adotada com os documentos ANSI/ISA (1993), ECSS (1997), DOE (1992a,b), IEEE (1996), ISA (1995) e NTS (2000).

a) Transdutor

A definição do VIM é muito vaga: “Dispositivo que fornece uma grandeza de saída que tem uma correlação determinada com uma grandeza de entrada”.

O transdutor é o primeiro instrumento da cadeia de medição; é aquele que recebe o estímulo proveniente do mensurando (KHAZAN, 1994; FIGLIOLA, 1995; DOEBELIN, 1990). É o instrumento que caracteriza a cadeia como destinada à medição de determinada grandeza.

O sistema de simulação a ser desenvolvido destina-se primordialmente à simulação de cadeias de instrumentos elétricos para medição de grandezas mecânicas. Nessas, no transdutor ocorre uma transformação entre domínios de energia (PUTTEN, 1996) ou a variação do valor de um parâmetro elétrico representativo de um componente, tal como uma resistência ou uma capacitância (PUTTEN, 1996; PALLÁS-ARENY, 1991; DALLY, 1993; DOE, 1993a,b; OGATA, 1993).

Transformação entre domínios ocorre, por exemplo, em um termopar, no qual uma informação no domínio energético térmico é transformada em uma tensão elétrica. Variação

do valor de um parâmetro ocorre, por exemplo, em um termistor, no qual a mesma informação no domínio energético térmico provoca não um sinal energético no domínio elétrico, mas a variação da resistência do termistor.

Para muitos autores, fabricantes e usuários, é chamado de transdutor ativo aquele no qual ocorre transformação energética e que, portanto, não necessita de energia auxiliar para proporcionar um sinal energético no domínio elétrico. O segundo tipo de transdutor, aquele no qual só ocorre a variação de um parâmetro de um componente é chamado de transdutor passivo.

No entanto, na literatura existem muitas divergências no tocante à terminologia (STEIN, 2000). Por exemplo, para DOEBELIN (1990), ISA (1993) e IEEE (1996), o entendimento é exatamente o oposto: passivo é o transdutor em que não há necessidade de alimentação com fonte auxiliar de energia e ativo é o que necessita de fonte auxiliar de energia.

O termo sensor é também extremamente usado para designar o elemento físico que neste trabalho está sendo chamado de transdutor. Em função de o VIM identificar sensor como sendo uma parte do transdutor, mais especificamente aquela que sente a variação do mensurando, optou-se neste trabalho unicamente pelo termo transdutor para designar o primeiro instrumento da cadeia de medição.

Para classificação dos transdutores, propõe-se que sejam adotados os termos: transdutores auto-geradores e transdutores que requerem alimentação. O termo auto-gerador *self generating* está contemplado em ISA (1995). Embora a definição seja genérica, não se aplicando unicamente a transdutores, os exemplos empregados em ISA (1995) são exatamente transdutores: eletromagnéticos, piezoelétricos e termelétricos.

b) Dispositivo mostrador

Corresponde, em relação ao transdutor, ao extremo oposto da cadeia de medição. Segundo o VIM: “Parte de um instrumento de medição que apresenta uma indicação”. O VIM tem uma definição análoga, para dispositivo registrador: “Parte de um instrumento de medição que fornece o registro de uma medição”.

Para uma cadeia modular, dispositivo mostrador e dispositivo registrador são instrumentos que apresentam a resposta da cadeia de medição. Podem ser analógicos ou digitais.

Nas aplicações industriais, a grande maioria dos dispositivos mostradores, embora sejam voltímetros ou amperímetros (DOEBELIN, 1990), por facilidade operacional são

graduados na unidade do mensurando. Os digitais recebem a informação já digitalizada oriunda de processamento em módulos anteriores da cadeia de medição. Os painéis sinóticos digitais e as telas de vídeo de computadores são exemplos.

c) Condicionador de sinais

O VIM não faz referência a qualquer elemento que possa estar entre o transdutor e o dispositivo mostrador (ou registrador).

Segundo ISA (1995): “Um módulo que desloca, atenua, amplifica, lineariza e/ou filtra o sinal”.

Enquadram-se nesse grupo todos os instrumentos inseridos na cadeia de medição entre transdutor e dispositivo mostrador ou registrador, com a função de modificar de alguma forma o sinal de medição. Neste trabalho consideram-se aí incluídos os conversores analógico-digitais.

Existem módulos que não se enquadram adequadamente em nenhuma das categorias acima. Esses receberão tratamento particular neste trabalho. É o caso de multiplexadores, de fontes de alimentação de transdutores que requerem alimentação e de dispositivos de interligação de instrumentos; por exemplo: fios de ligação.

4.3 Parâmetros típicos da instrumentação modular

Quando a cadeia de medição é formada por instrumentos individuais interligados, os parâmetros representativos das características metrológicas básicas dos instrumentos não são suficientes para caracterizar o comportamento metrológico dos instrumentos. Os efeitos das interligações podem ser muito mais significativos do que os inerentes às características metrológicas de cada módulo individualmente (FLESCHE, 1999b).

É interessante que o sistema de simulação empregue modelos elétricos o mais perto possível dos modelos tradicionalmente empregados em eletrônica. Se outras formas de modelagem fossem adotadas, haveria o risco de, para instrumentos reais do mercado, não se dispor dos valores dos parâmetros. Modelos baseados nos teoremas de Thévenin e de Norton têm sido empregados, tanto nas especificações de fabricantes quanto em normas e procedimentos técnicos usuais (DOE, 1992b; PUTTEN, 1996; BARP, 2000). O modelo de quadripolos (HAYT, 1978), por exemplo, é muito interessante para simulação digital por ser

facilmente tratável por análise matricial. Porém, para instrumentos de medição, não é usual que os parâmetros concernentes a essa forma de modelagem sejam conhecidos.

De acordo com o teorema de Thévenin, qualquer circuito elétrico formado por impedâncias passivas e por fontes lineares independentes de outros parâmetros do circuito no domínio elétrico pode ser modelado por uma fonte de tensão em série com uma impedância (HAYT, 1978; HOROWITZ, 1980; DOEBELIN, 1990). Analogamente, de acordo com o teorema de Norton, tal circuito pode ser modelado por uma fonte de corrente em paralelo com uma impedância.

Em instrumentação de medição é usual a utilização dos modelos de Thévenin e de Norton associados à técnica de análise de circuitos por superposição (PUTTEN, 1996; MALVINO, 1995; SEDRA, 1991). Fontes de tensão, fontes de corrente e impedâncias são associadas a parâmetros característicos dos instrumentos. Os modelos resultantes são mais complexos que aqueles que resultariam se os teoremas de Thévenin e de Norton fossem aplicados diretamente à entrada ou à saída do instrumento como um todo. É prática comum, embora não consensual, a adoção de circuitos equivalentes os mais simples possíveis na saída do instrumento, representando-se ao máximo as não-idealidades através de circuitos equivalentes na entrada do instrumento.

Um instrumento que tem somente saída no domínio elétrico, por exemplo, um transdutor auto-gerador, é em geral representado por uma fonte de tensão dependente do valor do mensurando, em série com uma impedância. Tal modelo contempla a representação da característica de resposta e da impedância de saída do instrumento. Para modelos mais exatos, fontes adicionais de tensão e de corrente são empregadas, representando ruídos e outras particulares não-idealidades.

As não-idealidades do instrumento, em termos de características metrológicas, são relacionadas à característica de resposta. Por exemplo: não-linearidade, histerese e erros de zero e de ganho.

Usando-se superposição, outras não-idealidades são modeladas por fontes adicionais, de tensão ou de corrente, em paralelo ou em série, dependendo do caso.

O comportamento dinâmico do instrumento é também usualmente representado de forma análoga, substituindo-se a característica de resposta pela função de transferência do instrumento (DOEBELIN, 1990).

Os efeitos da interligação de um instrumento a outros módulos da cadeia são determinados pela análise do circuito elétrico equivalente à interligação dos respectivos modelos. É usual a representação através do modelo de Norton somente para os instrumentos

que têm saída em corrente; ou seja: com impedância de saída bem superior à da entrada do módulo a ele conectado na cadeia de medição. Nos demais casos o emprego do modelo de Thévenin é o mais usual (DOEBELIN, 1990; PUTTEN, 1996).

Quando é feita análise em tensão do circuito equivalente à cadeia de medição, não-idealidades que dependem do circuito de entrada do módulo seguinte são representadas por fontes de corrente em paralelo; as que não dependem do circuito de entrada do módulo seguinte, por fontes de tensão em série. Algumas não-idealidades, como, por exemplo, ruídos, são simultaneamente representados por fonte de tensão e de corrente (KEITLEY, 1993).

Um instrumento que tem somente entrada no domínio elétrico, por exemplo um dispositivo mostrador, tem modelo de Thévenin equivalente a uma impedância. A representação das não-idealidades do instrumento exige, no entanto, que fontes sejam adicionadas ao modelo (CRISP, 1997).

Um instrumento que tem entrada e saída no domínio elétrico, como um amplificador ou um transdutor configurado em ponte, tem modelos equivalentes, da entrada e da saída, tratados em separado.

Frente à grande diversificação de módulos instrumentais e de configurações de ligação, não há como quantificar a influência de cada parâmetro sem fazer uma análise da cadeia formada. Também, sem análise do modelo da cadeia de medição, não se pode determinar a priori quais parâmetros são mais significativos (BARP, 1998; CAMARANO, 1993a,b; BLANK, 1996).

A falta de padronização, tanto no que se refere à terminologia quanto à forma de apresentação dos parâmetros por normas, documentos técnicos e por fabricantes, dificulta sobremaneira a apresentação e a análise dos modelos dos instrumentos.

Muitos módulos empregados na constituição de uma cadeia de medição não foram concebidos como instrumentos de medição. É o caso, por exemplo, de fontes de alimentação e de multiplexadores de uso geral, que muitas vezes acabam integrando uma cadeia de medição. Isso faz com que não se disponha de informações adequadas, ou que as informações estejam numa terminologia diferente da usual em metrologia. Na falta de terminologia oficial da área da metrologia para muitos dos parâmetros necessários à modelagem da cadeia de medição, foi adotada terminologia própria da área de instrumentação, estabelecida pela ANSI/ISA (1993) e complementada por NIST (1999), DOE (1992a,b), ISA (1995) e IEEE (1996).

Para alguns termos há equivalência direta entre os parâmetros do modelo elétrico, da forma como fornecidos pelos fabricantes, e os parâmetros representativos das características metrológicas básicas. Porém, para muitos desses parâmetros ainda não há, na área da

instrumentação, preocupação com a confiabilidade da informação. Ainda é comum que fabricantes forneçam os valores dos parâmetros associados a informações do tipo “máximo”, “mínimo” ou “típico”, sem fornecer qualquer informação complementar. Nesses casos assumiu-se que tal informação tem implícitas as seguintes características, segundo DEWEY (1998):

- Valores típicos e valores nominais: são valores utilizados para representar as características de todo um grupo. Para expressá-las, fabricantes utilizam diferentes tipos de valores resumidos. Os mais usados são: moda, média e mediana. Quando a distribuição que representa a grandeza é centrada entre seus limites, esses valores são praticamente coincidentes. Entretanto, se uma distribuição é deslocada do centro como mostrado na figura 4.1, esses valores podem ser consideravelmente diferentes. Em geral, a moda é utilizada como valor do parâmetro.
- Limites (máximo/mínimo): são valores garantidos pelo fabricante dentro das condições de teste especificadas. Geralmente são os únicos parâmetros medidos durante a produção e que servem de parâmetros de seu controle. Os valores máximos e mínimos quando empregados em análise de incertezas conduzem às condições de “pior caso” para o parâmetro em análise (AL-HASHIMI, 1995).

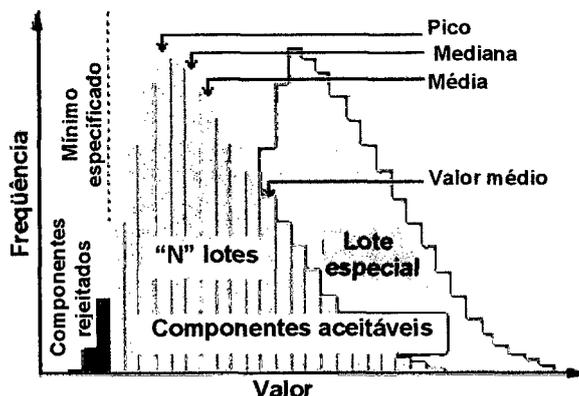


Figura 4.1 – Especificações e sua relação com distribuições de fabricação (DEWEY, 1998).

São poucos os catálogos e manuais de fabricantes que apresentam, de forma satisfatória, as informações necessárias para caracterizar metrologicamente o instrumento (COOK, 1993). É prática comum a apresentação de valores típicos para uma dada condição de operação, por exemplo, temperatura ambiente, mesmo que as características possam se

modificar consideravelmente para outras condições de operação. Esse tipo de especificação pode propiciar uma incerteza muito grande no modelo do instrumento.

Embora no estabelecimento do modelo elétrico da cadeia de medição, muitas informações sejam prestadas pelos fabricantes guardando terminologia própria da área de instrumentação, muitos termos têm significado similar a termos estabelecidos pelo VIM. São eles:

a) Tolerância

Tolerância corresponde à máxima variação admitida em torno do valor nominal de uma grandeza, seja ela corporificada ou gerada por uma fonte (BARP, 2000). Observa-se que esse termo é correlato ao termo erro máximo admissível, do VIM.

Em geral é uma especificação bastante confiável. Atualmente o seu intervalo da confiança mais usual é de $\pm 4\sigma$, ou $\pm 6\sigma$, dependendo do fabricante e da característica considerada. É, portanto, informação mais confiável do que o $\pm 2\sigma$, usual para características metrológicas.

b) Resolução

Segundo o VIM o termo resolução é reservado para dispositivos mostradores com indicação ou registro digitais. Em instrumentação o termo é empregado para designar o quanto correta é a representação digitalizada de uma informação analógica por um módulo qualquer (CHIORBOLI, 1997).

O termo correlacionado, erro de quantização, refere-se ao máximo desvio encontrado em um conversor analógico-digital entre o sinal analógico e o sinal digital correspondente (VUJIEIÉ, 1997). A curva de erro geralmente apresenta a forma de um dente de serra, com amplitude igual a ± 1 LSB (*Least Significant Bit* - bit menos significativo). O valor de 1 LSB corresponde à resolução do conversor (ANALOG DEVICES, 2000).

A resolução representa quantitativamente o menor valor de variação da grandeza de entrada que provoca alteração no estado digital da saída. Esse valor pode ser apresentado sob forma de número de bits ou número de dígitos.

O número de bits relaciona a resolução (incremento digital) com a faixa nominal (analógica) através da equação 4.1 (PUTTEN, 1996):

$$ID = \frac{AFN}{2^n} \quad (4.1)$$

onde:

ID – incremento digital do conversor;

AFN – amplitude da faixa nominal (INMETRO, 1995);

n – número de bits.

Por exemplo, um conversor de 12 bits possui uma resolução de $1/4096$ da faixa de nominal. O número de dígitos representa o número de algarismos significativos que pode ser apresentado na saída do módulo. O termo meio dígito é empregado para designação de um dígito da representação digital que só pode assumir o valor 0, +1 ou -1. Assim, um conversor de $4\frac{1}{2}$ dígitos pode mostrar valores entre -19999 e +19999.

c) Estabilidade

É termo equivalente ao termo deriva estabelecido pelo VIM, representando a variação lenta de um parâmetro com o tempo. Geralmente o fabricante fornece a variação típica encontrada em testes de longa duração, por exemplo 1000 h, do componente a uma temperatura de referência, usualmente 25 °C (BARP, 2000). É parâmetro cujas informações acerca de condições adicionais de contorno e da confiabilidade, geralmente não são fornecidas.

d) Deriva

É termo coincidente com o termo estabilidade, estabelecido pelo VIM. Representa a aptidão de um módulo de conservar constantes seus parâmetros característicos ao longo do tempo e de outras grandezas de influência.

Na determinação da deriva com a temperatura, a mais significativa para a maioria dos instrumentos e demais módulos elétricos, dois métodos são empregados pelos fabricantes: método da caixa e método da borboleta.

d1) Método da Caixa (*Box Method*): a variação da temperatura é determinada pela inclinação da diagonal de uma caixa delimitada pela faixa de temperatura e pelos valores máximo e mínimo encontrados nesse intervalo (figura 4.2a). Devido à grande variabilidade entre componentes, alguns fabricantes fornecem um valor médio obtido de uma análise estatística, como mostrado na figura 4.2b.

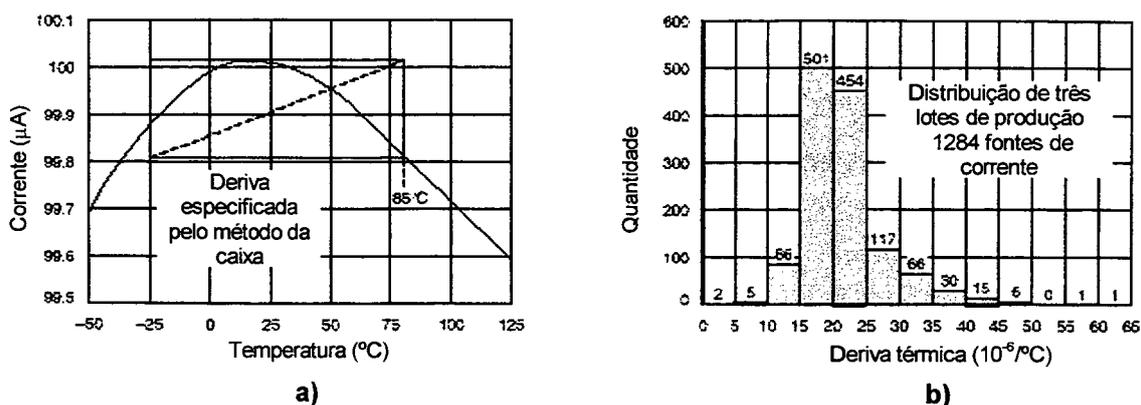


Figura 4.2 – Método da caixa para determinação da deriva com a temperatura.

d2) Método da Borboleta (*Butterfly Method*): determina a variação com a temperatura através da observação do comportamento em três pontos de medição, sendo um geralmente a 25 $^{\circ}C$ e os outros dois nos extremos da faixa de temperatura. De acordo com a forma de cálculo utilizada, esse método pode ser dividido em Método da Borboleta Verdadeiro e Método da Borboleta Modificado.

A figura 4.3 ilustra os dois métodos.

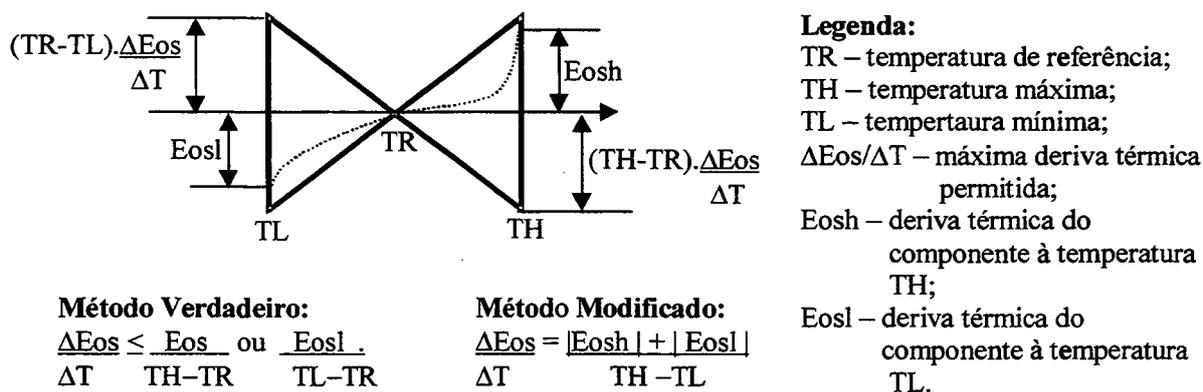


Figura 4.3 – Método da borboleta para determinação da deriva com a temperatura.

Através do coeficiente de temperatura é, então, possível estimar a variação do valor do parâmetro como função da variação da temperatura a que o instrumento é submetido. Essa estimativa pode ser bastante conservativa para pequenas variações de temperatura em torno da referência, uma vez que a variação em geral é bem maior nos extremos da faixa (DEWEY, 1998).

Os fabricantes costumam fornecer a deriva com especificação de valor típico ou de valor máximo.

e) Rejeição à variação da alimentação

Corresponde a uma forma de estabilidade, de acordo com a definição desse último termo pelo VIM.

Para modelar essa característica, em instrumentos com saída em tensão, determina-se a correspondente variação da tensão de saída do módulo através da equação:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta V_f}{\frac{PSRR}{10^{20}}} \quad (4.2)$$

onde:

ΔV_o – variação da tensão de saída do instrumento;

ΔV_f – variação da tensão da fonte de alimentação;

PSRR – rejeição à variação da alimentação (*power source rejection ratio*), em dB.

Para instrumentos com saída em corrente, o procedimento é idêntico, substituindo-se tensão de saída do instrumento por corrente de saída do instrumento.

No modelo de um instrumento com saída em tensão, uma fonte de tensão de valor igual a ΔV_o é colocada em série com a fonte que representa a tensão de saída do instrumento. Para o caso de instrumentos com saída em corrente, uma fonte de corrente é colocada em paralelo com a fonte que representa a corrente de saída do módulo.

f) Razão de rejeição de modo comum

A razão de rejeição de modo comum também corresponde a uma forma de estabilidade, de acordo como esse último termo é definido no VIM.

A tensão de modo comum (V_{mc}) é definida como a média entre as tensões dos dois terminais de entrada (NASH, 1998; NASH, 1999). Ao se aplicar uma tensão de modo comum na entrada de um amplificador diferencial real aparecerá, na saída do amplificador, uma tensão proporcional a essa tensão de modo comum. A correspondente não-idealidade do amplificador é representada pelo parâmetro razão de rejeição de modo comum (*Common Mode Rejection Ratio* - CMRR) e é apresentada em decibel (dB) (CRISP, 1997). O valor de variação de tensão da saída (ΔV_{mc}) do amplificador pode ser determinado através da equação (NASH, 1998):

$$\Delta V_{mc} = \frac{V_{mc} \cdot G}{10^{\frac{CMRR}{20}}} \quad (4.3)$$

onde:

ΔV_{mc} – tensão na saída decorrente da tensão de modo comum;

V_{mc} – tensão de modo comum;

G – ganho do amplificador;

CMRR – razão de rejeição de modo comum - *common mode rejection ratio*.

Geralmente os fabricantes fornecem essa característica com uma especificação do tipo valor mínimo, sob condições especificadas.

Entretanto, deve-se considerar que há acentuado decréscimo do valor da CMRR com o aumento da frequência do sinal de entrada. Assim, sinais de modo comum com frequência diferente de zero, mesmo que de baixa frequência, por exemplo 60 Hz, podem ter influências consideráveis no sinal de saída. Deve-se, ainda, considerar que a razão de rejeição de modo comum referente ao circuito em que o amplificador se insere pode vir a ser menor do que a do próprio amplificador, exigindo cálculo do efeito combinado equivalente (KOIDE,1997).

g) Isolação entre chaves (*crosstalk*)

É outro parâmetro que pode ser correlacionado ao termo estabilidade, de acordo com a forma como esse último termo é definido no VIM.

Um sinal presente na entrada de um canal de um multiplexador pode afetar o valor da saída dos outros canais. Esse efeito é denominado isolamento entre chaves (*crosstalk*). A quantificação da influência é determinada através da equação:

$$\Delta V_o = \frac{V_{test}}{10^{\frac{Crosstalk}{20}}} \quad (4.4)$$

onde:

ΔV_o [V] – tensão induzida ao canal considerado;

V_{test} [V] – tensão aplicada em um outro canal;

Crosstalk [dB] – capacidade de isolamento do canal (*crosstalk*), em dB.

É usual que os fabricantes forneçam para o *crosstalk* uma especificação do tipo valor mínimo.

Os parâmetros apresentados a seguir são parâmetros característicos específicos do modelo elétrico de instrumentos, para os quais não se identificou relação direta com termos definidos no VIM.

h) Impedância interna

O circuito de entrada ou de saída de um instrumento pode ser modelado de acordo com o teorema de Thévenin.

Quatro formas são as mais encontradas na especificação da impedância pelos fabricantes: valor mínimo, valor máximo, valor típico e valor típico associado a uma faixa de tolerância. A especificação de valor mínimo é usual para circuitos de entrada em tensão e para os de saída em corrente. A especificação de valor máximo é usual para circuitos de saída em tensão e para os de entrada em corrente. As especificações de valor típico e de valor típico associado a uma faixa de tolerância são usuais para transdutores que requerem alimentação.

Os fabricantes costumam aproximar a impedância por um modelo equivalente a uma resistência, ou uma resistência em paralelo com uma capacitância (LÖTTERS, 1999).

i) Tensão de *offset*

A tensão de *offset* é o resultado da assimetria interna existente nos módulos com entradas diferenciais. Esse parâmetro pode ser modelado como uma fonte de tensão em série com o sinal de entrada (FREIRE, 1999; NASH, 1999).

Alguns fabricantes dividem essa especificação em duas partes: uma referente à entrada e outra à saída. Isso ocorre quando o módulo incorpora ganho variável e esse interfere no valor do parâmetro.

As especificações geralmente são do tipo valor máximo e valor típico.

j) Corrente de bias e corrente de *offset*

São parâmetros característicos típicos de unidades de condicionamento de sinais, tais como amplificadores e filtros.

Correntes de bias são correntes que fluem pelos terminais de entrada devido à polarização dos circuitos eletrônicos dos instrumentos. A interligação do instrumento aos módulos anteriores da cadeia de medição provoca a geração de tensões de modo comum. Essa

fonte de incerteza é geralmente pequena em componentes com boa razão de rejeição de modo comum (NASH, 1999). Entretanto, se existe assimetria nas impedâncias diferenciais de entrada do módulo, a influência pode vir a ser muito significativa, já que tensões diferenciais são geradas. Nesses casos a influência será dada pela corrente de bias multiplicada pela diferença de impedâncias.

A corrente de *offset* é a diferença encontrada entre as duas correntes de bias. A corrente de *offset* substitui as correntes de bias na modelagem de circuitos que podem ser considerados simétricos. Em circuitos assimétricos, tanto as correntes de bias quanto as de *offset* precisam ser consideradas (NASH, 1999).

As especificações usuais são do tipo valor típico e valor máximo.

k) Ruído

Todo módulo eletrônico gera um ruído composto pela associação de duas formas principais de ruído: Johnson e *flicker* (KUO, 1996).

É usual na especificação de características de módulos eletrônicos que essas componentes sejam agrupadas e resumidas em gráficos de densidade, como função da frequência considerada, de ruído em tensão (figura 4.4) e em corrente (KEYTHLEY, 1993; SHERWIN, 1995; NASH, 1999).

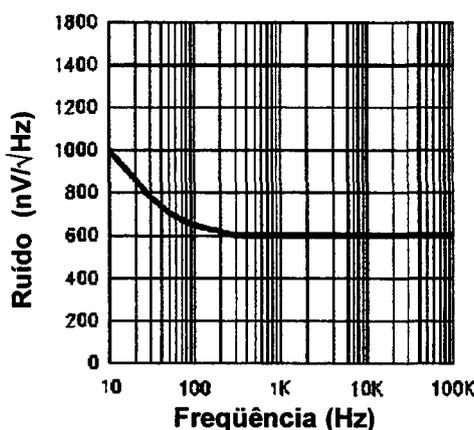


Figura 4.4 – Gráfico típico do ruído em tensão de instrumentos.

Uma fonte de tensão e uma de corrente, na entrada do amplificador, modelam o ruído (TROFIMENKOFF, 1996; SHERWIN, 1995). Para algumas unidades de condicionamento de sinais, especialmente para amplificadores de ganho regulável sobre grande faixa de valores, é

usual que o ruído em tensão seja dividido em duas partes: uma referida à entrada e outra referida à saída. Nesses casos duas fontes de tensão, uma na entrada e outra na saída, são empregadas para modelar ruído (NASH, 1999).

A quantificação do ruído depende da banda de frequência definida por filtros e do diagrama de densidade espectral. O valor de tensão de ruído (E_N) pode ser determinado através da equação (BARP, 2000):

$$E_N(f_H - f_L) = e_n \sqrt{f_{CE} \cdot \ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right) + f_H - f_L} \quad (4.5)$$

onde:

e_n [V] – tensão de ruído em uma banda de 1 Hz;

f_{CE} [Hz] – frequência de corte do ruído de tensão;

f_H [Hz] – limite de frequência superior;

f_L [Hz] – limite de frequência inferior.

O valor obtido pela equação 4.5 representa o valor médio quadrático do sinal de ruído. Para transformar em incerteza padrão, o sinal pode ser aproximado por uma distribuição normal com desvio-padrão de E_N . Procedimento análogo é empregado para quantificação do ruído em corrente.

As especificações em geral são do tipo valor típico. Adicionalmente deve ser considerado o ruído Johnson inerente aos circuitos resistivos complementares da cadeia de medição (VARGAS, 1996; SHERWIN, 1995).

4.4 Modelos elétricos das interligações de instrumentos

Para que se possa quantificar a influência das interligações dos instrumentos, há necessidade de que se faça uma análise do circuito elétrico equivalente à cadeia de medição como um todo. Os modelos elétricos adotados serão baseados nos propostos para análise de incertezas em BARP (2000), BLANK (1996), CAMARANO (1993b) e FLESCHE (1999b; 1993a; 1992).

O grau de influência de cada parâmetro do modelo pode variar significativamente em função da instrumentação envolvida. Por exemplo, a corrente de fuga de uma chave usada na multiplexação de transdutores pode ser desprezada quando se multiplexam extensômetros resistivos metálicos (FLESCH, 1992). A mesma corrente passa a ter influência determinante na incerteza da medição quando se multiplexam extensômetros piezorresistivos ou termistores (CAMARANO, 1992). Da mesma forma, enquanto a resistência dos fios de ligação da alimentação é desprezível se o transdutor for um termistor, é de extrema importância se o transdutor for um extensômetro metálico (FLESCH, 1992; BLANK, 1997b).

A título de exemplificação dos modelos elétricos empregados na avaliação de incertezas e que neste trabalho serão empregados para modelar interligações entre instrumentos, aqui é apresentado o modelo de um multiplexador. Modelos análogos deverão ser empregados para todos os demais módulos das cadeias de medição do sistema de simulação a ser desenvolvido.

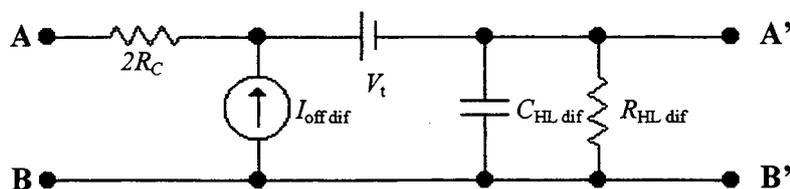
O multiplexador tem a função de permitir que módulos instrumentais sejam compartilhados por diferentes cadeias de medição. É comum sua aplicação entre transdutores e unidades de condicionamento de sinais.

As chaves mais utilizadas em instrumentação são as dos tipos: relé e semicondutora (FET e CMOS). O relé é um componente eletromecânico cujos contatos são comutados pela energização de uma bobina. As chaves semicondutoras são compostas por componentes semicondutores cuja condição de condução ou não-condução é controlada por um sinal de polarização. As chaves do tipo relé são mais lentas do que as do tipo semicondutor. Isso se deve à inércia, própria da construção dos relés. Os relés têm também vida muito mais curta. Porém eles possuem as vantagens de ter baixa resistência de contato, pequena corrente de fuga e de poder trabalhar sob muito mais alta tensão de modo comum.

Os multiplexadores mais típicos têm as configurações de chaveamento de um contato, dois contatos (diferencial entre *high* e *low*), três contatos (*high*, *low* e *guard*), quatro contatos e seis contatos (para transdutores que requerem alimentação, configurados em ponte, com realimentação). Podem estar associados a circuitos especiais para determinados tipos de transdutores. Por exemplo: complementos de ponte para medições com extensômetros de resistência; termistor para medição da temperatura de referência em medições com termopares (KEITHLEY, 1997; HEWLETT-PACKARD, 1999; NATIONAL, 2000).

Para qualquer arquitetura de chaveamento do tipo relé pode ser empregado o modelo elétrico equivalente mostrado na figura 4.5. (KEITHLEY, 1997; FLESCH, 1992; BLANK, 1996). Através de consulta bibliográfica, foram obtidas as faixas de valores dos

parâmetros típicos de multiplexadores que empregam chaves dos tipos relé e semicondutora, conforme apresentado na tabela 4.1 (BLANK, 1996; KEITHLEY, 1997; HEWLETT-PACKARD, 1999; NATIONAL, 2000; FLESCHE, 1992).



Legenda:

- R_C – resistência de contato fechado de um canal;
- I_{off} – corrente de *offset* (fuga) equivalente a um canal;
- V_t – tensão de *offset* (termelétrica) de um canal;
- C_{HL} – capacitância em paralelo equivalente a um canal;
- R_{HL} – resistência em paralelo equivalente a um canal;
- N – número de canais de um módulo de chaveamento.

$$I_{off\ dif} = I_{off} \cdot (N + 1)$$

$$R_{HL\ dif} = \frac{R_{HL}}{(N + 1)}$$

$$C_{HL\ dif} = C_{HL} \cdot (N + 1)$$

Figura 4.5 – Modelo elétrico equivalente para arquiteturas de chaveamento com relés.

Tabela 4.1 – Valores típicos de parâmetros de chaves dos tipos relé e semicondutora.

Parâmetro	Faixas de valores típicos	
	Chave relé	Chave semicondutora
N	4 a 8	4 a 16
R_C	(0,1 a 100) Ω	(50 a 3100) Ω
I_{off}	1 pA a 1 μ A	50 pA a 65 nA, de (0 a 28) $^{\circ}$ C 770 nA, de (28 a 55) $^{\circ}$ C
V_{off}	(1 a 50) μ V	(3 a 25) μ V, de (0 a 28) $^{\circ}$ C 250 μ V, de (28 a 55) $^{\circ}$ C
C_{HL}	(10 a 150) pF	(25 a 200) pF
R_{HL}	(10^6 a 10^{12}) Ω	(10^8 a 10^{11}) Ω
<i>crosstalk</i>	(20 a 80) dB	(20 a 100) dB

Na seqüência são traçados comentários acerca dos principais parâmetros característicos dos multiplexadores. Isso é feito com objetivo de destacar as características principais do modelo elétrico equivalente, quando esse é empregado na metrologia.

a) Resistência de contato

A condição que corresponde à chave conduzindo é a que mais interessa para análise da influência da chave sobre o sinal de medição. O valor de resistência é mais pronunciado em chaves semicondutoras, podendo atingir valores superiores 3 k Ω . Além disso, em comparação aos relés, nessas chaves a resistência de contato varia de forma muito significativa em função da tensão de alimentação e da temperatura.

A influência da resistência de contato fechado sobre o sinal de medição pode se manifestar de três formas principais:

- efeito divisor de tensão;
- tensão provocada pelo produto da resistência pelas correntes do circuito;
- tensão provocada pelo produto da resistência pela corrente de fuga da própria chave.

b) Corrente de *offset*

As chaves apresentam correntes de *offset* (ou correntes de fuga), decorrentes de não-idealidades do circuito de controle da comutação. As correntes de fuga podem ter grande influência sobre o sinal de medição, especialmente se ao sinal de medição estiveram associadas pequenas correntes ou altas resistências (BLANK, 1996).

c) Tensão de *offset*

As tensões de *offset* (ou tensões termelétricas) ocorrem principalmente devido à junção de diferentes metais e à presença de gradientes de temperatura. A tensão termelétrica corresponde a uma tensão adicionada ao sinal de medição, podendo nele interferir significativamente, já que os sinais de medição geralmente têm pequena amplitude. Por exemplo, a sensibilidade inerente a uma junção de cobre com óxido de cobre é quase vinte vezes maior do que a nominal de um termopar tipo J (ferro-constantan) e quase duzentas vezes maior do que a nominal de um tipo S (platina/platina-ródio) (KEITHLEY, 1997).

d) Resistência em paralelo

A resistência em paralelo provoca redução da resistência equivalente vista por módulos que estejam interconectados através da chave. Sua influência no sinal de medição

pode ser bastante significativa em circuitos de muito alta impedância, como os que envolvem transdutores piezelétricos ou amplificadores de isolamento (BLANK, 1997a).

e) Capacitância em paralelo

A capacitância em paralelo em geral não tem influência significativa no sinal de medição já que predominam outras capacitâncias do circuito, como as inerentes aos fios de ligação.

Deve-se ressaltar que o circuito da figura 4.5 precisa ser adaptado às situações particulares que estejam sendo analisadas. É necessário, por exemplo, que o modelo espelhe a queda de tensão equivalente ao produto da corrente de fuga pela resistência de contato. Se a impedância equivalente ao módulo conectado entre os terminais A' e B' for menor, ou da mesma ordem de grandeza, que a impedância equivalente ao módulo conectado entre os terminais A e B, a resistência de contato deverá ser colocada á direita da fonte de corrente do modelo.

Nas simulações para análise de incertezas, os ajustes têm sido feitos no momento da montagem do modelo global da cadeia de medição (FLESCH, 1993a; BLANK, 1997b). No caso do sistema de simulação proposto, as adaptações precisam ser automáticas, transparentes para o usuário.

4.5 Interligações usuais em instrumentação de medição

A literatura ainda dedica muito pouco espaço à análise metrológica da interligação de módulos instrumentais. A maioria das considerações feitas neste texto é baseada em experiência própria.

Geralmente o número de variáveis é de tal forma grande que somente através da análise do modelo completo da cadeia de medição é possível determinar quais parâmetros influenciam de forma mais significativa o sinal de medição.

No sistema de simulação deve ser considerado, como acontece na prática, que os módulos são interligados por fios. Os fios de ligação influenciam o comportamento da cadeia de medição em maior ou menor grau, dependendo das características elétricas dos fios e dos módulos que estão sendo interligados. Na análise de incertezas é usual que um fio seja modelado por uma resistência, função do material, do comprimento e da área da secção

transversal do fio (WANDEL, 1998). Em sistemas nos quais a frequência é elevada (acima de 1 kHz), há necessidade de se considerar a capacitância em paralelo entre fios de ligação.

Para circuitos em que sinais de medição e a alimentação de transdutores compartilham um mesmo cabo, ou fios fisicamente próximos, há necessidade de se considerar o efeito da indutância mútua. O efeito da indutância própria dos fios, no entanto, só é considerável em frequências bem mais elevadas, por exemplo, acima de 100 kHz. Tal frequência está bem acima da usual em instrumentação de medição de grandezas mecânicas.

As seguintes interligações são as mais frequentemente encontradas em instrumentação de medição. As considerações feitas dizem respeito ao quanto são significativas tais interligações na avaliação de incertezas.

a) Alimentação de transdutores

O transdutor que requer alimentação precisa ser alimentado para que forneça um sinal no domínio da energia elétrica. Na interligação de transdutores a fontes, o efeito da relação de impedâncias pode ser bastante significativo. Fios de ligação com uma dezena de metros de comprimento podem facilmente atingir 1Ω . Isso corresponde, para transdutores extensométricos de 120Ω configurados em ponte de Wheatstone, a uma queda na sensibilidade da ordem de 1% (FLESCH, 1992). A alteração da resistência dos fios em função da temperatura pode ser altamente significativa se comparada à variação da resistência observável em termorresistores e em extensômetros de resistência.

Se a alimentação é feita com sinal alternado, seja em corrente ou em tensão, parâmetros adicionais precisam ser considerados; por exemplo capacitâncias.

b) Multiplexação da alimentação de transdutores.

O efeito da multiplexação sobre o sinal de medição depende muito do tipo de chave e da impedância do transdutor. Chaves semicondutoras podem ser inviáveis até mesmo para multiplexar a alimentação de transdutores configurados em ponte completa, a menos que procedimentos ou circuitos especiais sejam adotados (FLESCH, 1992). Tendo alta resistência e baixa estabilidade de valor, podem mascarar integralmente o sinal de medição, induzindo erros gigantescos.

Na multiplexação de braços de pontes e na interligação de transdutores resistivos a ohmímetros, mesmo chaves tipo relé terão influência muito significativa.

Determinar quais parâmetros são críticos e quantificar as respectivas influências exige análise integral do circuito. Por exemplo, na multiplexação de braços de ponte, a maior

influência é da resistência; na de transdutores resistivos ligados a ohmímetros, em geral é da corrente de fuga (FLESCHE, 1993a; KEITHLEY, 1997).

c) Condicionamento de sinais de transdutores

É normal que os sinais de medição provenientes dos transdutores tenham amplitude bastante pequena. Tanto circuitos de conversão de transdutores que requerem alimentação quanto muitos dos transdutores auto-geradores fornecem tensões na faixa dos microvolts ou, no máximo, de milivolts. Dessa forma, as não-idealidades do condicionamento de sinais, por exemplo tensões de *offset* e de ruídos, podem alterar de forma significativa o sinal de medição.

Se o sinal que entra no módulo de condicionamento é oriundo de circuito de alta impedância, tais como termistores e extensômetros piezorresistivos, o efeito das correntes de *offset* e de ruído é significativo.

Se o sinal de medição tem frequência acima de poucos quilohertz, a relação de impedâncias pode provocar atenuação significativa dos sinais de medição. Isso se deve ao fato de que a impedância de entrada de condicionadores decresce de forma acentuada com o aumento da frequência.

Para os circuitos convencionais de ponte de Wheatstone e para o *NASA's Anderson loop* (ANDERSON, 1998c), a tensão de modo comum é extremamente grande se comparada à tensão diferencial. Também transdutores auto-geradores podem apresentar tensão de modo comum elevada devido a interferências, em especial da rede de 60 Hz. Então, outra não-idealidade importante é a razão de rejeição de modo comum do condicionador de sinais.

d) Multiplexação de sinais de transdutores

A multiplexação de sinais de transdutores é geralmente responsável pela maior parcela na composição da incerteza devida à cadeia de medição.

As resistências das chaves são da ordem de grandeza das resistências de transdutores resistivos. Também as variações da resistência entre sucessivos chaveamentos e as variações da resistência com a temperatura podem ser maiores do que as observadas nos transdutores.

A tensão termelétrica da chave é da ordem de grandeza da tensão fornecida por circuitos de ponte e por termopares.

O *crosstalk* pode ter influência muito significativa, já que os sinais presentes em canais adjacentes podem, na prática, ser de valores muito superiores ao do sinal de medição.

As correntes de fuga, de valores aparentemente desprezíveis, passam a ter influência extremamente grande quando as resistências das chaves ou a impedância do transdutor são altas.

e) Indicação de sinais amplificados e multiplexação de sinais amplificados

Nenhuma das duas é crítica em instrumentação de medição. No entanto, pelo caráter didático que se pretende que o sistema de simulação apresente, tais situações estão previstas. Dessa forma, o sistema de simulação poderá mostrar funções que o condicionador de sinais tem numa cadeia de medição e que muitas vezes são desconhecidas pelos usuários, como, por exemplo, a função de compatibilizar impedâncias.

5 Estrutura do sistema de simulação

5.1 Diretrizes para o desenvolvimento do sistema

Entende-se por sistema de simulação o conjunto formado por modelos de instrumentos, ambientes de simulação e recursos para desenvolvimento de modelos.

O sistema de simulação objeto deste trabalho é um conjunto de softwares e de procedimentos destinados à realização de atividades dos tipos:

- obtenção de infra-estrutura laboratorial – criação de modelos;
- aplicação da infra-estrutura – uso dos recursos de simulação.

A obtenção da infra-estrutura é vista dentro do sistema de simulação como uma atividade meio. A maioria dos usuários estará interessada unicamente no uso dos recursos que permitam simular procedimentos experimentais.

5.1.1 Estabelecimento dos requisitos básicos

Estabeleceu-se como meta que o sistema se comporte como um laboratório virtual. Nele deverão existir instrumentos modelados e ambientes que permitam empregar os modelos para simular experimentos reais típicos da instrumentação de medição.

A relação entre instrumento e cadeia de medição é a mesma estabelecida por DE NEGRI (1996), para “elemento” e “sistema”. Consta em DE NEGRI (1996, p.24-25): “Os termos elemento e sistema são relativos. Um elemento também pode ser considerado como um sistema, e um sistema pode ser considerado como um elemento dentro de um sistema maior. Os sistemas são hierárquicos”. Por analogia, no sistema de simulação, cada cadeia de medição constituída poderá ser considerada como um novo instrumento, passível de ser empregado na composição de outras cadeias de medição.

O sistema deve possibilitar a simulação do comportamento de cada cadeia de medição levando em consideração os seguintes itens:

a) Comportamento individual dos módulos nas condições de referência, levando em conta as características metrológicas básicas descritas no item 4.1

O sistema deve permitir analisar, para cada um dos instrumentos e demais módulos integrantes da cadeia de medição:

- característica de resposta nominal;
- desvios do comportamento ideal, devidos a fatores sistemáticos;
- desvios do comportamento ideal, devidos a fatores aleatórios;
- comportamento dinâmico.

b) Interligação dos módulos

Devem ser contemplados os efeitos descritos no item 4.3, acrescidos de outros considerados significativos em condições particulares. Como referência geral, para todas as cadeias de medição, deve haver condições de se realizar experimentos considerando os seguintes efeitos:

- aquecimento de transdutores em função da alimentação;
- impedâncias atuando como divisores de tensão;
- tensões de *offset* e de ruído;
- impedâncias combinadas com as correntes espúrias de cada um dos módulos, incluindo aí as correntes de ruído inerentes a cada um dos módulos, as correntes de fuga de chaves, e as correntes de bias e de *offset* de amplificadores.

c) Grandezas de influência

O sistema deve disponibilizar recursos para simular o efeito causado sobre a cadeia de medição pelas respectivas grandezas de influência mais típicas.

O sistema de simulação se restringe à cadeia de medição. Não foi prevista a simulação das influências adicionais decorrentes da iteração, que ocorre nos instrumentos reais, com o usuário e com a grandeza a medir. Não foi prevista, por exemplo, a simulação do efeito de paralaxe. Baseado em TOMITA (1994), assume-se que numa cadeia de medição formada a partir de instrumentos modulares, muitas outras fontes de incerteza são bem mais significativas. Além disso, mostradores digitais são muito mais usuais do que os analógicos. A interação com a grandeza a medir é muito particular de cada processo de medição, extrapolando o objetivo deste trabalho.

5.1.2 Aspectos cognitivos, ergonômicos e de utilização considerados

A simulação numérica envolve modelos matemáticos e lógicos que descrevem o comportamento de um sistema real. Esse tipo de avaliação pode juntar as facilidades da análise teórica com a potencialidade dos resultados obtidos com experimentação (DOE, 1998).

No entanto a simulação pode conduzir a resultados enganosos. Resumindo análise feita por LAW (2000), são os seguintes os principais erros cometidos no desenvolvimento de um sistema de simulação:

- a) falta de definição dos objetivos;
- b) aplicação inadequada da estatística:
 - escolha equivocada de distribuições;
 - substituição de uma distribuição por sua média;
- c) falta de conhecimento técnico acerca do objeto da simulação;
- d) modelos inadequados, com detalhes insuficientes ou em número excessivo;
- e) excesso de preocupação com animações em detrimento do conteúdo técnico.

Cada item da relação acima foi permanentemente considerado ao longo de todo o trabalho. Em especial: o item a, na fase de planejamento; os itens b, c e d, nas fases de estruturação do sistema e desenvolvimento dos modelos; o item e, durante a implementação dos ambientes de simulação.

O treinamento de pessoal na área de metrologia deverá ser uma das principais aplicações do sistema de simulação. Em função disso almeja-se que ele seja capaz de, num treinamento, facilitar aos usuários o alcance dos seguintes objetivos cognitivos estabelecidos em DOE (1997 p. 11-15):

- **Conhecimento:** define a habilidade para recordar fatos importantes relativos ao tema.
- **Compreensão:** habilidade para compreender um processo, trabalhando, por exemplo, com indicações, gráficos, procedimentos e outras informações que caracterizam o processo.
- **Aplicação:** capacidade de usar informações referentes ao conhecimento e à compreensão para resolver problemas rotineiros reais.
- **Análise:** capacidade para separar uma informação em suas partes componentes para revelar sua organização, relação e eventuais imperfeições.

- Síntese: capacidade para juntar partes em um conjunto para criar novas soluções, métodos ou procedimentos.
- Avaliação: capacidade mental necessária para julgar o valor de bens materiais e de informações e para manter efetivo controle da situação em situações dinâmicas, incertas e de emergência.

Tais objetivos serão alcançados se o sistema de simulação se comportar de forma aproximada a um laboratório real direcionado à experimentação com cadeias de medição. Sintetizando de forma direcionada à aplicação os aspectos cognitivos, ergonômicos e de utilidade do sistema, definidos em FOWLER (1999), as principais diretrizes estabelecidas, por ordem de prioridade foram:

- a simulação deve representar com mínima incerteza o comportamento metrológico de uma cadeia de medição;
- o sistema deve ser muito facilmente aplicável por usuários que tenham mínimos conhecimentos da estrutura de uma cadeia de medição;
- a forma de configuração das cadeias de medição simuladas deve lembrar ao máximo a forma da configuração física de cadeias equivalentes reais, o que implica associação biunívoca entre elementos físicos e modelos.

5.2 Estrutura proposta para o sistema de simulação

Por uma questão de clareza, julgou-se adequado apresentar de forma simultânea os softwares escolhidos e a estrutura operacional do sistema. Inicialmente é dada uma visão geral da estrutura operacional. Na seqüência é feita uma introdução aos softwares empregados. Finalizando é apresentada a estrutura física do sistema inter-relacionando módulos operacionais e softwares.

5.2.1 Estrutura operacional do sistema

A figura 5.1 apresenta esquematicamente a estrutura operacional baseada nas fases de utilização do sistema de simulação proposto.

A estrutura física do sistema foi estabelecida em função da relação entre usuários do sistema e modelos dos instrumentos.

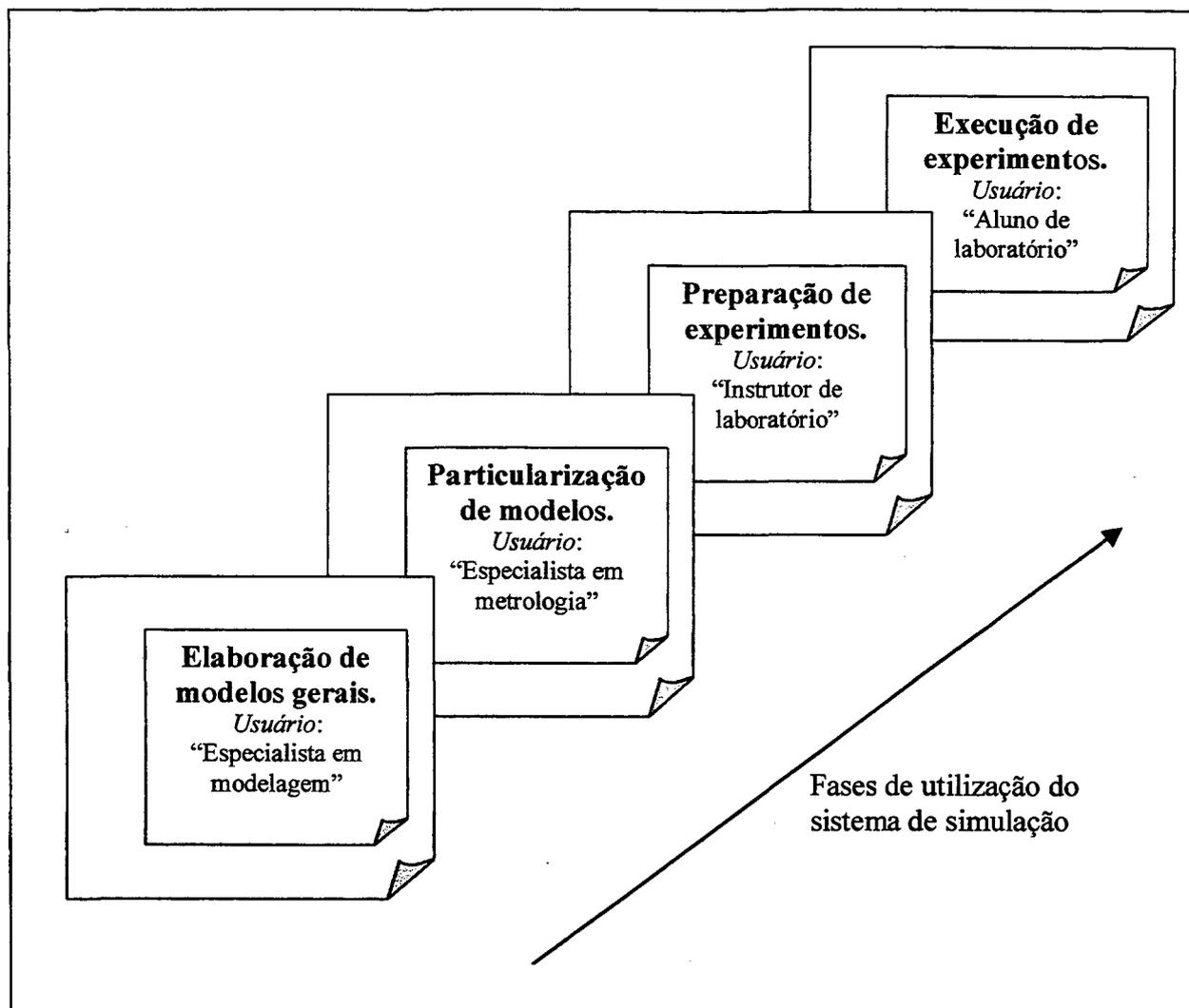


Figura 5.1 – Estrutura operacional do sistema de simulação.

Foram definidas quatro classes de usuários e duas classes de modelos de instrumentos.

a) Classes de usuários

A estrutura proposta para o protótipo do sistema de simulação é baseada na divisão dos potenciais usuários em quatro classes:

- usuário especialista em modelagem;
- usuário especialista em metrologia;
- usuário instrutor de laboratório;
- usuário aluno de laboratório.

No âmbito deste trabalho foram assumidas as seguintes definições:

- especialista em modelagem: usuário capaz de implementar modelos gerais de instrumentos. Para tanto ele deve ter conhecimentos suficientes de metrologia, de instrumentação eletrônica, de software (Visual Basic ou Labview) e de modelagem;
- especialista em metrologia: usuário que é capaz de particularizar modelos gerais já implementados. Esse usuário deve ser capaz de interpretar especificações metrológicas de instrumentos eletrônicos e ter conhecimentos superficiais de software (Visual Basic ou Labview);
- instrutor de laboratório: usuário capaz de planejar e montar experimentos com enfoque metrológico, empregando modelos já particularizados, usando um dos ambientes de simulação que estarão disponíveis;
- aluno de laboratório: usuário que empregará o sistema de simulação para realizar experimentos preestabelecidos ou configurados de acordo com seu próprio interesse.

b) Classes de modelos

O modelo de um instrumento, dentro do sistema de simulação, poder ser:

- modelo geral de um tipo de instrumento;
- modelo particularizado.

Entende-se aqui por modelo geral aquele que vale para um determinado tipo de instrumento sem, no entanto, terem sido atribuídos valores aos seus parâmetros característicos – por exemplo: modelo de termistor. Ao se atribuir valores aos parâmetros característicos se estará particularizando o modelo para que se comporte como um dado instrumento, que pode ser um instrumento fictício ou um instrumento do mercado – por exemplo: modelo do termistor 44077, do fabricante Omega (OMEGA, 1995).

Três situações estão previstas na obtenção de modelos particularizados:

- parametrização com valores típicos de um tipo de instrumento;
- parametrização com valores típicos de um lote de produção de um tipo de instrumento;
- parametrização com valores de um instrumento particular.

5.2.2 Softwares empregados

A abrangência multidisciplinar atribuída a um “sistema” por DE NEGRI (1996) pode perfeitamente ser aplicada ao desenvolvimento proposto. Nesse caso estão presentes todos os elementos que potencializam o emprego da programação orientada a objetos. A associação num único modelo, do elemento físico e do respectivo comportamento metrológico permite estabelecer estreita e facilmente perceptível ligação entre o modelo e o elemento físico modelado. Labview e Visual Basic são linguagens adequadas para o desenvolvimento de aplicativos dentro desse enfoque.

O Labview é o software mais empregado mundialmente para aquisição de sinais (NATIONAL, 2000). Embora tenha sido concebido como software de aquisição de sinais baseado no conceito de instrumentos virtuais (SPOELDER, 1999; THUCHARD, 1999; CRISTALDI, 1999), é hoje um poderoso ambiente de programação. A programação pode ser integralmente visual-gráfica, baseada no encadeamento de blocos funcionais.

O Labview incorpora uma vasta biblioteca matemática e estatística (CHUGANI, 1996). Sua facilidade de programação e possibilidade de integração com outros ambientes, como o Matlab, e com linguagens de programação, como C++ e Visual Basic, o tornam atrativo para aplicação geral na engenharia, especialmente quando relacionado à metrologia e ao controle (NATIONAL, 1998; PARTHASARATHY, 1998).

No ambiente Labview, a interação com o usuário é feita através de duas telas gráficas principais: o painel frontal e o diagrama de blocos. Elementos gráficos com funções preestabelecidas estão contidos em paletas. Três são as principais: “*controls*”, com os elementos incorporáveis ao painel frontal; “*functions*” e “*tools*”, associadas ao diagrama de blocos, contendo respectivamente funções pré-programadas e recursos básicos de edição.

No painel frontal é configurada a interface com o usuário, através do vídeo. Essa equivale, dentro do conceito de instrumentos virtuais, aos painéis dos instrumentos.

No diagrama de blocos é feito o encadeamento de blocos pré-concebidos, que correspondem a subrotinas, com funções lógicas, matemáticas, de controle de fluxo, de acesso a hardware, e todas as demais funções que equivalem a linhas de código na programação convencional.

Os aplicativos Labview têm extensão .vi. Eles exigem o ambiente Labview para que sejam editados ou executados. Há, no entanto, possibilidade de se gerar aplicativos executáveis.

A disponibilidade de recursos pré-programados, aliada a sua forma gráfica de programação, torna o ambiente Labview muito adequado para implementação de protótipos de sistemas de automação da medição (STEGAWSKI, 1998). Tornam também o Labview muito atrativo para o desenvolvimento de protótipos de sistemas de simulação, já que o próprio Labview, com um mínimo de adaptação, pode ser empregado como ambiente de simulação.

O Labview apresenta duas desvantagens técnicas em relação ao Visual Basic, para aplicação neste trabalho: maiores limitações operacionais impostas a programas executáveis gerados a partir do Labview e dificuldade do Labview de lidar com a programação de recursividades. Outra desvantagem é o menor número de usuários.

As duas limitações técnicas apontadas são comentadas a seguir:

a) Limitação do programa executável gerado pelo Labview

No Labview o programa propriamente dito é definido pelo diagrama de blocos. O painel frontal é apenas uma interface opcional com o operador para entrada e saída de informações. Dessa forma ao se empregar o Labview como ambiente de simulação, a montagem de experimentos deve ser feita no diagrama de blocos. Essa forma de montagem dos experimentos é semelhante à empregada por simuladores de circuitos eletrônicos disponíveis no mercado, como Electronics Workbench EDA (WORKBENCH, 1998) e Pspice (AL-HASHIMI, 1995). No caso do Labview há possibilidade adicional de se fazer uso paralelo do painel frontal para simular a interação do usuário com painéis de instrumentos.

O problema está nos programas executáveis gerados a partir do Labview. Nesses não há como editar o diagrama de blocos e, então, a simulação fica restrita às condições que foram previamente programadas, com grandes limitações para alteração de instrumentos e demais elementos e condições dos experimentos.

Uma possibilidade real para a aplicação como ambiente de simulação é o uso do Labview na forma de programa de demonstração. Tal programa é distribuído em larga escala pela National Instruments. Ele tem capacidade integral de processamento, sendo limitado no tempo em que cada programa pode permanecer em execução. Observe-se que essa limitação é aplicável somente ao programa que estiver sendo executado e não ao Labview como um todo. Dessa forma o usuário não estará limitado em tempo para montar experimentos sobre o ambiente de simulação mas, somente, para executar a simulação. Esse tempo de processamento é da ordem de dez minutos, perfeitamente adequado para simulação, mesmo

que várias cadeias sejam simuladas simultaneamente no mesmo ambiente e que o número de pontos de simulação seja grande.

b) Dificuldade de lidar com recursividades

O Labview não lida adequadamente com interações recursivas entre rotinas. Isso se deve à forma extremamente seqüencial com que seus programas são executados. Tal característica por vezes facilita a programação de aplicativos voltados à aquisição de sinais de instrumentos reais. No Labview o programa é feito seguindo-se uma seqüência de ações de forma muito inteligível para o usuário com experiência em instrumentação, na qual blocos pré-programados são associados a módulos físicos ou a operações de processamento.

No entanto, quando iterações recursivas entre tais blocos se fazem necessárias, deve-se recorrer a artificios. Saídas usuais, nem sempre plenamente satisfatórias, são o uso de estruturas de laço contendo os blocos envolvidos ou o uso de variáveis globais.

A necessidade de emprego de tais recursos aparece, por exemplo, na montagem de um programa para simular uma cadeia de medição a partir dos modelos previamente desenvolvidos dos instrumentos que a compõem. O efeito das interligações, como, por exemplo, o da impedância, é função de parâmetros característicos dos dois módulos envolvidos. Dessa forma, o sinal que será entregue pelo primeiro módulo não pode ser determinado somente pelas características incorporadas ao seu próprio modelo. Há necessidade de se considerar as características do modelo do segundo módulo. No entanto, na concepção estabelecida para o sistema de simulação, os modelos dos dois instrumentos são independentes. Seguindo a filosofia de programação em Labview, cada instrumento corresponderá a um bloco (sub-rotina), salvo com uma extensão .vi.

O procedimento normal de desenvolvimento de programas no Labview corresponde à interligação, no diagrama de blocos, das duas sub-rotinas. A montagem do programa é visual e a sua execução é seqüencial, obedecendo à ordem de montagem na tela, da esquerda para a direita. Dessa forma o bloco à esquerda não pode dispor de informações dos blocos à sua direita, a menos que ambos estejam dentro de uma estrutura seqüencial. Mesmo esse caso exige que o segundo bloco seja executado pelo menos uma vez para repassar informações para o primeiro.

Uma outra forma de contornar essa limitação do Labview é o uso de variáveis globais. Nesse caso as variáveis deveriam estar previstas nos blocos e serem definidas no programa que incorpora tais blocos, o que dificulta sobremaneira o desenvolvimento e a utilização do sistema de simulação.

Para o desenvolvimento do sistema de simulação, a maneira encontrada para contornar a limitação, da forma mais transparente para os futuros usuários, foi a incorporação de módulos de análise de circuitos aos modelos dos instrumentos. Esses módulos estão presentes nos modelos de circuitos de entrada de instrumentos. Recebem informações dos modelos encadeados na composição das cadeias de medição que estejam sendo simuladas e processam os efeitos das interligações.

Há uma grande variedade de configurações que podem ser encontradas nas cadeia de medição. A adoção de um módulo único de análise de circuitos para qualquer cadeia de medição levaria ao desenvolvimento de um simulador de circuitos elétricos bastante complexo, e dificilmente seria transparente para o usuário. Para viabilizar a adoção de solução simples para o módulo de análise de circuitos, as cadeias de medição foram divididas em segmentos de cadeias. Cada segmento de cadeia corresponde aos caminhos percorridos por sinais, entre dois ou mais módulos justapostos, até alcançarem um módulo cujos circuitos de saída tenham modelos equivalentes isolados eletricamente dos respectivos circuitos de entrada. Dessa forma foi possível resolver o problema incorporando-se pequena capacidade de tratamento de circuitos elétricos a módulos específicos de análise de circuitos. Tais módulos são específicos de cada segmento da cadeia de medição. A estrutura proposta para os módulos de análise de circuitos está detalhada no item 6.4.

5.2.3 Integração dos softwares

Propõe-se a associação de recursos do Labview e do Visual Basic. São previstas as seguintes atribuições:

Labview:

- desenvolvimento e testes dos modelos dos instrumentos;
- implementação de um ambiente de simulação que rode sobre o próprio Labview;
- geração de programas executáveis para simulação de experimentos.

Visual Basic:

- desenvolvimento de um ambiente específico para a simulação de cadeias de medição – o usuário poderá montar uma simulação empregando um painel especialmente desenvolvido para essa finalidade;
- conversão dos modelos desenvolvidos em Labview em modelos utilizáveis no ambiente de simulação desenvolvido em Visual Basic.

A vantagem de se desenvolver um ambiente de simulação em Visual Basic é que ele poderá ser um programa executável com muito maior flexibilidade operacional do que os executáveis gerados através do Labview.

Um pacote adquirido da National Instruments, intitulado ComponentWorks, traz um conjunto de controles ActiveX (PARTHASARATHY, 1998) para incorporar a programas em Visual Basic funções equivalentes às disponíveis no Labview. Tais funções correspondem às disponíveis nos paletes dos tipos “*controls*” e “*functions*”, o que permite o desenvolvimento de aplicações em Visual Basic usando as facilidades de interação com o usuário, de interface com instrumentos e de processamento matemático e estatístico disponíveis no Labview.

5.2.4 Descrição dos módulos do sistema

A figura 5.2 apresenta os módulos previstos para o sistema de simulação, identificando com (*) os módulos que foram desenvolvidos neste trabalho. Aqui todos os módulos foram desenvolvidos em Labview. Prevê-se, no entanto, que um sistema de simulação equivalente possa ser desenvolvido em Visual Basic (figura 5.2). Dessa forma será possível associar as facilidades de desenvolvimento e de testes do Labview, com o potencial que poderá ser dado a um ambiente de simulação configurado com um aplicativo Visual Basic.

Prevê-se que os usuários do sistema tenham disponíveis três ambientes de software: Labview, Visual Basic e programas executáveis gerados a partir de um dos dois primeiros.

Descrição dos módulos do sistema de simulação (figura 5.2):

a) Na fase “elaboração de modelos gerais”: **módulo LV1**

- Utilidade: desenvolvimento de modelos gerais de instrumentos (atividade de obtenção de infra-estrutura).
- Ambiente de execução: Labview.
- Usuário: “especialista em modelagem” (ver definição, item 5.2.1.a).
- Produto originário do módulo: modelos gerais de instrumentos, na forma de arquivos do Labview (.vi).

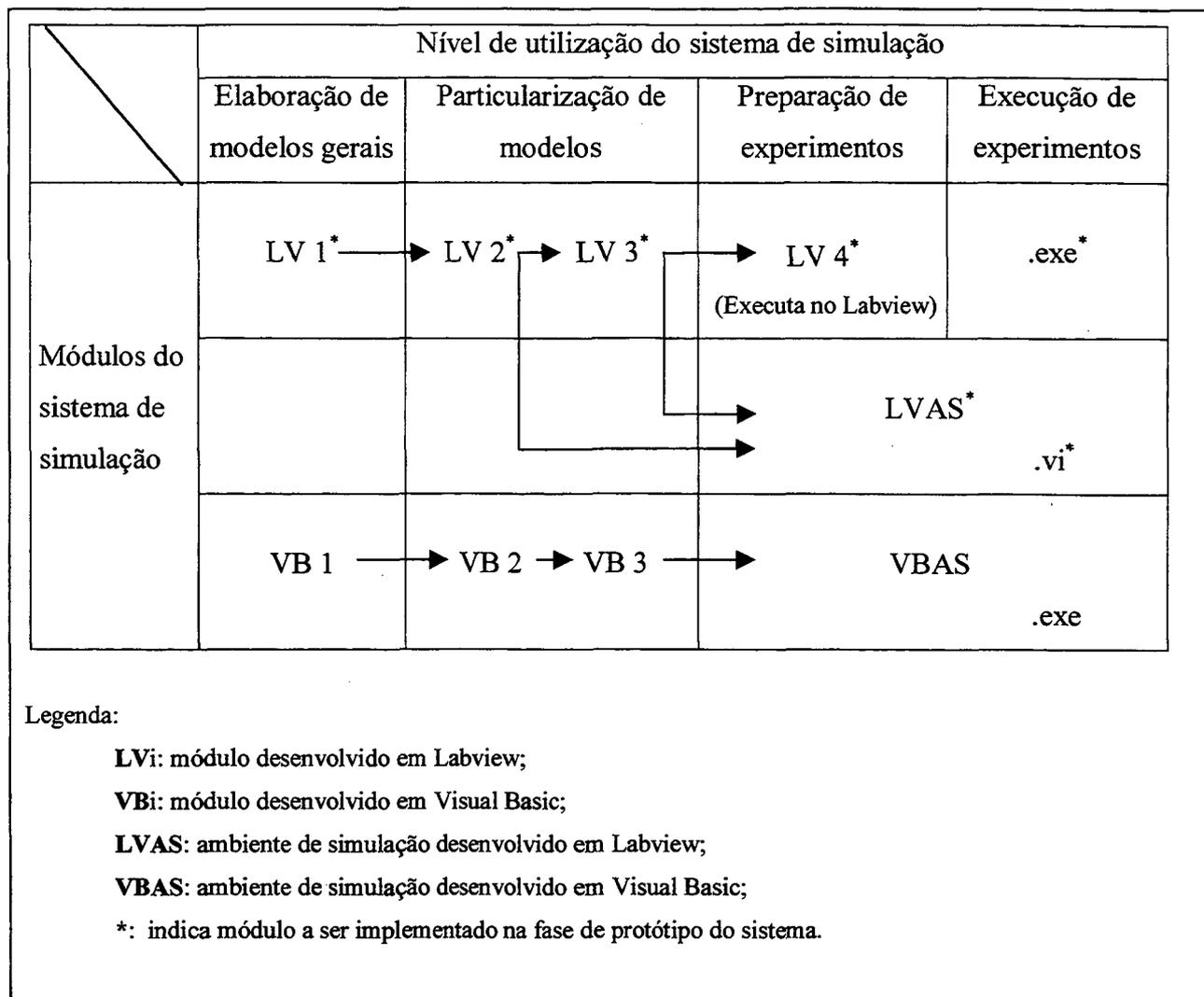


Figura 5.2 – Estrutura física do sistema de simulação.

b) Na fase “particularização de modelos”:

- **módulo LV2**

- Utilidade: parametrização de modelos gerais de instrumentos – associação de modelos gerais resultantes do módulo LV1 a instrumentos reais do mercado, ou a instrumentos fictícios com características próprias (atividade de obtenção de infraestrutura).
- Ambiente de execução: Labview.
- Usuário: “especialista em metrologia” (ver definição, item 5.2.1.a).
- Produto originário do módulo: modelos particularizados de instrumentos, na forma de arquivos do Labview (.vi).

- **módulo LV3**

- Utilidade: implementação de cadeias de medição a partir dos modelos particularizados resultantes do módulo LV2 e transformação da cadeia em novo instrumento (atividade de obtenção de infra-estrutura).
- Ambiente de execução: Labview.
- Usuário: “especialista em metrologia” (ver definição, item 5.2.1.a).
- Produto originário do módulo: modelos particularizados de instrumentos, na forma de arquivos do Labview (.vi).

c) Na fase “preparação de experimentos”: **módulo LV4**

- Utilidade: desenvolvimento de experimentos a partir de modelos particularizados (atividade de simulação).
- Ambiente de execução: Labview.
- Usuário: “instrutor de laboratório” (ver definição, item 5.2.1.a).
- Produto originário do módulo: arquivo executável (.exe) gerado a partir do Labview.

O módulo LVAS (ambiente de simulação desenvolvido em Labview) corresponde à utilização do próprio Labview como ambiente de simulação. É bastante simples o desenvolvimento de um programa para permitir que o Labview seja usado com essa finalidade. Nesse caso, além de muito maior flexibilidade na execução da simulação, estarão disponíveis todos os recursos de processamento do Labview. Prevê-se para o módulo LVAS as seguintes características:

- Utilidade: realização de simulações empregando modelos particularizados de instrumentos (atividade de simulação).
- Ambiente de execução: Labview.
- Usuário: “instrutor de laboratório” ou “aluno de laboratório” (ver definição, item 5.2.1.a).
- Produto originário do módulo: simulação realizada.

O módulo VBAS (ambiente de simulação desenvolvido em Visual Basic) poderá ser utilizado nas fases de “preparação de experimentos” e “execução de experimentos”. Ele terá as seguintes características:

- Utilidade: realização de simulações empregando modelos particularizados de instrumentos (atividade de simulação).
- Ambiente de execução: programa executável (.exe) gerado no Visual Basic.
- Usuário: “instrutor de laboratório” ou “aluno de laboratório” (ver definição, item 5.2.1.a).
- Produto originário do módulo: simulação realizada.

Para o usuário o módulo VBAS será equivalente ao módulo LVAS, com a diferença de que não necessitará do Labview para realizar a simulação. Estudos relativos ao desenvolvimento desse ambiente de simulação em Visual Basic foram realizados em dissertação de mestrado em Metrologia Científica e Industrial da UFSC, orientada em paralelo à condução deste trabalho (PEZZOTTA, 2001).

Os módulos VB1, VB2 e VB3 terão características equivalentes aos módulos LV1, LV2 e LV3, respectivamente. O ambiente de execução, no entanto, será o Visual Basic juntamente com o pacote “*ComponentWorks*” (NATIONAL INSTRUMENTS, 2000).

Nos capítulos seguintes são detalhados os modelos, os ambientes e os recursos adicionais desenvolvidos em Labview. Prevê-se que o desenvolvimento dos módulos correspondentes em Visual Basic será objeto de trabalhos futuros.

6 Desenvolvimento de modelos de instrumentos

6.1 Estrutura proposta para os modelos

Sistemas compostos a partir de módulos podem apresentar interações de difícil previsão, “...exigindo o estudo de partes isoladas a fim de estabelecer o comportamento real com maior segurança. Tais sistemas são caracterizados como complexos no sentido que o todo é mais que a soma das partes, ou seja, dadas as propriedades das partes e as leis de suas interações, não é trivial inferir sobre as propriedades do todo” (DE NEGRI, 1996 p.31). Nesse sentido, procurou-se perfeito entendimento de cada uma das partes constituintes dos modelos. Sempre que possível, buscaram-se situações correlatas na análise de incertezas, na teoria de sistemas e na análise de circuitos elétricos, matérias suficientemente dominadas para que sirvam de base para a modelagem.

O sistema destina-se à simulação de cadeias de medição formadas a partir de modelos dos módulos que as compõem. Dessa forma, cada modelo deve incorporar as respectivas características relacionadas às interligações.

Além do efeito das interligações, logicamente, há necessidade de que sejam consideradas as características do instrumento que independem da forma como ele esteja configurado na cadeia de medição. Essas características formam o que foi denominado neste trabalho *comportamento individual do instrumento*. Observe-se que, naqueles casos em que um instrumento corresponde ao sistema de medição completo, não haverá interligações. Nesses casos o modelo se reduz ao comportamento individual, ficando claro que tal modelo pode ser caracterizado pelas características metrológicas básicas definidas no item 4.1.

O sistema de simulação precisa tratar satisfatoriamente os efeitos decorrentes das condições ambientais, de alimentação e outras, que juntas formam as condições de contorno que caracterizam uma situação particular de emprego da cadeia de medição. As condições de contorno atuam continuamente sobre o comportamento geral do instrumento, tendo sido modeladas de forma que atuem tanto sobre o comportamento individual quanto sobre as interligações.

A figura 6.1 mostra o esboço do modelo de um instrumento, destacando as interligações.

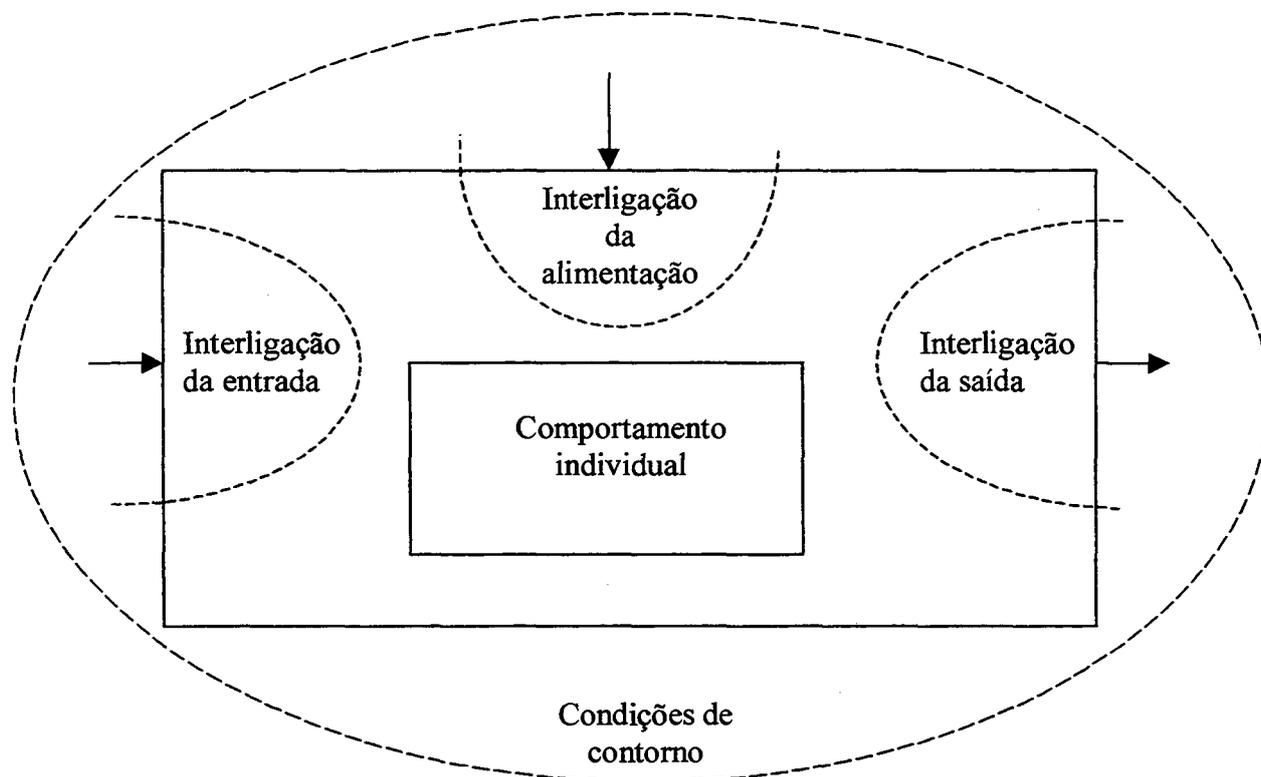


Figura 6.1 – Esboço do modelo de um instrumento.

Maiores detalhes com relação ao tratamento das condições de contorno estão apresentados no capítulo 7.

Duas formas de simular os efeitos das interligações foram analisadas:

- a) Integrar aos ambientes de simulação, externamente aos modelos, um sistema de análise que considere a disposição física das cadeias e as características dos módulos que a compõem.
- b) Incorporar módulos de análise aos próprios modelos dos instrumentos.

Na escolha da alternativa foram considerados: a complexidade do desenvolvimento e de futuras expansões; a correlação entre simulação e processo físico. Entende-se neste trabalho que a correlação será tanto maior quanto maior for o realismo na representação simultânea do comportamento e da estruturação física das cadeias de medição.

A primeira alternativa é de desenvolvimento mais complexo. Além disso, manter máxima correlação entre cadeias simulada e real implica, entre outras coisas, fluxos semelhantes de sinais de medição. Um sistema de análise das interligações externo aos modelos teria que ser executado e retornar à cadeia os valores dos sinais de medição em cada ponto considerado. Implementado em Labview isso exigiria uma estrutura de laço que teria que ser executada uma vez para calcular e outra para atualizar os sinais. Isso implicaria intensiva utilização, não recomendável, de pelo menos um dos seguintes recursos: acesso a arquivos, variáveis locais, variáveis globais.

Optou-se neste trabalho pela incorporação da análise aos próprios modelos dos instrumentos. Conseguiu-se dessa forma uma estrutura do sistema mais adequada às particularidades do Labview, além de excelente correlação entre modelos e instrumentos.

De acordo com a classificação apresentada no item 3.4, os modelos deverão ser híbridos: comportamentais e estruturais. Poderão ser eminentemente externos, sem prejuízo quanto ao alcance dos objetivos.

Observe-se que na composição física da cadeia de medição há um forte enfoque estrutural. Porém, para que os efeitos das interligações sejam modelados de forma satisfatória, há necessidade de que, também ali, o enfoque comportamental esteja presente.

Existem instrumentos compostos por mais de uma cadeia; por exemplo: multímetros e placas de aquisição de sinais com múltiplos canais. Esses foram, para efeito de simulação, partidos em cadeias individuais, cada qual caracterizada pelos módulos básicos descritos no item 4.2. Esse procedimento não implica significativa limitação, uma vez que ele é usual, tanto na análise de incertezas quanto na de circuitos elétricos. Os efeitos decorrentes de interações entre cadeias, quando significativos, devem ser incluídos nas condições de contorno, ou informados pelo usuário diretamente aos modelos, no momento da simulação.

Pontes amplificadoras, ohmímetros e demais instrumentos que, além de fazer o condicionamento do sinal de medição, fornecem alimentação para transdutores, tiveram modelagem simultânea e integrada das suas partes constituintes. Assim, numa cadeia de medição com termistor e ohmímetro a quatro fios, três módulos devem ser interligados no ambiente de simulação: o modelo do termistor; o modelo do cabo com quatro fios e o modelo completo do ohmímetro, que internamente já contempla a fonte de corrente e o voltímetro. Dessa forma conseguiu-se máxima correlação física entre modelos e sistemas reais.

A estrutura detalhada para os modelos dos instrumentos, proposta por este trabalho, está apresentada na figura 6.2.

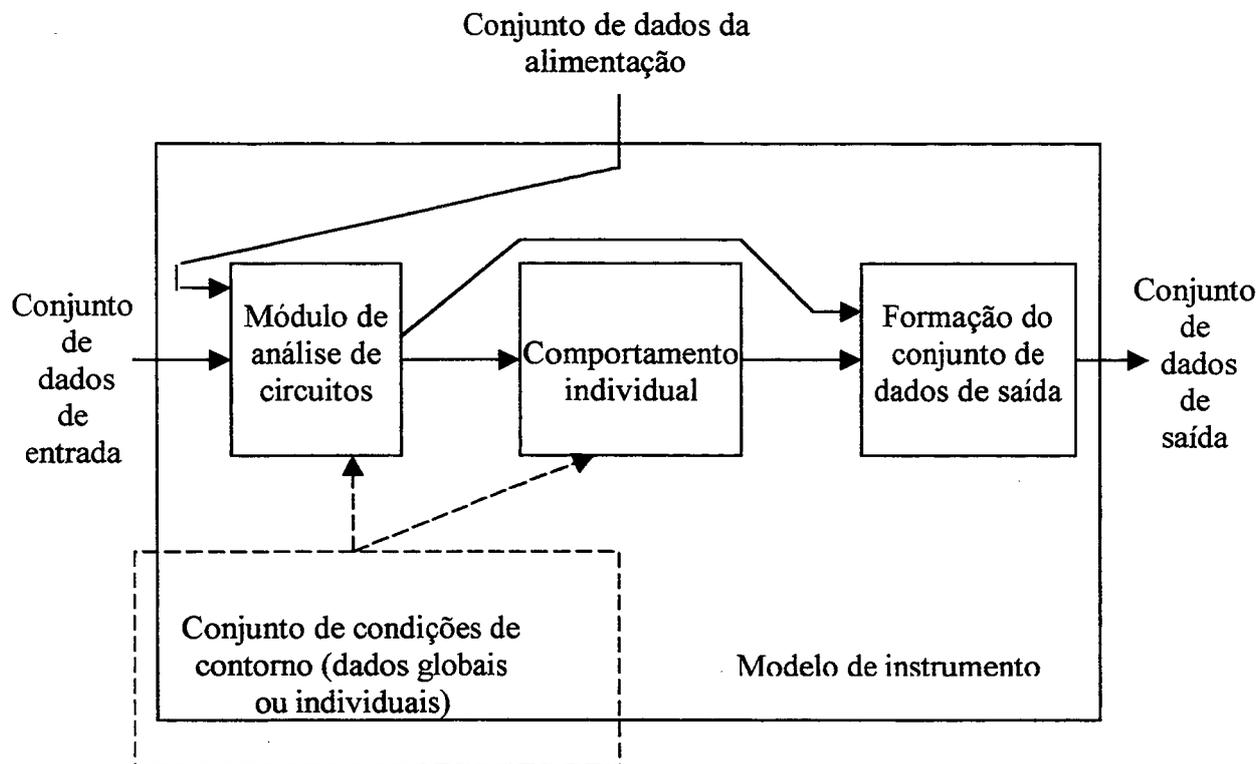


Figura 6.2 – Estrutura do modelo de um instrumento.

O modelo de um instrumento genérico tem como entradas:

a) Conjunto de dados de entrada:

- sinal de medição;
- conjunto de características dos instrumentos e dos demais módulos que precedem o instrumento considerado, na cadeia de medição.

b) Conjunto de dados da alimentação:

- sinal de alimentação;
- conjunto de características da fonte de alimentação e dos módulos que a conectam ao instrumento considerado.

- c) Conjunto de condições de contorno: dados acerca das condições ambientais e demais condições que devam ser assumidas no momento da realização de um experimento.

O processamento do conjunto global de dados de entrada, pelo modelo, resulta no conjunto de dados de saída:

- sinal de medição;
- conjunto de informações necessárias para que os efeitos das interligações sejam consideradas pelos módulos seguintes.

Assumiui-se que, para as contribuições de cada um dos os efeitos, mesmo as correlacionadas, pode-se adotar o princípio da superposição de efeitos (OPPENHEIM, 1997; GHAUSI, 1981). Assim, a cada instante de tempo, a saída de um instrumento irá apresentar um valor que é composto pela soma do valor ideal – aquele obtido da característica de resposta ideal do instrumento, com as parcelas de erro provocadas pelas não-idealidades dos instrumentos.

Observe-se que, fazendo-se atualização dos parâmetros dos instrumentos de forma simultânea à simulação, as correlações serão automaticamente consideradas. Por exemplo: suponha-se que as impedâncias, uma de entrada e a outra de saída, de dois módulos interligados variem da mesma forma com a temperatura. Trata-se de um caso de correlação negativa. Se as impedâncias são permanentemente atualizadas em função da temperatura dos instrumentos, tal efeito será corretamente computado na simulação do comportamento da cadeia de medição.

Os itens seguintes detalham o modelo apresentado na figura 6.2.

6.2 Modelo do comportamento metrológico estático individual

6.2.1 Comparação com modelos para avaliação de incertezas

No item 3.4 foi feita uma breve descrição da aplicação de simuladores para análise de incertezas. No capítulo 4 foram analisados os principais aspectos referentes aos parâmetros metrológicos típicos e sua associação aos modelos elétricos equivalentes de instrumentos de

medição. A simulação do comportamento metrológico de cadeias de medição tem uma semelhança grande com a simulação para efeito de avaliação da incerteza. Os modelos podem ser bastante parecidos, tanto para cadeias de medição como um todo, quanto para os instrumentos individualmente. No entanto, os valores atribuídos aos parâmetros exigem tratamento diferenciado.

Cada resposta particular da cadeia de medição será obtida da composição, ao longo da cadeia, dos valores simulados, representativos dos parâmetros individuais, dos efeitos das interligações e dos efeitos das grandezas de influência. Tais valores serão gerados a partir das distribuições que regem os seus respectivos comportamentos, incluindo características sistemáticas e aleatórias. Isso equivale a uma aplicação parcial do método tradicional de Monte Carlo (BEICHL, 1997; ISA, 1998; KAYSSI, 1998).

A diferença em relação à aplicação usual do método de Monte Carlo em simulação está no número de iterações. Na aplicação tradicional do método de Monte Carlo é obtida a distribuição dos valores das respostas em função das variações dos parâmetros considerados. Na proposta deste trabalho cada resposta da cadeia de medição corresponderá a um elemento da distribuição equivalente que seria obtida pelo método tradicionalmente aplicado em análise de incertezas. Então, ao invés de se gerar, através de um processo iterativo, um grande número de respostas para posterior análise da distribuição resultante, o processo termina com a geração da primeira resposta obtida.

Embora fuja aos objetivos deste trabalho, o sistema de simulação estabelecido dessa forma poderá ser adaptado para uso em análise de incertezas empregando Monte Carlo. Para tanto basta inserir o modelo da cadeia de medição dentro de uma estrutura de laço e variar e forma controlada os parâmetros a analisar.

Na seqüência são analisadas as particularidades da modelagem para a aplicação na simulação do comportamento metrológico, quando comparada com a modelagem para avaliação de incertezas.

a) Modelo para avaliação de incertezas

Na simulação para avaliação da incertezas, há necessidade de um modelo formal; por exemplo, uma equação matemática (MORAWSKI, 1994; MURAVYOV, 1997; BIPM, 1998; PARVIS, 1994) ou um algoritmo (BARP, 2000; ISA, 1998). Em sistemas muito simples, ou em que avaliações grosseiras são satisfatórias, uma simples análise de propagação de incertezas, baseada nos erros máximos dos instrumentos, pode ser suficiente (GONÇALVES, 1997). Nesse caso pode-se, com relativa facilidade, obter uma característica

de resposta equivalente à cadeia de medição como um todo e sua respectiva incerteza de medição.

Na grande maioria dos casos há, no entanto, necessidade de se dispor de recursos de análise estatística, como Monte Carlo (BEICHL, 1997; ISA, 1998; RUBINSTEIN, 1981).

Cada instrumento pode ser modelado empregando-se o modelo direto ou o modelo inverso da cadeia de medição (MORAWSKI, 1994; DE NEGRI, 1996). O modelo a empregar é definido pelo sentido em que é feita a análise: sentido direto – do transdutor para o mostrador, ou inverso ao fluxo do sinal de medição.

O objetivo final é a obtenção da incerteza da cadeia de medição ou do sistema de medição ou do processo de medição como um todo. Em função disso, os parâmetros devem estar apresentados de tal forma que possam ser transformados em incertezas padrões para que venham a ser considerados no cômputo da incerteza combinada (BIPM, 1998). Na quase totalidade dos casos a avaliação é tipo B (FLESCH, 1999b). Os parâmetros necessários são obtidos de catálogos de fabricantes e a eles é associada uma distribuição, geralmente retangular. A utilização da distribuição retangular, além de ser conservativa, tem sua aplicação respaldada pelo teorema do limite central (MONTGOMERY, 1996).

b) Modelo aplicável ao sistema de simulação proposto

Na simulação do comportamento do instrumento pode-se utilizar modelo semelhante ao empregado na análise de incertezas. A diferença está nos valores atribuídos aos parâmetros. Na análise de incertezas trabalha-se com os valores limites atribuídos a cada parâmetro, dentro de um determinado nível da confiança estabelecido (BIPM, 1998). Na simulação do comportamento do instrumento, cada parâmetro precisa ser simulado a partir da distribuição que rege o seu comportamento. Nesse caso não é a distribuição resultante que interessa, mas sim uma particular resposta apresentada pela cadeia de medição num dado momento. Há, logicamente, necessidade de que seja simulado o comportamento da cadeia de medição constituída, para cada aplicação simulada do mensurando.

A título de ilustração da diferença entre análise de incertezas e simulação de comportamento, suponha-se um transdutor de pressão com faixa de medição especificada de (0 a 200) MPa que possa ser enquadrado como classe 2A segundo a ANSI/ASME B40.1 (ANSI/ASME, 1985). No caso da análise de incertezas, tal informação levaria a assumir-se um erro máximo admissível igual a 0,5% da amplitude da faixa nominal, ou seja: 1 MPa. Assumindo-se, como geralmente acontece na prática, que não se disponha de informações mais detalhadas, seria adotada distribuição retangular. Então, tal parcela de contribuição à

incerteza combinada corresponderia a uma incerteza padrão (BIPM, 1998) de 1 MPa dividido por $\sqrt{3}$, ou seja: 0,6 MPa.

No caso da simulação do comportamento do instrumento, há necessidade de que seja atribuído um valor momentâneo ao sinal de saída do instrumento. Esse valor momentâneo, para que expresse o que seria apresentado por um instrumento real, não pode se basear unicamente nesse limite atribuído ao erro máximo. É pequena a probabilidade de ocorrência de um desvio do valor ideal (erro) próximo ao erro máximo.

Observe-se que a cada instante em que uma medição é simulada, novos valores devem ser assumidos na saída dos instrumentos envolvidos. O desvio de tais valores para os valores ideais geralmente tem alta probabilidade de ser menor do que o valor do erro máximo admissível, podendo, no entanto, ser maior em algumas medições. A probabilidade de ocorrência de erros maiores depende do nível da confiança associado ao erro máximo admissível.

Além disso, o desvio pode ser positivo ou negativo, o que para efeito de avaliação da incerteza não é significativo, mas para simulação do comportamento é fundamental.

Fontes de erros sistemáticos são as mais diversas (SCHUMACHER, 1981). Na simulação do comportamento, tais fontes e respectivos valores de tendências devem estar perfeitamente identificados. Na avaliação de incertezas tais efeitos são computados considerando-se, geralmente, valores assumidos como máximos. Além disso, valores de tendência determinados experimentalmente representam agrupamentos de fontes de incerteza, em geral de difícil caracterização individual.

Quando o objetivo é avaliar incertezas, a modelagem de características aleatórias de instrumentos é baseada em distribuição normal ou, por simplificação baseada no teorema do limite central (BIPM, 1998), em distribuição retangular. Mais esporadicamente são empregadas distribuições tipo U ou triangular (BIPM, 1998). A dificuldade em se tratar distribuições mais complexas faz com que não se justifique a sua utilização, especialmente porque a incerteza dos valores dos parâmetros costuma ser bastante grande. Dessa forma a incerteza da incerteza avaliada deve-se muito mais à falta de segurança acerca das informações disponíveis do que às distribuições adotadas. Algo semelhante certamente acontecerá também com a simulação das características de resposta. O emprego de distribuições teoricamente mais adequadas como, por exemplo, a distribuição beta (FLESCHE, 1995), não produzirá resultados muito diferentes de uma normal truncada em um número razoável de desvios-padrão.

Ao contrário do que ocorre na avaliação da incerteza, na simulação da característica de resposta há necessidade de truncamento para evitar que o sistema de simulação apresente respostas absurdas, não condizentes com o comportamento real de instrumentos.

Na simulação do comportamento do instrumento pode-se estar interessado na observação da forma como a variação de um parâmetro altera a resposta do sistema. Nesse caso a escolha da distribuição precisa ser mais criteriosa do que na avaliação de incertezas, uma vez que o objetivo é a análise da correlação. O teorema do limite central logicamente não se aplica à situação.

Há também a necessidade de se considerar de que forma se distribuiriam as fontes de incerteza no instrumento, entre características sistemáticas e aleatórias, levando simultaneamente em consideração o conjunto de parâmetros característicos dos instrumentos. Assim, um transdutor de pressão que empregue etapas internas de conversão de sinais que contenham elementos mecânicos móveis estará muito mais sujeito a efeitos da histerese e da repetitividade do que um transdutor integrado piezorresistivo, mesmo que em ambos o erro máximo admissível seja o mesmo.

6.2.2 Modelos convencionais

Entende-se aqui por modelos convencionais aqueles implementados através de equações matemáticas ou de distribuições estatísticas. Esses modelos foram os empregados para a maioria das características metrológicas estáticas individuais.

As características metrológicas estáticas individuais podem ser divididas em: características que influenciam diretamente o sinal de medição e características que influenciam a curva característica de resposta. As características que influenciam diretamente o sinal de medição são tratadas matematicamente como termos aditivos.

O modelo das características individuais foi estabelecido de forma que, sempre que haja a possibilidade, uma dada influência seja tratada como característica que modifica o sinal de medição. Exemplos são: histerese e linearidade. Dessa forma, excetuando-se a característica de resposta nominal e suas variações em ganho, todas as demais influências são consideradas como termos aditivos. Dessa maneira conseguiu-se muito menor incerteza numérica na modelagem, em relação àquela em que a característica de resposta é modelada com todas as suas não idealidades incorporadas.

A alteração do valor do sinal de medição pode ser considerada como proveniente de:

- Parâmetros sistemáticos influenciando no sinal de medição – valores numéricos adicionados ao sinal de medição, de forma constante ou variável em função do valor do sinal de medição ou de condições de contorno. Por exemplo, é constante, para amplificadores, a tensão de *offset* referida à entrada. São dependentes do valor do sinal de medição: a histerese, o desvio-padrão empregado no gerador de dados aleatório que modela a repetitividade e o erro de linearidade. É função de condições de contorno – temperatura, a deriva térmica da tensão de *offset*.
- Parâmetros aleatórios influenciando no sinal de medição – valores numéricos obtidos de geradores de dados aleatórios segundo a distribuição que melhor representa a característica modelada. É o caso da repetitividade de instrumentos e de ruídos.

As principais características metrológicas individuais foram estudadas, e modelos convencionais foram estruturados, em dissertação de mestrado em Metrologia Científica e Industrial da UFSC, orientada em paralelo à condução deste trabalho (DARRIGO, 2001).

6.2.3 Modelos neurais

Muitas características dos instrumentos dependem de um grande conjunto de condições de contorno, o que dificulta sobremaneira a sua modelagem. Histerese é uma dessas características. Desconhece-se um modelo matemático que descreva, de forma satisfatória, o seu comportamento ao longo da faixa de medição. Cada instrumento tem a sua própria curva de histerese, que pode, ainda, variar de forma significativa em função da amplitude da variação do sinal de medição antes da inversão de sentido.

É proposta de XU (1997) empregar redes neurais artificiais para modelar laços de histerese em sistemas magnéticos (densidade de fluxo magnético em função de intensidade de campo magnético). Os erros encontrados foram suficientemente baixos para que uma aplicação baseada em redes neurais artificiais fosse considerada neste trabalho como opção para modelagem da histerese de instrumentos de medição.

A simulação da histerese pode ser enquadrada como um caso de interpolação de função, o que é relatado na literatura como dos mais típicos casos de utilização de redes neurais artificiais (BARRETO, 1997; HECKMANN, 1999).

A histerese de um instrumento pode ser facilmente modelada por uma rede neural se considerado sempre um ciclo completo, do início ao final da faixa de medição, de valores crescentes e decrescentes da grandeza a medir. Porém, para se modelar a situação que ocorre na aplicação real, em que o ciclo pode não ser completo, a solução, via redes neurais artificiais, é mais trabalhosa, tanto no que se refere ao projeto, quanto ao treinamento da rede.

Como parte da estruturação do sistema de simulação foi desenvolvido, em Labview, um ambiente para criação, treinamento e teste de redes neurais. Seu objetivo é a utilização das redes na modelagem de características estáticas de instrumentos. O ambiente prevê a criação de redes estáticas, multicamadas, do tipo *feed-forward*, com algoritmo de treinamento *backpropagation* (BARRETO, 1997). Embora seja a rede mais facilmente encontrável no mercado (PNL, 2000), optou-se pelo desenvolvimento. Objetivou-se maior aprofundamento no conhecimento relativo ao projeto e ao treinamento da rede neural, além de garantir a perfeita integração das redes treinadas aos modelos dos instrumentos.

Para modelar histerese foram empregadas redes neurais com três neurônios na camada de entrada e um neurônio na camada de saída. As entradas correspondem a: valor momentâneo do mensurando (em valor relativo à faixa de medição); posição da faixa de medição em que ocorreu a inversão de sentido (em valor relativo à faixa de medição); valor da histerese na posição em que ocorreu a inversão (em valor relativo à histerese máxima).

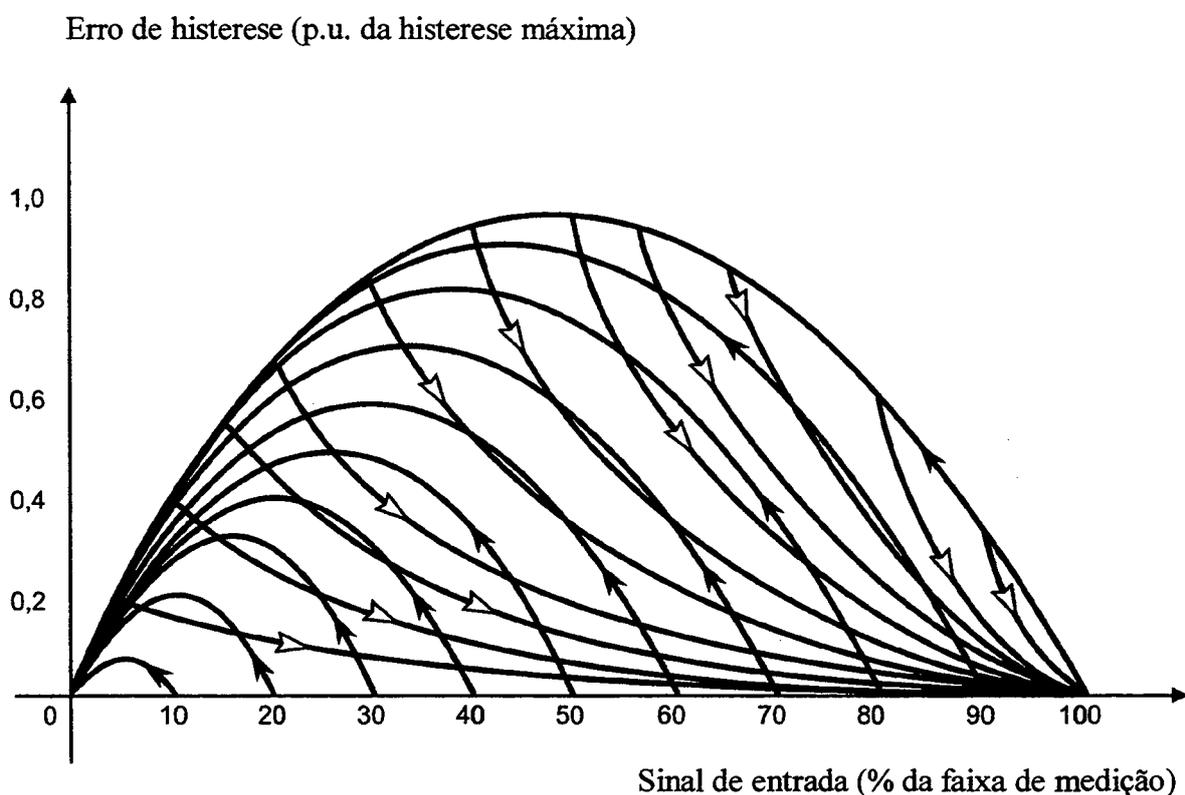
É empregada como referência da histerese - histerese igual a zero, a curva que corresponde à característica de resposta real do instrumento para valores crescentes a partir do início da faixa de medição até o seu final. Em relação a essa curva são computados tanto os valores de histerese para ciclos completos quanto os valores de histerese correspondentes a ciclos parciais.

Trabalhou-se sobre redes de uma e de duas camadas intermediárias, com número de neurônios em tais camadas variando de 4 a 200. Como função de ativação, em todos os casos, e para todos os neurônios, adotou-se a função sigmóide:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (6.1)$$

Observou-se plena viabilidade de trabalhar com diferentes redes neurais simultaneamente, cada uma representando parte da faixa de medição. Dessa forma foi possível empregar redes com poucos neurônios para representar curvas de histerese que apresentem os mais diversos comportamentos.

Não foi possível estabelecer uma correlação clara entre configuração e resultados alcançados. Observou-se, porém, que uma rede com somente uma camada intermediária com número de neurônios igual a nove conseguiu representar vinte diferentes comportamentos típicos de histerese com incerteza na representação menor do que 1% do valor da histerese máxima admitida em cada um dos casos. Isso ocorreu tanto para histereses correspondentes a ciclos completos quanto para histereses parciais. Um dos comportamentos representados está mostrado na figura 6.3. Incerteza de 1% em relação ao valor da histerese máxima é desprezível se comparada à incerteza usual nos processos de determinação experimental da histerese. Isso significa que a representação da histerese através de redes neurais é perfeitamente viável.



Legenda:



curva de erros de histerese para valores decrescentes do sinal de entrada;



curva de erros de histerese para valores crescentes do sinal de entrada.

Figura 6.3 – Exemplo de padrão de erro de histerese para treinamento de rede neural.

Dos conjuntos de curvas que representam o comportamento da histerese foram extraídos os conjuntos de pontos que formam os padrões de treinamento. Trabalhou-se com resolução igual a 0,2% do valor da histerese máxima para cada conjunto de curvas. Foram feitos treinamentos de uma mesma rede, empregando-se padrões de treinamento com número variável de 10 a 200 pontos para representar um ciclo de histerese. Constatou-se uma elevada capacidade da rede de aprender o comportamento, mesmo se poucos pontos forem apresentados durante o treinamento. Um ciclo completo de histerese, por exemplo, para 20 diferentes padrões testados, foi representado com incerteza menor que 2%, mesmo quando somente 10 pontos por ciclo foram apresentados como padrão de treinamento. A explicação está na forma suave com que varia a curva de histerese ao longo da faixa de medição.

Se o objetivo fosse a representação de características que variassem significativamente de ponto a ponto da faixa de medição, como o ruído, por exemplo, a situação seria diferente. Nesse caso o número de pontos que formam o padrão de treinamento precisaria ser extremamente grande para conter as características que a rede deve aprender.

Oscilações foram propositadamente incluídas nos padrões de histerese, para efeito de teste. A rede passou a se comportar como um filtro, atenuando as oscilações. Essa atenuação aumenta tanto na medida em que se reduz o número de neurônios nas camadas intermediárias quanto na medida em que se reduz o tamanho do conjunto de pontos do padrão de treinamento.

O emprego de redes neurais mostrou-se plenamente viável e justificável com base nas seguintes considerações:

- embora tenha-se feito ampla busca, não foi encontrada outra forma de modelar satisfatoriamente a histerese de instrumentos;
- a aplicação de redes extremamente simples, estáticas e do tipo *feed-forward*, com somente uma camada intermediária, leva a resultados plenamente satisfatórios;
- a aplicação permite realizar treinamento e exaustivos testes da rede antes de seu emprego nos modelos, o que compensa a principal limitação das redes neurais: a dificuldade da comprovação formal de funcionamento adequado;
- a solução é universal; a mesma rede pode representar uma grande quantidade de diferentes padrões de histerese. A mudança de uma para outra aplicação ocorre apenas no padrão de histerese que é apresentado à rede durante a fase de treinamento.

As mesmas redes neurais empregadas para modelar histerese foram utilizadas para modelar duas outras características cujo comportamento varia ao longo da faixa de medição: linearidade e repetitividade. Nesses casos, uma única rede, com uma só camada intermediária de nove neurônios, modelou com incerteza menor do que a resolução adotada (0,2% do valor máximo da característica representada) a linearidade e a repetitividade. Incertezas dessa ordem podem ser consideradas desprezíveis nesta aplicação. Tais utilizações de redes neurais também são enquadradas como interpolação de função. São aplicações extremamente simples, em que redes neurais apresentaram resultados plenamente satisfatórios.

O processo consiste em treinar a rede com um padrão formado por um conjunto de dados que tem como entrada a posição ao longo da faixa de medição e como saída os correspondentes valores de linearidade e de repetitividade. A mesma rede poderia ser treinada simultaneamente para representar as duas características. Optou-se pelo emprego de redes individuais para linearidade e repetitividade, visando a manter a máxima modularidade na implementação dos modelos.

A vantagem da representação da linearidade e da repetitividade através de redes neurais está na simplicidade e na universalidade da solução. O emprego de funções matemáticas exigiria análise caso a caso. Ademais, o processo de geração dos padrões pode ser automatizado, se integrado a uma eventual calibração destinada a subsidiar a implementação de modelos de instrumentos.

6.3 Modelo do comportamento metrológico dinâmico individual

Neste item é mostrada a forma adotada para modelar o comportamento dinâmico inerente a cada instrumento individualmente. Julgou-se conveniente, devido às respectivas particularidades, tratar em separado os instrumentos inteiramente analógicos e os instrumentos que incorporam conversão analógico-digital. Os efeitos dinâmicos relacionados às interligações dos circuitos equivalentes às entradas e saídas de instrumentos são considerados nos módulos de análise de circuito, apresentados no item 6.4.

6.3.1 Características dinâmicas de instrumentos analógicos

a) Modelo para avaliação de incertezas de instrumentos analógicos

Na simulação para avaliação da incertezas, as características dinâmicas dos instrumentos podem ser tratadas de forma similar àquela com que são tratadas as características estáticas. Conhecendo-se as características dinâmicas dos instrumentos e o procedimento de medição, pode-se obter uma incerteza padrão correspondente e envolvê-la normalmente na avaliação da incerteza combinada.

Por exemplo, considere-se um instrumento de primeira ordem que tenha uma constante de tempo de valor máximo igual a τ . Suponha-se que a esse instrumento seja aplicado um degrau e que o procedimento de medição determine que se aguarde um tempo igual a τ entre a aplicação do degrau e o instante da obtenção da medida. Pelo procedimento do GUM seria associada a τ uma distribuição. Supondo que nenhum conhecimento adicional estivesse disponível, provavelmente uma distribuição retangular seria adotada. Isso conduziria a uma incerteza equivalente de 37% do valor do mensurando (OPPENHEIM, 1997). Na prática se trabalharia com um tempo muito maior do que τ , logo o percentual seria muito menor do que 37%. Conseqüentemente, medida e mensurando estariam com valores próximos o bastante para que qualquer um dos dois pudesse ser usado como valor fiducial. No exemplo considerado a incerteza associada corresponde a $\pm 18,5\%$, o que, dividido por $\sqrt{3}$, para transformação em incerteza padrão, corresponde a aproximadamente $\pm 10\%$ do valor medido.

O mesmo procedimento poderia ser adotado nos casos em que se aguardasse um tempo maior para fazer a medição, ou que somente se conhecesse o tempo de resposta do sistema. Na prática o tempo de resposta – *settling time* (ANSI/ISA, 1993) é a característica mais fornecida (NATIONAL INSTRUMENTS, 1993).

Procedimentos semelhantes também poderiam ser adotados se fossem usados sistemas de segunda ordem. Nesses casos o tempo de resposta seria o parâmetro empregado.

Logicamente, se correções fossem aplicadas ao valor da medida, o parâmetro a ser empregado na avaliação da incerteza combinada seria a incerteza da correção.

Para os casos em que avaliação da incerteza requer análise no domínio da frequência, o procedimento a aplicar requer análise bem mais detalhada do problema, mas a solução continua sendo obtida através de equacionamento matemático, geralmente relacionando a frequência de interesse com a de corte do instrumento. Uma razão de amortecimento em torno de 0,7 é típico. Nessa condição o *overshoot* é pequeno e sua função de transferência é

próxima da que seria se o sistema fosse de primeira ordem (AMBROSIUS, 1966). Isso permite a adoção de procedimentos semelhantes para análise de incertezas em sistemas de primeira e de segunda ordens.

b) Modelo de características dinâmicas no sistema de simulação proposto

Os parâmetros característicos dos instrumentos são obtidos para condições previamente estabelecidas, que envolvem inclusive a fixação da forma de variação do mensurando, geralmente senoidal ou degrau (HITZ, 1999; SHESTAKOV, 1996). Para simulação do comportamento dinâmico do sistema, há necessidade de que, independentemente da forma do sinal de entrada, o sistema de simulação apresente resposta semelhante à que o instrumento real apresentaria. Isso requer um tratamento bastante diferenciado do que é feito na análise de incertezas.

O sistema de simulação deve ser empregável em qualquer computador e inclusive sob a Internet. Isso inviabiliza a utilização do tempo real na simulação. Então o tempo também precisará ser grandeza simulada. Para modelagem num ambiente discreto, como é o caso do sistema de simulação proposto, o sinal de medição deve ser convertido em informações discretas para permitir o seu tratamento numérico.

Por analogia à simulação dinâmica de processos físicos em geral e à modelagem aplicada ao projeto de sistemas de controle, constata-se que há duas formas principais de modelagem: a no domínio da frequência e a no domínio do tempo. A literatura e a prática mostram muito maior aplicação da análise no domínio da frequência. A matemática necessária para análise do comportamento dinâmico através da função de transferência empregando transformada de Laplace, para sistemas contínuos, ou transformada z , para sistemas discretos, consta de livros básicos de análise de sinais. A transformada z é ideal para modelagem no domínio da frequência de sistemas que processam sinais discretos (ANTAO, 1996).

Geralmente a análise no domínio da frequência permite estabelecer o comportamento do sistema de forma muito mais ilustrativa, além de viabilizar um tratamento matemático mais simples do que o que requer a análise do domínio do tempo. Porém a análise no domínio da frequência através da função de transferência só é aplicável a sistemas lineares e invariantes no tempo (ELLIS, 2000).

Para um sistema ser linear ele deve satisfazer simultaneamente aos princípios da homogeneidade e da superposição. Para que o princípio da homogeneidade seja obedecido, se uma entrada $e(t)$ gera uma saída $s(t)$, uma entrada $k.e(t)$ deve gerar uma saída $k.s(t)$, para

qualquer valor de k . A saturação e o *slew-rate* de amplificadores são características que levam a comportamento não homogêneo. O princípio da superposição prevê que se uma entrada $e_1(t)$ gera uma saída $s_1(t)$ e uma entrada $e_2(t)$ gera uma saída $s_2(t)$ então uma entrada $e_1(t) + e_2(t)$ irá produzir uma saída $s_1(t) + s_2(t)$.

Para que um sistema seja invariante no tempo, se um elemento apresenta para uma entrada $e(t)$ uma saída $s(t)$, ele deverá apresentar para uma entrada $e(t-\Delta t)$, uma saída $s(t-\Delta t)$, para qualquer Δt maior do que zero.

Neste trabalho, chegou-se a fazer testes com a modelagem no domínio da frequência. O processo consistiu em obter-se a transformada de Fourier do sinal de entrada e aplicar-se as componentes de frequência do sinal à função de transferência do sistema.

Optou-se, no entanto, pela simulação do comportamento dinâmico no domínio do tempo, baseada na aplicação da equação de diferenças (KODOSKY, 1993; OPPENHEIM, 1989; ELLIS, 2000).

Para obtenção da equação de diferenças foi empregada a seguinte seqüência de ações, detalhada em OLIVEIRA (2001):

- estabelecimento dos parâmetros representativos do comportamento dinâmico do instrumento: constante de tempo para sistemas de primeira ordem; frequência natural e coeficiente de amortecimento, para sistemas de segunda ordem;
- obtenção da correspondente equação diferencial;
- obtenção da função de transferência, pela aplicação da transformada de Laplace;
- obtenção da função de transferência no domínio discreto, através da transformação bilinear de $H(s)$ para $H(z)$;
- determinação da equação de diferenças, usando a transformada z inversa.

Procedimento idêntico pode ser empregado para sistemas representados por equações diferenciais de ordem superior. A modelagem através de equações de diferenças pode ser empregada, por exemplo, para representar a função de transferência de filtros ativos (PUTTEN, 1996), situação em que é usual que se empregue representação por ordem superior a dois. Nesse caso, o processo de obtenção da correspondente equação de diferenças parte da função de transferência.

A título de ilustração, são apresentadas na seqüência as equações diferenciais de primeira e de segunda ordem (equações 6.2 e 6.4) e as respectivas equações de diferenças (equações 6.3 e 6.5).

A equação diferencial correspondente a um sistema de primeira ordem é:

$$\tau \frac{dY}{dt} + Y = kX \quad (6.2)$$

Onde:

- Y - sinal de saída;
- X - sinal de entrada;
- k - sensibilidade estática;
- τ - constante de tempo.

A concernente equação de diferenças, para sistemas de primeira ordem, é:

$$Y[n] = \frac{kTa(X[n] + X[n-1]) + Y[n-1](2\tau - Ta)}{2\tau + Ta} \quad (6.3)$$

Onde:

- $Y[n]$ - sinal de saída, correspondente ao n ésimo ponto;
- $X[n]$ - sinal de entrada, correspondente ao n ésimo ponto;
- k - sensibilidade estática;
- τ - constante de tempo;
- Ta - tempo entre amostras.

A equação diferencial para um sistema de segunda ordem é:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2Y}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dY}{dt} + Y = kX \quad (6.4)$$

Onde:

- Y - sinal de saída;
- X - sinal de entrada;
- k - sensibilidade estática;
- ζ - razão de amortecimento;
- ω_n - frequência natural.

A corresponde equação de diferenças, para sistemas de segunda ordem, é:

$$Y[n] = \frac{k\omega_n^2 T_a^2 X[n] + 2k\omega_n^2 T_a^2 X[n-1] + k\omega_n^2 T_a^2 X[n-2]}{4 + 4\zeta\omega_n T_a + \omega_n^2 T_a^2} + \frac{(8 - 2\omega_n^2 T_a^2)Y[n-1] - (4 - 4\zeta\omega_n T_a + \omega_n^2 T_a^2)Y[n-2]}{4 + 4\zeta\omega_n T_a + \omega_n^2 T_a^2} \quad (6.5)$$

Onde:

$Y[n]$ - sinal de saída, correspondente ao enésimo ponto;

$X[n]$ - sinal de entrada, correspondente ao enésimo ponto;

k - sensibilidade estática;

ζ - razão de amortecimento;

ω_n - frequência natural;

T_a - tempo entre amostras.

A partir da equação de diferenças, é determinada a resposta que o instrumento apresentará após um intervalo de tempo preestabelecido. O intervalo de tempo corresponde ao tempo de amostragem (ANTAO, 1996) que é a resolução do sistema no tocante à grandeza tempo. Seu valor será fornecido indiretamente pelo usuário, no ambiente de simulação, ao informar ao sistema o intervalo de tempo e o número de pontos a simular. Valerá simultaneamente para todos os elementos que estiverem sendo simulados.

A repetida aplicação do modelo ao longo do tempo de duração da simulação, com constante atualização do sinal de entrada, permitirá o estabelecimento de um conjunto de pares de pontos que representarão a resposta do instrumento em função do tempo para o sinal de entrada considerado.

Quatro razões levaram à opção pela modelagem no domínio do tempo para a aplicação considerada:

- a) Possibilidade de modelar sistemas não lineares e sistemas variantes no tempo. A modelagem através de equações de diferenças permite tanto a modelagem de sistemas lineares quanto não lineares. Constitui-se na principal vantagem teórica da análise no domínio do tempo em relação à análise no domínio da frequência (ELLIS, 2000). Estritamente do ponto de vista de características dinâmicas, os instrumentos podem ser simplificados para que se assumam que sejam lineares e

invariantes no tempo. Isso é procedimento normal na modelagem do comportamento de sistemas dinâmicos em geral, seja para simulação, para análise de incertezas ou para projeto de sistemas de controle (OPPENHEIM, 1989). A falta de ferramental matemático simples adequado ao tratamento de não-linearidades tem suscitado simplificações nem sempre perfeitamente embasadas (ELLIS, 2000). Segundo YAMAMURA (2001), que classifica o século 21 como a “a era do não-linear”, a pesquisa sobre teorias de sistemas não lineares vem crescendo acentuadamente. Na aplicação prevista neste trabalho, os sistemas apresentarão uma série de não linearidades impostas pelas características estáticas que deverão ser tratadas em conjunto com as características dinâmicas. A apresentação de um simples erro sistemático, como um *offset*, por exemplo, faz com que o sistema seja não linear. No domínio da frequência, isso exige cuidados no encadeamento dos módulos para que a simulação não leve a resultados enganosos. O mesmo ocorre com a invariância no tempo. A existência de características aleatórias nos instrumentos faz com que suas características possam ser alteradas entre instantes de tempo subseqüentes numa mesma simulação.

- b) A transformada de Fourier, quando aplicada a sinais não periódicos, exige cuidados especiais na interpretação dos resultados (SOLIMAN, 1990), o que dificulta a generalização dos modelos. Na análise através de equações de diferenças não há qualquer distinção entre sinais estáticos e dinâmicos, exigindo menor conhecimento do usuário, tanto na implementação dos modelos, a partir de módulos preestabelecidos, quanto na utilização do ambiente de simulação.
- c) A análise no domínio da frequência exige que o comportamento do sinal seja previamente conhecido, para que dele possam ser extraídas os respectivos componentes de frequência. Ao se encadearem módulos com diferentes comportamentos dinâmicos ou que deverão processar diferentes sinais, há necessidade de que se coloque memória local no sistema de simulação. Isso faz com que haja necessidade de sofisticação dos modelos estáticos para que esses possam ser empregados de forma conjunta com os modelos dinâmicos. Tal não ocorre quando a análise é feita no domínio do tempo. Os sinais são tratados em tempo real, à medida que são gerados, sem necessidade de análise prévia do comportamento dos sinais. Assim, conseguiu-se total compatibilidade entre os modelos estáticos e dinâmicos.

- d) A análise de sinais através de Fourier continua viável no ambiente de simulação, independente de os modelos terem sido estabelecidos no domínio do tempo, através de equações de diferenças. Para tanto, a análise de Fourier é feita para os sinais no ambiente de simulação como se estivesse sendo feita para um sinal adquirido de um sistema físico real. Dessa forma pode-se empregar Fourier para analisar sinais, sem interferir na simulação da cadeia de medição.

Características dinâmicas de instrumentos analógicos foram estudadas e modeladas em dissertação de mestrado em Metrologia Científica e Industrial da UFSC, orientada em paralelo à condução deste trabalho (OLIVEIRA, 2001). Testes mostraram a plena adequação da modelagem no domínio do tempo empregando equações de diferenças. A incerteza é função do tempo de amostragem. Quanto maior esse tempo, maior o erro na simulação. A figura 6.4 mostra o valor do erro máximo da resposta da equação de diferenças em relação à equação diferencial, quando aplicado um degrau à entrada de um sistema de primeira ordem. O eixo das abscissas apresenta o número de amostras contido num tempo igual a uma constante de tempo.

Máximo Erro Relativo

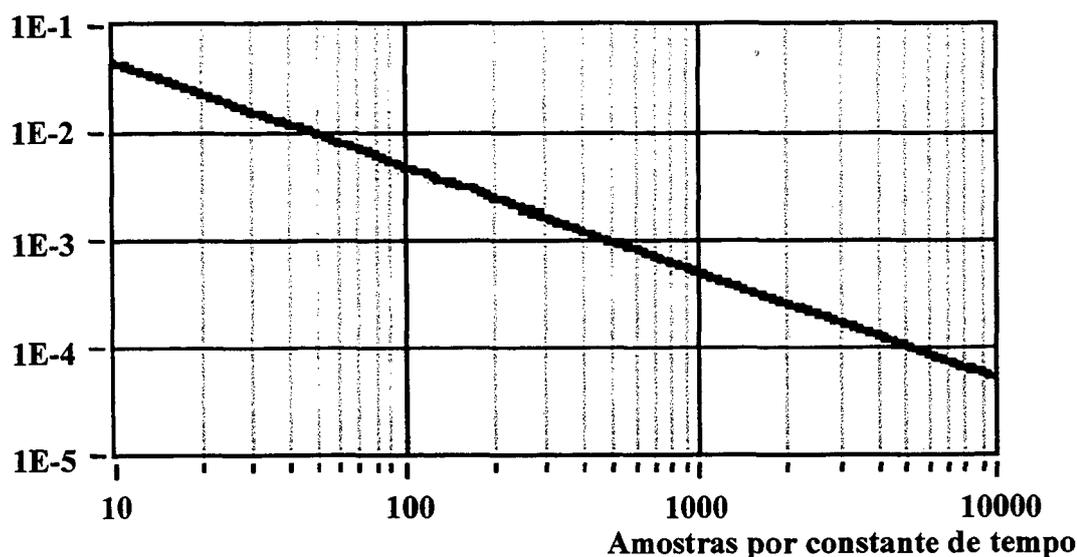


Figura 6.4 – Erro entre equação de diferenças e equação diferencial para um sistema de primeira ordem submetido a uma entrada degrau.

Observa-se que utilizando tempo entre amostras menor ou igual a um cinquenta avos da constante de tempo do sistema, o erro máximo é inferior a 1%. Análises para outros sinais, e para sistemas de segunda ordem, estão apresentadas em OLIVEIRA (2001).

6.3.2 Características dinâmicas de instrumentos que têm conversor A/D

A falta de padronização faz com que diferentes procedimentos sejam adotados para modelar características de conversores analógico-digitais quando o objetivo é avaliação de incertezas (CHIORBOLI, 1997; ARABI, 1996; MIELKE, 1996; LARRABEE, 1998; MUGINOV, 1997; BACCIGALUPI, 1994; SCHOUKENS, 1997; SURESH BABU, 1995; XI, 1996).

A simulação de sistemas lógicos em tempo contínuo é analisada em MORIN (1997). Modelar o comportamento dinâmico de um sistema digital pode ser bastante complexo quando se faz necessária a simulação de transitórios nas mudanças de estado. Esse seria o caso, por exemplo, se o sistema devesse simular todo o diagrama temporal envolvido no processo de controle de uma conversão A/D (ARABI, 1996).

No sistema de simulação proposto, o enfoque é metrológico. Nele será considerado que uma informação somente é válida quando a saída do conversor A/D assumir um estado estável, independentemente do que se passou durante a fase de conversão. Dessa forma a modelagem para simulação do comportamento dinâmico de conversores analógico-digitais pode ser mais simples do que a modelagem para avaliação de incertezas.

Uma abordagem detalhada do tratamento da resolução, baseada no erro de quantização, é proposta por VUJIEIÉ (1997) para aplicação a sistemas de simulação do comportamento de conversores A/D.

Para os objetivos do presente trabalho julgou-se que, dos modelos analisados por MORIN (1997), o mais simples – “atraso do sinal”, também empregado para modelagem de incertezas por BACCIGALUPI (1994), já seria satisfatório.

Para mais perfeita modelagem, foi feita, no entanto, diferenciação entre as três formas mais usuais de conversão: integração, aproximações sucessivas e comparação (HOESCHELE, 1994; SEDRA, 1991).

O conversor de integração incorpora no seu circuito de entrada um integrador, com tempo de integração igual ao tempo de conversão. O resultado apresentado pelo conversor corresponde à média do sinal na entrada durante o tempo de conversão. Então, o modelo estabelecido corresponde à operação matemática de obtenção da média dos valores do sinal de entrada durante o tempo de conversão. O valor correspondente à média é repassado para a saída ao final da conversão, obedecendo a resolução ditada pelo número de bits do conversor A/D.

Para o conversor A/D que opera por comparação, também conhecido como conversor paralelo (HOESCHELE, 1994), a característica dinâmica foi representada por um atraso na atualização da resposta, com um tempo de atraso igual ao tempo de conversão. Observe-se que, embora haja necessidade de memória local no modelo para representação do atraso do sinal, isso é uma representação do comportamento real do sistema físico, e não uma exigência do tratamento matemático, como ocorre na modelagem no domínio da frequência. Dessa forma o modelo do conversor é totalmente compatível com os demais modelos, podendo ser usado de forma conjunta na cadeia de medição. Os módulos que antecedem o conversor A/D na cadeia de medição não são afetados pela sua memória local. Qualquer módulo que venha após o conversor A/D receberá o sinal com o atraso imposto pelo A/D. Para o usuário, a operação é transparente.

Um conversor do tipo aproximações sucessivas precisa estar precedido de um circuito de *sample-and-hold*. O modelo foi estabelecido para o conjunto, ficando idêntico ao de um paralelo, porém com tempo bem maior de atraso, para corresponder ao que acontece com conversores reais. Os filtros *anti-aliasing*, que precisam estar presentes na conversão (HEWLETT PACKARD, 1995), foram modelados por Laplace (PINTELON, 1997; CHEN, 1995; SHESTAKOV, 1996) e convertidos no modelo de equações de diferenças, da mesma forma que nos modelos dos instrumentos analógicos.

6.4 Módulo de análise de circuitos

A interligação entre instrumentos no ambiente de simulação é feita por uma conexão física que transporta não só os sinais de medição e de alimentação, mas todo o conjunto de informações necessárias para que os efeitos das interligações sejam considerados.

Para quantificação dos efeitos das interligações, é proposta deste trabalho a divisão da cadeia de medição em segmentos de cadeia, com aplicação sucessiva de análise de circuitos baseada em modelos de Thévenin. A segmentação da cadeia é feita em cada elemento que tenha elementos anteriores a ele ligados e que todo esse conjunto – próprio elemento e elementos anteriores – possa ser substituído pelo modelo Thévenin equivalente a um circuito de saída, para efeito de análise da interligação desse conjunto ao restante da cadeia.

Para efeito de análise das interligações, sempre que um segmento de cadeia contiver outros segmentos, esses últimos são substituídos pelos respectivos modelos equivalentes de Thévenin. Os cálculos necessários para determinação dos modelos equivalentes de Thévenin

são realizados por módulos de análise de circuitos, especialmente desenvolvidos para as configurações mais típicas encontradas nas cadeias de medição.

Numa cadeia de medição simples, contendo um transdutor auto-gerador, um amplificador e um voltímetro, existem dois segmentos: um que vai do transdutor ao amplificador e outro que vai do transdutor ao voltímetro. Observe-se que o amplificador enxergará a saída do transdutor unicamente como um modelo equivalente de Thévenin de um circuito de saída, independentemente do tipo de transdutor. Da mesma forma, independentemente de quantos módulos antecedam o amplificador, o voltímetro enxergará a saída do amplificador unicamente como um modelo equivalente de Thévenin de um circuito de saída.

Tratando-se de uma cadeia de medição com transdutor que requer alimentação, por exemplo, empregando-se circuito de ponte de Wheatstone, todo o conjunto formado por fonte de alimentação, transdutor e circuito de ponte forma um segmento de cadeia. Daí em diante, a análise passa a ser idêntica à que foi feita para o caso do emprego de transdutor auto-gerador.

Pode-se observar que há uma ligação biunívoca entre segmento de cadeia e módulo de análise de circuitos. Cada segmento de cadeia está associado a um módulo de análise de circuitos, cujas características são estabelecidas pelo último elemento presente no segmento de cadeia. Assim, o módulo de análise de circuitos pode estar contido no modelo do último elemento de cada segmento de cadeia. Dessa forma, o módulo de análise de circuitos contido em meia ponte de Wheatstone é diferente de um contido em uma ponte completa.

A grande maioria das configurações de cadeias de medição encontradas na instrumentação modular tem interligação de instrumentos através de um subconjunto da seqüência: cabos elétricos; chaves; cabos elétricos. Essa seqüência foi prevista no equacionamento dos módulos de análise de circuitos incluídos nos modelos dos instrumentos.

A presença dos cabos e das chaves é facultativa, a critério do usuário. Cada cabo pode ter de dois a seis fios; cada chave de um a seis contatos. Assim como em situações reais, podem ser empregados cabos e chaves com número maior ou igual ao de vias necessárias.

A monitoração dessas limitações impostas pelo sistema de simulação é feita para cada configuração composta. Cada módulo da cadeia de medição que deva ser monitorado para evitar conexão indevida, ao repassar os dados para o módulo seguinte, repassa juntamente uma codificação binária referente à sua situação. Essa codificação inicia sempre com valor zero e é cumulativa individualmente dentro de cada segmento de cadeia. No caso dos cabos e chaves que interligam módulos, por exemplo, o primeiro cabo tem código 1, a chave, código 2 e o segundo cabo, código 4. Ao ser colocado em uma cadeia de medição um cabo verifica se

já há outro cabo naquele segmento de cadeia. Códigos 1 e 5 indicam a existência de outro cabo. Se o código é 1, é sinal de que há outro cabo, porém não há chave, o que não justifica a presença do segundo cabo. Mensagem de alerta é emitida. Se o código é 3, já estão presentes o primeiro cabo e a chave, o que faz com que o novo cabo perceba que ele é o segundo, adicionando 4 à codificação. Assim, tem código 7, a configuração de um segmento de cadeia na sua forma mais completa, com o módulo inicial e final interligados por um primeiro cabo, uma chave e um segundo cabo. Além da verificação da adequação da configuração, esse código é considerado, quando aplicável, pelo módulo de análise de circuitos.

A verificação do número de vias de chaves e de cabos é feita pela impedância correspondente. Fios e contatos inexistentes têm impedância tendendo a infinito.

Foram desenvolvidos os seguintes módulos genéricos de análise de circuitos:

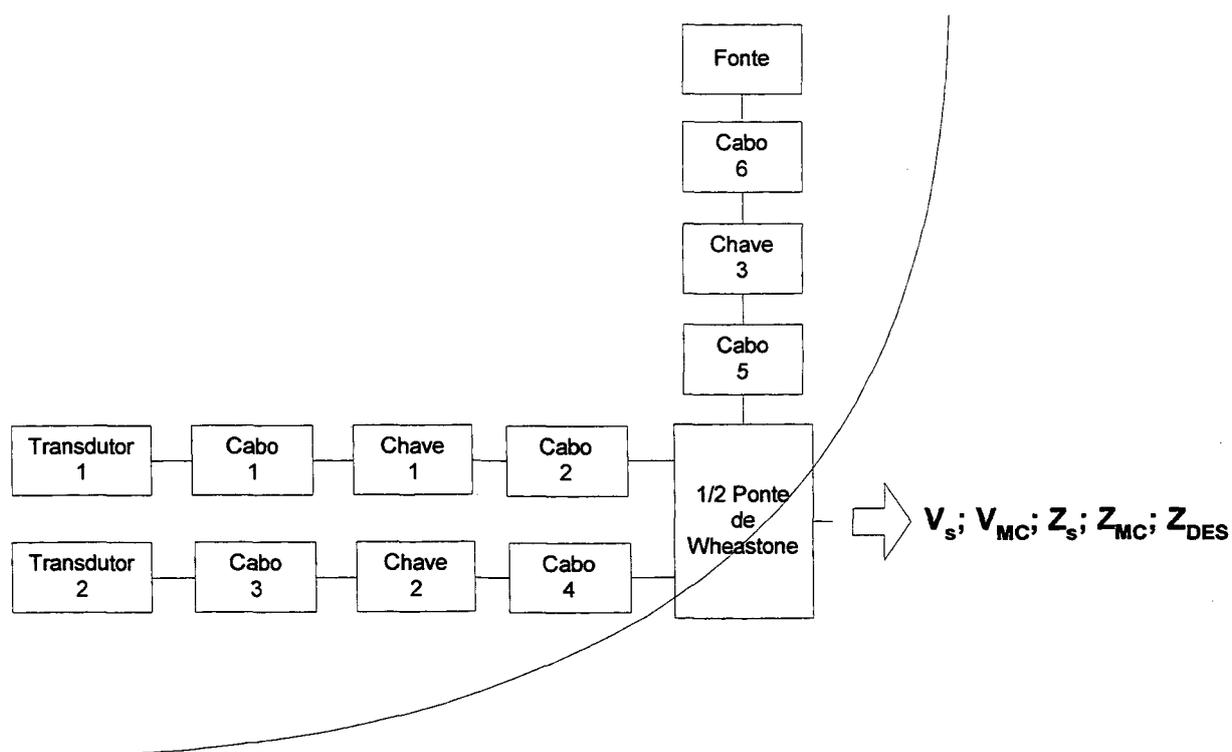
- a) Entrada em tensão: aplicável aos instrumentos que têm somente uma entrada, e ela é na forma de sinal de tensão. Prevê que na composição da cadeia de medição lhe será conectado um elemento ou segmento de cadeia de medição que possa ser substituído por um modelo de Thévenin equivalente a um circuito de saída em tensão. Por exemplo: fonte de tensão, transdutor auto-gerador, saída de amplificador, saída de filtro, saída de ponte de Wheatstone, saída de divisor de tensão, saída de conversor corrente-tensão, ou qualquer outro. Observe-se que este módulo estará presente em todos os modelos de instrumentos que apresentam alguma entrada em tensão. Assim, o mesmo módulo é reaproveitado nos modelos dos instrumentos: amplificador, voltímetro, registrador, filtro, placa de aquisição de sinais, dentre outros.
- b) Entrada em corrente: equivalente ao módulo anterior, porém para circuitos com modelo equivalente a um circuito de saída em corrente.

Além desses módulos genéricos, foram desenvolvidos módulos específicos para atender aos segmentos de cadeias encontráveis nas principais cadeias de medição:

- a) Circuitos de ponte de Wheatstone:
 - ponte completa;
 - meia ponte com dois elementos sensores independentes;
 - meia ponte com um transdutor configurado em meia ponte;
 - um quarto de ponte.
- b) *Anderson loop*
- c) Divisor de tensão
- d) Conversor corrente-tensão

- e) Ohmímetro de 2 fios
- f) Ohmímetro de 4 fios
- g) Gelo eletrônico para termopares

A título de ilustração, na figura 6.5 são apresentadas as interligações, no ambiente de simulação, do módulo meia ponte de Wheatstone com dois elementos sensores resistivos independentes e alimentação em tensão contínua. Observe-se que o módulo meia ponte de Wheatstone tem três entradas: uma que vem da fonte de alimentação e duas que vêm dos elementos sensores.

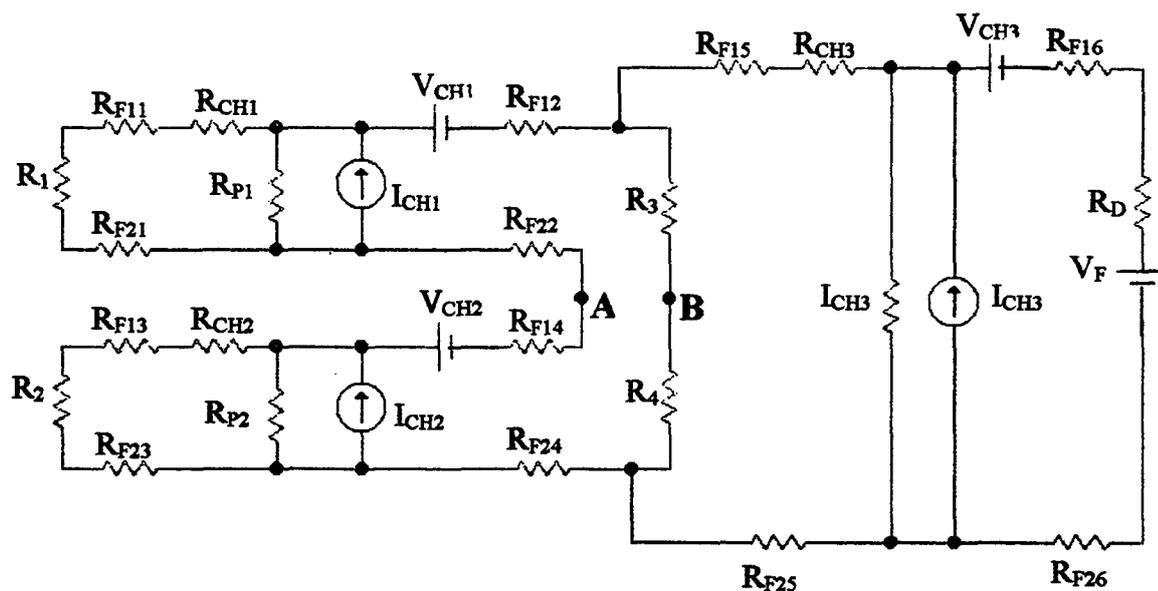


Legenda:

- V_s – tensão de saída (diferencial);
- V_{MC} – tensão de modo comum;
- Z_s – impedância de saída (diferencial);
- Z_{MC} – impedância de modo comum;
- Z_{DES} – impedância de desbalanceamento.

Figura 6.5 – Interligações do módulo meia ponte de Wheatstone no ambiente de simulação.

Na figura 6.6 é apresentado o esquema geral de tensão contínua, base para equacionamento do módulo de análise de circuitos de meia ponte de Wheatstone. Para ilustrar o método, é apresentado na seqüência o procedimento de obtenção dos parâmetros representativos do circuito equivalente à saída da ponte de Wheatstone completa. A tensão de saída corresponde à tensão entre os pontos A e B na figura 6.6. A tensão diferencial corresponde à diferença das tensões entre os dois pontos. A tensão de modo comum corresponde à média das tensões nos dois pontos. Considerando o valor momentâneo de cada um dos parâmetros passivos do modelo, as tensões dos pontos A e B podem ser encontradas por superposição dos efeitos das fontes de corrente e de tensão envolvidas.



Legenda:

- A;B – pontos correspondentes à saída da ponte de Wheatstone;
- I_{CHi} – corrente de fuga da i -ésima chave;
- R_1 ; R_2 – resistências dos transdutores 1 e 2;
- R_3 ; R_4 – resistências de complementação da ponte de Wheatstone;
- R_{CHi} – resistência em paralelo da i -ésima chave;
- R_D – resistência diferencial da fonte de alimentação;
- R_{Fij} – resistência do i -ésimo fio, do j -ésimo cabo;
- R_{Pi} – resistência em paralelo da i -ésima chave;
- V_{CHi} – tensão de *offset* da i -ésima chave;
- V_F – tensão da fonte de alimentação.

Figura 6.6 – Esquema elétrico empregado no equacionamento do módulo de análise de circuitos para meia ponte de Wheatstone.

A resistências equivalentes, de modo comum e diferencial, podem ser facilmente encontradas empregando-se o método de eliminação de fontes (HAYT, 1978) e as necessárias transformações triângulo-estrela, para que resultem somente circuitos série e paralelo planificáveis. A resistência de desbalanceamento corresponde à diferença entre as resistências de modo comum determinadas a partir dos pontos A e B.

Dessa forma chega-se ao modelo equivalente Thévenin desse segmento de cadeia. Os parâmetros correspondentes são repassados para o conjunto de dados de saída. O segmento de cadeia seguinte é o que vai até o amplificador. O módulo de análise de circuitos do amplificador, que corresponde ao módulo genérico entrada em tensão, vai utilizar tais dados como representativos de todo o primeiro segmento de cadeia. A aplicação sucessiva do método, até o elemento mostrador da cadeia de medição, fará com que sejam consideradas as interligações ao longo da cadeia de medição como um todo.

6.5 Definição dos parâmetros representativos dos modelos

Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho semelhante que pudesse servir de base para sistematização na obtenção das características de instrumentos para efeito de simulação do comportamento metrológico. É proposta e adotada neste trabalho a seguinte classificação das características:

a) Características inerentes ao comportamento de um instrumento específico:

- Aleatórias com distribuição invariável ao longo da faixa de medição e do sentido de aplicação da grandeza de entrada.
- Aleatórias com distribuição variável ao longo da faixa de medição e do sentido de aplicação da grandeza de entrada:
 - com a forma de variação previsível e equacionável;
 - com a forma de variação previsível qualitativamente, porém não equacionável;
 - com forma de variação imprevisível.
- Sistemáticas constantes ao longo da faixa de medição e do sentido de aplicação da grandeza de entrada.

- Sistemáticas com valores variáveis ao longo da faixa de medição e do sentido de aplicação da grandeza de entrada:
 - com a forma de variação previsível e equacionável;
 - com a forma de variação previsível qualitativamente, porém não equacionável;
 - com forma de variação imprevisível.

b) Características inerentes aos princípios físicos dos instrumentos

Instrumentos têm características que serão influenciadas pelos princípios físicos envolvidos na sua construção. Dessa forma, instrumentos metrologicamente similares têm valores típicos diferentes dos instrumentos que empreguem outros princípios físicos.

c) Características inerentes a peculiaridades de um lote de produção

Admite-se neste trabalho que as características de instrumentos distintos dentro de um mesmo lote guardam certas correlações, porém têm valores individualizados.

Isto quer dizer que cada parâmetro característico do instrumento pode variar de um instrumento para outro dentro de um lote de produção, porém o lote como um todo terá valores típicos que podem ser diferentes de um lote para outro.

A subdivisão do item a) auxilia na seleção dos modelos de características metroológicas que serão empregadas ao se implementar o modelo de um instrumento. Por exemplo, característica que varie ao longo da faixa de medição, como a repetitividade de um voltímetro, por exemplo, requer a composição de dois modelos individuais: um gerador de dados normalmente distribuídos e um modelo da forma de variação do desvio-padrão ao longo da faixa de medição.

Considerar o estabelecido no item b) permite aproximar o modelo do comportamento real do instrumento. Por exemplo, o erro de linearidade de um transdutor indutivo de deslocamento apresenta uma curva bastante característica, com valores máximos nas regiões correspondentes a um quarto e a três quartos da faixa de medição total, considerando como zero o máximo deslocamento negativo.

Considerar o estabelecido no item c) permite modelar características cuja média varia de forma significativa de um lote de produção para outro. É o caso, por exemplo, da especificação da tolerância de termistores e de extensômetros de resistência. Seus valores nominais são relativamente elevados, porém a dispersão é pequena dentro de um lote.

Grandezas de influência, em especial a temperatura, podem alterar os valores dos parâmetros característicos dos instrumentos. A essa influência pode ser atribuída a mesma divisão adotada para os parâmetros que caracterizam os desvios sistemáticos e aleatórios ao longo da faixa de medição de um instrumento particular.

Prevê-se que os valores das grandezas que correspondem às condições de contorno sejam permanentemente repassados pelo ambiente de simulação, na forma de um conjunto de variáveis globais, para todos os modelos que estiverem sendo empregados num dado tempo. Cada modelo levará em consideração o particular subconjunto que lhe diz respeito. Adicionalmente, tais grandezas poderão ter seus valores alterados individualmente em cada um dos modelos pelo usuário do sistema, tanto antes, quanto durante uma simulação.

A escolha dos parâmetros que integram os modelos dos instrumentos levou em consideração:

- a representatividade do parâmetro na composição da incerteza ao empregar-se o instrumento para compor diferentes cadeias de medição típicas (BACCIGALUPI, 1994; BARP, 2000; BLANK, 1996; CAMARANO, 1993b; DOEBELIN, 1990; FLESCHE, 1999b; FLESCHE, 1993b; FLESCHE, 1992; FREIRE, 1999; KEITHLEY, 1997; MUGINOV, 1997; NASH, 1999; TROFIMENKOFF, 1996; WANDEL, 1998);
- o conjunto de parâmetros usualmente estabelecido por documentos técnicos que sistematizam a apresentação de características de instrumentos (NASA, 1991; COOK, 1993; DOE, 1992a,b; NTS, 2000; NAVY, 1981);
- o conjunto de parâmetros tipicamente apresentado por fabricantes nas especificações de equipamentos (COOK, 1993; DARRIGO, 2001; PALLÁS-ARENY, 1991; DEWEY, 2000; OLIVEIRA, 2001)

Valores dos parâmetros foram obtidos de normas, de publicações técnico-científicas, de especificações de fabricantes e de dados disponíveis de atividades experimentais coletadas de diversas fontes.

Atualmente é muito pequeno o número de informações disponíveis acerca das características dos instrumentos, especialmente as fornecidas pelos fabricantes que, além de poucas, são vagas e muitas vezes inconsistentes.

Dispõe-se de centenas de relatórios de calibração de instrumentos, a maioria deles oriundos de laboratórios da Rede Brasileira de Calibração. Porém o número de informações

quantitativas que puderam ser aproveitadas é extremamente pequeno. Isso ocorre por duas razões:

- os transdutores são os únicos elementos, dentro da instrumentação modular, que vêm sendo calibrados em separado do restante da cadeia de medição;
- as incertezas dos processos de calibração em geral são da mesma ordem de grandeza ou até maiores do que a contribuição de alguns dos parâmetros que se pretende modelar.

A determinação experimental para todos os parâmetros é inviável, por demandar tempo e recursos laboratoriais demasiados. Isso implicou necessidade de atribuição de valores fictícios, para determinados parâmetros. Os valores reais terão que ser ajustados ao longo do tempo, à medida que o conhecimento evolua.

7 Consolidação do sistema de simulação

Os recursos desenvolvidos receberam arte-final e foram integrados e testados para caracterizar efetivamente um sistema de simulação. Ambientes de simulação, modelos de instrumentos e elementos adicionais foram implementados em Labview, resultando num sistema totalmente operacional. O sistema é modular, de muito fácil utilização e atende aos diferentes usuários previstos no capítulo 5.

7.1 Ambientes de simulação

Três ambientes de simulação foram desenvolvidos: um para simulação empregando modelos de características estáticas – InstruSim; dois ambientes para simulação empregando modelos que envolvem características dinâmicas – InstruSim-D/ED e InstruSim-D/F. O InstruSim-D/ED é próprio para utilização dos modelos implementados através de equações de diferenças. O ambiente InstruSim-D/F emprega análise no domínio da frequência, a partir da aplicação da transformada de Fourier aos sinais de medição simulados. Todos os ambientes foram desenvolvidos em Labview 6i.

Para configurar cadeias de medição, o usuário interliga módulos de forma totalmente gráfica, sem qualquer necessidade de programação. Cada cadeia de medição é montada no diagrama de blocos empregando recursos que foram incorporados à paleta de funções do Labview. Tal paleta passou a conter o ícone InstruSim, que faz chamada, de forma hierárquica, a uma série de ícones associados a modelos e demais recursos. Os ícones que correspondem a programas podem ser arrastados e soltados no ambiente de simulação. A edição dos recursos e a interligação dos módulos são feitas empregando os recursos originais da paleta *tools* do Labview. Quatro conjuntos de recursos foram desenvolvidos:

- geradores de grandezas;
- modelos de instrumentos e demais elementos das cadeias de medição;
- módulos de documentação e de análise da simulação;
- ferramentas para geração de novos modelos.

Paralelamente, no painel frontal podem ser introduzidos os controles e os mostradores inerentes aos instrumentos que estiverem sendo empregados.

O sistema não impõe limitações ao número de cadeias que operam simultaneamente.

Foram disponibilizados recursos para simulação das grandezas de influência mais significativas para cada um dos módulos de uma cadeia de medição: temperatura ambiente, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, tensão e frequência da rede elétrica. Essas grandezas foram tratadas dentro do sistema de simulação como variáveis globais, interagindo simultaneamente com todos os instrumentos e demais módulos.

Os ambientes desenvolvidos são totalmente compatíveis com todos os demais recursos disponíveis no Labview. Assim, usuários com conhecimento poderão fazer uso simultâneo da capacidade de programação e depuração do Labview, inclusive de forma interna às cadeias de medição e aos próprios modelos de instrumentos.

7.1.1 Ambiente para simulação estática – InstruSim

De acordo com a classificação apresentada no item 3.4, o InstruSim é um ambiente para eventos contínuos. Assim é, porque todas as variáveis envolvidas podem ser alteradas de forma contínua.

O InstruSim é extremamente amigável para qualquer usuário com conhecimentos mínimos da estrutura de uma cadeia de medição. Para facilitar ao máximo a interação com o usuário, o ambiente não relaciona os valores dos sinais envolvidos na simulação com os respectivos tempos de ocorrência. Em função disso, não permite o emprego de modelos dinâmicos.

O sistema prevê duas formas de operação: intermitente e contínua. Na forma intermitente, a simulação é realizada a cada novo comando do operador. Na forma contínua, simulações são realizadas seqüencialmente até que o usuário comande a parada. Nessa última forma de simulação, as grandezas a medir e as grandezas de influência podem ser alteradas, em tempo real durante a simulação. O sistema responde instantaneamente às novas condições impostas pelo usuário.

O usuário pode selecionar, individualmente, os dados que deverão ser considerados em análises estatísticas, na geração de arquivos de dados e na apresentação de resultados na forma gráfica.

7.1.2 Ambientes para simulação dinâmica - InstruSim-D

Diferem do InstruSim por serem ambientes destinados à simulação envolvendo características dinâmicas dos instrumentos. De acordo com a classificação apresentada no item 3.4, são ambientes para simulação sobre eventos discretos. Isso se deve à variável discreta tempo, que é simulada com resolução preestabelecida.

Adicionalmente aos recursos disponíveis no ambiente de simulação InstruSim, há os controles do tempo de simulação e do número de amostras. A relação entre tempo de simulação e número de amostras estabelece o tempo entre amostras, que caracteriza a resolução. O tempo é tratado nos ambientes também como grandeza simulada, o que permitiu desvincular o resultado da simulação da capacidade de processamento do computador empregado. Dessa forma é plenamente viável a realização de simulações dinâmicas, mesmo em arquiteturas computacionais extremamente lentas, como, por exemplo, sob a Internet.

Em função da prefixação do número de amostras e do tempo de simulação, somente a operação intermitente é viável nesses ambientes.

Detalhamento dos dois ambientes para simulação dinâmica:

Ambiente InstruSim-D/ED:

O ambiente InstruSim-D/ED destina-se à simulação através de modelos baseados em equações de diferenças. O ambiente é totalmente compatível com os modelos estáticos empregados no ambiente InstruSim. Dessa forma, num mesmo experimento simulado, podem ser empregados modelos estáticos de alguns instrumentos e dinâmicos de outros. Isso é importante sob dois aspectos: disponibilidade atual no sistema de simulação bem maior de modelos estáticos do que de dinâmicos; facilidade de ressaltar, na simulação, as características dinâmicas específicas de determinados módulos. Esse é o caso das características dinâmicas de conversores A/D e de transdutores que, na quase totalidade dos casos, interferem de forma muito mais significativa no comportamento dinâmico do que as dos demais módulos das cadeias de medição. Logicamente os modelos dos instrumentos podem conter simultaneamente as características estáticas e dinâmicas.

Nesse ambiente não é imposta qualquer limitação para o número de amostras na simulação.

Ambiente InstruSim-D/F:

O ambiente InstruSim-D/F destina-se à simulação empregando modelos dinâmicos baseados em *fast Fourier transformer* - FFT. Nesse ambiente, ao contrário do que ocorre no ambiente InstruSim-D/ED, devido ao emprego da FFT, o número de amostras na simulação deve ser potência de 2. Isso implica restrições de valores ao tempo entre amostras.

O ambiente InstruSim-D/F foi desenvolvido para aplicação exclusivamente didática dirigida ao aprendizado da transformada de Fourier. O ambiente não é compatível com os modelos desenvolvidos para o ambiente InstruSim. Não houve preocupação neste trabalho com o desenvolvimento de muitos recursos e modelos para o ambiente InstruSim-D/F. Os desenvolvidos tiveram função única de teste operacional do ambiente.

Nos itens seguintes são descritos exclusivamente recursos associados aos ambientes InstruSim e InstruSim-D/ED. Isso é feito por não ter havido aprofundamento no emprego da análise em frequência para simulação, em função da decisão tomada no capítulo 6, de empregar equações de diferenças para modelar características dinâmicas. Dessa forma, o ambiente InstruSim-D/F pode ser entendido como sendo apenas um anexo do sistema de simulação.

7.2 Instrumentos atendidos

Os métodos empregados para desenvolvimento dos modelos são aplicáveis a um grande elenco de instrumentos de medição. O sistema de simulação implementado está preparado para trabalhar com esse elenco de instrumentos. Por uma questão de tempo de desenvolvimento, houve necessidade de se limitar o número de instrumentos efetivamente modelados.

A escolha das grandezas a medir e dos instrumentos empregados na implementação do sistema foi feita considerando quatro fatores:

- representatividade nas aplicações industriais;
- disponibilidade de informações técnicas;
- disponibilidade de instrumentos reais equivalentes;
- envolvimento do máximo número de parâmetros característicos.

Como forma de atendimento a esses critérios, optou-se pelos instrumentos enfocados pelo Labmetro em cursos regulares da UFSC e em cursos de especialização para o meio industrial. Foram definidas como grandezas a medir (ABNT, 1992a): temperatura, deslocamento linear, pressão (manométrica), força e deformação linear relativa.

Os instrumentos e demais módulos das cadeias de medição, modelados e integrados ao sistema de simulação, foram:

a) Transdutores de temperatura

- termopar;
- termorrresistor;
- termistor.

b) Transdutores de deslocamento linear

- potenciométrico.

c) Transdutores de deformação linear relativa

- extensômetro de resistência.

d) Transdutores de força

- extensométrico (com extensômetros metálicos);
- piezorresistivo (com extensômetros piezorresistivos).

e) Transdutores de pressão

- extensométrico (com extensômetros metálicos);
- piezorresistivo (com extensômetros piezorresistivos).

f) Fontes de alimentação para transdutores

- fonte de tensão;
- fonte de corrente.

g) Circuitos conversores para transdutores que requerem alimentação

- divisor de tensão;
- conversor corrente-tensão;
- ponte de Wheatstone;
- *Anderson loop*.

h) Condicionadores de sinais

- amplificador de instrumentação;
- filtro passa-baixas;
- conversor analógico-digital.

i) Voltímetros

j) Multiplexadores

- com chave tipo relé, de 2, de 3 e de 4 contatos;
- com chave tipo semiconductor, de 2, de 3 e de 4 contatos.

k) Fios de ligação

l) Instrumentos compostos

- ohmímetro a dois fios;
- ohmímetro a quatro fios;
- ponte amplificadora para transdutores resistivos em configuração de meia ponte;
- placa de aquisição de sinais.

Todos os modelos das características foram testados individualmente para demonstrar que representam satisfatoriamente o comportamento dos instrumentos e demais elementos das cadeias de medição. Na quase totalidade dos modelos implementados foram representadas características estáticas. Embora individualmente os modelos das características dinâmicas tenham sido exaustivamente testados, poucos instrumentos foram modelados. São eles:

- termopar;
- termistor;
- termorresistor;
- amplificador;
- filtro passa baixas
 - de primeira ordem;
 - de segunda ordem;
 - Buterworth de terceira ordem.
- conversor A/D
 - aproximações sucessivas;
 - paralelo;
 - integração.

Calibrações de instrumentos simulados foram efetuadas, empregando-se como padrão de calibração a característica de resposta nominal do instrumento. Excetuando-se o comportamento dinâmico, para o qual o erro na simulação é função do tempo entre amostras – fato discutido no item 6.3.1, todos os resultados alcançados apresentaram pequena diferença em relação aos valores teóricos esperados. Mesmo quando se empregou recurso de

modelagem pouco convencional, como redes neurais, as influências das características simuladas nunca se afastaram mais do que 1% dos seus respectivos valores teóricos.

7.3 Estrutura da paleta de recursos

Os modelos de instrumentos e os demais recursos de simulação desenvolvidos foram incorporados à paleta de funções do Labview.

A figura 7.1 mostra uma visão parcial da paleta de recursos do InstruSim.

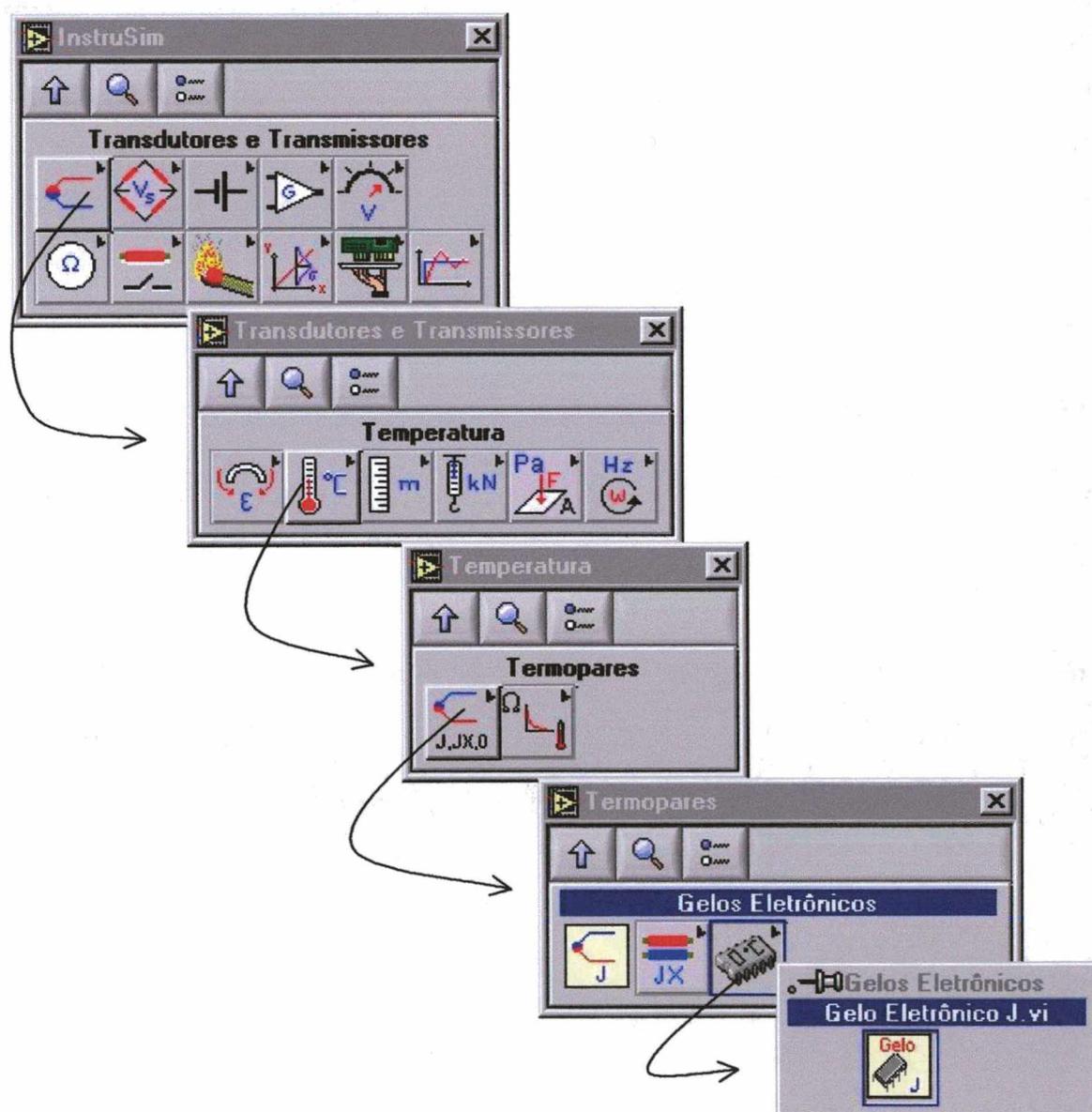


Figura 7.1 – Paleta de recursos do InstruSim – Seleção de gelo eletrônico tipo J.

A divisão dos recursos de simulação pelos *menus* hierárquicos da paleta obedeceu à seguinte estrutura:

a) Transdutores e transmissores

Deformação

Temperatura

Termopares (instrumentos e acessórios)

Termopares (transdutores)

Cabos de extensão e compensação

Gelos eletrônicos

Termistores

Termorresistores

Deslocamento

Força

Pressão

Rotação

b) Circuitos conversores

$\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone

$\frac{1}{2}$ de ponte de Wheatstone

Ponte completa de Wheatstone

Anderson loop

Divisor de tensão

Conversor corrente-tensão

c) Fontes

Fontes de tensão

Fontes de corrente

d) Condicionadores de sinais

Amplificadores

Filtros

e) Mostradores

Voltímetros

Amperímetros

- f) Instrumentos compostos
 - Pontes amplificadoras
 - Ohmímetros
 - Anderson loop*
 - Placas de aquisição de sinais
 - Cadeias de medição completas
- g) Diversos
 - Chaves
 - Cabos
- h) Geradores de grandezas
- i) Ferramentas de análise
 - Gráficos
 - Estatística
- j) Recursos de modelagem
 - Modelos genéricos de instrumentos
 - Módulos de análise de circuitos
 - Modelos de distribuições
 - Modelos de ruídos
 - Recursos de modelagem neural
 - Recursos diversos
- k) Simulação dinâmica
 - Recursos de modelagem dinâmica
 - Modelos dinâmicos de instrumentos
 - Gráficos para simulação dinâmica
 - Geradores de sinais dinâmicos

Cento e dois programas com extensão *.vi*, incluindo modelos e demais recursos, foram desenvolvidos e estão distribuídos nos níveis mais baixos dos *menus*.

7.4 Considerações finais

A figura 7.2 mostra a aparência do diagrama de blocos no ambiente InstruSim-D/ED.

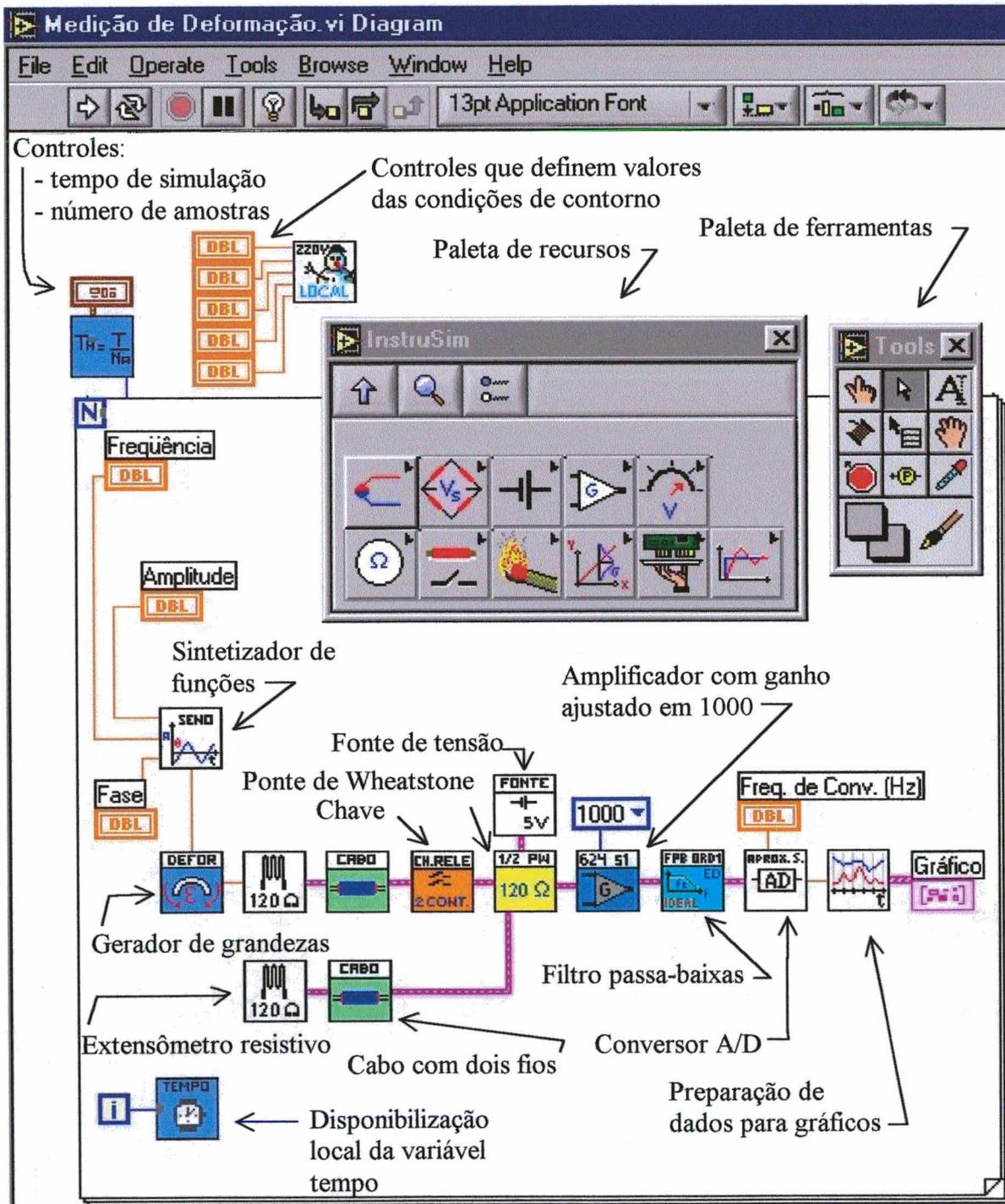


Figura 7.2 – Diagrama de blocos no ambiente InstruSim-D/ED

O fluxo do sinal de medição através da cadeia tem o sentido da esquerda para a direita. Observe-se que os módulos de análise de circuitos são internos aos modelos, ficando transparentes para o usuário. Observe-se também a correlação entre módulos simulados e módulos físicos.

A figura 7.3 ilustra a utilização simultânea do painel frontal e do diagrama de blocos no ambiente InstruSim.

A cadeia de medição, configurada no diagrama de blocos, é formada por termopar, fio de extensão, gelo eletrônico, amplificador e voltímetro. O bloco conectado à esquerda do termopar é um gerador da grandeza temperatura. Nesse exemplo, a interação com o usuário durante a simulação é feita, principalmente, pelo painel frontal. Aí se enquadram o estabelecimento dos valores das condições de contorno, a definição do valor e da unidade do mensurando, a seleção de dados para processamento e a visualização de resultados.

Todos os parâmetros dos instrumentos, à exceção do ganho do amplificador, estão definidos internamente aos próprios modelos. O ganho do amplificador está estabelecido – valor igual a 1000, através de uma constante colocada no diagrama de blocos. Essa forma de definição é opcional para todos os parâmetros e para todas as grandezas de influência e mensurandos.

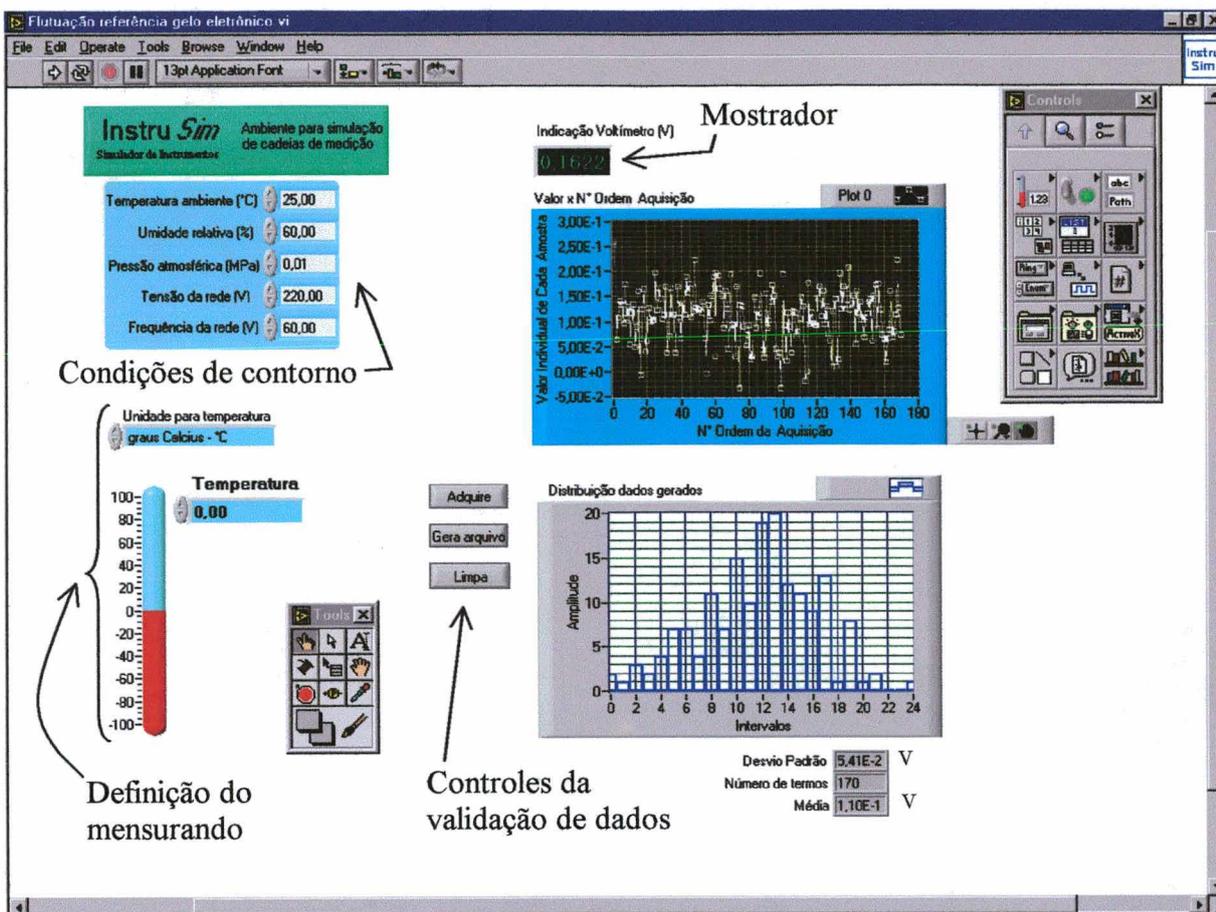
Comparando-se as figuras 7.2 e 7.3b pode-se observar a semelhança, citada no item 7.1, entre os ambientes InstruSim-D/ED e InstruSim. A diferença está apenas na estrutura de laço, exclusiva do ambiente InstruSim-D/ED, controlada pela relação entre o tempo de simulação e o número de amostras.

Observa-se também na figura 7.3b que, conforme destacado no item 7.3, o *menu* com os recursos do InstruSim foi adicionado à paleta de funções do Labview, permitindo que todos os recursos originais deste possam ser utilizados nos ambientes de simulação.

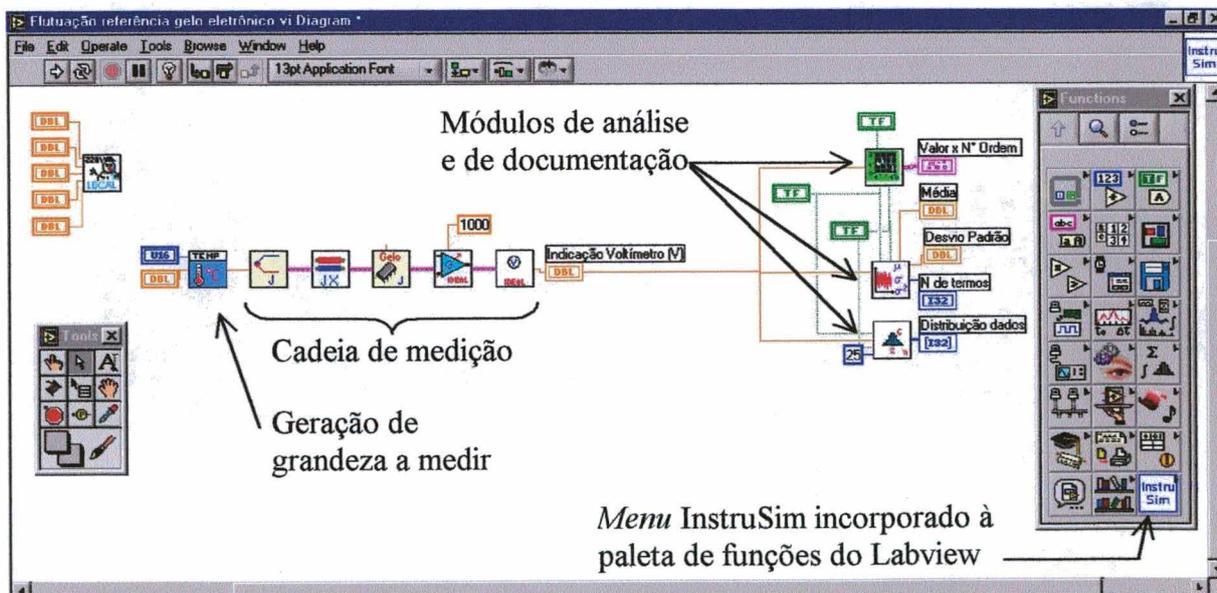
Embora limitados em quantidade de instrumentos modelados, os ambientes de simulação implementados estão integralmente estruturados e prontos para receber novos modelos de instrumentos e demais recursos de modelagem e de simulação.

Modelos reaproveitáveis das principais características metroológicas foram desenvolvidos e procedimentos foram elaborados visando a agilizar a implementação futura de tais recursos.

Centenas de configurações diferentes de cadeias de medição foram testadas, mostrando a plena operação do sistema de simulação como um todo.



a) Painel frontal



b) Diagrama de blocos

Figura 7.3 – Exemplo de simulação no ambiente InstruSim

8 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

8.1 Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo estruturar um sistema de simulação de instrumentos de medição, com ênfase em cadeias modulares.

A necessidade de dispor de tal sistema foi identificada ao se analisar a estrutura metrológica dos sistemas da qualidade. Deficiências foram constatadas nos procedimentos usuais, especialmente quando há emprego de instrumentação modular.

Mostrou-se que há grande potencial dos sistemas de simulação para subsidiar a definição de procedimentos relativos à garantia da qualidade e para treinamento de pessoal.

Não foi encontrada em toda a bibliografia consultada nenhuma referência a sistemas adequados à simulação de cadeias modulares de medição. Em decorrência foi proposta a estruturação de um sistema. O sistema estruturado reúne recursos do Labview e do Visual Basic. Um protótipo foi desenvolvido sobre o Labview.

A estruturação do sistema e o desenvolvimento do protótipo exigiram amplo trabalho de levantamento do estado-da-arte em metrologia, instrumentação eletrônica e em técnicas de modelagem e de simulação. Procurou-se aproximar os conceitos aplicados em metrologia àqueles inerentes à instrumentação.

Recursos pouco usuais na modelagem – equações de diferenças e redes neurais foram analisados. Modelos e ferramentas de simulação foram desenvolvidos com tais recursos.

O presente trabalho proporcionou as seguintes contribuições ao estado-da-arte:

- Identificação de deficiências nos procedimentos usuais de garantia da qualidade. Foi proposta uma estrutura para atender aos sistemas da qualidade nos quais os procedimentos metrológicos envolvem cadeias modulares de medição.
- Contribuição à padronização da terminologia em metrologia e instrumentação. Foram identificadas divergências e omissões em normas, recomendações técnicas, documentos de fabricantes e no próprio Vocabulário Internacional de Metrologia. Propostas foram formuladas.

- Classificação dos meios usuais de emprego de recursos computacionais, como forma de auxílio à garantia da qualidade metrológica. Foi identificado o potencial da aplicação de um sistema de simulação direcionado à área.
- Estruturação de um sistema de simulação de cadeias de medição. Um sistema com características e estrutura inéditas foi proposto. Um protótipo integralmente operacional foi desenvolvido.
- Comparação entre modelos para análise de incertezas e modelos para representação do comportamento metrológico. Identificou-se a análise de incertezas como a referência mais aproximada à simulação do comportamento metrológico. Essa foi empregada para subsidiar o desenvolvimento dos modelos de instrumentos. Foram analisados os modelos usuais das principais características metrológicas aplicáveis à avaliação de incertezas. Modificações necessárias para representação do comportamento metrológico foram propostas.
- Emprego de modelos neurais para modelar características metrológicas. Não se encontrou na literatura nenhuma outra proposta de modelagem de características metrológicas em modelos de instrumentos eletrônicos modulares através de redes neurais. Um ambiente para implementação de modelos neurais foi desenvolvido. Modelos neurais foram implementados e testados.
- Modelagem de características dinâmicas através de equações de diferenças. Ao contrário do que é usual na modelagem de características dinâmicas, ou seja, da modelagem no domínio da frequência, justificou-se a utilização da modelagem no domínio do tempo para simulação de instrumentos.
- Estruturação de uma forma de divisão da cadeia de medição em segmentos de cadeias. O desenvolvimento de módulos de análise de circuitos foi baseado numa proposta de segmentação da cadeia de medição. Isso permitiu tratar as inter-relações dos módulos de forma transparente ao usuário e empregar na modelagem somente circuitos elétricos relativamente simples.

O desenvolvimento deste trabalho levou às seguintes conclusões:

a) Quanto ao sistema de simulação:

- O emprego do Labview na aplicação proposta mostrou-se justificável. As limitações da linguagem são plenamente compensadas: pela facilidade de utilização do próprio Labview como ambiente de simulação; pela fácil associação

biunívoca dos módulos desenvolvidos aos sistemas físicos correspondentes; pelos recursos de depuração disponíveis.

- O protótipo desenvolvido é de fácil utilização por qualquer usuário que tenha noções da estrutura de uma cadeia de medição modular, sem exigir conhecimentos relativos aos circuitos elétricos e eletrônicos envolvidos.
- A estruturação do sistema, prevendo diferentes categorias de usuários, permitiu o desenvolvimento de um sistema adequado a usuários com diferentes níveis de formação no tocante à instrumentação de medição. Seu uso é adequado a treinamentos específicos de metrologia básica, trabalhando com as características de cadeias completas de medição. Também é adequado a treinamentos focados na análise dos instrumentos, suas características individuais e suas formas de interligação.
- A forma perfeitamente padronizada e modular dos modelos dos instrumentos e dos recursos de simulação permitirá o continuado aprimoramento do sistema de simulação, com fácil desenvolvimento de recursos adicionais.
- O emprego de variáveis globais para modelar condições de contorno aplicáveis ao ambiente de simulação permitiu grande versatilidade no estabelecimento das condições de simulação.
- O sistema de simulação da forma como está implementado tem toda a estrutura necessária para que possa ser empregado na avaliação de incertezas pelo método de Monte Carlo. Para tanto basta que sejam empregados modelos representativos para as características a analisar e que o sistema de simulação seja colocado a operar em modo contínuo, com um grande número de simulações consecutivas.

b) Quanto aos modelos:

- A estruturação dos modelos a partir da modelagem das características metrológicas permite integral reaproveitamento de módulos e fácil implementação de modelos de novos instrumentos.
- O uso de recursos neurais para modelagem de características de instrumentos mostrou-se plenamente viável e, em muitos casos, vantajosa quando comparada aos meios tradicionais de modelagem.
- A forma de modelagem adotada para as características dinâmicas permite que não-linearidades sejam adequadamente tratadas, de forma transparente ao usuário.

- Níveis muito diferentes de sofisticação podem ser impostos aos modelos, de acordo com a conveniência, podendo-se tornar esse fato imperceptível para o usuário que simplesmente empregue, no ambiente de simulação, modelos previamente desenvolvidos.
- A segmentação da cadeia de medição, para efeito de análise de circuitos, permitiu que se desenvolvessem modelos simples para as interligações.
- Os valores dos parâmetros característicos dos modelos implementados podem ser facilmente alterados pelo usuário, possibilitando analisar individualmente o efeito de cada uma das características na composição do sinal de medição. Dessa forma, a adequação dos modelos para que sejam empregados para analisar incertezas de medição pelo método de Monte Carlo corresponde à simples alteração de valores dos parâmetros representativos para que assumam valores variáveis dentro das faixas correspondentes a situações de piores casos.

8.2 Sugestões para trabalhos futuros

O sistema de simulação da forma como foi estruturado permite que ele seja empregado para a nucleação de trabalhos de pesquisa e de desenvolvimento em diversas áreas do conhecimento. A literatura analisada durante o desenvolvimento deste trabalho evidenciou que a metrologia, a instrumentação, a eletrônica, a simulação, a análise de sistemas não-lineares e as técnicas de inteligência artificial terão destaque ainda maior no meio científico nos próximos anos.

Muitas alternativas foram vislumbradas durante o desenvolvimento do trabalho. As que não puderam ser satisfatoriamente exploradas são propostas na seqüência como temas plausíveis para futuros trabalhos:

- Aprofundamento no emprego de recursos neurais para modelagem de características metroológicas individuais e de características de instrumentos e de cadeias de medição como um todo. A capacidade de aprendizado das redes neurais pode ser explorada para que elas representem conjuntos de características, sem necessidade de modelagem individual. Características dinâmicas também devem ser passíveis de modelagem desde que se incorpore dinâmica à rede, como, por exemplo, linhas de atraso ou realimentações.

- Automação do processo de geração de modelos a partir de sistemas físicos reais. Para tanto há toda uma infraestrutura já em operação no Laboratório de Metrologia e Automação da UFSC. Caso típico passível de automação é o do treinamento de modelos neurais. Nesse caso, podem ser extraídas, de forma automatizada, não só características metrológicas de instrumentos, mas também características operacionais de elementos empregados em bancadas, tais como atuadores pneumáticos e motores elétricos.
- Exploração de recursos de inteligência artificial para modelar grandezas de influência e demais condições de contorno. As condições de ensaio aplicáveis a situações típicas industriais e laboratoriais podem ser representadas de diferentes formas empregando recursos da inteligência artificial. Soluções híbridas podem ser promissoras. Por exemplo, sistemas especialistas podem ser empregados para direcionar simulações; lógica difusa pode ser empregada para modelar as condições de contorno; redes neurais podem armazenar comportamentos típicos de instrumentos e de dispositivos auxiliares.
- Aprofundamento na modelagem de instrumentos. Aí há uma vasta gama de possibilidades a explorar, de acordo com a formação e a área de interesse do pesquisador. A exploração mais detalhada dos modelos de instrumentos ou de famílias de instrumentos, de circuitos conversores, de elementos adicionais, tais como fios e chaves, exige que muitos trabalhos sejam ainda desenvolvidos.
- Análise das reais perspectivas de aplicação do sistema de simulação desenvolvido. A aplicação para treinamento é claramente viável. No entanto, o sistema tem potencial para aplicação em muitas outras situações típicas da metrologia. A simulação de condições específicas para subsidiar decisões quanto à aquisição de equipamentos, a simulação para efeito de análise de incertezas e a simulação para desenvolvimento de módulos das cadeias de medição correspondem a possibilidades a serem exploradas.
- Desenvolvimento de um conjunto didático para ensino de metrologia e de instrumentação. O protótipo desenvolvido corresponde a um laboratório. Da mesma forma que em um laboratório real, experimentos podem ser configurados para auxiliar no processo de aprendizado. Para tanto é desejável uma reestruturação da seqüência e da forma como são tradicionalmente ministrados os conteúdos, para que se faça máximo aproveitamento das diferenças existentes entre laboratório real e laboratório simulado.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Requisitos gerais para a capacitação de laboratórios de calibração e de ensaios*. ABNT ISO/IEC GUIA 25, Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Grandezas e unidades da mecânica*. NBR 12533. Rio de Janeiro, 1992a. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Manômetros – verificação de características*. NBR 11968. Rio de Janeiro, 1992b. 3p.

ADACHI, T.; KAMIGAKI, T.; OKAWA Y. Application of the case-based learning to measuring signs painted on road surfaces. In: AIMaC'91 IMEKO Symposium. *Proceedings*, p.61-66, Kyoto (Japan), 1991.

ALFAGENME, J. J.G.; LOPEZ M. R.; BOTE L. S. Comparison between theoretical models and experimental measurements of electrodynamic loudspeaker systems. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.

AL-HASHIMI, B. *The art of simulation using PSpice*. New York: CRC Press, 1995.

ALIPPI C. et al. New trends in intelligent system design for embedded and measurement applications. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.6, p.36-44, June 1999.

ALIPPI, C.; FERERO A.; PIURI, V. Artificial intelligence for instruments and measurement applications. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.1, n.6, p.9-17, June 1998.

ABROSIUS, E. E.; FELLOWS, R. D.; BRICKMAN, A. D. *Mechanical measurement and instrumentation*. p. 66-90. New York: Ronald Press Company, 1966.

ANACOM. *Simuladores para a área educacional*. Publicação comercial da Anacon Software: Anacom Flash Especial, n.4, São Paulo, 1. trimestre 2000. 8p.

ANALOG DEVICES. *Catálogo do fabricante*. Disponível em: <http://products.analog.com/products_html/list_gen_120_2_1.html>. Acesso em: 3 jul. 2000.

ANALOG DEVICES. *Monolithic thermocouple amplifier with cold junction compensation*. Temperature Measurement Components, v.1, p.8. USA: Analog Devices, 1999.

ANDERSON, K. F. NASA's Anderson loop. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.1, n.3, p.5-15, Mar. 1998a.

ANDERSON, K. F. How to contain your currents: use gradient guards and charge channels. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.1, n.9, p.24-27, Sept. 1998b.

ANDERSON, K. F. A successor to the Wheatstone bridge: NASA's Anderson loop. CAL LAB – *The International Journal of Metrology*, v.5, n.5, p.23-32, Sept./Oct. 1998c.

ANDERSON, K. F. The new current loop: an instrumentation and measurement circuit topology. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.5, p.1061-1067, Oct. 1997.

ANGRISANI, L.; PIETROSANTO, A. A technique for electromagnetic interference measurements on instruments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.47, n.4, p.925-929, Aug. 1998.

ANSI/ISA – AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE / INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA. *Process instrumentation terminology*. ANSI/ISA Standard S51.1-1979. (Reaffirmed 1993). USA: ANSI, 1993. 68p.

ANSI/ASME – AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE / AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, THE. *Gauges – pressure indicating dial type – Elastic element*. ANSI/ASME Standard B40.1 USA: ASME, 1985. 34p.

ANTAO, B. A. A. Simulation and modeling: AHD languages – a must for time-critical designs. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, p.12-17, July 1996.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Manual of Petroleum Measurement Standards*. Chapter 13 – Section 1: Statistical aspects of measuring and sampling. Washington, June 1985. 17p.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Manual of Petroleum Measurement Standards*. Chapter 13 – Section 2: Methods of evaluating meter proving data. Washington, Nov. 1994. 42p.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Quality manual checklist: Transition from API Spec Q1, 5th edition to API Spec Q1, 6th edition*. Washington, Sept. 1999. 7p.

ARABI K.; KAMINSKA B.; RZESZUT, J. BIST for D/A and A/D converters. *IEEE Design & Test of Computers*, v.13, n.4, p.40-49, Winter, 1996.

ARPAIA P.; BACCIGALUPI, A; PIETROSANTO, A. Performance optimization of VXI-based measurement stations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.44, n.3, p.828-831, June 1995.

ARRI, E. et al. On the application of guide to the expression of uncertainty in measurement to measuring instruments. *Measurement – Journal of the International Measurement Confederation IMEKO*, n.16, p.51-57, 1995.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIAL. *Standard practice for utilization of test data to determine conformance with specifications*. ASTM-D 3244-98. USA, 1998. 8p.

BACCIGALUPI A.; BERNIERI A.; PIETROSANTO A. A digital-signal-processor-based measurement system for on-line fault detection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.3, p.731-736, June 1997.

BACCIGALUPI, A.; DAPONTE, P.; D'APUZZO M. An improved error model of data acquisition systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.43, n.2, p.220-225, Apr. 1994.

BAGGI, H. et al. Burr-Brown Spice based macromodels, Rev. F. *Application note* AB-020F. Tucson: Burr-Brown, Jan. 1995.

BARBETA, V. B. Use of simulation software for physics teaching. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.

BARP, A. M. *Metodologia de avaliação e de gerenciamento da incerteza de sistemas de medição de temperatura*. Florianópolis, 2000. 133p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial). Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.

BARP, A.; FLESCHE, C. A. Avaliação da incerteza de medição durante o projeto de cadeias de medição. In: III SEMETRO – Seminário Internacional de Metrologia Elétrica. *Anais em CD-ROM*. Rio de Janeiro, 15 a 17 set. 1998.

BARRETO, J. M. *Inteligência artificial no limiar do século XXI*. Florianópolis: PPP Edições, 1997.

BARWICZ, A.; MORAWSKI R. Z. Teaching measuring systems. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.3, p.20-27, Mar. 1999.

BEICHL I.; SULLIVAN. F. Monte Carlo time after time. *IEEE Computational Science & Engineering*, v.4, n.3, p.91-94, July/Set. 1997.

BELLOMO, N.; PREZIOSI L. Mathematical problems in metrology modeling and solution methods. In: Workshop Advanced Mathematical Tools in Metrology. *Proceedings*, p.23-36, Torino (Italy), Oct. 1993.

BENNICH, P. Dimensional quality control and quality management in manufacturing companies. In: Seminário Internacional para Controle da Qualidade SI-MpCQ-97. *Proceedings*. Florianópolis, out. 1997.

BENNICH, P. The assessment of conformance to geometrical product specifications. In: Seminário Internacional para Controle da Qualidade SI-MpCQ-97. *Proceedings*. Florianópolis, out. 1997.

BICH, W.; TAVELLA P. Calibration by comparison in metrology: a survey. In: Workshop Advanced Mathematical Tools in Metrology, *Proceedings*, p.155-163, Torino (Italy), Oct. 1993.

BIPM, et al. *Guia para expressão da incerteza de medição*. 2. ed. Tradução por INMETRO et al. de: "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement". Rio de Janeiro: INMETRO, 1998. 120p.

BLANK, M. *Sistematização das especificações metrológicas em sistemas automatizados de aquisição de sinais*. Florianópolis, 1996. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

BLANK, M.; FLESCHE, C. A. Sistematização da análise de erros na multiplexação automatizada de transdutores piezoelétricos convencionais. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. *Anais em CDROM*. Bauru, dez. 1997a.

BLANK, M.; FLESCHE, C. A. Análise comparativa entre erros metrológicos decorrentes da multiplexação automatizada obtidos em análise teórica e experimental. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. *Anais em CDROM*. Bauru, dez. 1997b.

BOCK, W. J. et al. Automatic calibration of fiber-optic strain sensor using self-learning system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.43, n.2, p.341-346, Apr. 1994.

BOGUSLAVSKY, J. et al. Instrument platforms are converging. *Research & Development*, v.42, n.1, p.26-27, Jan. 2000.

BOROVICKA, M. Metrology and quality of final product – methodology. In: 6th IMEKO Symposium – Metrology for Quality Control in Production. *Proceedings*, p.59-61, Vien, Sept. 8-10, 1998.

BORTOLAN, G. Interference with fuzzy logic. In: Workshop Advanced Mathematical Tools in Metrology. *Proceedings*, p.47-56, Torino (Italy), Oct., 1993.

BRIDGET, D. ISO 9000 changes the quality focus. *Quality*. v.39, n.4, p.52–56, Apr. 2000.

CAMARANO, D. M.; FLESCHE, C. A. Methodology to adjust calibration intervals of temperature electric transducer. In: XIII IMEKO World Congress. *Proceedings in CDROM*. Itália, Sept. 1994.

CAMARANO, D. M.; FLESCHE, C. A. Garantia da qualidade metrológica de sistemas automatizados de medição de temperatura com transdutores elétricos. In: Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. *Anais*, v.1, p.407-413, Madri, set. 1993a.

CAMARANO, D. M. *Procedimentos aplicáveis à garantia da qualidade metrológica dos resultados na termometria automatizada com termopar e sensores resistivos*. Florianópolis, 1993b. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

CAMARANO, D. M.; FLESCHE, C. A. Erros na multiplexação automatizada de transdutores de temperatura tipo termopar, termorresistor e termistor. In: V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. *Anais*. Punta Arenas, dez. 1992.

CARMO, R. W. Process control teaching tools. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.

CHANG, P. et al. A triangular connection Hopfield neural network approach to analog-to-digital conversion. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.43, n.6, p.882-888, Dec. 1994.

CHEN, C. L., WANG, S. C. A PC-based adaptive software for automatic calibration of power transducers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.5, p.127-131, Oct. 1997.

CHEN, L.; RAO S. S. Manipulation of uncertainties in the determination of optimal machining conditions under multiple criteria. *Transactions of the ASME*, v.119, p.186-192, May 1997.

CHEN, W. K. *The circuit and filters handbook*. New York: CRC Press, 1995.

- CHIORBOLI, G.; FRANCO, G.; MORANDI C. Uncertainties in quantization-noise estimates for analog-to-digital converters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.1, p.56-59, Feb. 1997.
- CHOMA JR, J. CAS 101: preparing electrical engineering students for the challenges of the VLSI communications circuits' era. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, p.16-22, May 1998.
- CHRYSLER, et al. *Análise dos sistemas de medição (MSA) – Manual de referência – Primeira edição brasileira*. São Paulo: jun. 1997. Tradução de: "Measurement Systems Analysis Reference Manual".
- CHRYSLER, et al. *QS9000 – Manual of statistical process control*. Automotive Industry Action Group, Detroit, Michigan, 1995.
- CHUA, L. O. et al. CNN universal chips crank up the computing power. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, p.18-28, July 1996.
- CHUGANI, M. HANKS, J. G math – a new paradigm for mathematics. National Instruments, *Application Note* 091, Nov. 1996. 12p.
- COOK, S. C. A methodology for formulating measuring instrument specifications. *Measurement*. Elsevier Science B. V., n.11, p.1-31, London, 1993.
- COPSTEIN, B.; MÓRA, M. C.; RIBEIRO, L. An environment for formal modeling and simulation of control systems. In: 33 rd Annual Simulation Symposium. *Anais em CDROM*. Washington, D.C., Apr. 16-22, 2000.
- COX, M. G. A classification of mathematical software for metrology. In: Workshop Advanced Mathematical Tools in Metrology. *Proceedings*, p.239-246, Torino (Italy), Oct. 1993.
- CRISP, P. B. DMM terminology. Appendix to article "A generic DMM test and calibration strategy". CAL LAB – *The International Journal of Metrology*, v.4, n.4, p.31-33, July/Aug. 1997.
- CRISTALDI, L.; FERRRERO, A. PIURI, V. Programmable instruments, virtual instruments and distributed measurement systems: what is really useful, innovative and technically sound? *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.9, p.20-27, Sept. 1999.
- DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; MCCONNELL, K. G. *Instrumentation for engineering measurements*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- DAMATO, T.; MAEGAVA, L. M.; MACIEL FILHO R. The use of the software Matlab to improve chemical engineering education. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.
- DARRIGO, S. R. *Desenvolvimento de modelos do comportamento metrológico estático de instrumentos de medição*. Florianópolis, 2001. 116p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.

DE NEGRI, V. J. *Estruturação da modelagem de sistemas automáticos e sua aplicação a um banco de testes para sistemas hidráulicos*. Florianópolis, 1996. 157p. Tese (Doutoramento em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

DEWEY, F. R. *A complete guide to data sheets – Part 2: The essential parts of the data sheet*. Sensors Magazine. Oct. 1998. Disponível em: <<http://www.sensorsmag.com/articles/1098/ds21098/index.htm>>. Acesso em: 03 jul. 2000.

DIAS, J. L. M. *Medida, normalização e qualidade; aspectos da história da metrologia no Brasil*. Rio de Janeiro, 1998. 292p.

DIECK, R. H. *Measurement uncertainty – Methods and application*. 2. ed. USA: ISA – Instrument Society of America, 1997. 223p.

DIETRICH, E. Measurement system capability study state-of-the-art. In: 6th IMEKO Symposium – Metrology for Quality Control in Production. *Proceedings*, p.125-132, Vien, Sept., 8-10, 1998.

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *Überdruckmeßgeräte mit elastischem Meßglied für die allgemeine Anwendung – Anforderungen und Prüfung*. DIN 16005. Berlin, 1985. 6p.

DOBROWIECKI, T. P. et al. Will measuring instruments turn into agents? *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.4, p.991-995, Aug. 1997.

DOE – U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY. *DOE Handbook: Guide to good practices for on-the-job training*. DOE-HDBK-1206-98. Washington, 1998. 61p.

DOE – U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY. *DOE Handbook: Guide to good practices for developing learning objectives*. DOE-HDBK-1200-97. Washington, 1997. 48p.

DOE – U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY. *DOE Training Program Handbook: A systematic approach to training*. DOE-HDBK-1078-94. Washington, 1994. 216p.

DOE – U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY. *DOE Standard: Guide to good practices for control of equipment and system status*. DOE-STD-1039-93. Washington, 1993a. 29p.

DOE – U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY. *DOE Fundamentals Handbook: Engineering symbology, print and drawings*. Vol 2 of 2. DOE-HDBK-1016/2-93. Washington, 1993b. 96p.

DOE – U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY. *DOE Standard: Guideline to good practices for control and calibration of measuring test equipment at DOE nuclear facilities*. DOE-STD-1054-93. Washington, 1993c. 17 p.

DOE – U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY. *DOE Fundamentals Handbook: Instrumentation and control*. Vol 1 of 2. DOE-HDBK-1013/1-92. Washington, 1992a. 132p.

DOE – U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY. *DOE Fundamentals Handbook: Instrumentation and control*. Vol 2 of 2. DOE-HDBK-1013/2-92. Washington, 1992b. 168p.

DOD – U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE. *Calibration systems requirements*. Military Standard - MIL-STD-45662A. - Washington, Aug. 1988.

DOEBELIN, E. O. *Measurement systems: application and design*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1990.

DOMINGUES, A. H. An architecture of cooperative learning in distance education context. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.

DURAKBASA, M. N. Flexible management and intelligent confirmation of measuring equipment. In: 6th IMEKO Symposium – Metrology for Quality Control in Production. *Proceedings*, p.793-798, Vien, Sept. 8-10, 1998.

DYER, S. A.; SCHMALZEL J. L. Macroelectronics: a gateway to electronics and instrumentation education. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.47, n.6, p.1507-1511, Dec. 1998.

EAL – European Cooperation for Accreditation of Laboratories. EAL-R2 - *Expression of the uncertainty of measurement in calibration*, 1996.

EATHERLEY, G. J.; PETRIU, E. M. A fuzzy controller for vehicle rendezvous and docking. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.44, n.3, p.810-814, June 1995.

ECSS – EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. *Space Engineering – Verification*. ECSS-E-10-02A, Rev. 1. Noordwijk (Netherlands) Nov. 1998. 144p.

ECSS – EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. *Space product assurance - Glossary of terms*. ECSS-P-001A, Rev. 1. Noordwijk (Netherlands) June 1997. 36p.

ECSS – EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. *Space product assurance – Quality assurance*. ECSS-Q-20A. Noordwijk (Netherlands) Apr. 1996. 59p.

EICHHORN, M. The fuzzy control design toolbox for use with Matlab and application for optimum fuzzy control design strategies. In: World Automation Congress – Soft Computing with Industrial Applications. *Proceedings*, v.5, p.181-188, Montpellier (France), May 28-30, 1996.

ELLIS G. *Control system design guide*. 2. ed. New York: Academic Press, 2000.

FARAR, P.; BREZINA, I. Calibration – the primary requirement of accurate measurements. In: 5th IMEKO TC-14 Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control. *Proceedings*, p.38-45, Zaragoza (Spain), Oct. 25-27, 1995.

FATHI M. T.; HILDEBRAND, L. Function approximation using fuzzy logic and evolution strategies. In: World Automation Congress – Soft Computing with Industrial Applications. *Proceedings*, v.5, p.197-202, Montpellier (France), May 28-30, 1996.

FERNICOLA, V. C.; CROVINI L. Digital signal processing for fiber-optic thermometers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.44, n.2, p.447-450, Apr. 1995.

FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. *Theory and design for mechanical measurements*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

FLEIRE, R. C. S.; DAHER, S.; e DEEP, G. S. A highly linear single p-n junction temperature sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.43, n.2, p.127-131, Apr. 1994.

FLESCH, C. A.; SOARES JR, L. A methodology for unification in the treatment of metrological aspects in the quality assuring systems. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM 99). *Anais em CD-ROM*. Águas de Lindóia: 22 a 26 nov. 1999a.

FLESCH C. A.; BARP A. M. Avaliação a priori da incerteza em sistemas modulares de medição de temperatura. In: IV Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIDIM/99. *Anais em CDRom*. Santiago de Chile, 23 a 26 nov. 1999b.

FLESCH, C. A.; SCAVONE, R. Aplicación de sistemas expertos para determinar intervalos de calibración de instrumentos de medición en bancos de ensayo. *Revista Internacional Indexada Información Tecnológica*, ISSN 0716-8756. v. 9, n.2, p.169-176, 1998.

FLESCH, C. A. *Metrologia*. Apostila da disciplina Metrologia e Eletrônica para Experimentação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC. Florianópolis: Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC, 1997.

FLESCH, C. A.; GALAZ, M. J. Determinação da função beta e sua aplicação na metrologia. In: XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. *Anais*. Belo Horizonte, dez. 1995.

FLESCH, C. A.; CAMARANO, D. M. Proposta de metodologia de seleção dos módulos físicos e lógicos de um processo de medição automatizado de temperatura com transdutores dos tipos termopar, termorresistor e termistor. In: XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. *Anais*. v.3., p.269-274. Brasília, dez. 1993a.

FLESCH, C. A.; FRANÇA, L. R. G. Sistema de gerenciamento de instrumentos de controle geométrico: caracterização e desenvolvimento de um protótipo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. *Anais*. v.3, p.1551-1554 Brasília, dez. 1993b.

FLESCH, C. A.; TRONCOSO, L. S. Sistematização da análise das fontes de erros na multiplexação automatizada de extensômetros resistivos. In: V Congresso Nacional de Ingeniería Mecánica. *Anais*. Punta Arenas, dez. 1992.

FLUKE. *Calibration: Philosophy in Practice*. 2. ed. Everett: Fluke, Apr. 1994.

FORBES, A. B. Mathematical software for metrology: meeting the needs of the metrologist. In: Workshop Advanced Mathematical Tools in Metrology. *Proceedings*, p.247-253, Torino (Italy), Oct. 1993.

FOTY, D. *Mosfet modeling with SPICE: principles and practice*. New Jersey: Prentice Hall, 1997

FOWLER, K. The human interface. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.9, p.47-50, Sept. 1999.

FRANÇA, L.R.G. *Sistema de gerenciamento de instrumentos de controle geométrico: caracterização e desenvolvimento de um protótipo*. Florianópolis, 1993. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

FREIRE, R. C. S.; DEEP, S. G. Error in the thermoresistive sensor-based feedback measurement configuration due DC amplifier offset voltage. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.48, n.1, p.50-53, Feb. 1999.

FUJIMOTO, H.; TANAKA, M.; NAKAYAMA, K. Noise reduction in an optical interferometer for picometer measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.44, n.2, p.471-474, Apr. 1995.

GAJDA, J.; SZYPER, M. Parametric optimization of measuring systems according to the joint error criterion. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.4, p.769-775, Aug. 1997.

GEDEON, T. D. Fuzzy-neural interpolation for numeric data. In: World Automation Congress – Soft Computing with Industrial Applications. *Proceedings*, v.5, p.237-242, Montpellier (France), May, 28-30, 1996.

GHAUSI, M. S.; LAKER, K. R. *Modern filter design – Active RC and switched capacitor*. USA: Prentice-Hall, 1981.

GOES, F. M. L.; MEIJER, C. M. A simple accurate bridge-transducer interface with continuous autocalibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.3, p.704-710, June 1997.

GONÇALVES JR.; A. A. *Metrologia: Parte 1 – Apostila utilizada no curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial da UFSC*. Florianópolis: Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC, 1997.

GRACHANEN, C. L. Uncertainty Calculator: a freeware tool for expressing measurement uncertainty. CAL LAB – *The International Journal of Metrology*, v.4, n.2, p.18-21, Mar./Apr. 1997.

HABBADI, A.; NOYES, D.; SOLER, F. Smart sensors design for real-time quality control in machining. In: 5th IMEKO TC-14 Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control. *Proceedings*, p.396-405, Zaragoza (Spain), Oct. 25 –27, 1995.

HART SCIENTIFIC. *Catálogo do fabricante*. Disponível em: <<http://www.hartscientific.com>>. Acesso em: 18 mar. 2000.

HAYT, W. H. J.; KEMMERLY, J. E. *Análise de circuitos em engenharia*. Tradução de José Rubens de Doria Porto. São Paulo: McGraw-Hill, 1978.

HBM – HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. *Catálogo eletrônico de produtos*. Disponível em: <<http://hbm.de/english/prod/dmp40.html>>. Acesso em: 18 dez. 1999.

HECKMANN, J. R. *Identificação de potenciais aplicações da inteligência artificial na metrologia*. Florianópolis, 1999. 142p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.

HECKMANN, J. R.; FLESC, C. A. Minimização de incertezas em circuitos de linearização de transdutores através de algoritmos genéticos. In: III SEMETRO – Seminário Internacional de Metrologia Elétrica. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, 15 a 17 set. 1998.

HEINLOTH, S. Good-bye QS-9000? *Quality Magazine*. v.39, n.3, p.50-54, Mar. 2000.

HENNING, H.; GERLACH, T.; TRYBA, V. A backpropagation algorithm for fuzzy systems. In: World Automation Congress – Soft Computing with Industrial Applications. *Proceedings*, v.5, p.301-306, Montpellier (France), May 28-30, 1996.

HERAEUS. *Catálogo do fabricante*. Disponível em: <<http://www.heraeus.com>>. Acesso em: 07 mar. 2000.

HEWLETT PACKARD. *Calculating the uncertainty of a single measurement*. Publicações técnicas do fabricante. Disponível em: <http://www.uktm.external.hp.com/mikehut/one_meas/unc.html>. Acesso em: 15 abr. 2000.

HEWLETT PACKARD. *Test & Measurement Catalog*. Catálogo do fabricante. USA: 1999.

HEWLETT PACKARD. The fundamentals of signal analysis. *Application Note 243*, Jan. 1995. 68p.

HILL G. VXibus revision 2.0 – What's new? *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.6, p.19-22, June 1999.

HITZ, T. The digitally sampled system: how fast is fast enough? *Sensors Magazine*. Feb. 1999. Special Section: Data Acquisition. Disponível em: <http://www.sensorsmag.com/articles/0299/0299_da/fast0299.shtml>. Acesso em: 30 abr. 1999.

HOESCHLE, D. F. *Analog-to-digital and digital-to-analog conversion techniques*. 2. ed. Arizona: John Wiley & Sons, 1996.

HOLOU, N. A.; IBRAHIM, F. Using analogy to enhance understanding of electrical circuits. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.

HOOVER, S. A working education in metrology. *Quality*. v.38, n.11, p.36-39, Oct. 1999.

HOROWITZ, P.; WINFIELD, H. *The art of electronics*. 2. ed. Cambridge: University Press, 1980.

HOUTEN, G. ISO 9001:2000. *Information Management Journal*. v.34, n.2, p.28-7, Apr. 2000.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *The IEEE Standard dictionary of electrical and electronics terms*. IEEE Std 100-1996. 6. ed. New York, Dec. 1996.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *Requirements for the calibration and control of measuring and test equipment used in nuclear facilities* – IEEE Std. 498. New York, June 1990.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. *Procedimento para elaboração dos certificados emitidos pelos laboratórios da RBC* – Documento RBC N. 002, Revisão 08. Rio de Janeiro: INMETRO, jun. 1997.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. *Brasil e a certificação ISO 9000 – Relatório de pesquisa*. Rio de Janeiro: INMETRO, 1996.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia – Versão Brasileira do "Vocabulary of basic and general terms in metrology"* publicado em 1993 pela ISO/IEC/OIML/BIPM. Rio de Janeiro: INMETRO, mar. 1995.

ISA – INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA. *ISA Dictionary of measurement & control*. 3. ed. North Carolina: ISA, 1995. 462 p. Disponível em: <<http://www.isa.org/fmo/dictionary/define.html>>. Acesso em: 25 ago. 2000.

ISA – INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA. *Technical Report: Use of the Monte Carlo uncertainty combination method for setpoint evaluation*. ISA-TR67.04.14. North Carolina: ISA, 1998. 32 p.

ISGMAX. *Uncertainty Analyzer. Software de avaliação*. Disponível em: <<http://www.isgmax.com>>. Acesso em: 14 mar. 2000.

ISHIOKA, T.; TAKEGAKI, M. Knowledge-based modeling of physical processes. *Measurement – Journal of the International Measurement Confederation IMEKO*, n.12, p.227-235, 1994.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Petroleum liquids and liquefied petroleum gases – Measurement – Standard reference conditions*. ISO/DIS 5024. Genève (Switzerland), 1998. 3p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specification*. ISO/FDIS 14253-1. Genève (Switzerland), 1997a. 17p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 2: Guide to the estimation of uncertainty of measurement in calibration of measuring equipment and product verification*. ISO 14253-2. Genève (Switzerland), 1997b. 73p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Technical Report. Assessment of uncertainty in calibration and use of flow measurement devices – Part 1: Linear calibration relationships*. ISO/TR 7066-1. Genève (Switzerland), 1997c. 28p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Draft International standard. Graphical symbols for diagrams – Part 5: Measurement and control devices*. ISO/DIS 14617-5. Genève (Switzerland), 1996. 29p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions*. ISO 5725-1. Genève (Switzerland), 1994a. 17p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method*. ISO 5725-2. Genève (Switzerland), 1994b. 41p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: Probability and general statistical terms*. ISO 3534-1. Genève (Switzerland), 1993a. 47p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 2: Statistical quality control*. ISO 3534-2. Genève (Switzerland), 1993b. 33p.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Statistics – Vocabulary and symbols*. ISO 3534. Genève (Switzerland), 1977. 47p.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Gestão da qualidade e garantia da qualidade – Terminologia*. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8402. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 1994a.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Normas de gestão da qualidade e garantia da qualidade – Parte 1: Diretrizes para seleção e uso*. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9000-1. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 1994b.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Sistemas da Qualidade – Modelo para garantia da qualidade em projeto, desenvolvimento, produção, instalação e serviços associados*. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9001. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 1994c.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Sistemas da Qualidade – Modelo para garantia em produção, instalação e serviços associados*. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9002. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 1994d.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Sistemas da Qualidade – Modelo para garantia da qualidade em inspeção e ensaios finais*. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9003. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 1994e.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Gestão da qualidade e elementos do sistema da qualidade*. Parte 1: Diretrizes. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9004-1. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 1994f.

ISO/ABNT. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Requisitos de garantia da qualidade para equipamentos de medição – Parte 1: Sistema de comprovação metrológica para equipamento de medição*. Tradução: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR/ISO 10012-1. Rio de Janeiro: ABNT, nov. 1993.

ISO/CDI 9001:2000. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Quality management systems – Requirements – ISO/TC 176/SC 2/N 415*. Genève, Switzerland: ISO, July 1998.

JANDRE, F. C.; SEIXAS, J. M. PALAS: an integrated WWW based laboratory for supporting the teaching of linear systems. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17- 20, 1998.

JORNADA, João A. H. et al. Limitações metrológicas para a certificação ISO 9000 – Pesquisa realizada pela Rede Metrológica RS, PUC do RS – LABELO, MKS Engenharia da Qualidade e UFRS. In: Seminário Internacional de Metrologia para Controle da Qualidade SI-MpCQ-96. *Anais*. Florianópolis, ago. 1996.

JUNG, W. Using the LTC Op Amp macromodels. *Application Note 48 (AN48-1)*. Analog Devices. Nov. 1991.

KALE, L. V. Programming languages for CSE: the state of the art. *IEEE Computational Science & Engineering*, v.5, n.2, p.18-26, Mar./Apr. 1998.

KAYE, P. J. ISO 9000: Should your company seek certification? *Pennsylvania CPA Journal*. v.70, n.4, p. 7-10, Apr. 2000.

KAYSSI, A. I. Macromodel construction and verification – Enhancing the process with dimensional analysis. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, p.6-9, May 1998.

KEITHLEY. *Low level measurement*. 4. ed. Cleveland: Keithley Instruments, 1993.

KEITHLEY. *Switching Handbook – A Guide to signal switching in automated systems*. 3. ed. Keithley Instrumentation, 1997.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R.; SADOWSKI, D. A. *Simulation with arena*. Boston: McGraw-Hill, 1998.

KEY, P. J. Metrology in conformity assessment. In: Seminário Internacional de Metrologia para Controle da Qualidade SI-MpCQ-96. *Anais*. Florianópolis, ago. 1996.

KHAZAN, A. D. *Transducers and their elements: design and application*. Englewood Cliffs: PTR Prentice-Hall, 1994.

KOCHSIEK, M.; ODIN, A. Quality management in Metrology – An important prerequisite for the quality assurance of products and services. In: Proceedings 6th IMEKO Symposium – Metrology for Quality Control in Production. *Anais*, p.345-350, Vien, Sept. 8-10, 1998.

KODOSKY, J.; PÉREZ, E. Linear systems in LabVIEW. National Instruments, *Application Note 039*, Feb. 1993. 12p.

KOIDE F. T. Common-mode rejection ratio redefined. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.3, p.737-739, June 1997.

KOLEN, P. T. Self-calibration/compensation technique for microcontroller-based sensor arrays. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.43, n.4, p.620-623, Aug. 1994.

KOTTMANN, M. P. *Komponentenorientierte Modellierung und Simulation kombinierter Systeme*. Zürich, 1997. 137p. Tese (Doktor der Technischen Wissenschaften). Eidgenössischen Technischen Hochschule.

KREUZER, M. *High precision measuring unit DMP40 – Successor of DMP 39*. Publicação técnica da Hottinger Baldwin Messtechnik. Disponível em <http://hbm.de/english/prod/dmp40_paper.html>. Acesso em: 12 dez. 1999.

KUO H. H. *White noise distribution theory*. New York: CRC Press, Inc, 1996. 378p.

LAOPOULOS T. Teaching instrumentation and measurement in the complex-systems era. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.3, p.28-30, Mar. 1999.

LARRABEE, J. IRONS, F. H.; HUMMELS, D. M. Using sine wave histograms to estimate analog-to-digital converter dynamic error functions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.47, n.6, p.1448-1456, Dec. 1998.

LARSON, M. Tips for ISO 9000 preparation: Set up going training. *Quality*. v.38, n.13, p.56-58, Dec. 1999.

LAW A. M. Ten critical pitfalls in simulation modeling. *Simulation Industry News: Paper of the month* (Aug. 2000) Disponível em: <[wysiwyg://58/http://www.averill-law.com/simulation-news-papers.htm](http://www.averill-law.com/simulation-news-papers.htm)>. Acesso em: 28 ago. 2000.

LEE K. B.; SCHNEEMAN R. D. Internet-based distributed measurement and control applications. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.6, p.23-27, June 1999.

LEWIS, C. W. Make the most of more-precise temperature measurements. *Chemical Engineering*, v.?, n.?, p.90-94, May 1998.

LI, X.; MELJER, G. C. M.; JONG, G. W. A microcontroller-based self-calibration technique for a smart capacitive angular-position sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.4, p.888-892, Aug. 1997.

LISKA, A. F. *Controle estatístico das componentes da incerteza em processos de medição de parâmetros geométricos*. Florianópolis, 1999. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

LÖTTERS J. et al. A sensitive differential capacitance to voltage converter for sensor applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.48, n.1, p.89-96, Feb. 1999.

LUTZ, T. A.; M. Using TCP/IP as an instrument interface. *Sensors Magazine*. July 1998. Disponível em: <<http://www.sensorsmag.com/articles/actv0298.htm>>. Acesso em: 27 abr. 2000.

MACIEL, M. R. W.; MACIEL, R.; VASCONCELOS, C. J. G. The use of commercial simulators in the engineering teaching: a naturally stimulating approach. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.

MALVINO, A. P. *Eletrônica – Volume 2*. Tradução Romeu Abdo; revisão técnica Antonio Pertence Júnior. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 1995.

MANDEL, J.; LASHOF, T. W. The nature of repeatability and reproducibility. *Journal of Quality Technology*, v.19, n.1, p.29-36, Jan. 1987.

MARCHIORO T. L.; LANDAU, R. H. Web-based education in computational science and engineering. *IEEE Computational Science & Engineering*, v.4, n.2, p.19-26, Apr./June 1997.

MATHIESEN, O. Uncertainty of measurement – understanding the GUM. In: Advanced School of Metrology: Evaluation of Uncertainty of Measurement. *Anais. Programa RH Metrologia*, Angra dos Reis, dez. 1997.

MENDEL, J. M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, v.83, n.3, p.345-377, Mar. 1995.

MENDEL, J. M.; MOUZOURIS, G. C. Designing fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems – II: Analog and Digital Signal Processing*, v.44, n.11, p.885-894, Nov. 1997.

MICHAELLIS. *Moderno dicionário da língua portuguesa*. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 1998. 2259p.

MICROSIM PSpice A/D & Basics – Circuit analysis software – Reference Manual (Version 7.1). Irvine: MicroSim, 1996.

MICROSIM PSpice A/D & Basics – Circuit analysis software – User Guide (version 7.1). Irvine: MicroSim, 1996.

MIELKE J. A. Frequency domain testing of ADCs. *IEEE Design & Test of Computers*, v.13, n.1, p.64-69, Spring, 1996.

MOCHIZUKI, K.; MASUDA, T.; WATANABE K. An interface circuit for high-accuracy signal processing of differential-capacitance transducers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.47, n.4, p.823-827, Aug. 1998.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 4. ed. Arizona: John Wiley & Sons, 1996.

MORAWSKI, R. Z. Unified approach to measurand reconstruction. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.43, n.2, p.226-231, Apr. 1994.

MORIN, L. Logic models for continuous time. *IEE Proceedings – Computational Digital Technology*, v.144, n.6, p.353-361, Nov. 1997.

MOU, J. A method of using neural networks and inverse kinematics for machine tools error estimation and correction. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.119, p.247-254, May 1997.

MOURE, M. et al. Educational application of virtual instruments based on reconfigurable logic. In: IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education. *Anais em CDROM*. Arlington, Virginia, July 19-21, 1999.

MUGINOV, G. D.; VENETSANOPOULOS, A. N. A new approach for estimating high-speed analog-to-digital converter error. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.4, p.980-985, Aug. 1997.

MURAVYOV, S. V.; SAVOLAINEN, V. Scales and covers in general measurement problem. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.4, p.961-965, Aug. 1997.

NAKAMURA, Y. et al. A multifrequency quadrature bridge for realization of the capacitance standard at ETL. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.48, n.2, p.351-355, Apr. 1999.

NAMAS – NATIONAL ACCREDITATION OF MEASUREMENT AND SAMPLING. *The expression of uncertainty and confidence in measurement for calibrations*. NIS 3003. National Physical Laboratory, England: NAMAS, 1995.

NAMAS – NATIONAL ACCREDITATION OF MEASUREMENT AND SAMPLING. *Guide to the expression of uncertainties in testing – NIS 80 General Principles and Guidance for Estimation and Reporting Uncertainties of Measurement in Testing* p. 1-15, England: NAMAS, Sept. 1994.

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Contractor Report 4597: Strain gage selection in loads equations using a genetic algorithm*. NASA-FSC:5905-S-311-P-18. Edwards, California, Nov. 1991. 17p.

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Instructions for EEE parts selection, screening and qualification*. NASA-311-INSTR-001. Edwards, California, Nov. 1996. 241p.

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Specification for thermistor insulated and uninsulated negative temperature coefficient*. NASA-FSC:5905-S-311-P-18. Edwards, California, Nov. 1991. 17p.

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Full-text Standards*. Disponível em: <<http://standards.nasa.gov/>>. Acesso em: 12 jun. 2000.

NASH, E. Errors and error budget analysis in instrumentation amplifier application. AN-539 *Application Note*. Norwood: Analog Devices, Aug. 1999. 6p.

NASH, E. *Common mode and instrumentation amplifiers*. July 1998. Disponível em: <<http://www.sensorsmag.com/articles/amp0798.htm>>. Acesso em: 27 abr. 2000.

NATIONAL INSTRUMENTS. *The Measurement and Automation*. Catálogo do fabricante. Disponível em: <<http://www.ni.com/>>. Austin: National Instruments, 2000. Acesso em: 28 dez. 2000.

NATIONAL INSTRUMENTS. *Calibration – Accuracy and uncertainty*. Disponível em: <<http://www.natinst.com/support/calibrat/accuracy.htm>>. Austin: National Instruments. Acesso em: 12 dez. 1999.

NATIONAL INSTRUMENTS. Using Labview to create multithreaded applications for maximum performance and reliability. *Application Note AN-114*. Disponível em: <<http://www.national.com/apnotes.html>>. Austin: National Instruments. Jan. 1998. Acesso em: 18 jan. 2001.

NATIONAL INSTRUMENTS. Is your data inaccurate because of instrumentation amplifier settling time? *Application Note* AN-045. Disponível em: <<http://www.national.com/apnotes.html>>. Austin: National Instruments, Aug. 1993. Acesso em: 25 fev. 2001.

NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. LM34/LM35 precision monolithic temperature sensors. *Application Note* AN-460. Disponível em: <http://www.national.com/apnotes/Analog-TempSensors_v2.html>. Irvine: National Semiconductor. Acesso em: 04 nov. 1995.

NAVY – U. S. DEPARTMENT OF NAVY. *Military Standard: test requirements document, Preparation of*. MIL-STD-1345B. Washington, D. C. (USA), 1981. 71p.

NG, et al. Learn Net: an integrated multimedia system for distance learning. In: IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education. Anais em CDROM. Arlington, Virginia, July 19-21, 1999.

NIELSEN, H. S. Know your uncertainty. *Quality*. v.39, n.4, p.169-176, Apr. 2000.

NIELSEN, H. S. Using the ISO "Guide to the expression of uncertainty in measurements" to determine calibration requirements. In: National Conference of Standards Laboratories Workshop & Symposium. *Anais*. USA, 1997.

NIST – NATIONAL INSTITUTE FOR STANDARDS AND TECHNOLOGY. Efficiency of electric motors. *NIST Handbook* 150-10. USA: Aug. 1995. 79p.

NIST – NATIONAL INSTITUTE FOR STANDARDS AND TECHNOLOGY. *Glossary of time and frequency terms*. Disponível em: <<http://www.boulder.nist.gov/timefreq/glossary.htm>>. Acesso em: 27 abr. 1999.

NTS – NORWEGIAN TECHNOLOGY STANDARDS INSTITUTION. *Field instrumentation*. NOR-SOK Standard PrI-001. Rev. 3. Oslo (Norway): Apr. 2000. 155p.

OBEYSEKARE U.; GRINSTEIN F. F.; PATNAIK, G. The visual interactive desktop laboratory. *IEEE Computational Science & Engineering*, v.4, n.1, p.63-71, Jan./Mar. 1997.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. Tradução de Ivan Jose de Albuquerque. 2. ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1993.

OHTE, A. e YAMAGATA, M. A precision silicon transistor thermometer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.26, n.4, p.225-231, Dec. 1977.

OLIVEIRA, A. C. X. *Modelagem de características dinâmicas de instrumentos de medição*. Florianópolis, 2001. 112p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.

OMEGA ENGINEERING. *The temperature handbook*. v. 29. Stanford: Omega Press, 1995.

ONAT, B. M. et al. Implementation of a charge-based neural euclidean classifier for 3-bit flash analog-to-digital converter. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.3, p.672-677, June 1997.

ONNEY C. D.; COLLURA, J. V. A limited in-flight evaluation of the constant current loop strain measurement method. NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, *Technical Memorandum*. NASA-TM-104271. Edwards, California, Aug. 1997. 32p.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Discrete-time signal processing*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. *Signal & systems*. 2. ed. UPPER saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997.

PALLÁS-ARENY, R.; WEBSTER, J. *Sensor and signal conditioning*. New York: John Wiley & Sons, 1991.

PARKER JR. A. R. Simultaneous measurement of temperature and strain using four connecting wires. NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION *Technical Memorandum*. NASA-TM-104271. Edwards, California, Nov. 1993. 12 p.

PARTHASARATHY, M. Using ActiveX to share data among applications. *Sensors Magazine*. Feb. 1998. Disponível em: <<http://www.sensorsmag.com/articles/actv0298.htm>>. Acesso em: 27 abr. 2000.

PARVIS M. Using a-priori information to enhance measurement accuracy. *Measurement*. Elsevier Science B. V., n.12, p.237-249, 1994.

PATRICK M.; VOIGT, R. Advanced simulation science and engineering at disciplinary interfaces. *IEEE Computing in Science & Engineering*, v.2, n.2, p.14-16, Mar./Abr. 2000.

PEARCE C.; McROBERTS W. A. Quality standards for tooling & equipment. *Machine Design*. v.72, n.2, p.S68-S71, Jan. 2000.

PETRIU, E. M.; CORDEA, M.; PETRIU D. C. Virtual prototyping tools for electronic design automation. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.6, p.28-31, June 1999.

PEZZOTTA, C. A. *Emprego da orientação a objetos para caracterização de recursos num ambiente de simulação de instrumentos*. Florianópolis, 2001. 80p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.

PFEIFER, T.; TORRES, F. *Gestión integral de la calidad*. Barcelona: Ediciones Gestión 2000, Mar. 1998.

PINTELON, R.; SCHOUKENS, J. Frequency-domain identification of linear time-invariant systems under nonstandard conditions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.1, p.65-71, Feb. 1997.

PNL – PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY – US DEPARTMENT OF ENERGY. *Artificial neural networks* – Available software. Disponível em: <<http://www.emsl.pnl.gov:2080/proj/neuron/neural/systems/software.html>>. Acesso em: 19 maio 2000.

PUTTEN, A. D. O. V. *Electronic measurement systems. Theory & Practice*. 2. ed. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1996.

RAFFALDI, J.; RAMSIER, S. Five ways to verify your gages. *Quality Magazine*. v.39, n.3, p.38-42, Mar. 2000.

RASMUSSEN, A.; ZAGHLOUL M. E. In the flow with MEMs. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, p.12-25, July 1998.

RASSA, B. Measurement standards. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.3, p.6-9, Mar. 1999.

RICHTER, D. Software quality assurance in metrology. In: Workshop Advanced Mathematical Tools in Metrology. *Proceedings*, p.255-262, Torino, Oct. 1993.

ROSSI, G. B.; CRENNNA F. On the implementation of ISO 10012 requirements for metrological confirmation. In: 6th IMEKO Symposium – Metrology for Quality Control in Production. *Proceedings*, p.561-566, Vien, Sept. 8-10, 1998.

RUBINSTEIN, R. *Simulation and the Monte Carlo method*. New York: John Wiley & Sons, 1981.

RUNYON, S. PC interface could change the face of data-acquisition market – National Instruments plugs testers into USB. *Electronic Engineering Times*, n.994, p.6, Feb. 23, 1998.

RUSSO F. Recent advances in fuzzy techniques for image enhancement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.47, n.6, p.1428-1434, Dec. 1998.

RUSSO, F.; RAMPONI, G. Fuzzy methods for multisensor data fusion. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.43, n.2, p.288-294, Apr. 1994.

SALZMANN, C. et al. Requirements for real-time laboratory experimentation over the Internet. International Conference on Engineering Education. *Anais em CDRom*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.

SCAVONE R.; FLESCH, C. A. Garantía de la calidad de resultados en bancos de ensayo de motores usando las técnicas de Taguchi. *Revista Internacional Indexada Información Tecnológica*, ISSN 0716-8756. v.9, n.2, 1998, p.161-168, Chile, 1998.

SCAVONE, R. *Técnicas de auxílio à garantia da confiabilidade metrológica em bancadas automatizadas de ensaio*. Florianópolis, 1994. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

SCHMALZEL J. I&M education for new millennium: a U. S. perspective. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.3, p.31-36, Mar. 1999a.

SCHMALZEL J. L. Improving instrumentation and measurement education. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.3, p.10-13, Mar. 1999b.

SCHMALZEL J. Instrumentation education. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.1, n.3, p.34-35, Mar. 1998.

SCHOUKENS, J.; PINTELON, R.; VANDERSTEEN, G. A sinewave fitting procedure for characterizing data acquisition channels in the presence of time base distortion and time jitter. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.4, p.1005-1010, Aug. 1997.

SCHUMACHER, R. B. F. Systematic measurement errors. *Journal of Quality Technology*, v.13, n.1, p.10-24, Jan. 1981.

SEAVAR, M. *TC 176 surveys ISO 9000 user requirements for year 2000 revisions*. Disponível em: <www.iso.ch/presse/user.htm>. Wexford (Ireland). Acesso em: 17 abr. 1998.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. *Microelectronic circuits*. 3. ed., Fortworth: Saunders College, 1991.

SEIXAS, J. M.; XEXEO, G. B.; FONSECA, G. A. A WWW based development environment for neural network applications in experimental physics. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.

SHERWIN, J. Noise specs confusing? *Application Note AN-104*. Irvine: National Semiconductor, 1995.

SHESTAKOV A. L. Dynamic error correction method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.45, n.1, p.250-255, Feb. 1996.

SHEU, J. B.; LEE Y. D.; YOUNG, W. C. Combining high-tech with business sense for learning success. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, p.23-28, May 1998.

SIMAS, H.; BRUCIAPAGLIA, A. H.; COELHO A. A. R. A first control laboratory with computer aided learning. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.

SINGLAS – SINGAPORE INSTITUTE OF STANDARDS AND INDUSTRIAL RESEARCH. *Guidelines on the evaluation and expression of the measurement uncertainty – Technical Guide 1*, Singapore Laboratory Accreditation Scheme, Singapore, 1995.

SOARES JR, L. *Confiabilidade metrológica no contexto da garantia da qualidade industrial: Diagnóstico e Sistematização de Procedimentos*. Florianópolis, 1999a. 120p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.

SOARES JR. L.; FLESCHE C. A. Aplicação do ISO-GUM em sistemas da qualidade ISO 9000. In: IV Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIDIM/99. *Anais em CDROM*. Santiago de Chile, 23 a 26 nov. 1999b.

SOCORRO, P.; ROMERO, F.; RODRIGUEZ, J. I. Adquisición de datos y control automático de la calibración de comparadores mecánicos mediante banco de verificación. In: 5th IMEKO TC-14 Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control. *Proceedings*, p.175-186, Zaragoza (Spain), Oct. 25-27, 1995.

SOLIMAN, S. S.; SRINATH, M. D. *Continuous and discrete signals and systems*. 2. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.

SPOELDER, H. J. W. Virtual instrumentation and virtual environments. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.9, p.14-19, Sept. 1999.

ST – STANDARD LINEAR MACROMODELS. *Macromodels user manual*. Disponível em: <<http://www.two.st.com/stonline/index.shtml>>. Acesso em: 12 ago. 2000.

STEENPUT E.; ROLAIN Y. Auto-consistent environment for measurement software development. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.4, p.742-746, Aug. 1997.

STEGAWSKI, M. A.; SCHAUMANN, R. A new virtual-instrumentation-based experimenting environment for undergraduate laboratories with application in research and manufacturing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.47, n.6, p.1503-1506, Dec. 1998.

STEIN P. When active means passive. *Sensors Magazine* (on line). Apr. 2000. Disponível em: <<http://www.sensorsmag.com/articles/0400/4/main.shtml>>. Acesso em: 19 maio 2000.

STEIN, P. New uncertainty method is taking hold. *Quality Progress*, v.32, n.11, p.95-98, Nov. 1999.

STEPHENS, K. S. ISO 9000 and total quality. *Journal Quality Management – QMJ*, p.57-71, 1994.

STRAKOS, V.; KEBO, V. Technical education of engineers in the context of multimedia computer technologies. In: International Conference on Engineering Education. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, Aug. 17-20, 1998.

SURESH BABU B. N.; WOLLMAN, H. B. Transient and overvoltage recovery testing of analog-to-digital converters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.44, n.1, p.53-60, Feb. 1995.

TAYLOR, B. N.; KUYATT, C. E. *Guías para la evaluación y expresión de la incertidumbre de los resultados de las mediciones de NIST*. Spanish Translation of NIST Technical Note 1297. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1994.

THEISEN, A. M. F. *Fundamentos da metrologia industrial: aplicação no processo de certificação ISO 9000*. Porto Alegre: RH-METROLOGIA, 1997.

THEISEN, A. M. F. Modificações e tendências para os sistemas de controle dos equipamentos de medição com as novas normas ISO 9000 no ano 2000. In: 3º Seminário Internacional de Metrologia Elétrica – III SEMETRO. *Anais em CDROM*. Rio de Janeiro, set. 1998.

TOMITA, Y.; HONDA, S. Experimental evaluation of instrument scale readings obtained by eye interpolation of fractional interval values. *Measurement*. Elsevier Science B. V., n.13, p.147-151, London, 1994.

TROFIMENKOFF, F. N.; FINVERS I. G.; HASLETT J. W. DC measurement errors due to auto-zeroed amplifier noise. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.45, n.1, p.317-318, Feb. 1996.

TRUCHARD, J. Virtual measurements. *Research & Development*, v.41, n.7, p.30-32, June 1999.

TRYLING, D. P. Electronics for the new century. *Electrical Apparatus*. v.53, n.3, p.49-50, Mar. 2000.

TUC – TELEMAR UNIVERSITY COLLEGE. SYSLAB. *Dynamic Systems Virtual Lab*. Documentação do sistema. Disponível em: <[wysiwyg://101/http://www-pors.hit.no/~finnh/syslab/index_eng.htm](http://www-pors.hit.no/~finnh/syslab/index_eng.htm)>. Acesso em: 18 mar. 2000.

TUINENGA, P. W. *Spice: A guide to circuit simulation and analysis using PSpice*. 3. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995.

VALID MEASUREMENTS. *Links to NASA's Anderson loop information*. Disponível em: <<http://www.vm-usa.com/links.html>>. Acesso em: 03 jul. 2000.

VAN DOREN, V. J. Simulation simplifiers “what-if” analysis. *Control Engineering Magazine* (online). Jan. 1998. Disponível em: <<http://www.manufacturing.net/magazine/ce/archives/1998/ct10/01.98/g/00.htm>>. Acesso em: 08 jul. 2000.

VARGAS M.; PALLÁS-ARENY, R. On the thermal noise introduced by a resistor in a circuit. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.45, n.1, p.345, Feb. 1996.

VOULO, J. H. *Fundamentos da teoria dos erros*. 2. ed. p.227-232. São Paulo, 1996.

VUJIEIÉ V. V.; ZUPUNSKI, I. Z.; MILOVANCEV S. S. Predetermination of the quantization error in digital measurement systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.2, p.439-441, Apr. 1997.

WANDEL, B. C. Modeling circuit parasitics. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.1, n.3, p.31-33, Mar. 1998.

WARRIOR, J. Smart sensor networks of the future. *Sensors Magazine*. Mar. 1997. Disponível em: <http://www.sensorsmag.com/articles/0397/net_mar/index.shtml>. Acesso em: 25 ago. 2000.

WATANABE K. Instrumentation education in Japan: despair and expectation. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.3, p.14-19, Mar. 1999.

WECKENMANN, A.; KNAUER, M. Causes and consequences of measurement uncertainty in production metrology. In: 6th IMEKO Symposium – Metrology for Quality Control in Production. *Proceedings*, p.693-698, Vien, Sept. 8-10, 1998.

WHITMORE, S. A.; MOES, T. R. Measurement uncertainty and feasibility study of flush airdata system for a hypersonic flight experiment. *NASA Technical Memorandum 4627*. Edwards, California: NASA, June 1994. 16p.

WITTE, R. A. Engineering education for test and measurement designers. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, v.2, n.3, p.11-13, Mar. 1999.

WOLINSKI T. R.; MUSZKOWSKI, M. Fourier analysis of strain measurement using highly birefringent two-mode optical fibers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.44, n.3, p.704-707, June 1995.

WORKBENCH. *News Releases: Advances in virtual instrumentation*. Disponível em: <<http://www.intsys-europe.fr/ElectronicsWorkbench/news.html>>. Acesso em: 12 dez. 1999.

XI, J.; CHICHARO, J. F. A new algorithm for improving the accuracy of periodic signal analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.45, n.4, p.827-831, Aug. 1996.

XU, Q. Neural network for representation on hysteresis. *IEE Proceedings – Science Measurement and Technology*, v.144, n.6, p.263-266, Nov. 1997.

YANG, Q.; BUTLER, C.; BAIRD, P. J. S. Probe error modeling using artificial neural networks. In: 5th IMEKO TC-14 Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control. *Proceedings*, p.406-413, Zaragoza (Spain), Oct. 25-27, 1995.

ZHANG K.; BUTLER C.; YANG Q. A fiber optic sensor for the measurement of surface roughness and displacement using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.46, n.4, p.899-902, Aug. 1997.

ZIMMER, T.; KADIONIK, P.; DANTO, Y. A World-Wide-Web based instrumentation pool real testing in a virtual world. In: 1997 International Conference on Microelectronic Systems Education (MSE '97). *Anais em CDROM*. Arlington, Virginia, July 21-23, 1997.

ZINGALES, G.; NARDUZZI, C. The role of artificial intelligence in measurement. In: AIMaC'91 – IMEKO Symposium. *Proceedings*, p.3-12, Kyoto (Japan), 1991.

ZUCKERMANN, A. Gaining added value from the year 2000 ISO 9000 revisions. *World Trade*. v.13, n.2, p.60-62, Feb. 2000.