

**ESTIMAÇÃO E COMPENSAÇÃO DA
INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO
GÁS MANOMÉTRICO EM UM
SENSOR DE PRESSÃO: UM ESTUDO
DE CASO USANDO SENSOR
PIEZORESISTIVO**

Francisco Ermelindo de Magalhães

Orientador: Dr. Luís Antônio Aguirre

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da
Universidade Federal de Minas Gerais

15 de março de 2001

Resumo:

Este trabalho tem por objetivo estudar a necessidade de compensação dos efeitos da temperatura do gás manométrico em um sensor de pressão. A influência da temperatura pode ser observada durante a utilização de um Padrão Digital de Pressão (DPG). Uma motivação para este trabalho foi a possibilidade de usar um sensor de pressão de baixo custo como padrão secundário de transferência de pressão visando o aumento da vida útil do DPG. Propositadamente foi escolhido um sensor cuja saída fosse influenciada pela temperatura do gás manométrico. Então, a primeira meta deste trabalho é quantificar a necessidade da compensação dos efeitos dinâmicos e estáticos da temperatura no sensor de pressão. A segunda meta é, de fato, executar a compensação e avaliar o desempenho do sensor. Este estudo envolve a aplicação da variação controlada da temperatura do gás manométrico no sensor de pressão e a avaliação do comportamento do mesmo durante a variação da temperatura. Desenvolveu-se e testou-se uma metodologia para a compensação do efeito da temperatura, objetivando quantificar e compensar os efeitos espúrios da temperatura. Os resultados, discutidos neste trabalho, sugerem que só é necessária a compensação do efeito estático da temperatura e que, quando realizada, tal compensação habilita o uso deste sensor, de custo relativamente baixo, como padrão secundário de transferência de pressão.

Abstract:

This work is concerned with the need for temperature compensation in a pressure sensor. One motivation for this work is the cheap of pressure sensors as secondary standards instead of a more expensive the Digital Pressure Gauge (DPG). The output of such sensors, however, are influenced by the manometric gas temperature. Therefore, the first goal of this work was to quantify the need for static and dynamic temperature compensation. The second goal was then to actually perform compensation and assess overall performance. In order to do so, a special set up was built and a large number of dynamic and static tests were carefully performed. A methodology was then defined in order to quantify and compensate for spurious temperature effects. The results discussed in this work suggest that only static compensation of temperature effects are required and that, when accomplished, such a compensation enables the use of relatively cheap pressure sensors as secondary standards.

Agradecimento:

à Deus;
à minha esposa Patrícia Dutra;
ao amigo Carlos Martinez;
ao Professor Luís Aguirre;
ao Jorge Saffar;
aos colegas da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais;
aos colegas do Centro de Pesquisa e desenvolvimento em Engenharia Elétrica e
aos colegas do Centro de Pesquisas Hidráulicas.

Sumário

Simbologia	17
1 Introdução	23
2 Metrologia e sistemas de medição	27
2.1 Elementos funcionais de um instrumento	27
2.2 Métodos de correção de entradas modificantes e de interferência .	31
2.3 Revisão bibliográfica sobre aplicação de compensação	36
3 Metodologia e procedimentos de ensaios	39
3.1 Calibração estática do sensor de temperatura RTD	44
3.1.1 Material	44
3.1.2 Procedimentos	44
3.2 Calibração estática do sensor de pressão	45
3.2.1 Material	45
3.2.2 Procedimentos	45
3.3 Aplicação de um degrau positivo de temperatura no RTD	46
3.3.1 Material	47
3.3.2 Procedimentos	47
3.4 Aplicação de um degrau negativo de temperatura no RTD	48
3.4.1 Material	48
3.4.2 Procedimentos	48
3.5 Efeito da fonte de alimentação do sensor de pressão	49
3.5.1 Material	49
3.5.2 Procedimentos	50
3.6 Efeito da temperatura ambiente	50
3.6.1 Material	50
3.6.2 Procedimentos	51
3.7 Degrau positivo de temperatura na câmara de pressão	51
3.7.1 Material	52
3.7.2 Procedimentos	52
3.8 Aplicação de um sinal de variação lenta de T_g	52
3.8.1 Material	53
3.8.2 Procedimentos	53

3.9	Aplicação de um sinal de variação rápida de T_g	54
3.9.1	Material	54
3.9.2	Procedimentos	54
3.10	Aplicação de um sinal estático de T_g	55
3.10.1	Material	55
3.10.2	Procedimentos	55
4	Descrição das montagens realizadas e dos componentes utilizados	57
4.1	Efeito da temperatura ambiente	58
4.1.1	Descrição da montagem	60
4.1.2	Coleta de dados	61
4.2	Calibração estática do sensor de pressão	66
4.3	Efeito da variação da tensão de alimentação	67
4.4	Identificação dos parâmetros do RTD868	68
4.4.1	Resposta do RTD868 ao degrau de temperatura	71
4.4.2	Validação do modelo do RTD868	72
4.5	Descrição do sistema de aquisição de dados	73
5	Avaliação da necessidade da compensação estática e dinâmica	75
5.1	Aplicação de um sinal de variação lenta de T_g	76
5.2	Descrição da montagem para aplicação de um sinal chaveado de temperatura	82
5.3	Resultados da aplicação de um sinal chaveado	85
6	Ensaio para a compensação estática de T_g	95
6.1	Avaliação do efeito de T_g a pressão constante	95
6.1.1	Resultado dos ensaios estáticos	100
6.2	Validação da compensação da temperatura do gás manométrico	108
6.2.1	Validação dos coeficientes da reta de compensação	109
6.2.2	Verificação da equação para a compensação estática	110
6.2.3	Validação da compensação estática	112
7	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	117
A		125
	Terminologia	125
B		129
	Descrição de equipamentos	129
B.1	Lista dos principais materiais utilizados	129
B.2	Detalhamento dos principais equipamentos	131
B.2.1	Sensor de pressão	131
B.2.2	Multímetro	132

B.2.3	Sistema de aquisição de dados - VXI	132
B.2.4	Descrição do VXI utilizado	137
B.2.5	Padrão Digital de Pressão	137
B.2.6	Controlador de Pressão, PPC1	137
C		141
	Programas e drivers desenvolvidos	141
C.1	Programas para aquisição de dados	141
C.2	Driver para instrumento da HP E1364A 16 canais	142
D		167
	Teoria básica	167
D.1	Teoria básica da análise de sistemas lineares	167
D.2	Teoria básica dos sinais binários no processo de identificação . . .	171

Lista de Tabelas

4.1	Comparação do sensor de pressão com manômetro de coluna d'água	61
4.2	Influência da temperatura ambiente, ensaio 1	63
4.3	Influência da temperatura ambiente, ensaio 2	64
4.4	Influência da fonte de alimentação	68
6.1	Resumo dos valores de m	102
6.2	Resumo dos erros estimados compensação de T_g	108
6.3	Verificação dos valores de m	113
6.4	Validação dos novos valores de m	113
6.5	Validação da compensação	114
6.6	Validação da compensação, continuação	114

Lista de Figuras

2.1	Elementos funcionais	28
2.2	Tipos de entradas	30
2.3	Realimentação de alto ganho	32
2.4	Princípio geral do filtro na entrada	33
2.5	Princípio geral do filtro na saída	35
2.6	Entradas em oposição	36
3.1	Câmara de condicionamento do fluido manométrico	40
3.2	Esquema da montagem do sinal chaveado	41
3.3	Diagrama de blocos do sistema	42
4.1	Modelos de sensores	58
4.2	Câmara de esterilização	59
4.3	Sensor \times manômetro de coluna d'água	62
4.4	Efeito da temperatura ambiente	65
4.5	Sensor \times DPG	66
4.6	Efeito da fonte de alimentação	69
4.7	Degrau positivo de temperatura no RTD	71
4.8	Degrau negativo de temperatura no RTD	72
5.1	Diagrama de blocos do sistema	76
5.2	Resposta de H ao degrau de temperatura	77
5.3	Sinal lento de temperatura do gás	79
5.4	Resposta ao sinal lento de temperatura do gás	80
5.5	Resultado da transformação termodinâmica do gás	81
5.6	Esquema da montagem do sinal chaveado	83
5.7	Temperatura do gás manométrico para o sinal chaveado	84
5.8	Aplicação do sinal chaveado de temperatura no gás	86
5.9	Diagrama de Bode de $G(j\omega)$	87
5.10	FFT do sinal chaveado de T_g	88
5.11	Comparação dos módulos de $T_g(j\omega)$ e de $G(j\omega)$	89
5.12	Fase de $T_g(j\omega)$ e de $G(j\omega)$	90
5.13	Módulo de $T_e(j\omega)$ e de $G(j\omega)$	91
5.14	Fase de $T_e(j\omega)$ e de $G(j\omega)$	92

5.15	Resultados de P e Y_s para o sinal chaveado	93
5.16	Resultado da transformação de T_g dentro da câmara	94
6.1	Temperatura T_g a 2kPa	97
6.2	Pressão P e Y_s a 2kpa	98
6.3	Detalhamento do DPG	99
6.4	Resultados do sensor de pressão para 2kPa	103
6.5	Erro em kPa da saída do sensor de pressão a 4kPa	105
6.6	Erro em kPa da saída do sensor de pressão a 6kPa	106
6.7	Erro em kPa da saída do sensor de pressão a 8kPa	107
6.8	Validação dos parâmetros para compensação a 3kPa	111
6.9	Validação dos parâmetros para compensação a 5kPa	112
6.10	Validação dos parâmetros para compensação	115
7.1	Câmara equalizadora	119
7.2	Esquema do Laboratório Isaac Newton	120
B.1	Sensor de pressão	132
B.2	Multímetro e fonte de alimentação	133
B.3	Montagem para avaliar a influência da temperatura ambiente . . .	134
B.4	Câmara de condicionamento do fluido manométrico	135
C.1	Painel do programa	142
C.2	Detalhamento do programa	143
C.3	Programa para gerar e aplicar um sinal binário	144
C.4	Detalhamento do programa para gerar um sinal binário	145
C.5	Detalhamento do programa para aplicar um sinal binário	146
D.1	Diagram de blocos	170

Simbologia, abreviaturas e siglas

Observações gerais

Neste trabalho, às vezes, o sistema é representado pelo modelo de diagrama de blocos, sendo que na ocorrência desta representação, os nomes dos blocos são indicados por letras latinas maiúsculas com ou sem argumento, por exemplo S, DPG, H, G(s).

Os valores das variáveis estimadas são representadas com o símbolo circunflexo, por exemplo \hat{e}_{al} , \hat{Y} .

O índice "i" dos símbolos significa que este símbolo é usado para várias variáveis.

Simbologia

A seguir estão listados os principais símbolos usados de forma geral e a página na qual aparece pela primeira vez. O uso específico de símbolos é definido *in loco*.

$\angle(G(j\omega))$	fase da transformada de Fourier de G	87
$\angle(T_g(j\omega))$	fase da FFT de T_g	87
b	interseção da reta ajustada	63
e_{al}	função erro devido a alimentação do sensor	68
e_i	tensão de alimentação	32
e_{ikpa}	função erro a i kPa	102
e_o	tensão de realimentação	32
$e(T_e, P)$	função erro devido a T_e e P	79
\hat{e}_{al}	erro estimado devido a fonte de alimentação	67
\overline{err}_{sc_i}	média da distribuição do erro a ikPa sem correção	104
\overline{err}_{cc_i}	média da distribuição do erro a ikPa com correção	104
$f(T_e, P)$	função de saída do sensor de pressão	78
$f_1(P)$	componente da saída de S devido à pressão	78
$f_2(T_e)$	componente da saída de S devido à T_e	78
$f_3(P)$	função para estimar o valor de m	110
F_D	função da entrada desejável	30
F_I	função de uma entrada de interferência	31
$F_{M,I}, F_{M,D}$	maneira específica em que i_M afeta F_D e i_D	31
$g(t), x(t)$	função genérica de g e x no tempo	168
G	nome do bloco que representa o sensor de temperatura	75
G(s)	transformada de Laplace de g(t)	71

$G(j\omega)$	transformada de Fourier de G	83
$ G(j\omega) $	módulo da transformada de Fourier de G	87
H	representação da câmara de pressão em bloco	75
i_D	entrada desejada	31
i_I	entrada de interferência	31
i_{M_i}	entrada modificante	31
i'_I	saída do filtro para uma entrada de interferência	31
i'_M	saída do filtro para uma entrada de modificante	34
K_{AM}	ganho do amplificador	33
K_B	ganho da bomba de pressão	32
k_D	ganho de um instrumento linear	30
k_e	constante da transformação termodinâmica	80
K_{FB}	ganho de realimentação	33
k_G	ganho de G	72
K_{SP}	ganho do sensor de pressão	32
m	inclinação da reta ajustada	63
m_e	valor de m determinado pelos dados medidos	111
m_{e_i}	valor de m para ikPa	111
\hat{m}	valor de m estimado por um polinômio	110
n	expoente da função da transformação termodinâmica	80
N	número de amostras	171
o_M	parcela da entrada modificante no sinal de saída	34
o_D	parcela da entrada desejada no sinal de saída	34
o_I	parcela da entrada de interferência no sinal de saída	34
o_{I1}	parcela devida à entrada de interferência	35
o_{I2}	parcela devida à entrada de modificante	35
o'	saída	34
p_o	pressão de saída	31
\hat{P}	pressão P estimada	80
RTD_{amb}	saída do sensor de temperatura ambiente em ohms	69
RTD_g	saída do sensor de temperatura do gás em ohms	69
RTD868	identificação do sensor de temperatura utilizado	57
$r_{uu}(\tau, t)$	função de auto-correlação de $u(t)$	171
$r_{uy}(\tau, t)$	função de correlação cruzada entre $u(t)$ e $y(t)$	171
S	representação do sensor de pressão em bloco	35
T	período	171
T_{amb}	temperatura ambiente	64
T_e	temperatura do gás manométrico	41
$T_e(j\omega)$	FFT de T_e	83
$T_g(j\omega)$	FFT de T_g	83
T_g	temperatura do gás manométrico medido	70
$ T_g(j\omega) $	módulo da FFT de T_g	87

T_b	período de um sinal binário	173
T_1, T_2	temperatura do gás na entrada da câmara equalizadora	119
u_c	incerteza devido ao ganho, <i>off-set</i> e linearidade	117
V_{cc}	tensão de alimentação do sensor	68
V_1	volume de gás da câmara equalizadora	118
$y(t)$	sinal qualquer de primeira ordem	70
$X(s)$	transformada de Lapace de $x(t)$	70
$Y(s)$	transformada de Lapace de $y(t)$	70
$Y_{s_{amb}}$	saída devido ao efeito da T_{amb} com P constante	63
Y_{s_i}	saída do bloco S a ikPa	61
\hat{Y}_s	Y_s estimado	80
\hat{Y}_{s_i}	Y_s estimado a ikPa com correção	102
α	inclinação da reta de calibração	114
β	interseção da reta de calibração	114
σ_{cc_i}	desvio padrão da distribuição do erro a ikPa com correção	104
σ_{m_i}	desvio padrão do valor da inclinação da reta ajustada a ikPa	63
σ_{b_i}	desvio padrão do valor da interseção da reta ajustada a ikPa	63
σ_{sc_i}	desvio padrão da distribuição do erro a ikPa sem correção	104
σ_3	desvio padrão do cálculo de $m(3)$	111
σ_5	desvio padrão do cálculo de $m(5)$	111
τ_i	constante de tempo da variável i	72
τ_{min}	menor constante de tempo de interesse	173
ω_{c_i}	freqüência de corte do sistema i	93
*	operador convolução	170
$E[\cdot]$	operador esperança matemática	171
$round[\cdot]$	arredonda para o menor inteiro mais próximo	173

Abreviaturas, siglas e sinais usados no texto

A seguir são listadas as principais abreviaturas, siglas e sinais usadas neste trabalho.

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
CETEC	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais;
DPG	<i>Digital Pressure Gauge</i> ou Padrão Digital de Pressão;
FAC	Função de auto-correlação;
FCC	Função de correlação cruzada;
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> ou transformada rápida de Fourier;
FIR	<i>Finite Impulse Response</i> ou resposta finita ao impulso;
FT	Função de transferência;
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i> ;
HP	<i>Hewlett Packard</i> ;
HP VEE	Plataforma de programação da HP;
IBASIC	Chip pré-programado com o compilador para a linguagem de programação BASIC;
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial;
MATLAB	<i>software</i> da MATH WORKS [©] ;
mmH ₂ O	unidade prática de pressão;
MQ	Mínimos quadrados;
<i>off-line</i>	depois da coleta de dados;
<i>off-set</i>	desvio - valor de saída para entrada nula;
<i>on-line</i>	durante a coleta de dados;
PI	Proporcional e Integral;
PID	Controlador proporcional, integral e derivativo;
PPC1	controlador de pressão do DPG;
PRBS	Sinal binário pseudo-aleatório (<i>pseudo-random binary signal</i>);
<i>ps</i>	<i>pressure set</i> ;
<i>psh</i>	<i>pressure set hold</i> ;
Pset	valor desejado de pressão;
<i>ripple</i>	oscilação superposta a um sinal contínuo;
RNA	Rede Neural Artificial;
<i>slots</i>	encaixe para placas eletrônicas;
<i>strain gauge</i>	tipo de extensômetro resistivo;
RBC	Rede Brasileira de Calibração;
RMMG	Rede de Metrologia de Minas Gerais;
RTD	<i>Resistance temperature detector</i> ;
SISO	Uma entrada e uma saída (<i>single-input, single-output</i>);
TDF	Transformada Discreta de Fourier;
TF	Transformada de Fourier;

"U"	tipo de manômetro de coluna de líquido;
VXI	VMEbus eXtensions for Instrumentation;
<i>Wheststone</i>	tipo de ligação de circuito em ponte de <i>wheatstone</i> ;
VME	barramento de placas de computador.

Capítulo 1

Introdução

A Metrologia é hoje no Brasil uma das áreas tecnológicas que está se destacando e com isto aumentando a conscientização de sua devida importância. Com a necessidade de obter produtos de qualidade, equipamentos confiáveis e padrões rastreáveis para manter-se competitivo, tanto no mercado interno quanto no mercado internacional, o Brasil nos últimos anos investiu em pesquisa. Porém, estes investimentos estão muito aquém das necessidades exigidas para o desenvolvimento de bens e produtos. Tendo em vista estes pequenos investimentos, mas de grande importância para a nação, o Brasil conta atualmente com vários laboratórios que possuem padrões de referência, instalações físicas e instrumental, além de pessoal técnico qualificado que podem estar capacitados à prestação de serviços e consultoria.

Para padronizar procedimentos, metodologias e para que se mantenha a qualidade de produtos e serviços, foram criadas redes metrológicas, através das quais é possível promover intercomparações de padrões e procedimentos, desta maneira capacitando ainda mais os profissionais envolvidos na área e garantindo a qualidade dos serviços prestados.

Minas Gerais aparece no quadro nacional com uma contribuição de 9 credenciamentos junto ao INMETRO/RBC, de um total de aproximadamente 111 credenciamentos no Brasil.

Dentro de Minas Gerais, a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) possui 1 laboratório credenciado pelo INMETRO/RBC e homologado pela RMMG nas grandezas força e torque: o Laboratório Isaac Newton. Não deixando de observar que pelo desenvolvimento natural do parque industrial e a crescente necessidade da manutenção da qualidade de um sistema estável e com referências sólidas reconhecidas pelo INMETRO, vários outros laboratórios devem estar se preparando para ingressar nas redes e contribuir ainda mais para este desenvolvimento.

O Laboratório Isaac Newton do CETEC tem se mostrado pioneiro na área de força e agora está trabalhando com as grandezas massa (pequenas massas) e pressão. Para trabalhar com a grandeza pressão, exigiu-se a aquisição de padrões de medição de pressão. Estes padrões são utilizados na calibração de equipamentos de medição de pressão. Em um desses equipamentos, denominado DPG, foi observado que há influência das condições ambientais na indicação do padrão de pressão. Tendo em vista o custo do equipamento e a grande influência provocada pelas variáveis indesejáveis (Doebelin, 1990), propõe-se fazer um trabalho para compensar o efeito de tais variáveis utilizando técnicas de identificação (Aguirre, 2000; Norton, 1986) aplicadas a um sistema de medição de pressão que seria acoplado ao DPG e utilizando um sensor de baixo custo do tipo piezoresistivo. Fazendo a estimação e compensação da temperatura deste sensor, espera-se reduzir as incertezas das medições quando este for utilizado e apresentar sugestões para diminuir os efeitos indesejáveis da temperatura no DPG.

Para a elaboração dos procedimentos dos ensaios a serem realizados com este sensor (ABNT-MB-3082, 1989; ABNT-NBR8189, 1995), foram contactados vários laboratórios de centros de pesquisas e universidades prestadores de serviços credenciados pelo INMETRO/RBC, bem como outras redes e laboratórios metrológicos, cuja rastreabilidade seja assegurada. Estes contatos foram realizados no sentido de buscar e trocar informações e procedimentos adotados para ensaios, para que os resultados pudessem ser comparados com algum já existente. Porém, não foram encontrados laboratórios que pesquisaram ou estejam realizando trabalhos cujo foco seja o tema estudado nesta dissertação e não foram encontrados trabalhos brasileiros já publicados referentes a este assunto, levando em conta os recursos disponíveis de procura: *Internet*, bibliotecas da UFMG e do CETEC, revistas e jornais científicos e trabalhos apresentados em congressos. Como não foram encontrados procedimentos ou métodos para ensaios dinâmicos de pressão prescritos em normas, estes foram elaborados para este caso em particular e foram baseados nos trabalhos encontrados (Patra and Bos, 2000b; Patra and Baliarsingh, 1994; Patra, 1997; Patra and Panda, 1998; Patra and Bos, 1999; Patra and Bos, 2000a; Yang, 2000).

Também pode-se dizer que este trabalho é pioneiro no que se refere à identificação de padrão de pressão. A compensação que é realizada em padrões desta natureza, atualmente, é feita por meio da medição da temperatura ambiente e corrigindo apenas para a dilatação do pistão (DPG, 1990).

Conteúdo dos capítulos

Este trabalho está dividido em capítulos da seguinte forma:

- 2 **Metrologia e Sistemas de Medição**
 - 3 **Metodologias e procedimentos para os ensaios**
 - 4 **Descrição dos componentes e montagens realizadas**
 - 5 **Avaliação da necessidade da compensação estática e dinâmica da temperatura do gás manométrico**
 - 6 **Ensaio para a compensação estática da temperatura do gás manométrico**
 - 7 **Conclusões e propostas para trabalhos futuros**
- Referências Bibliográficas**
Anexos

Capítulo 2 - Metrologia e sistemas de medição: apresenta uma revisão bibliográfica e uma idéia geral de um instrumento de medição, o que são entradas desejáveis e indesejáveis de um instrumento de medição, algumas configurações possíveis para a compensação de entradas indesejáveis, se estas compensações podem ser incluídas durante ou depois da fase de projeto e se pode ser interna ou externa aos instrumentos de medição. Também apresenta alguns métodos de compensação para sistemas de medição que envolvem mais de um instrumento em uma mesma montagem, e cita alguns trabalhos estudados os quais utilizam de métodos de compensação de temperatura.

Capítulo 3 - Metodologias e procedimentos de ensaios: apresenta as metodologias e os procedimentos adotados para a execução dos ensaios cujos resultados são apresentados no capítulos seguintes.

Capítulo 4 - Descrição dos componentes e montagens realizadas: apresenta a descrição dos materiais e equipamentos utilizados, a calibração dos sensores e os resultados dos ensaios em cada componente usado na montagem. Este capítulo tem por objetivo mostrar quais são os comportamentos individuais dos principais componentes usados na montagem: sensor de temperatura, sensor de pressão e DPG. Descreve separadamente cada um dos componentes, instrumentos e acessórios utilizados na montagem do sistema de medição, bem como o sistema de aquisição de dados. Destaca a influência da temperatura ambiente, da fonte de alimentação do sensor de pressão sobre a saída deste. Finalmente, descreve o ensaio para a identificação do sensor de temperatura e apresenta os resultados do ensaio com o respectivo modelo, bem como a validação para este modelo.

Capítulo 5 - Avaliação da necessidade da compensação estática e dinâmica: este capítulo mostra os resultados e a análise dos dados obtidos na aplicação de entradas conhecidas na planta, ou seja, mostra os resultados da aquisição dos dados de entrada e saída da planta quando esta for excitada com sinais conhecidos, tais como: resposta ao degrau unitário e resposta a sinais aleatórios. Apresenta os resultados da aplicação de dois tipos de sinais: o primeiro conhecido como degrau (Ogata, 1990) e outro é um sinal binário pseudo aleatório (Aguirre, 2000). Mostra também alguns resultados da resposta aos sinais de entrada para verificar a influência da temperatura do gás na resposta dinâmica do sensor de pressão.

Capítulo 6 - Ensaios para a compensação estática da temperatura do gás manométrico, T_g : este capítulo apresenta o estudo e a compensação da influência da temperatura no sensor de pressão em regime estático. Apresenta também análise em várias faixas de pressão para verificação do tipo de compensação necessária nestas faixas.

Capítulo 7 - Conclusão e sugestões para trabalhos futuros: apresenta a avaliação dos resultados obtidos, a conclusão da observação dos resultados para a faixa de pressão do sensor e mostra a redução das "incertezas" conseguida devido à compensação aplicada. Apresenta também a análise da influência das condições ambientais no padrão de pressão DPG, bem como algumas sugestões para solucionar os problemas observados durante os ensaios. Finalmente, são sugeridos alguns temas para trabalhos futuros.

Anexos: apresenta a terminologia utilizada neste trabalho, a descrição dos principais elementos e instrumentos utilizados nas montagens, os programas utilizados e os *drivers* desenvolvidos. Finalmente, apresenta a teoria básica de alguns tópicos importantes para o entendimento deste trabalho: teoria básica da análise de sistemas lineares e teoria básica dos sinais binários no processo de identificação.

Para que se pudesse realizar os ensaios descritos nos capítulos 5 e 6, foi projetada uma câmara, citada no texto como câmara de pressão, na qual o gás manométrico é condicionado numa determinada temperatura e pressão.

Ao findar este trabalho espera-se que os efeitos indesejáveis da temperatura do gás manométrico sobre o sensor de pressão sejam compensados, e também poder melhorar o desempenho deste sensor que é de valor comercial bastante acessível. Propor solução para a compensação dos efeitos das condições ambientais no DPG, o que implica em uma significativa redução de sua incerteza.

Capítulo 2

Metrologia e sistemas de medição

Este capítulo apresenta uma introdução ao sistema de medição. Mostra o que são entradas desejáveis e indesejáveis de um instrumento de medição, bem como algumas configurações possíveis para a compensação de entradas indesejáveis. Mostra como estas compensações podem ser incluídas durante ou depois da fase de projeto e se pode ser interna e/ou externa aos instrumentos de medição. São apresentados alguns métodos clássicos de compensação para sistemas de medição quando envolve mais de um instrumento em uma montagem. Finalmente, apresenta a classificação de alguns trabalhos interessantes segundo os métodos apresentados para a compensação das entradas não desejadas.

2.1 Elementos funcionais de um instrumento

É desejável descrever de uma forma generalizada, sem detalhar a parte física, a operação e o desempenho dos instrumentos de medição, bem como os equipamentos associados. A operação pode ser descrita em termos dos elementos funcionais do sistema de um instrumento, e o desempenho é definido em termos das características estáticas e dinâmicas deste instrumento (Doebelin, 1990).

De uma forma geral, nos instrumentos podem ser reconhecidos os elementos cujas funções são similares às outras que já tenham sido descritas ou realizadas. Ou seja, de uma forma geral, os instrumentos possuem elementos ou conjunto de elementos que desempenham funções similares.

A concepção de dividir o instrumento em um número limitado de tipos de elementos, de acordo com a função do elemento, ajuda no entendimento do mesmo. Esta divisão pode ser feita de diversas formas e não padronizadas. A apresentação em um esquema pode ajudar no entendimento da operação de vários e/ou novos instrumentos, tanto no contato diário quanto no projeto e desenvolvimento de sistemas de medição (Doebelin, 1990).

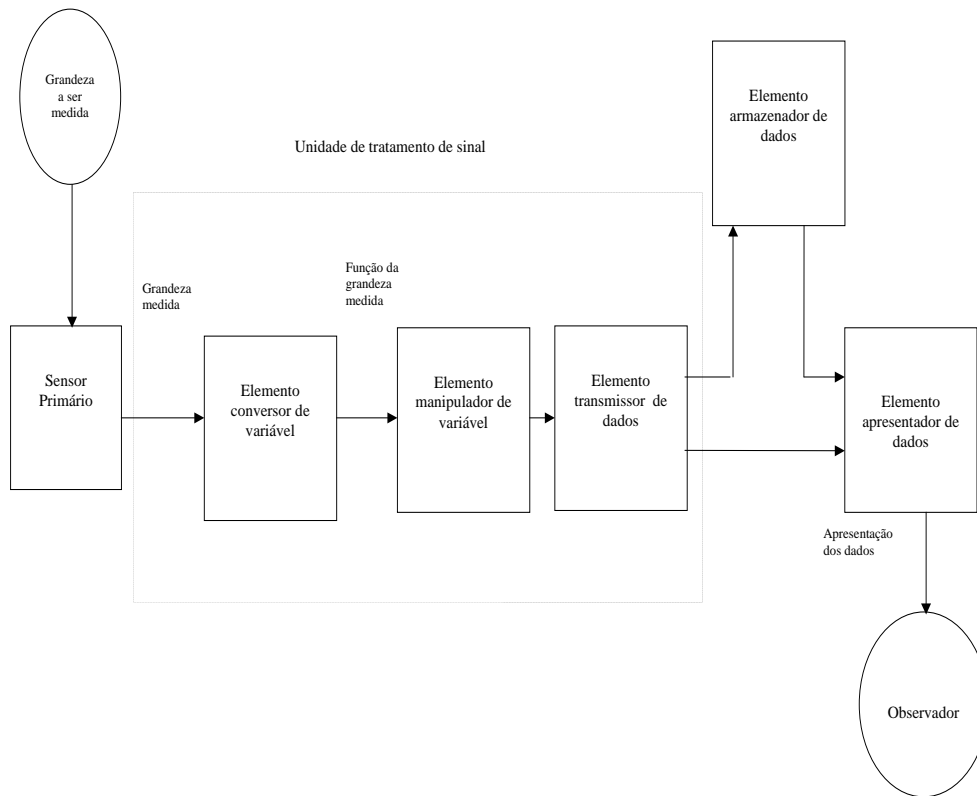


Figura 2.1: Elementos funcionais de um instrumento ou sistema de medição (Doebelin, 1990).

A Figura 2.1 apresenta uma possibilidade de arranjo dos elementos funcionais de um instrumento. Ela inclui todas as funções básicas consideradas necessárias para a descrição de vários instrumentos. O elemento primário do sensor é que primeiro recebe a energia proveniente do ambiente a ser medido. A natureza da saída deste elemento depende do caminho a ser seguido e da quantidade a ser medida. Isto é importante para notar que os instrumentos normalmente extraem alguma energia do ambiente medido. Nestes casos, a quantidade medida pode ser considerada um distúrbio do ponto de vista do meio (ou sistema) onde está sendo feita a medida. Portanto, uma medição teoricamente perfeita é impossível de ser alcançada. Bons instrumentos são projetados para minimizar este efeito, mas freqüentemente, está presente provocando algum tipo de distúrbio (Doebelin, 1990).

O sinal de saída do *elemento sensor primário* é um sinal que é função de uma variável física. Para o instrumento desempenhar a função desejada será necessário converter esta variável em uma outra variável apropriada, preservando

a informação do sinal original. O elemento que realiza tal função é chamado de *elemento conversor de variável*. Pode ser notado que nem todo instrumento inclui um elemento conversor de variável, mas alguns requerem vários. Então, os *elementos* aqui denotados desta maneira, são elementos funcionais, não são elementos físicos. A Figura 2.1 mostra um instrumento totalmente separado em blocos, o que pode levar a pensar que fisicamente existem precisamente separados dentro dos instrumentos e em elementos ou subsistemas, desempenhando funções específicas, mas isto nem sempre acontece. Em geral uma peça específica de *hardware* pode executar várias funções básicas.

O instrumento pode necessitar que um determinado sinal representado por uma variável física seja manipulada de alguma forma. A manipulação apresenta-se especificamente por uma mudança no valor numérico da variável, de acordo com uma regra definida, mas a apresentação da natureza física da variável é a mesma. Desta maneira, um amplificador eletrônico, por exemplo, aceita um pequeno sinal de tensão em suas entradas e produz um sinal na saída que é uma tensão, mas é alguma constante vezes a entrada. Um elemento que apresenta uma função semelhante é chamado de *elemento de manipulação*. Um *elemento de manipulação* não necessariamente segue um *elemento conversor*, mas pode precedê-lo (Doebelin, 1990).

Quando os elementos funcionais de um instrumento são de fato fisicamente separados, é necessário transmitir os dados de um para o outro. O elemento que desempenha esta função é chamado *elemento transmissor de dados*. Isto pode ser simplesmente um cabo ou algo mais elaborado, como um sistema de telemetria, usado para transmitir um sinal do satélite para um equipamento terrestre, via ondas de rádio.

Um elemento que desempenha a função de adequar o sinal para apresentação ao usuário é chamado *elemento apresentador de dados*. Esta função inclui uma simples indicação de um ponteiro movendo sobre uma escala e/ou uma pena (caneta) do registrador movendo sobre um mapa. Enquanto a maioria dos instrumentos se comunicam com as pessoas através do sentido da visão, o uso de outros sentidos tais como audição e tato é certamente concebível (Doebelin, 1990).

Um instrumento pode envolver funções básicas em vários níveis e combinações. Elas não necessitam aparecer na ordem mostrada na Figura 2.1.

Após a descrição do desempenho e das características do instrumento, é desejável desenvolver uma configuração generalizada que apresente uma relação entre a entrada e a saída, englobando todas as partes do sistema da medição. Um esquema é apresentado na Figura 2.2. As entradas são classificadas em três categorias: entradas desejadas, entradas de interferências e entradas modificantes.

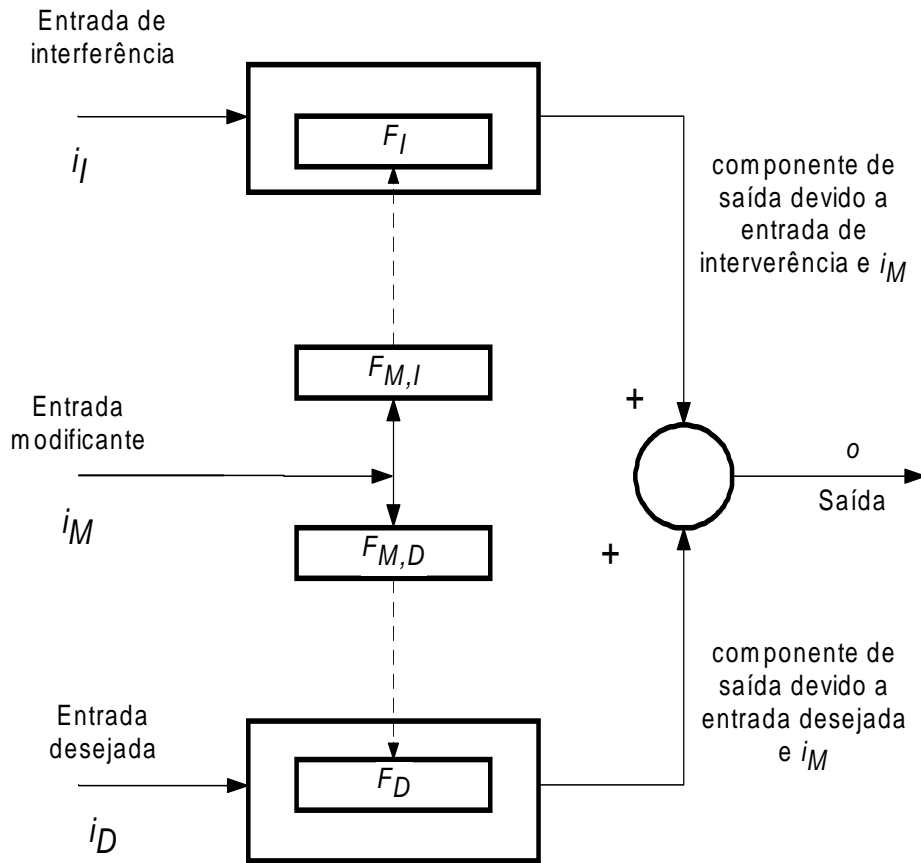


Figura 2.2: Configuração generalizada de entrada-saída (Doebelin, 1990).

As *entradas desejadas* representam as grandezas que o sistema de medição especificamente pretende medir.

As *entradas de interferência* representam as grandezas as quais o sistema de medição possui alguma sensibilidade, porém é esperado que não seja sensível a esta entrada. Uma entrada desejável produz uma componente de saída de acordo com a função (relação) entrada-saída simbolizada por F_D , onde F_D denota a operação matemática necessária para obter uma saída a partir de uma entrada. O símbolo F_D pode ser representado por diferentes concepções, dependendo em particular da característica que está sendo descrita. Deste modo, F_D pode ser uma constante k_D , que dá a relação de proporcionalidade entre uma entrada constante e estática para a correspondente saída estática de um instrumento linear. Para um instrumento não linear, uma simples constante não é adequada para representar a relação estática entre entrada e saída, então uma função matemática mais complicada é requerida para descrever esta função. Para a relação

dinâmica entre entrada e saída, é necessária uma equação diferencial. Se a descrição da saída for estatística, ou de dispersão, são desejadas repetições iguais de entradas estáticas, então será necessária uma função de distribuição estatística. O símbolo F_D incorpora todas estas concepções. O símbolo F_I serve para uma função similar de uma entrada de interferência.

A terceira classe de entrada é a classe das entradas modificantes. *Entradas modificantes* são as grandezas que causam uma mudança na relação entrada-saída para uma entrada desejável com entrada de interferência, ou seja, elas causam uma mudança em F_D e F_I . Os símbolos $F_{M,I}$ e $F_{M,D}$ representam a maneira específica em que i_M afeta F_I e F_D , respectivamente. Estes símbolos $F_{M,I}$ e $F_{M,D}$ são interpretados de uma forma geral como F_I e F_D . O diagrama da Figura 2.2 ilustra esses conceitos.

2.2 Métodos de correção de entradas modificantes e de interferência

Na fase de projeto ou durante o uso dos sistemas de medição, diversos métodos para reduzir os efeitos de entradas espúrias podem ser usados. Aqui serão brevemente decritos alguns dos métodos mais usados.

O *método de insensibilidade inerente* proporciona, na fase de projeto, a determinação do uso de elementos do sistema de medição sensíveis apenas às entradas desejadas. Este método diz respeito à escolha das características dos materiais usados na construção do instrumento. Quando isto não é possível, pode-se fazer uma aproximação para uma dada aplicação. Em termos da configuração geral da Figura 2.2, a aproximação requer que o ganho de F_I e $F_{M,D}$ sejam tão perto de zero quanto possível. Entretanto, i_I e/ou i_M podem existir e estas entradas não afetam a saída.

O *método de realimentação de alto ganho* pode ser exemplificado pelo sistema mostrado na Figura 2.3. Este método pode ser usado quando o método anterior for aplicado e a saída ainda for sensível às entradas espúrias. A melhor compreensão deste método pode ser obtida por meio de um exemplo. Supondo que deseja-se medir a tensão de entrada, e_i , de um sistema usado para gerar pressão através de uma bomba. A saída do sistema é o valor da pressão, p_o , que é a saída do sensor de pressão e é proporcional à pressão de saída da bomba, tal que,

$$p_o = (K_B \cdot K_{SP}) \cdot e_i, \quad (2.1)$$

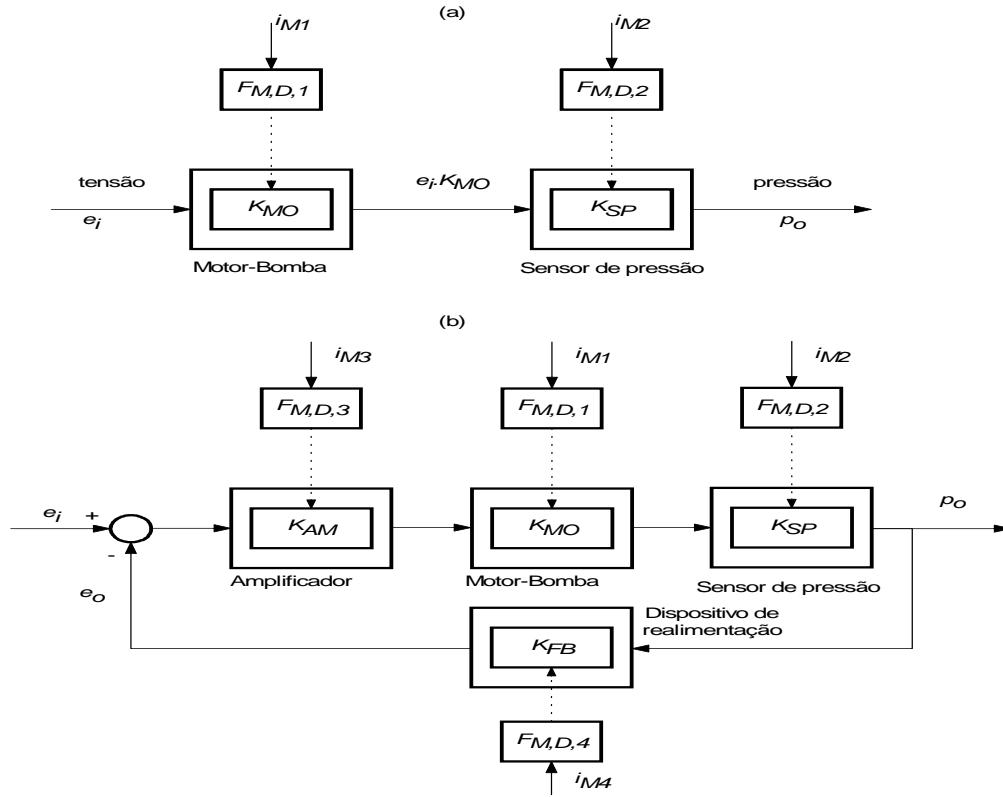


Figura 2.3: Uso da realimentação de alto ganho para reduzir o efeito da entrada espúria: (a) sistema em malha aberta e (b) sistema em malha fechada ou com realimentação (Doebelin, 1990).

sendo que K_B e K_{SP} são constantes apropriadas. Este arranjo, mostrado na Figura 2.3a, é chamado de sistema em malha aberta. Se as entradas modificadoras i_{M1} e i_{M2} existirem, elas causarão mudanças em K_B e K_{SP} que provocam erros na relação entre e_i e p_o . Estes erros estão na proporção direta com as mudanças em K_B e K_{SP} .

Supondo que, em um dado instante, deseja-se construir um sistema como na Figura 2.3b. Aqui, a saída p_o é medida pelo dispositivo de realimentação, que produz uma tensão e_o . A diferença entre e_i e e_o é aplicada no amplificador que alimenta o motor da bomba de pressão. Então, pode-se escrever

$$(e_i - e_o) \cdot K_{AM} \cdot K_B \cdot K_{SP} = (e_i - K_{FB} \cdot p_o) \cdot K_{AM} \cdot K_B \cdot K_{SP} = p_o, \quad (2.2)$$

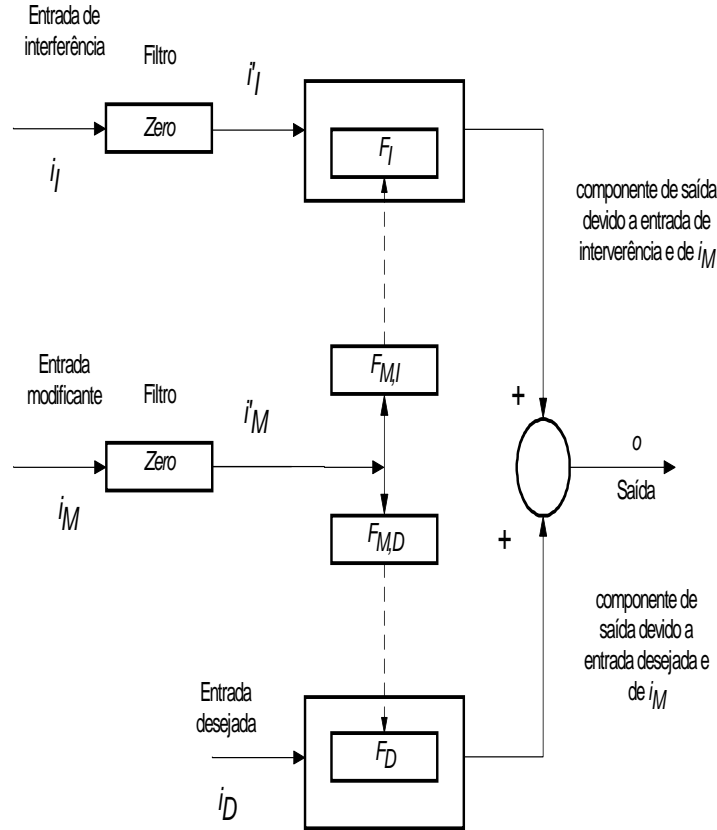


Figura 2.4: Princípio geral do filtro: aplicação do filtro na entrada (Doebelin, 1990).

$$p_o = \frac{K_{AM} \cdot K_B \cdot K_{SP}}{1 + K_{AM} \cdot K_B \cdot K_{SP} \cdot K_{FB}} \cdot e_i. \quad (2.3)$$

Se K_{AM} for grande (um sistema de "alto ganho"), então

$$K_{AM} \cdot K_B \cdot K_{SP} \cdot K_{FB} \gg 1, \quad (2.4)$$

logo,

$$p_o \cong \frac{1}{K_{FB}} \cdot e_i. \quad (2.5)$$

O significado da equação 2.5 é que o efeito da variação de K_B , K_{SP} e K_{AM} (como resultado das entradas modificantes i_{M1} , i_{M2} e i_{M3}) sobre a relação de entrada, e_i , e saída, p_o , pode ser desprezado. Então basta fazer com que K_{FB} seja

insensível a i_{M4} para manter inalterada a calibração entrada-saída, como mostrada pela equação 2.5. Isto implica que a saída não depende do ganho da bomba e nem do ganho do sensor de pressão.

Para este método, na verdade é introduzido um elemento amplificador, K_{AM} , de tal modo $K_{AM} \gg 1$. Com a introdução deste elemento, com valores elevados, pode-se observar na malha direta que pequenas variações de e_i provocam elevados valores de p_o , podendo provocar instabilidade do sistema. Enfim, antes da implementação deste método deve ser avaliado o risco da instabilidade provocada pelo elevado ganho, que será introduzido no sistema.

O *método de correções calculadas* requer uma medição ou estimação da entrada de interferência e modificante e é necessário saber quantitativamente como elas afetam a saída. Com esta informação, é possível calcular as correções que podem ser somadas ou subtraídas da saída indicada e deixar somente a componente associada à entrada desejada, que é o ideal.

O *método de filtragem dos sinais de entrada ou saída* é baseado na possibilidade de introdução de certos elementos ("filtros") dentro do instrumento de forma a bloquear os sinais espúrios, de tal modo que seus efeitos sobre a saída sejam removidos ou reduzidos. O filtro pode ser aplicado a vários e apropriados sinais no instrumento; seja na entrada, na saída, ou em um sinal intermediário. O conceito de filtragem na entrada é mostrado esquematicamente na Figura 2.4 para os casos da entrada e saída filtrados. Na Figura 2.4 as entradas i_I e i_M passam através de filtros cuja relação entrada-saída é (idealmente) zero. Assim i'_I e i'_M são nulos mesmo se i_I e i_M não forem. O conceito de filtragem na saída é ilustrado na Figura 2.5. Neste caso a saída o , é o sinal original que é uma superposição de o_M (saída devida à entrada de interferência), o_D (saída devida à entrada desejada) e o_I (saída devida à entrada modificante). Se for possível construir filtros seletivos para bloquear a passagem de o_I e o_M mas permitindo o_D passar, isto pode ser simbolizado como na Figura 2.5 e resulta em o' consistindo inteiramente de o_D .

Os filtros necessários na aplicação deste método podem ter várias formas. Se um filtro for colocado diretamente no caminho de uma entrada espúria, este filtro deve ser projetado para bloquear completamente a passagem do sinal indesejado ou reduzi-lo o máximo possível. Se, no entanto, o filtro for inserido em um ponto onde o sinal possui ambas componentes, a desejada e a espúria, este filtro deve ser seletivo, ou seja, deixa passar essencialmente as componentes da entrada desejada e inalterando-as enquanto efetivamente bloqueia todas as outras componentes.

O *método de entradas em oposição* consiste na introdução intencional de elementos dentro do sistema de medição para interferir e/ou modificar as entradas. Estes elementos têm o objetivo de cancelar os efeitos indesejáveis da inevitável

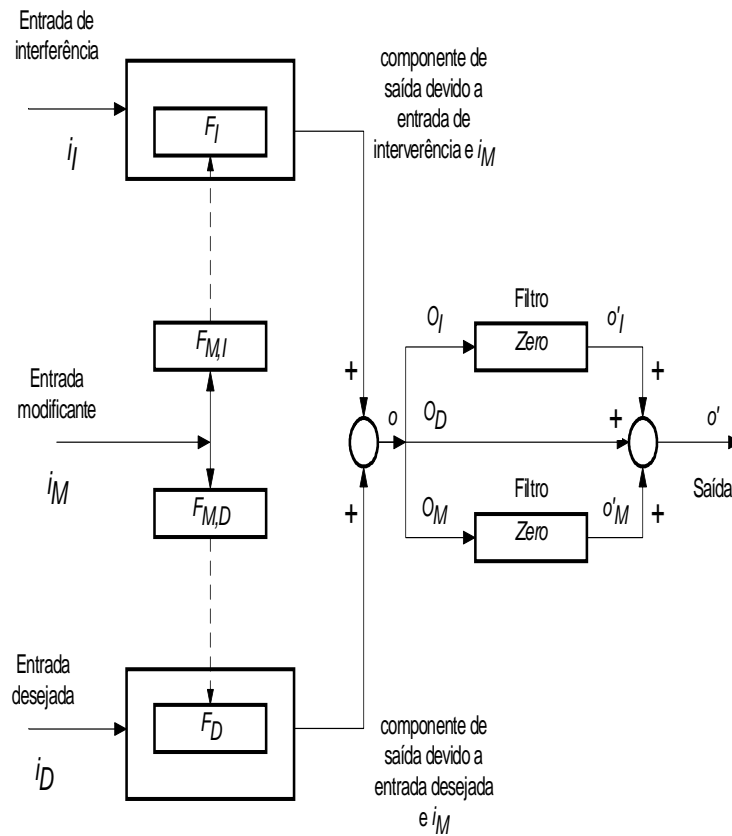


Figura 2.5: Princípio geral do filtro: aplicação do filtro na saída (Doebelin, 1990).

entrada espúria. A Figura 2.6 mostra esquematicamente o conceito das entradas espúrias em oposição. A entrada intencionalmente introduzida é projetada de tal modo que os sinais o_{I1} e o_{I2} sejam essencialmente iguais, mas com ação oposta; assim a contribuição de $o_{I1} - o_{I2}$ para a saída é aproximadamente nula. Este método pode, de fato, ser considerado como uma variação do método de correções calculadas. Entretanto, o "cálculo" e aplicação da correção são executados automaticamente devido à estrutura do sistema, especialmente pelo cálculo numérico ou pela ação humana. Estes dois métodos são similares, no entanto a distinção entre eles é que, na fase de projeto, é levada em conta a dificuldade de construção de novos sistemas de medição aplicando estes generalizados conceitos de correção.

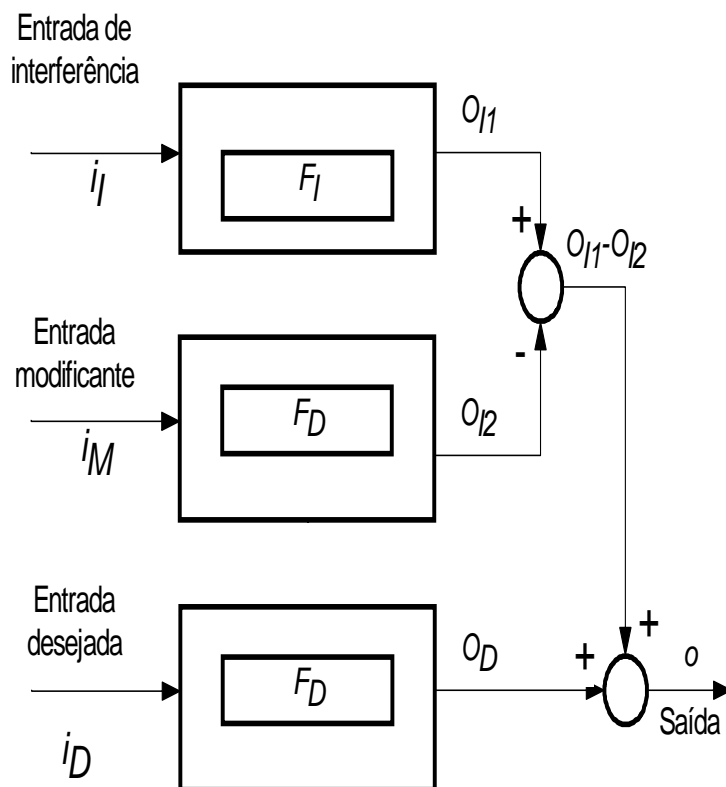


Figura 2.6: Método de entradas em oposição (Doebelin, 1990).

2.3 Revisão bibliográfica sobre aplicação de compensação

Alguns exemplos que utilizam a compensação de temperatura podem ser vistos em (Doebelin, 1990). Um trabalho interessante na medição de pressão e que realiza a compensação dos efeitos da temperatura é o trabalho descrito em (Patra, 1997) no qual é mostrado um desenvolvimento de um sensor de pressão, baseado no efeito capacitivo, ou seja a variação da capacitância quando a pressão é aplicada no sensor. As não linearidades deste tipo de sensor são muitas. As compensações necessárias são realizadas por meio de uma rede neural. O trabalho (Patra and Bos, 2000b) mostra uma continuação do estudo do sensor de pressão capacitivo. Estes trabalhos mostram ferramentas úteis para aplicar soluções complexas e não triviais de serem implementadas. O método utilizado é o método de entradas em oposição. A rede neural é treinada para produzir um sinal de mesma amplitude e em oposição aos efeitos das entradas de interferência e modificantes.

O trabalho realizado e descrito em (Molinar and Nespoli, 1992) descreve um sensor destinado a altas pressões, discutindo a estabilidade da saída do mesmo. Mas para este caso a temperatura não foi considerada como um fator importante visto que o sensor é baseado em uma ponte de *strain gauges* colada em um tarugo de metal. Este metal funciona como um grande dissipador de calor para a variação da temperatura da resistência do sensor. Neste trabalho é utilizado o método de insensibilidade inerente para o conjunto e o metal como método de filtragem na entrada, porém para ensaios estáticos com longo período de duração, a saída pode ser afetada pelo novo valor de temperatura e esta compensação não foi mostrada no trabalho.

O sistema descrito em (Kayatas and Loumos, 1998) ilustra a possibilidade de se usar uma variável intermediária para compensar os efeitos da temperatura em uma massa de líquido armazenado em um tanque. O método utilizado neste trabalho é o método das correções calculadas. É medida a temperatura do tanque e a correção é realizada por meio de um microprocessador que calcula o valor da correção e soma ao valor da entrada. Para este caso, inicialmente são realizados ensaios para determinar empiricamente a função de correção que posteriormente será gravada no microprocessador.

O sistema mostrado em (Pereira and Girão, 1998) diz respeito à influência da temperatura ambiente no controle da intensidade de campo magnético. Este trabalho é também um exemplo de aplicação do método das correções calculadas. A compensação do efeito da temperatura é feita através da medição das temperaturas em dois pontos distintos. Um sensor mede a temperatura ambiente e outro mede a temperatura próximo ao enrolamento (fonte do campo magnético). As duas informações de temperaturas são processadas em uma rede neural e a rede envia um sinal a um algoritmo computacional que o transmite ao atuador.

O trabalho apresentado em (Karl, 1998) propõe um compensador eletrônico para circuitos de medição do tipo ponte. Apresenta um equipamento capaz de auxiliar na aplicação de método de entradas em oposição. Para aplicar o método das entradas em oposição na ponte de *Wheatstone* os sensores deveriam ser idênticos, para que todos elementos produzissem os mesmos sinais para as devidas entradas modificantes ou de interferência. Neste equipamento há possibilidade de ajustar equações de reta para a compensação de cada elemento.

Um exemplo de aplicação do método de realimentação é apresentado em (Chotai and Behzadi, 1991), porém não é o método de realimentação de alto ganho, é um controle PI. É utilizada a aplicação de um PI e não de um controlador P. O integrador é aplicado para que o sistema não se torne instável.

Enfim o método escolhido para a compensação, neste trabalho, será o método

das correções calculadas. Este método permite fazer a compensação sem alterar o sistema de medição e sem a necessidade de modificar fisicamente o sensor de pressão. Para a aplicação deste método será necessário quantificar os efeitos da temperatura do gás manométrico na saída do sensor de pressão. A grande dificuldade esperada será a medição da temperatura do gás manométrico. A proposta inicial é que a compensação seja realizada *off line*. No entanto, se não houver atraso na programação das etapas deste trabalho, espera-se que nos últimos 3 meses, possa conseguir implementar um algoritmo computacional que permita realizar a compensação *on line*. Com esta implementação poder validar os resultados da compensação *on line*.

Capítulo 3

Metodologia e procedimentos de ensaios

Este capítulo objetiva apresentar as metodologias e procedimentos utilizados nos ensaios práticos, bem como a finalidade dos mesmos. Os procedimentos aqui apresentados foram desenvolvidos para avaliação de sensores de pressão de uma forma geral, especialmente os que possuem em sua saída um sinal elétrico. Tendo em vista que este trabalho pretende fazer a avaliação dos efeitos da temperatura do gás manométrico em um sensor de pressão, é necessário conhecer o comportamento de todos os elementos, dispositivos, etc, a serem utilizados. E são necessárias várias montagens afim de permitir conhecer o efeito apenas desta entrada espúria que pode ser estático e/ou dinâmico.

O sensor de pressão em estudo possui em sua saída um sinal elétrico. Assim faz-se necessário conhecer as incertezas e os erros causados pela fonte de alimentação. Todas as vezes que este sensor de pressão for utilizado para medição de pressão, a fonte de alimentação estará sendo utilizada, logo contribui para o aumento das incertezas do sensor.

Outro fator importante é a temperatura ambiente. Todo e qualquer sistema de medição está submetido à variação da temperatura ambiente, a qual também contribui para o aumento das incertezas das medições.

Para avaliar o efeito da temperatura do gás é necessário medi-la. A partir de testes dinâmicos observou-se que o sensor de temperatura, neste caso RTD, pode ser modelado como um sistema de primeira ordem. Então é necessário estimar os parâmetros do modelo do RTD para que se determine o sinal de temperatura que realmente existe, já que o resultado da medição é apenas uma amostra da grandeza que está sendo medida. Outro fator agravante no uso de sensores térmicos é que deve-se garantir que responda mais rápido do que a velocidade de variação da grandeza a ser medida. Ou seja, para ensaios dinâmicos, se a grandeza a ser

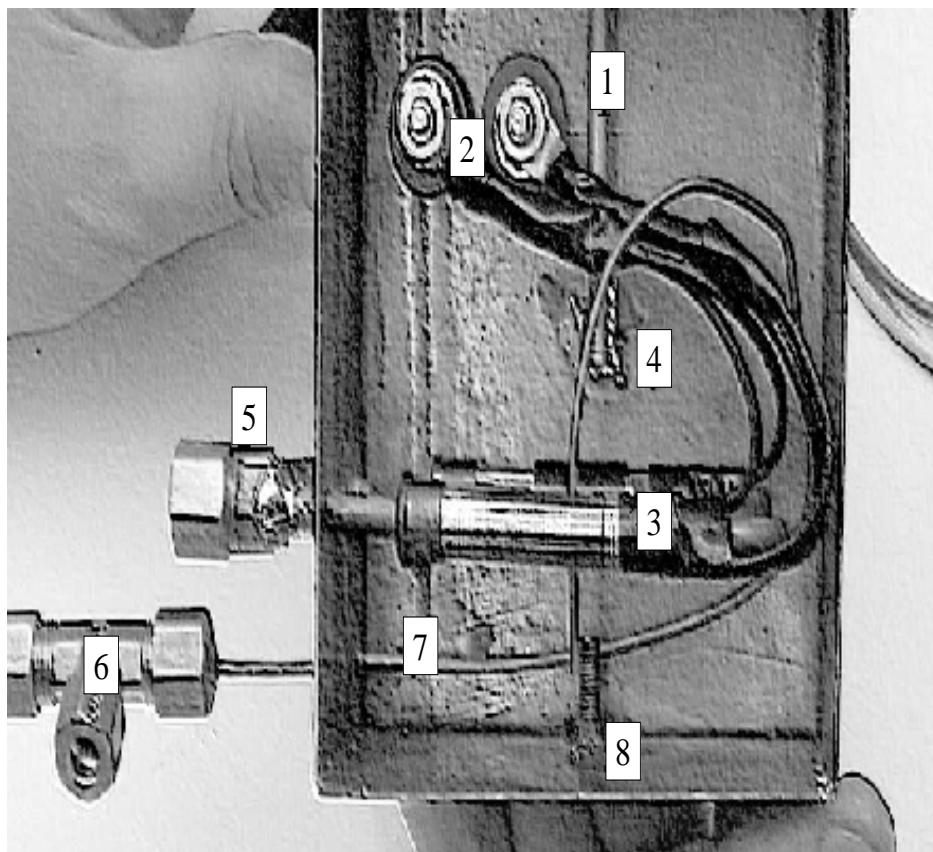


Figura 3.1: Câmara de condicionamento do fluido manométrico (nitrogênio): 1 - Sensor de temperatura RTD868, 2 - Terminais de alimentação do aquecimento, 3 - Resistências para o aquecimento, 4 - Superfície onde foi soldado o sensor de pressão, 5 - Terminais de conexão do sistema de arrefecimento, 6 - Conexão "Te" para ligação da linha de pressão e o DPG, 7 - Tubo para tomada de pressão e 8 - Parafuso.

medida variar o resultado de saída do sensor deve ter a mesma taxa de variação da grandeza.

Conhecendo as incertezas causadas pelas principais entradas indesejadas no processo de medição que utilize o sensor de pressão e os parâmetros dos modelos dos principais componentes, podem-se realizar montagens para se conseguir avaliar os efeitos da temperatura do gás manométrico. Para este específico sensor foi construída uma câmara para o condicionamento do gás manométrico. Os detalhes construtivos da câmara de pressão serão mostrados no capítulo 5. A câmara é mostrada na Figura 3.1 e pode ser representada por uma função que no texto e na Figura 3.3 é denominada de H. Esta câmara foi usada na montagem mostrada na Figura 3.2, cuja montagem pode ser representada por um diagrama de blocos

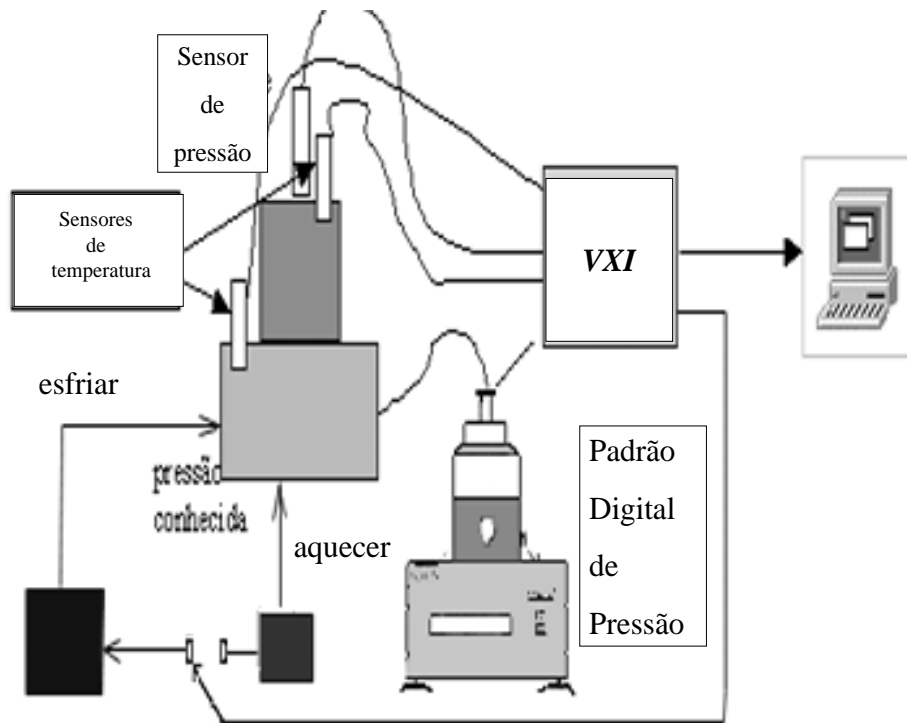


Figura 3.2: Esquema da montagem para aplicação de um sinal chaveado.

como mostrado na Figura 3.3. Nesse diagrama, S representa o sensor de pressão, G o termômetro, DPG o padrão de pressão e H a câmara de pressão.

A compreensão do diagrama da Figura 3.3 é muito importante pois todo o trabalho é baseado na identificação dos parâmetros de cada bloco, na aquisição das variáveis P , Y_s , T_g e na compensação dos efeitos de T_g sobre Y_s .

Sabendo-se que a saída do sensor de pressão, S , é Y_s , esta pode ser expressa em função das variáveis T_e e P pela função f , ou seja,

$$Y_s = f(T_e, P). \quad (3.1)$$

É desejável que a função $f(T_e, P)$ possa ser desmembrada em

$$f(T_e, P) = f_1(T_e) + f_2(P). \quad (3.2)$$

Porém esta separação de f em duas parcelas não é fácil de ser obtida, pois na prática P é função de T_e .

Considerando que a função $f_2(P)$ é uma parcela da saída de S e é dependente apenas de P , pode ser expressa pela curva de calibração estática, então

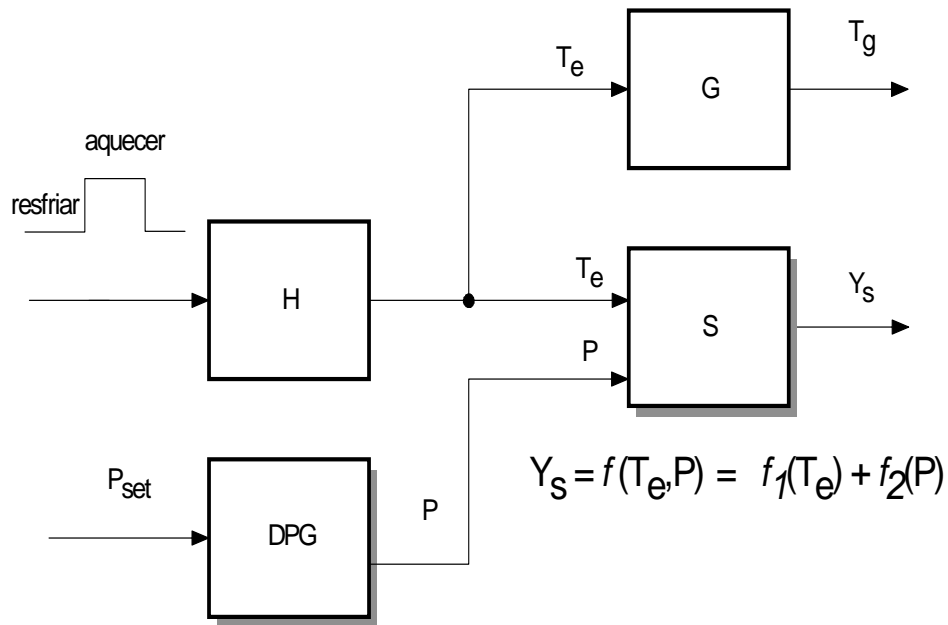


Figura 3.3: Diagrama de blocos do sistema.

$$Y_s - f_2(P) = f_1(T_e), \quad (3.3)$$

logo, não é considerada a dinâmica da função f_2 , pois o sensor de pressão responde tão rápido quanto se possa variar a pressão. Este sensor possui uma frequência de corte da ordem de 10kHz.

A função $f_1(T_e)$ não é conhecida, porém sabe-se que pode ter duas partes: uma estática e outra dinâmica. A parte estática pode ser representada por equações lineares. Já a parte dinâmica pode ser representada por equações diferenciais se for tratada como função contínua ou equações de diferenças se for tratada como função discreta. Portanto, deve-se realizar a identificação destas partes de $f_1(T_e)$ para implementar a compensação.

Sabendo-se que f_1 é dependente de T_e então, para que seja feita a identificação dos parâmetros de f_1 deve-se conhecer T_e . Mas não se tem acesso direto ao sinal T_e e sim à saída do sensor de temperatura RTD. Logo, o sinal T_e pode ser estimado a partir do sinal T_g e da função G . Então, a função G deve ser estimada

para que se possa conhecer o sinal T_e .

A partir do sinal de T_e pode-se estimar a função f_1 e saber qual é o efeito sobre Y_s . A compensação baseia-se na subtração da função f_1 de Y_s . Então, a saída estimada do sensor de pressão seria

$$\hat{Y}_s = Y_s - f_1(T_e), \quad (3.4)$$

$$\hat{Y}_s = f_1(T_e) + f_2(P) - f_1(T_e), \quad (3.5)$$

$$\hat{Y}_s = f_2(P), \quad (3.6)$$

desta forma, Y_s da equação 3.6 seria dependente apenas da curva de calibração estática, o que é ideal para o sensor de pressão. É desejável que a saída do sensor dependa apenas da pressão e não tenha efeitos de outras variáveis, porém a saída do sensor de pressão é função de várias variáveis como: a temperatura ambiente, que pode ser mantida constante e medida; a fonte de alimentação, que pode ser conhecida; a pressão aplicada, que é medida pelo padrão DPG; a temperatura do gás, a qual se deseja avaliar a influência e de outras entradas indesejadas que não representam valores significativos no cálculo da incerteza do sensor. Então as duas variáveis de interesse são a temperatura do gás e a pressão. A função que descreve este efeito é representada na equação 3.2. Os ensaios dinâmicos mostrarão se o sensor é afetado pela dinâmica da temperatura do gás e os ensaios estáticos mostrarão qual é o erro do sensor quando a temperatura é mantida em diferentes patamares para a mesma pressão.

Com o objetivo de se conhecer os parâmetros de determinados componentes é necessário realizar alguns ensaios e devem-se padronizar os procedimentos destes ensaios para que se possa repetir os ensaios ou aplicar a outros sensores. Os principais ensaios são:

ensaios	objetivos
1 calibração estática do RTD	k_G
2 calibração estática do sensor de pressão, S	f_2
3 aplicação de degrau positivo de temperatura no RTD	τ_G
4 aplicação de degrau negativo de temperatura no RTD	validação
5 efeito da fonte de alimentação do sensor de pressão	incerteza
6 efeito da temperatura ambiente	incerteza
7 degrau positivo de temperatura na câmara de pressão	τ_H
8 aplicação de um sinal de variação lenta de T_g	dinâmica de H
9 aplicação de um sinal de variação rápida de T_g	dinâmica de H
10 aplicação de um sinal estático de T_g	estática de H

3.1 Calibração estática do sensor de temperatura RTD

O objetivo deste ensaio é fazer o levantamento da curva de calibração do RTD e obter os parâmetros das características estáticas do sensor de temperatura. Este sensor possui identificação de RTD868. Com os resultados da calibração estática pode-se obter o erro de linearidade, repetibilidade e de exatidão do sensor.

3.1.1 Material

Os itens utilizados foram:

- 1 sensor de temperatura RTD,
- 2 recipiente de paredes adiabáticas,
- 3 padrão de temperatura calibrado,
- 4 água quente,
- 5 água a temperatura ambiente,
- 6 gelo,
- 7 indicador para o sensor de temperatura RTD.

3.1.2 Procedimentos

Os seguintes procedimentos foram usados:

1 - Fazer um banho em um recipiente de paredes adiabáticas, misturando água à temperatura ambiente com gelo, esperar que entre em equilíbrio térmico.

2 - Colocar o padrão para medir a temperatura do banho.

3 - Colocar o RTD para medir a temperatura do banho. Tomar o cuidado para vedar os terminais elétricos do RTD. Caso molhe, pode causar oxidação e alterar as resistências de contato.

4 - Esperar que os medidores de temperatura entre em equilíbrio térmico com o banho.

5 - Anotar os valores das temperaturas em uma planilha.

6 - Acrescentar um pouco de água quente.

7 - Esperar que a temperatura estabilize.

8 - Repetir os item 5, 6 e 7 para no mínimo 5 valores diferentes de temperatura na faixa de interesse.

Os resultados destes procedimentos serão descritos no capítulo 4.

3.2 Calibração estática do sensor de pressão

O objetivo é fazer o levantamento da curva de calibração do sensor de pressão e obter as características estáticas do mesmo, bem como os erros de linearidade, repetibilidade e exatidão.

A calibração consiste basicamente da aplicação de três séries crescentes segundo os procedimentos das Normas do Sistema da Qualidade do CETEC do Laboratório Isaac Newton do CETEC e das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT-NBR8189, 1995; ABNT-MB-3082, 1989).

3.2.1 Material

Os itens utilizados foram:

- 1 sensor de pressão,
- 2 alimentação para o sensor de pressão,
- 3 indicador para o sensor de pressão,
- 4 padrão de pressão, neste caso o DPG,
- 5 aplicador de pressão, neste caso o PPC1,
- 6 termômetro.

3.2.2 Procedimentos

Os seguintes procedimentos foram usados:

- 1 - Ligar a tomada de pressão positiva do sensor de pressão no aplicador e no DPG.

2 - Aplicar a excitação do sensor de pressão recomendada pelo fabricante ou a que será usada no sensor.

3 - Ligar o DPG e o PPC1.

4 - Abrir os registros do cilindro de alimentação de gás.

5 - Esperar que o DPG, PPC1 e o sensor estabilize o auto-aquecimento. Isto corresponde a um intervalo de tempo de 15 a 30 minutos.

6 - Zerar o DPG, anotar a leitura do indicador do sensor em uma planilha.

7 - Aplicar o valor de pressão, iniciando com o valor de 10% da faixa nominal.

8 - Esperar que a pressão estabilize.

9 - Anotar as medições do padrão e da saída do sensor em uma planilha e retirar a pressão.

10 - Repetir os itens 7, 8 e 9 para pelo menos mais 4 valores de pressão. Estes valores devem estar compreendidos entre 10% e 100% da faixa nominal. Os intervalos entre dois valores consecutivos devem ser iguais.

11 - Repetir os itens 9, 8 e 7 para o sentido decrescente.

12 - Anotar o resíduo, quando retornar ao zero.

13 - realizar 3(três) séries crescentes e 3(três) séries decrescentes.

Os resultados destes procedimentos serão descritos no capítulo 4.

3.3 Aplicação de um degrau positivo de temperatura no RTD

O RTD, conhecido também como PT-100, pode ser modelado como um sistema de primeira ordem por ser um sistema térmico. Logo, se for aplicado um degrau de temperatura produzirá uma resposta temporal e através desta pode-se determinar os parâmetros da função que representa o RTD. O objetivo deste ensaio é obter a resposta temporal do RTD a uma entrada em degrau de temperatura.

3.3.1 Material

Os itens utilizados foram:

- 1 sensor de temperatura, neste caso RTD,
- 2 sistema de aquisição de dados, neste caso VXI,
- 3 dois recipientes de paredes adiabáticas,
- 4 um termômetro calibrado,
- 5 água a temperatura ambiente,
- 6 gelo,
- 7 cronômetro.

3.3.2 Procedimentos

Os seguintes procedimentos foram usados:

1 - Encher os dois recipientes de paredes adiabáticas com água a temperatura ambiente.

2 - Colocar gelo em um dos dois recipientes de tal forma que a temperatura do banho se torne a temperatura do gelo fundente.

3 - Ligar o sistema de aquisição de dados, preparado para coletar os valores de tempo, saída do RTD e se possível a temperatura do banho.

4 - Medir a temperatura do banho de gelo fundente com o termômetro e anotar este valor na planilha.

5 - Medir a temperatura do banho a temperatura ambiente com o termômetro calibrado e anotar este valor em uma planilha.

6 - Inserir o RTD no banho de gelo fundente, tomar o cuidado de vedar os contatos elétricos para não molhar e oxidar posteriormente.

7 - Esperar o sistema entrar em equilíbrio termodinâmico. A temperatura deve permanecer constante e igual a do item 3.

8 - Ligar o sistema de aquisição de dados e simultaneamente disparar o cronômetro.

9 - Retirar o RTD do banho de gelo fundente, simultaneamente parar o cronômetro e rapidamente colocar no banho à temperatura ambiente.

10 - Anotar na planilha o tempo indicado no cronômetro.

11 - Esperar que o RTD entre em equilíbrio termodinâmico com o banho à temperatura ambiente fazendo a aquisição destes dados.

12 - Salvar os dados coletados.

Os resultados destes procedimentos serão descritos no capítulo 4.

3.4 Aplicação de um degrau negativo de temperatura no RTD

3.4.1 Material

Os itens utilizados foram:

- 1 sensor de temperatura, RTD,
- 2 sistema de aquisição de dados, VXI,
- 3 dois recipientes de paredes adiabáticas,
- 4 um termômetro calibrado,
- 5 água a temperatura ambiente,
- 6 gelo,
- 7 cronômetro.

3.4.2 Procedimentos

Os seguintes procedimentos foram usados:

1 - Encher os dois recipientes de paredes adiabáticas com água à temperatura ambiente.

2 - Colocar gelo em um dos dois recipientes de tal forma que a temperatura do banho se torne a temperatura do gelo fundente.

3 - Ligar o sistema de aquisição de dados, para coletar os valores de tempo, saída do RTD e se possível a temperatura do banho.

4 - Medir a temperatura do banho à temperatura ambiente com o termômetro calibrado e anotar este valor em uma planilha.

5 - Esperar estabilizar a temperatura do banho de gelo fundente, medir com o termômetro calibrado e anotar este valor na planilha.

6 - Inserir o RTD no banho à temperatura ambiente, tomar o cuidado de vedar os contatos elétricos para não molhar e oxidar posteriormente.

7 - Esperar que o sistema entre em equilíbrio termodinâmico. A temperatura deve permanecer constante e igual a do item 4.

8 - Ligar o sistema de aquisição de dados e simultaneamente disparar o cronômetro.

9 Retirar o RTD do banho a temperatura ambiente, simultaneamente parar o cronômetro e rapidamente colocar no banho com gelo fundente.

10 Anotar na planilha o tempo indicado no cronômetro.

11 Esperar que o RTD entre em equilíbrio termodinâmico com o banho à temperatura ambiente fazendo a aquisição destes dados.

12 Salvar os dados coletados.

Os resultados destes procedimentos serão descritos no capítulo 4.

3.5 Efeito da fonte de alimentação do sensor de pressão

O fato do sensor de pressão possuir na sua saída um sinal elétrico, significa que parte da energia da fonte de alimentação está presente no sinal de saída. Logo, o objetivo deste ensaio é quantificar as incertezas de medição provocadas pela fonte de alimentação.

3.5.1 Material

Os itens utilizados foram:

- 1 sensor de pressão,
- 2 fonte de alimentação variável,
- 3 aplicador de pressão,
- 4 um termômetro calibrado,
- 5 medidor para a fonte de alimentação
se for utilizada fonte de corrente → amperímetro,

- se for utilizada fonte de tensão → voltímetro,
- 6 medidor de pressão,
- 7 indicador para a saída do sensor de pressão.

3.5.2 Procedimentos

Os seguintes procedimentos foram usados:

1 Alimentar o sensor de pressão com a corrente de excitação sugerida pelo fabricante.

2 Aplicar uma pressão de valor compreendido entre 10 e 90% da faixa nominal do sensor de pressão e manter constante neste valor durante todo o ensaio.

3 Construir uma planilha para anotação dos dados. Deve conter uma tabela para coletar os valores de tensão alimentação, tensão de saída do sensor de pressão e temperatura ambiente.

4 Anotar os valores do item 3 na planilha construída para 50,60,70,80, 90,100 e 110% da excitação nominal.

Os resultados destes procedimentos serão descritos no capítulo 4.

3.6 Efeito da temperatura ambiente

O objetivo deste ensaio é quantificar a influência na incerteza causada pela variação da temperatura ambiente que para este ensaio pode ser considerada a temperatura do corpo do sensor de pressão.

3.6.1 Material

Os itens utilizados foram:

- 1 sensor de pressão,
- 2 fonte de alimentação para o sensor de pressão,
- 3 aplicador de pressão,
- 4 um termômetro calibrado,
- 5 medidor para a fonte de alimentação para fonte de corrente → amperímetro,

- para fonte de tensão → voltímetro,
- 6 medidor de pressão,
- 7 indicador para a saída do sensor de pressão,
- 8 estufa de paredes adiabáticas, que tenha controle de temperatura e que cujo volume interno seja maior que dez vezes o volume do sensor de pressão,
- 9 cronômetro.

3.6.2 Procedimentos

Os seguintes procedimentos foram usados:

1 - Colocar o sensor de pressão dentro da estufa de tal forma que se possa aplicar a excitação e medir a sua saída sem abrir a estufa.

2 - Colocar o termômetro calibrado dentro da estufa de tal modo que se possa fazer a leitura sem abrir a estufa.

3 - Alimentar o sensor com a excitação nominal.

4 - Aplicar um valor de pressão compreendido entre 10 e 90% da faixa nominal do sensor de pressão e manter neste valor durante todo o ensaio.

5 - Construir uma planilha para coleta de dados. Esta planilha deve conter o valor da temperatura dentro da estufa, da saída do sensor de pressão, da excitação do sensor, da pressão aplicada no sensor e do tempo de estabilização da temperatura.

6 - Aplicar no mínimo 5 (cinco) patamares de temperatura e fazer a coleta dos dados na planilha do item 5.

Os resultados destes procedimentos serão descritos no capítulo 4.

3.7 Degrau positivo de temperatura na câmara de pressão

A câmara de pressão, que será descrita no capítulo 5, possui em seu interior um sistema de aquecimento e de resfriamento. O sistema de aquecimento será usado para aplicar um degraú de temperatura. O objetivo deste ensaio é obter a resposta temporal do bloco H quando aplicada na entrada um degraú de temperatura para estimar os parâmetros da função H.

3.7.1 Material

Os itens utilizados foram:

- 1 câmara de pressão com o sensor de temperatura soldado,
- 2 sistema de aquisição de dados, VXI,
- 3 chave liga desliga do sistema de aquecimento,
- 4 cronômetro.

3.7.2 Procedimentos

Os seguintes procedimentos foram usados:

1 - Deixar que a câmara de pressão entre em equilíbrio termodinâmico com a temperatura ambiente. A pressão dentro da câmara deve ser a pressão atmosférica.

2 - Ligar o sistema de aquisição de dados.

3 - Começar a coleta dos dados e simultaneamente disparar o cronômetro

4 - Ligar a chave do sistema de aquecimento e simultaneamente parar o cronômetro.

5 - Anotar o valor do tempo lido no cronômetro.

6 - Esperar entrar em equilíbrio termodinâmico.

7 - Desligar a chave de aquecimento e esperar entrar em equilíbrio termodinâmico.

Obs.: usar os dados até o item 6 para obter os parâmetros do modelo e os do item 7 para validar o modelo.

Os resultados destes procedimentos serão descritos no capítulo 5.

3.8 Aplicação de um sinal de variação lenta de T_g

O objetivo deste ensaio é verificar a função de transformação termodinâmica do gás manométrico dentro da câmara de pressão. A aplicação de um sinal de temperatura de variação lenta permite considerar que a indicação do RTD, localizado está dentro da câmara de pressão, seja a própria temperatura dentro da câmara.

3.8.1 Material

Os itens utilizados foram:

- 1 câmara de pressão com os sensores de temperatura e de pressão soldados
- 2 fonte de alimentação do sensor de pressão
- 3 varivolt
- 4 padrão de pressão, neste caso DPG
- 5 sistema de aquisição de dados, VXI

3.8.2 Procedimentos

Os seguintes procedimentos foram usados:

- 1 - Conectar o sensor de pressão ao DPG.
- 2 - Conectar o varivolt de tal forma a alimentar o sistema de aquecimento da câmara com tensão mínima.
- 3 - Ligar o sistema de aquisição de dados.
- 4 - Alimentar o sensor de pressão com a excitação nominal.
- 5 - Ligar o DPG para medir a pressão dentro da câmara de pressão.
- 7 - Esperar que a câmara entre em equilíbrio termodinâmico com o ambiente e com o sistema de aquecimento. Isto é feito verificando a estabilização da temperatura do gás dentro da câmara.
- 8 - Começar a coleta dos dados. Os dados coletados devem ser: o tempo, a saída do sensor de pressão, a indicação do DPG, o sensor de temperatura e se possível a temperatura ambiente.
- 9 - Variar lentamente o ajuste do varivolt. Considerando que o ajuste máximo do varivolt é de 360° , então a velocidade instantânea tem de ser menor que $\frac{360^\circ}{\tau_H}$, sendo que τ_H é a menor constante de tempo de interesse da câmara de pressão.

Os resultados destes procedimentos serão descritos na seção 5.

3.9 Aplicação de um sinal de variação rápida de T_g

O objetivo deste ensio é aplicar um sinal cuja taxa de variação seja a maior possível de tal modo que ainda provoque variação mensurável na temperatura do gás manométrico. O sinal que será aplicado é um sinal chaveado e espera-se aproximar de um sinal conhecido como PRBS (Aguirre, 2000; Norton, 1986)

3.9.1 Material

Os itens utilizados foram:

- 1 câmara de pressão com os sensores de temperatura e de pressão soldados,
- 2 fonte de alimentação do sensor de pressão,
- 3 relé de potência de 15A,
- 4 padrão de pressão, neste caso DPG,
- 5 sistema de aquisição de dados, VXI,
- 6 gerador de sinal binário cujo tempo entre os estados seja aleatório
uma sugestão é apresentada em (Norton, 1986), outra opção é se a placa de aquisição de dados possuir saída, pode-se criar um arquivo com sinal binário, tempo aleatório e periódico. Para aplicar na saída da placa de aquisição.

3.9.2 Procedimentos

Estes procedimentos são referentes ao caso de se ter uma saída no sistema de aquisição de dados. Neste caso o sistema VXI possui uma placa HPE1364 que são relés e podem ser comandados pelo computador.

Os seguintes procedimentos foram usados:

1 - Ligar um relé de potência de três contatos de tal forma que o contato comum seja a alimentação e os outros dois sejam o aquecimento e o outro o resfriamento.

2 - Ligar a bobina do relé de potência à saída do gerador de sinal binário.

3 - Ligar o sistema de coleta de dados e iniciar a coleta de dados. Devem ser coletados os seguintes dados: tensão da bobina do relé de potência, saída do sensor de pressão, saída do DPG, saída do sensor de temperatura do gás e se possível a temperatura ambiente.

4 - Fazer a aquisição dos dados até que julgue o número de ciclos suficiente para realizar a identificação do sistema. Caso seja conseguido um sinal PRBS, faça a aquisição de pelo menos 5 (cinco) ciclos.

5 - Salve os dados.

Os resultados destes procedimentos serão descritos na seção 5.

3.10 Aplicação de um sinal estático de T_g

O objetivo deste ensaio é avaliar o efeito estático da temperatura do gás para uma dada faixa de pressão. Com isto é possível verificar qual é a melhor compensação a ser aplicada para minimizar o efeito da temperatura do gás.

3.10.1 Material

Os itens utilizados foram:

- 1 câmara de pressão com os sensores de temperatura e de pressão soldados,
- 2 fonte de alimentação do sensor de pressão,
- 3 controlador de temperatura (varivolt),
- 4 padrão de pressão, neste caso DPG,
- 5 aplicador de pressão, neste caso o PPC1,
- 6 sistema de aquisição de dados, VXI.

3.10.2 Procedimentos

Os seguintes procedimentos foram usados:

- 1 - Ligar o controlador de temperatura (varivolt) no sistema de aquecimento.
- 2 - Aplicar um valor de pressão na câmara de pressão. Sugestão 20, 40, 60 e 80% da faixa nominal do sensor de pressão.
- 3 - Ajustar o aplicador de pressão para controlar no valor desejado.
- 4 - Energizar o sistema de aquecimento.
- 5 - Iniciar a coleta de dados. Deve-se coletar os seguintes dados: saída do sensor de pressão, saída do DPG, saída do sensor de temperatura do gás e se

possível a temperatura ambiente.

6 - Ajustar o varivolt de tal modo que a temperatura do gás permaneça constante.

7 - Repetir o item 6 para vários valores diferentes. Sugestão, obter no mínimo 5 (cinco) patamares diferentes de temperatura.

8 - Salvar os dados

9 - Voltar ao item 2 e escolher um novo valor de pressão e repetir os procedimentos de 3 a 8.

Para a validação, devem ser repetidos todos os passos de 1 a 8. Porém, no passo 2 escolher valores diferentes dos que já foram ensaiados.

Os resultados destes procedimentos serão descritos na seção 6.

Enfim, este capítulo listou os procedimentos seguidos na execução dos ensaios. Os respectivos resultados são apresentados e discutidos nos capítulos 3, 4 e 5.

Capítulo 4

Descrição das montagens realizadas e dos componentes utilizados

No processo de identificação de sistemas multi-variáveis, como é o caso, há um interesse em estimar os parâmetros dos sensores das grandezas a serem medidas e posteriormente obter o modelo para o sistema como um todo. Mas nem sempre é possível conhecer os parâmetros de cada componente ou de cada bloco, para o caso de o sistema ser representado em diagrama de blocos. Quando são conhecidos os parâmetros de um bloco e só se pode realizar as medições das variáveis ou de entrada ou de saída deste bloco, é possível estimar a outra. Tendo em vista este fato, foram realizados alguns ensaios com objetivo de conhecer e identificar cada componente da montagem separadamente. Este capítulo apresenta, então as descrições de cada um dos ensaios, de cada componente, dos instrumentos ou acessórios utilizados nas montagens do sistema de medição, bem como no sistema de aquisição de dados. São também apresentados os resultados dos ensaios para a avaliação da influência da temperatura ambiente no sensor de pressão, para a verificação da influência da fonte de alimentação sobre a saída do sensor de pressão. Finalmente, é descrito o ensaio para a identificação do sensor de temperatura utilizado, os resultados destes ensaios e o modelo mais simples e mais próximo encontrado para o sensor de temperatura, RTD868, bem como a validação para este modelo.

As descrições encontradas nos catálogos para os sensores de temperatura e pressão devem ser confirmadas através de ensaios práticos, desta maneira há maior confiabilidade nos resultados.

Para que se conheça melhor o sensor de pressão utilizado, foram realizados alguns ensaios com a finalidade de levantar a necessidade de compensação da temperatura, a influência da fonte de alimentação e da temperatura ambiente na saída do sensor de pressão.

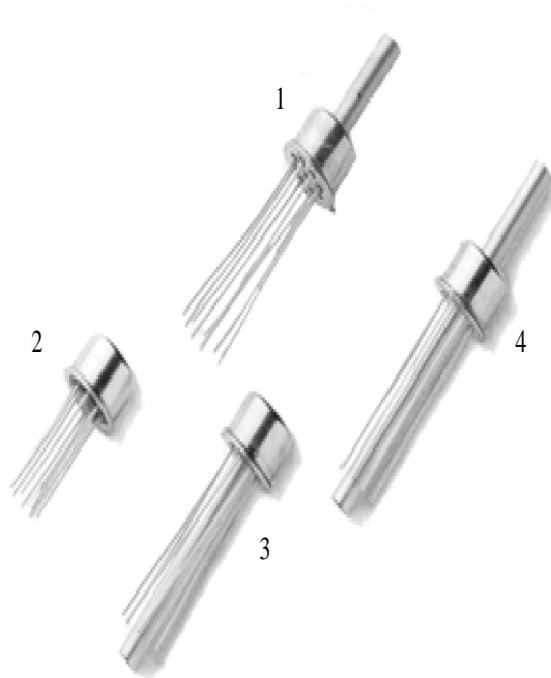


Figura 4.1: Modelos de sensores de pressão da série PX. O modelo do sensor utilizado é o indicado pelo número 4.

O sensor de pressão utilizado é mostrado na Figura 4.1, ele possui uma membrana onde estão instaladas resistências que podem ser ligadas em ponte. Normalmente o circuito ponte utilizado é a "Ponte de *Wheatstone*". O material usado na fabricação das resistências que compõem o circuito ponte é semelhante a um circuito integrado e é muito sensível à temperatura, se comparado aos sensores que usam resistências metálicas do tipo *strain gauge*. O princípio de funcionamento do transdutor é baseado no efeito piezoresistivo, ou seja, uma variação de pressão provoca uma variação nos valores das resistências do sensor. As características técnicas dos componentes, instrumentos e acessórios são apresentadas no Anexo B.

4.1 Efeito da temperatura ambiente

A temperatura ambiente é uma das principais entradas espúrias para os sensores de pressão baseado no efeito piezoresistivo. O calor pode propagar até à membrana do sensor de pressão principalmente de duas formas: por condução e por convecção. Na propagação por condução, o corpo do sensor esquentar e por

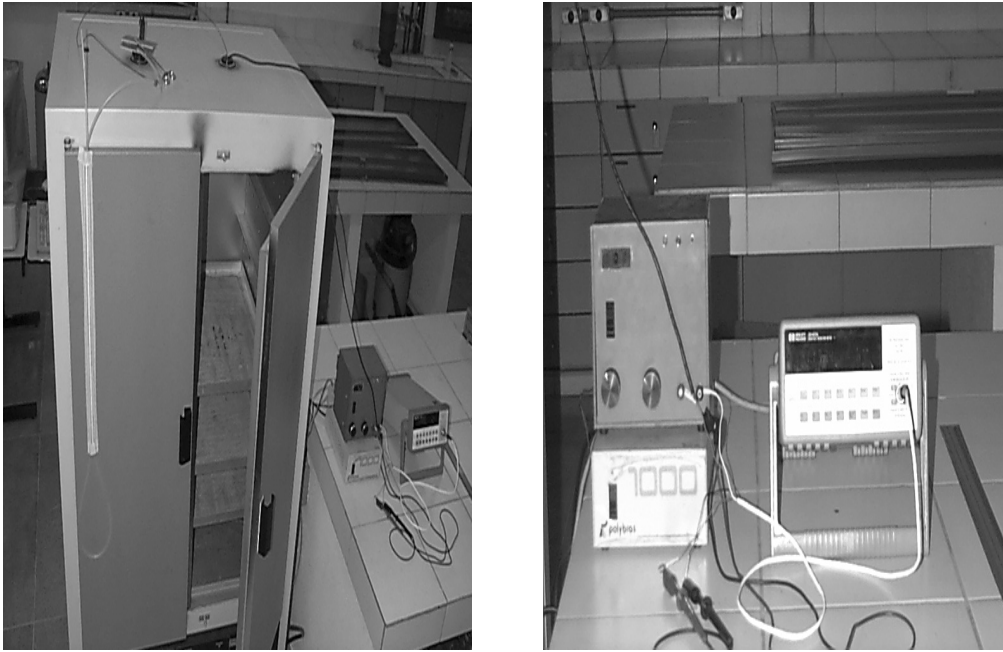


Figura 4.2: Componentes da montagem: (a) câmara de esterilização e (b) multímetro e fonte de alimentação.

condução, o calor atinge a membrana onde localizam-se as resistências sensíveis à pressão. A principal fonte de calor para este caso seria a variação da temperatura ambiente que provoca variação da temperatura do corpo do sensor. Na propagação por convecção, o fluido manométrico que banha a membrana transporta o calor até as resistências provocando alteração que pode acarretar uma saída diferente para a mesma pressão aplicada. Já a radiação não é analisada neste trabalho pelo fato de o sensor não estar exposto à fonte intensa de luz ou de radiação eletromagnética que possam provocar variações de pressão mensuráveis.

Os ensaios realizados para a estimação dos parâmetros do sensor de pressão iniciam-se pela determinação das características estáticas do sensor, que consiste na aplicação de um sinal de pressão constante e conhecido nas entradas do sensor e na medição simultânea da saída do instrumento. Os procedimentos para a calibração estática do sensor de pressão são descritos na seção 3.2. Dos resultados obteve-se uma equação ou uma função que relaciona o sinal de entrada (pressão aplicada) com o sinal de saída do sensor (diferença de potencial).

A primeira montagem foi realizada para avaliar a influência da temperatura ambiente na saída do sensor de pressão. Foi feita em uma câmara de esterilização, como mostrada na Figura 4.2. Para este caso, foi tomado como referência o manômetro de coluna líquida. Isto se deve à impossibilidade de transportar o

padrão DPG para o laboratório onde se localiza a câmara de esterilização na qual os testes para avaliação da influência da temperatura ambiente foram realizados. Como é necessário o uso de uma referência de pressão, o sensor de pressão foi calibrado em relação a este manômetro de coluna d'água cujas leituras são realizadas com uma escala graduada em mm. Os resultados foram obtidos controlando a temperatura em 23,4°C dentro da câmara de esterilização, realizando-se o primeiro levantamento da função do sensor de pressão em relação a um instrumento de referência de pressão, ou seja, foi feita a primeira calibração do sensor de pressão. A equação da curva de calibração serve para relacionar a saída do sensor e conhecer a relação entre a saída em mV/V e a pressão aplicada em mmH₂O. Os resultados referentes à comparação do sensor de pressão com a coluna d'água são apresentados na Tabela 4.1 e complementados pela Figura 4.3.

Como pode ser visto na Figura 4.3 na faixa compreendida entre 20 e 40 mmH₂O a indicação do sensor de pressão apresentou uma variação. Isto se deve ao fato de existir alguma irregularidade na parede interna do tubo do manômetro em "U". Esta imperfeição do manômetro não é significativa, pois a parte útil do manômetro é acima de 100mmH₂O que corresponde a 10% da faixa nominal do sensor de pressão.

4.1.1 Descrição da montagem

A montagem para avaliação dos efeitos da temperatura ambiente foi realizada em uma estufa de secagem e esterilização. Foram aproveitadas as entradas já existentes para termômetros de bulbo, localizadas na parte superior da estufa. Estas entradas foram usadas para passar o tubo de cobre de 6,35mm de diâmetro usado para transmissão da pressão. Este tubo foi soldado em uma das extremidades do sensor. O sensor, por sua vez, foi introduzido na câmara através de um dos orifícios localizados na parte superior da câmara de esterilização. Como a câmara de esterilização possui um processo de homogeneização da temperatura interna, que é conseguida através do deslocamento de ar (este deslocamento de ar é provocado por dois conjuntos de ventiladores localizados nas paredes laterais), introduziu-se também uma mangueira, cuja extremidade foi colocada junto ao sensor de pressão para tomar como pressão atmosférica a pressão dentro da câmara de esterilização (pressão de referência), isto é, a mesma pressão atmosférica sentida pelo sensor. Um manômetro de coluna d'água em "U" com água destilada e corante foi colocado fora da câmara para monitoração da pressão aplicada ao sensor. Uma das extremidades da coluna foi ligada à mangueira com a pressão atmosférica (de referência) sentida pelo sensor e a outra extremidade foi ligada a uma conexão "Te", ligação para duas tomadas de pressão, na qual foram ligados o tubo que é ligado ao sensor de pressão e o aplicador de pressão.

Tabela 4.1: Comparação do sensor de pressão com manômetro de coluna d'água

det	pressão mmH ₂ O	$\frac{V_s}{V_{cc}}$ = saída/entrada $\mu\text{V}/\text{V}$	temperatura °C	tempo seg
1	0	526,9	23,3	6
2	23,5	377,99	23,4	6
3	39,5	224,96	23,4	6
4	50,0	150,79	23,3	6
5	70,5	-12,58	23,4	6
6	78,0	-68,05	23,4	6
7	94,5	-193,20	23,4	6
8	151,0	-624,22	23,6	6
9	183,0	-869,34	23,6	6
10	184,5	-881,25	23,6	6
11	186,5	-893,93	23,7	6

Sendo:

det = determinação seqüencial de cada conjunto de leituras desta série,

pressão = pressão aplicada ao sensor,

saída/entrada = relação entre a saída e a alimentação do sensor,

temperatura = temperatura dentro da câmara de esterilização,

tempo = intervalo de tempo esperado após a estabilização da leitura.

O aplicador de pressão era inicialmente uma seringa plástica na qual foi adaptado um parafuso para prover o travamento do embolo. Porém não foi possível anular completamente o vazamento de ar na seringa e manter a pressão constante por muito tempo, já que era previsto que o experimento duraria entre 4 a 6 horas, por ensaio. Então esta seringa plástica foi substituída por uma seringa de vidro cujo, vazamento era bem menor do que a plástica, porém o problema persistiu. Para solucioná-lo foi colocada no lugar da seringa uma mangueira cirúrgica de borracha flexível de tal forma que uma extremidade foi ligada à tomada de pressão e a outra foi vedada com uma pinça autotravante. Esta mangueira foi colocada entre duas placas paralelas de metal que podiam ser prensadas por parafusos. Este sistema resolveu o problema, mantendo constante a pressão aplicada ao sensor.

Uma observação importante no que diz respeito à questão metrológica é que o manômetro de coluna líquida só foi utilizado para garantir a aplicação de pressão constante no sensor e não para a calibração definitiva do sensor.

4.1.2 Coleta de dados

Os procedimentos são descritos na seção 3.6 e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.2. Como pode ser visto nesta tabela, a pressão aplicada

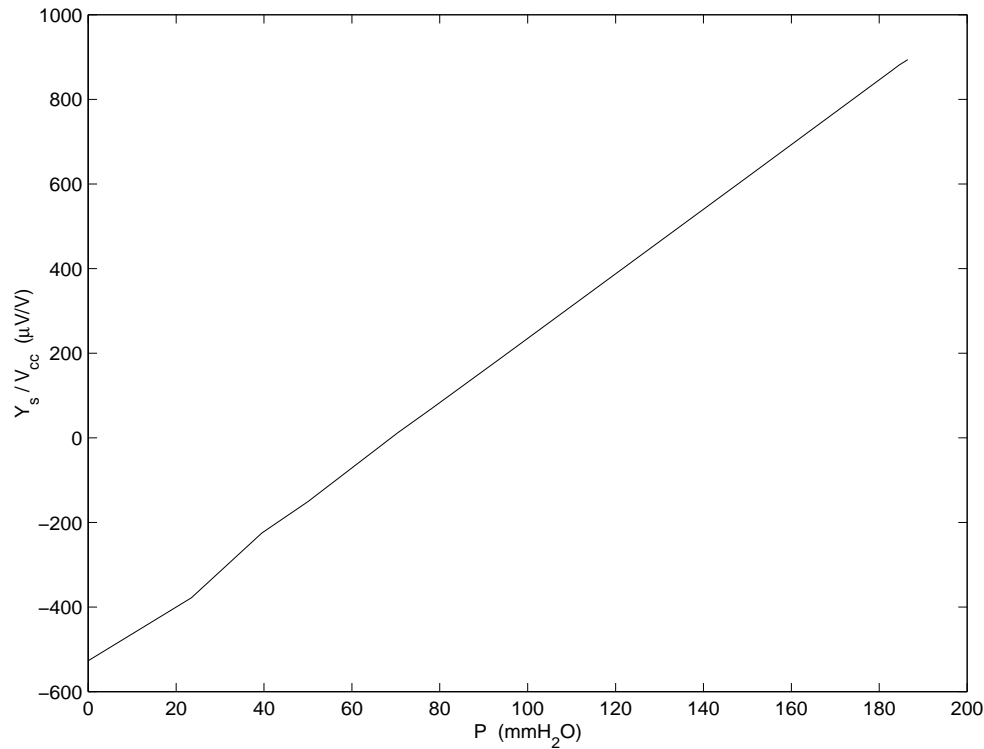


Figura 4.3: Resultados da calibração do sensor de pressão em relação à coluna d'água, ENS_SEN.

deveria permanecer constante em um valor escolhido na faixa entre 10% e 90% da faixa nominal do sensor de pressão, sendo que foi aplicada uma pressão de 160mmH₂O. Porém houve uma variação da pressão aplicada da ordem de 6,9% em relação ao valor inicial, causando uma variação na saída do sensor de pressão e o efeito apenas da variação da temperatura ambiente não ficou explícito, ou seja, a medição da saída do sensor de pressão, para este ensaio, apresentou o resultado que é a variação da pressão, somada à variação da temperatura que foi da ordem de 7,6%. Esta variação pode ser devido a vários fatores, mas o mais provável, é a expansão do ar confinado dentro da parte do tubo de cobre que estava localizado dentro da câmara de esterilização. O fato é que o valor da pressão ter diminuído e depois ter aumentado enquanto a temperatura estava sempre crescente, como mostra a Tabela 4.2, pode ser atribuído ao fluxo de ar provocado pelo sistema de homogeneização. De acordo com os dados do fabricante, o tempo de acomodação do sensor de pressão é muito menor do que o de temperatura, concluindo-se que o sensor de pressão responde mais rápido que o sensor de temperatura. Então, supõe-se que o tempo esperado para estabilização da temperatura do ar dentro da câmara não foi suficiente para equalizar a temperatura sentida pelo sensor de temperatura e a temperatura sentida pelo tubo conectado ao sensor de pressão.

Tabela 4.2: Influência da temperatura ambiente, ensaio 1

det	temp °C	$\frac{Y_s}{V_{cc}}$ = saída/entrada μV/V				média	pressão mmH ₂ O	tempo min
1	26,3	645,56	645,50	645,16	645,41	160	10	
2	27,1	630,03	630,00	630,00	630,01	157	13	
3	27,7	634,99	636,00	636,60	635,86	156	14	
4	39,6	606,73	606,80	607,00	606,84	160	11	
5	45,5	613,34	613,02	612,45	612,94	165	10	
6	39,4	644,42	644,59	645,99	645,00	167	45	
7	39,0	652,81	653,59	653,30	653,23	167	26	
8	38,2	639,34	639,99	640,07	639,80	165	25	
9	37,2	641,84	641,85	641,57	641,75	166	27	
10	36,8	656,59	656,41	656,45	656,48	166	30	
11	36,1	626,36	626,72	626,91	626,66	163	30	

Sendo que:

det = deturiação seqüencial de cada conjunto de leituras desta série,
temp = temperatura dentro da câmara de esterilização,
saída/entra = relação entre a saída e a alimentação do sensor,
média = a média das leituras de saída/entrada,
tempo = intervalo de tempo esperado para a estabilização da leitura,
tensão de alimentação do sensor = 4,892V,
comprimento do tubo de cobre dentro da câmara = 130mm.

Para solucionar este problema, atuou-se no parafuso do aplicador de pressão, de modo que esta variação de pressão fosse compensada, este ajuste fino de compensação foi realizado manualmente.

Os resultados com a compensação desta variação de pressão são apresentados na Tabela 4.3 e complementados pela Figura 4.4.

A equação da reta conseguida através da aplicação de uma regressão linear para as variáveis T_{amb} e Y_{s_mV} é mostrada na equação 4.1,

$$Y_{s_{amb}} = (\alpha \pm \sigma_\alpha) \cdot T_{amb} + (\beta \pm \sigma_\beta), \quad (4.1)$$

sendo que Y_{s_{amb}} é o valor estimado da razão saída/entrada, α = -7,1993 é a inclinação da reta, β = 680,3668 é a interseção da reta com o eixo das ordenadas, σ_α = 3,64 é o desvio padrão de α, σ_β = 12,14 é o desvio padrão de β da reta obtida pela regressão linear e T_{amb} é o valor da temperatura ambiente aplicada ao sensor.

Tabela 4.3: Influência da temperatura ambiente, ensaio 2

det	T_{amb}	$Y_{s_{mV}}$	V_{cc}	$\frac{Y_s}{V_{cc}} = \text{saída/entrada}$ $\mu V/V$			P	tempo
	oC	mV	V	medido	estimado	erro%		
1	27,2	2,447	5,067	481,20	484,55	01,78	132	15
2	27,8	2,450	5,064	485,68	480,23	00,88	132	15
3	30,6	2,306	5,055	455,09	460,07	07,12	132	15
4	33,2	2,229	5,051	444,34	441,35	09,32	132	15
5	37,9	2,051	5,049	405,90	407,52	17,16	132	15
6	35,9	2,133	5,049	423,40	421,92	13,59	132	15

Sendo que:

det = determinação seqüencial de cada conjunto de leituras da série,

T_{amb} = temperatura dentro da câmara de esterilização,

$Y_{s_{mV}}$ = saída do sensor em mV,

V_{cc} = alimentação do sensor,

Y_s = relação entre a saída e a alimentação do sensor,

erro = valor absoluto do erro entre o valor medido e o estimado dado em %,

P = pressão aplicada ao sensor,

tempo = intervalo de tempo esperado para a estabilização da leitura,

comprimento do tubo de cobre dentro da câmara = 130mm.

$$Y_{s_{amb}} = (-7,1993 \pm 3,64) \cdot T_{amb} + (680,3668b \pm 12,14), \quad (4.2)$$

Como pode ser visto na Tabela 4.3 o maior valor de erro em módulo encontrado para este ensaio é da ordem de 17%, numa faixa de temperatura em que o sensor pode ser usado. Isto significa que, se este sensor for usado em um instrumento de uso geral ou usado como padrão de transferência, nesta faixa de temperatura, os efeitos da variação da temperatura ambiente deverão ser compensados. Este erro foi calculado tomado como referência o valor da relação saída/entrada = $490\mu V/V$ para a temperatura ambiente igual a $22^\circ C$, porém se for utilizado como um instrumento de uso geral e em um ambiente cuja temperatura ambiente não ultrapasse a faixa de $\pm 5^\circ C$, o desvio apresentado para esta situação é da ordem de 0,9% em relação ao fundo de escala, não havendo necessidade de compensação da variação da temperatura ambiente.

É importante lembrar que independente de como o sensor será usado, a temperatura ambiente representa uma entrada espúria e produz erros em Y_s . Estes erros podem ser tolerados em alguns processos de medição e considerados muito elevados em outras aplicações. Como pode ser visto nos resultados, a tempe-

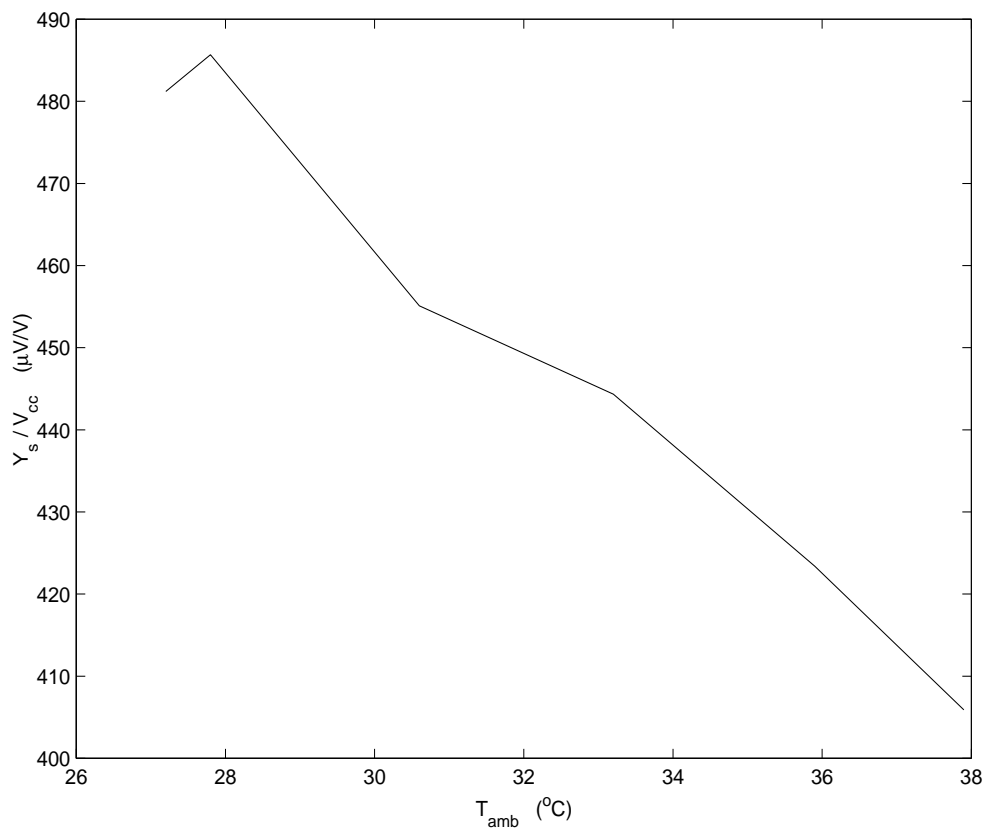


Figura 4.4: Efeito da temperatura ambiente no sensor de pressão com $P = 132\text{mmH}_2\text{O}$, ENS_SEN.

ratura ambiente altera completamente o comportamento do sensor de pressão e pode ser associada a uma entrada modificante. A necessidade de aplicar algum método de correção para eliminar os efeitos desta entrada modificante é muito clara, principalmente pelo fato de que a principal utilização deste sensor será na calibração de instrumentos de uso geral. Ou seja, espera-se compensar os efeitos desta entrada espúria, bem como os da temperatura do gás manométrico.

Para todos os ensaios de avaliação da temperatura ambiente o sinal de saída do sensor de pressão, Y_s , foi dado como sendo a relação *saída/entrada*, sendo que a entrada é a tensão de excitação da ponte do sensor e a saída é a diferença de potencial provocada pelo desequilíbrio da ponte. Este procedimento foi adotado visando diminuir os efeitos da variação da fonte de alimentação, mesmo sabendo que a variação foi menor do que 20mV.

Após mostrar as influências da fonte de alimentação e da temperatura ambiente à saída do sensor de pressão, Y_s , será atribuído apenas o valor da diferença de potencial provocada pelo desequilíbrio da ponte.

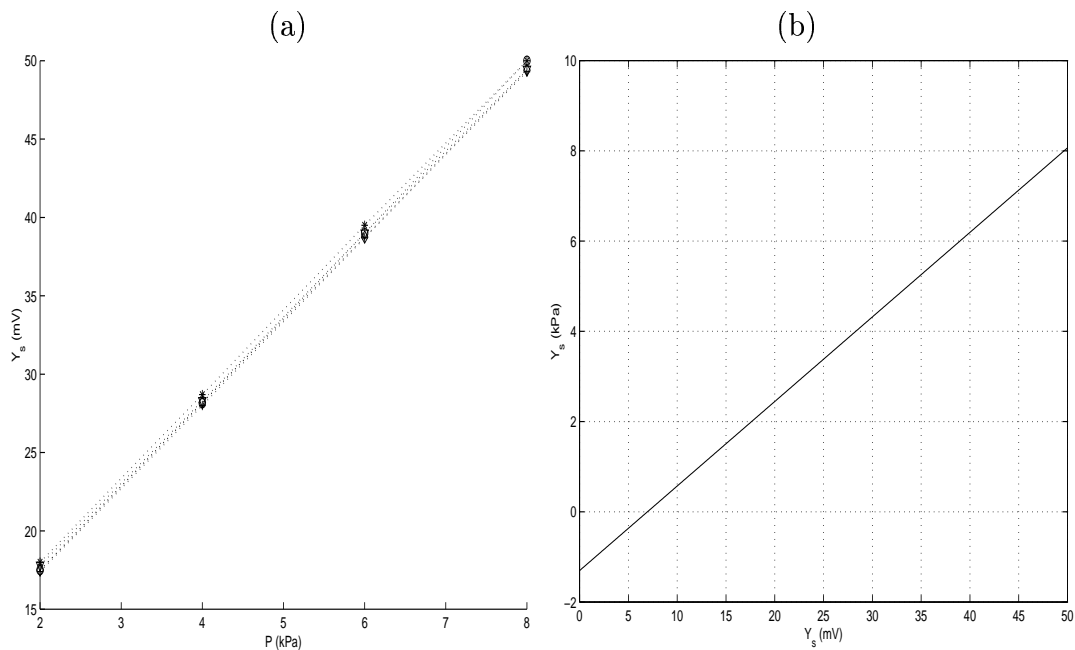


Figura 4.5: Calibração do sensor de pressão contra o DPG, CALIBRA: (a) dados coletados e (b) resultado da comparação do valor estimado Y_s pela equação 4.3.

4.2 Calibração estática do sensor de pressão

Depois de realizados os ensaios no sensor de pressão isoladamente, este foi soldado na câmara de pressão. Esta nova montagem pode tornar o comportamento do sistema de medição diferente do sensor isolado. Devido a este fato, outras calibrações foram realizadas. Neste caso em relação a um a um padrão digital de pressão denominado DPG capaz de fazer medição de pressão com resolução da ordem de 0,01Pa.

A calibração definitiva do sensor de pressão foi realizada fazendo a aquisição dos valores da saída do sensor de pressão e do padrão de pressão DPG, seguidos os procedimentos descritos na seção 3.2. As descrições técnicas do DPG são encontradas no Anexo B. Os resultados referentes à calibração do sensor são apresentado na Figura 4.5.

A Figura 4.5(a) mostra as calibrações realizadas em vários dias diferentes, aproximadamente 10 dias. Isto quer dizer que, antes de ser iniciado cada ensaio, foi realizada uma calibração estática do sensor de pressão à temperatura ambiente, com isto pode-se verificar a não variação com o tempo. E até mesmo avaliar

a reprodutibilidade dos resultados da calibração.

A calibração consistiu basicamente da aplicação de um sinal de pressão constante conseguida através do controlador PPC1 conectado ao medidor DPG. As descrições técnicas do PPC1 são encontradas no Anexo B. As variações da temperatura ambiente e do gás manométrico foram consideradas desprezíveis. Durante o ensaio, a temperatura ambiente foi monitorada.

Destes resultados pode-se ver que o sensor de pressão responde linearmente em relação a cada valor de pressão aplicada em suas entradas e a relação encontrada é dada por

$$Y_{s_{\text{kPa}}} = 187,3663 \cdot Y_{s_{\text{mV}}} - 1,3016, \quad (4.3)$$

sendo que na equação 4.3, $Y_{s_{\text{kPa}}}$ é dado em kPa e $Y_{s_{\text{mV}}}$ é dado em mV. Esta equação é uma regressão linear entre os valores coletados da saída do sensor de pressão e da pressão no DPG, representada na Figura 4.5(b).

4.3 Efeito da variação da tensão de alimentação

A influência da fonte de alimentação que é apresentada na Figura 4.2(b), na saída do sensor pode ser avaliada com os procedimentos descritos na seção 3.5, neste caso a temperatura da câmara foi mantida constante e igual a 22,8°C, a pressão de 160mmH₂O aplicada ao sensor também foi mantida constante.

Os resultados são mostrados na Tabela 4.4 e complementados pela Figura 4.6. É importante medir a componente alternada do sinal presente na saída da fonte de alimentação, para que se tenha uma idéia de quão a fonte de alimentação é estável. É recomendado que se faça esta medição utilizando-se um osciloscópio.

A avaliação dos desvios provocados pela variação da tensão da fonte de alimentação pode ser feita tomando-se os valores dos erros percentuais devido a variação da tensão de alimentação do sensor de pressão. Encontrada uma equação polinomial que descreva a relação entre o erro e a tensão de alimentação, mostrada na equação 4.4, pode-se avaliar qual é o erro provocado por uma variação de 0,05V na tensão de alimentação, V_{cc} .

$$\hat{e}_{al} = -1.7922 \cdot V_{cc}^2 + 9.9180 \cdot V_{cc} - 5.1039, \quad (4.4)$$

sendo que \hat{e}_{al} é o desvio estimado do erro calculado em relação a tensão de alimentação de 4,968V. Deste resultado, pode-se ver que para valores próximos à tensão nominal de alimentação de (5,0±0,05)V, o erro apresentado na saída do sensor é da ordem de ±0,5%. Isto significa que este sensor sofre uma grande

Tabela 4.4: Influência da fonte de alimentação

det	alimentação V_{cc}	$\frac{Y_s}{V_{cc}} = \text{saída/entrada}$ $\mu\text{V}/\text{V}$	e_{al} %	temperatura $^{\circ}\text{C}$	tempo seg
1	4,968	-688,80	0	22,8	6
2	4,898	-690,26	0,21	22,8	6
3	4,702	-703,45	2,21	22,8	6
4	4,491	-714,43	3,72	22,8	6
5	4,255	-716,00	3,95	22,8	6
6	4,076	-724,70	5,21	22,8	6
7	3,899	-734,55	6,64	22,8	6
8	3,671	-739,80	7,40	22,8	6
9	3,497	-741,91	7,71	22,8	6
10	3,248	-745,05	8,17	22,8	6
11	2,998	-747,00	8,45	22,8	6

Sendo que:

det = determinação seqüencial de cada conjunto de leituras desta série,
 alimentação = tensão de alimentação do sensor,
 saída/entrada = relação entre a saída e a alimentação do sensor,
 e_{al} = erro calculado em relação a $V_{cc} = 4,968\text{V}$,
 temperatura = temperatura dentro da câmara de esterilização,
 tempo = intervalo de tempo esperado após a estabilização da leitura.

influência da fonte de alimentação principalmente se a fonte de alimentação for em tensão, logo é recomendado que se use uma fonte de alimentação estável (com regulação da ordem de 10mV) e que tenha capacidade de fornecer corrente superior a 2,0mA. Caso seja usada fonte de corrente para a alimentação, deve-se fazer o mesmo procedimento para avaliação do efeito sobre a saída do sensor de pressão. A fonte de alimentação utilizada é uma fonte de tensão de 4.968V e com *ripple* inferior a 10mV, o que implica em uma incerteza menor do que $\pm 0,06\%$ devido a fonte de alimentação.

4.4 Identificação dos parâmetros do RTD868

Antes de acoplar o medidor de temperatura RTD868 na câmara de pressão. Foram realizados alguns ensaios no sensor isoladamente, como por exemplo calibração e aplicação de degraus de temperatura.

Para conhecer o valor das temperaturas ambiente e do gás manométrico, foram realizadas as calibrações estáticas destes sensores de temperatura cujos procedi-

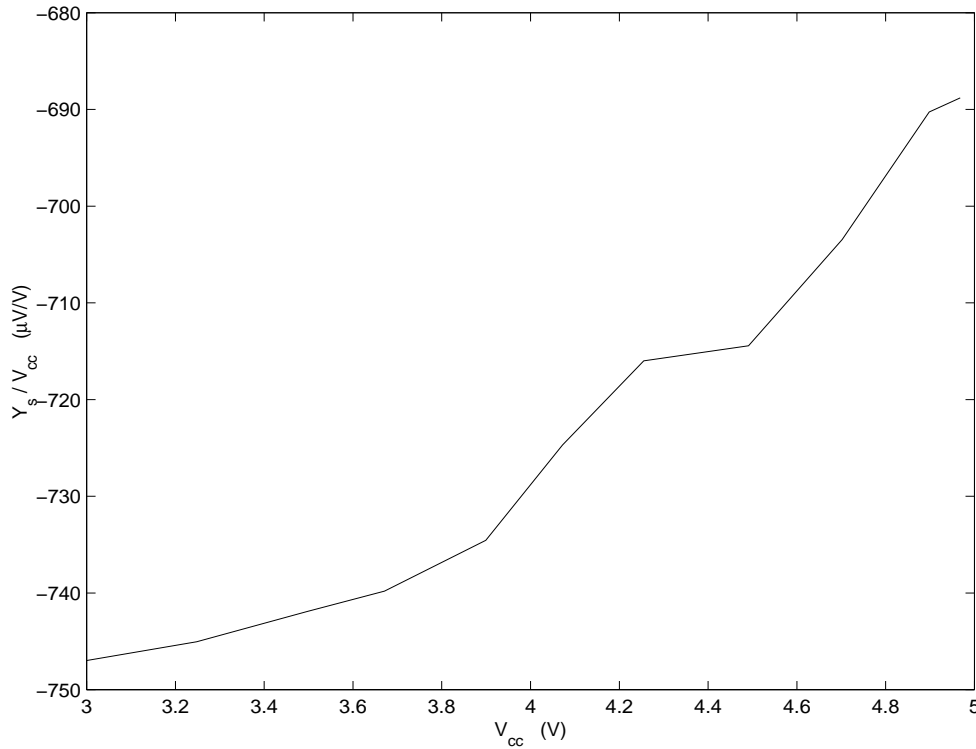


Figura 4.6: Efeito da fonte de alimentação V_{cc} na saída do sensor, ENS_SEN.

mentos são apresentados na seção 3.3. Ambos os sensores são RTD - PT100, cujo sinal de saída é a variação da resistência devido à variação da temperatura. A principal característica deste tipo de sensor é que a 0°C (zero graus centígrados) a sua resistência é de 100Ω . A equação que representa a calibração do sensor usado para medição da temperatura ambiente é mostrada na equação 4.5 e é a relação entre o sinal de saída do RTD e o termômetro padrão. Já a equação que representa a calibração estática do sensor de temperatura usado para medir a temperatura do gás manométrico, é mostrada na equação 4.6. Esta equação refere-se à calibração do RTD868 usado para medir a temperatura do gás manométrico.

$$T_{\text{amb}} = 2,41 \cdot \text{RTD}_{\text{amb}} - 241,61 \quad (4.5)$$

$$T_g = 2,5632 \cdot \text{RTD}_g - 257,4161 \quad (4.6)$$

sendo T_{amb} em $^{\circ}\text{C}$, RTD_{amb} é a saída do sensor de temperatura ambiente em Ω (ohms), T_g em $^{\circ}\text{C}$ e RTD_g é a saída do sensor de temperatura do gás manométrico em Ω (ohms).

Uma grande dificuldade esperada é conhecer a temperatura do gás manométrico tão rápido quanto a medição da pressão aplicada. Fazendo uma análise

física do sistema pode-se ver que não é possível medir a variação da temperatura do gás manométrico antes de medir a variação da pressão sentida pelo sensor. Isto se deve ao fato de que uma variação na temperatura do gás manométrico provocar uma expansão do gás, acontecendo antes do calor chegar ao sensor de temperatura. Então o valor de T_e deverá ser estimado. Para estimar função de T_e é necessário conhecer a função de transferência de $G(s)$ que representa o RTD868. Com a função $G(s)$ e o valor medido de T_g é possível estimar o valor de T_e . O objetivo deste ensaio é encontrar a função de $G(s)$.

O comportamento dinâmico do RTD também será importante para conhecer a velocidade de variação da temperatura e um sinal utilizado na identificação de sistemas é a **resposta ao degrau unitário**, apresentado no Anexo D. Considerando que o RTD comporta-se como um sistema de primeira ordem, a relação entrada-saída é dada como exemplo mostrado na equação 4.7,

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s + 1}, \quad (4.7)$$

considerando que as condições iniciais são nulas.

Note que todos os sistemas com a mesma função de transferência irão exibir a mesma saída em resposta à mesma entrada. Sabendo que a transformada de Laplace da função degrau unitário é $\frac{1}{s}$, substituindo $X(s) = \frac{1}{s}$ na equação 4.7, obtém-se

$$Y(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{s}, \quad (4.8)$$

reescrevendo em frações parciais, tem-se

$$Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1}, \quad (4.9)$$

fazendo a transformada inversa de Laplace da equação 4.9, obtém-se

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} (t \geq 0). \quad (4.10)$$

A equação 4.10 mostra que, inicialmente, a saída $y(t)$ é nula e finalmente se torna unitária. Uma das características importantes desta curva de resposta exponencial $y(t)$ é que em $t = \tau$ o valor de $y(t)$ é 0,632, ou a resposta $y(t)$ alcançou 63,2% de sua variação total (Ogata, 1990). O objetivo de se aplicar um degrau de temperatura no RTD868 é conhecer a constante de tempo τ para este sensor.

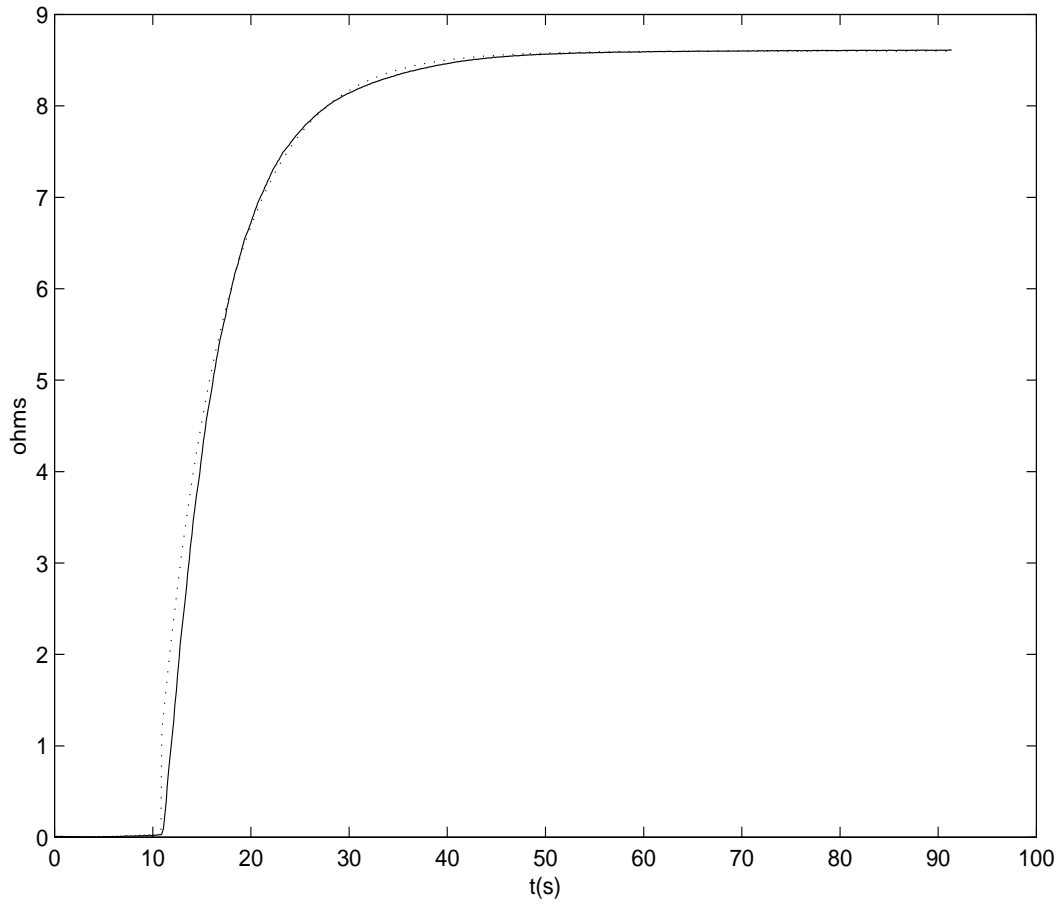


Figura 4.7: Resultado da aplicação de uma entrada em degrau positivo de temperatura no sensor de temperatura RTD868, DEGRAU2, o zero corresponde a 100Ω : (—) sinal medido do RTD e (···) sinal estimado do RTD.

4.4.1 Resposta do RTD868 ao degrau de temperatura

Sabendo-se que G , sensor de temperatura, pode ser representado por um sistema de primeira ordem, então os parâmetros de G podem ser estimados aplicando-se neste sensor um degrau de temperatura. Os procedimentos para os ensaios são descritos na seção 3.3. Neste caso a temperatura ambiente é de 23°C e da mistura de água e gelo fundente a $0,7^\circ\text{C}$. Os resultados referentes à aquisição dos dados destes ensaios são apresentados nas Figuras 4.7.

Como pode ser observado nas Figuras 4.7 e 4.8, realmente o sensor de temperatura pode ser bem representado por uma função de primeira ordem mostrada na equação 4.11 e que será utilizada no próximo capítulo,

$$G(s) = \frac{k_G}{\tau_G s + 1}, \quad (4.11)$$

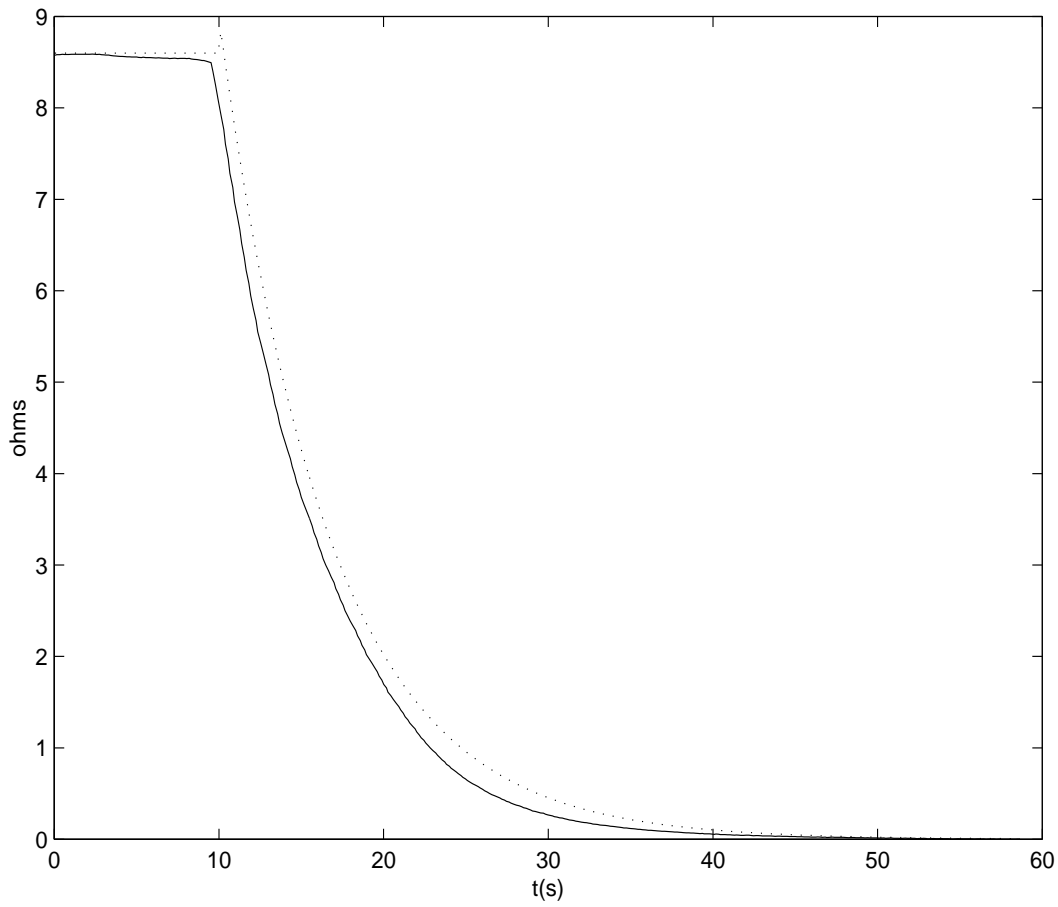


Figura 4.8: Resultado da aplicação de uma entrada em degrau negativo de temperatura no sensor de temperatura RTD868, DEGRAU1, o zero corresponde a 100Ω : (—) sinal medido do RTD e (···) sinal estimado do RTD.

sendo $k_G=0,3728$ e $\tau_G = 6s$.

4.4.2 Validação do modelo do RTD868

A validação deste modelo consiste na execução de um novo ensaio para comparar a saída do RTD868 com a resposta do modelo encontrado. Para este caso foi aplicado um degrau negativo cujos procedimentos são descritos na seção 3.4 e foram coletados os dados. A Figura 4.8 mostra a resposta ao degrau aplicado ao RTD juntamente com a resposta da simulação ao modelo mostrado na equação 4.11. O erro encontrado é calculado pela diferença entre o modelo e a saída do RTD868, foi menor do que 5%, isto significa que o modelo é aceitável e representa o RTD868.

Pode-se ver que a constante de tempo referente à resposta do transdutor de temperatura RTD868 é da ordem de 6s (seis segundos), como mostrado na equação 4.11, e o da planta é da ordem de 240s (duzentos e quarenta segundos) como será visto no próximo capítulo e apresentado na Figura 5.2; mas para a planta a constante de tempo depende da faixa de temperatura em que será aplicado o degrau. Comparando-se as duas constantes de tempo, vê-se que $\tau_{\text{sistema}} \gg \tau_G$, o que significa que a resposta da montagem à temperatura é mais lenta do que a resposta do transdutor de temperatura, então este pode ser usado para fazer a aquisição de dados de temperatura deste sistema, não provocando falseamento na forma do sinal das medições de temperatura da câmara de pressão.

É importante lembrar que estes degraus foram aplicados no RTD868 antes deste ser montado na câmara de pressão. Logo, é conhecida a sua função de transferência independente do sistema e com esta função é possível estimar a temperatura do sistema baseando-se nos dados de saída, como será mostrado no próximo capítulo.

4.5 Descrição do sistema de aquisição de dados

Depois de apresentar os componentes e sensores que são partes do sistema, é necessário que se tenha um meio de armazenar todas as informações das coletas dos sinais de cada sensor. Para armazenar os dados coletados durante os ensaios, é utilizado um microcomputador acoplado a um equipamento denominado VXI. A descrição do sistema VMEbus eXtensions for Instrumentation é apresentada no Anexo B.

O VXI utilizado na aquisição dos dados é composto de uma placa mãe, fontes de alimentação, placas de interfaces serial e GPIB, um multímetro HPE1328, uma placa multiplexadora HPE1345, uma placa multiplexadora HPE1355, uma placa de relés HPE1364, uma placa de entrada/saída digital HPE1326 e um circuito pré-programado com o IBASIC internos em um gabinete de (50 × 20 × 50)cm. Na parte frontal estão localizados um teclado e um indicador para programação e seleção de parâmetros das placas internas. Na parte traseira encontram-se os *slots* para encaixe dos terminais de placa e conexão de cabos. A seleção entre o modo de operação local ou remoto é conseguido por meio de uma chave localizada na parte traseira do módulo VXI. Os endereços e sub-endereços eletrônicos usados no equipamento VXI são os definidos nos manuais. Para a placa de relés HPE1364 foi desenvolvido um programa para a comunicação com o computador denominado *driver* que é mostrado em detalhes no Anexo C.

Capítulo 5

Avaliação da necessidade da compensação estática e dinâmica

No capítulo anterior, foi mostrado o efeito da variação da temperatura ambiente, e que é uma entrada espúria, devido ao fato da saída do sensor variar quando apenas a temperatura ambiente é alterada. Algumas questões levantadas devem ser respondidas, como por exemplo: será que a temperatura do gás é alterada significativamente quando a temperatura ambiente varia? Será que é por isto que há alteração na saída do sensor de pressão? Ou será que a saída do sensor de pressão é alterada quando há mudança na temperatura do gás? Que relação pode ser encontrada entre a variação da temperatura do gás e a saída do sensor? Para responder a estas questões será necessário realizar alguns ensaios, e para realizar estes ensaios aplicando-se a variação da temperatura do gás manométrico é necessária uma montagem na qual possa ser variada apenas a temperatura do gás T_g , enquanto a pressão é mantida constante. Este capítulo apresenta a descrição desta montagem, os resultados e a análise dos dados obtidos a partir da aplicação de sinais conhecidos na entrada do sistema, bem como os resultados da aquisição dos dados de entrada e saída do sistema, quando este for excitado com o degrau unitário (Ogata, 1990) e sinais aleatórios (Aguirre, 2000). É discutida também a análise da resposta aos sinais de entrada para verificar a influência da temperatura do gás nas respostas estática e dinâmica do sensor de pressão. Finalmente, são apresentadas as compensações necessárias para este sensor.

O sistema estudado pode ser representado de várias formas, por exemplo, o diagrama de blocos, mostrado na Figura 5.1 e já apresentado no capítulo 3.

Neste diagrama, H é a representação da câmara de pressão, T_e é a temperatura do gás manométrico, G é o sensor de temperatura RTD868, S é o sensor de pressão, Y_s é a saída do sensor de pressão, P é a pressão dentro da câmara de pressão e DPG é o medidor digital de pressão.

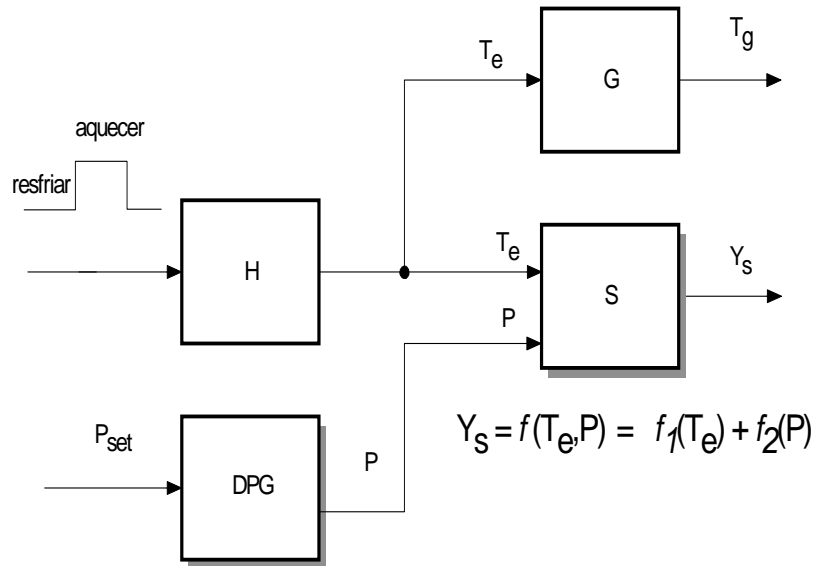


Figura 5.1: Diagrama de blocos do sistema estudado.

Inicialmente será mostrado qual é o tipo de transformação termodinâmica que ocorre com o gás dentro da câmara de pressão e, em seguida o estudo dos efeitos da parte dinâmica da temperatura deste gás no sensor de pressão.

5.1 Aplicação de um sinal de variação lenta de T_g

A análise termodinâmica é baseada nos resultados da aplicação de aquecimento ou resfriamento de gás dentro da câmara, ou seja, a aplicação de degrau de temperatura na entrada do bloco H que representa a câmara de pressão. No que diz respeito ao controle de outras variáveis espúrias, apenas a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar foram controladas e a influência eletromagnética e ruídos de vibração foram considerados desprezíveis. A pressão do gás dentro do sistema foi medida pelo DPG; já a saída do sensor de pressão Y_s , e a temperatura do gás T_g , foram monitoradas pelo VXI. Este ensaio consiste basicamente da aplicação de variação de calor dentro da câmara de pressão H, e nas medições de T_g , de P e de Y_s .

A aplicação de um sinal de variação lenta de T_g permite considerar a saída do

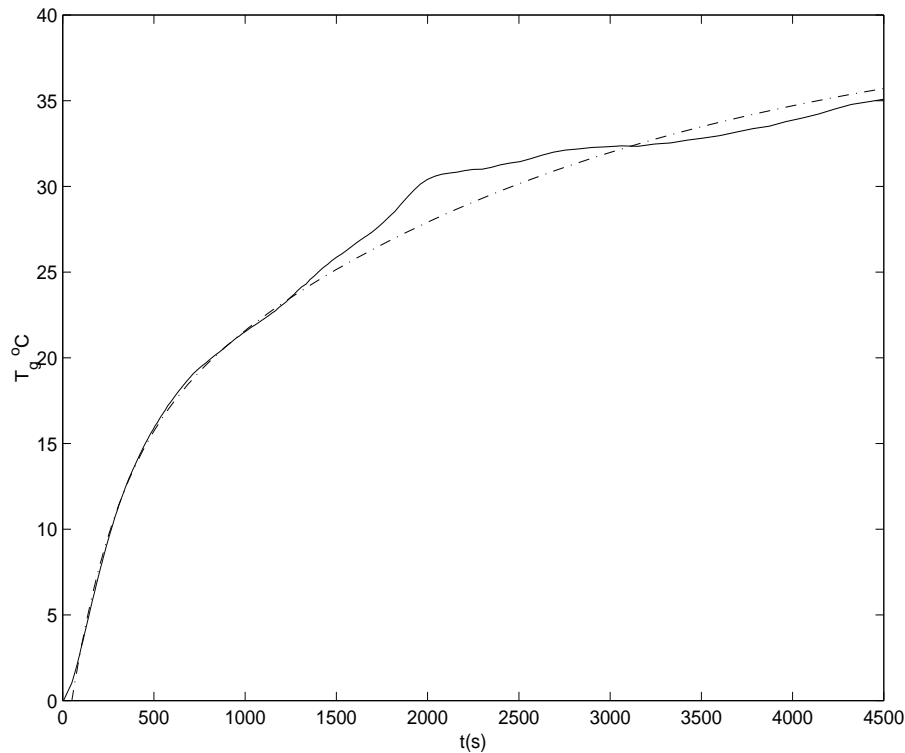


Figura 5.2: Resultados da resposta ao degrau de temperatura aplicado na câmara de pressão, H, DEGRAU_H: (-) sinal medido de T_g e (- · -) resultado da simulação da equação

sensor de temperatura RTD868, como sendo a própria grandeza temperatura do gás dentro da câmara. Mas o que é uma variação lenta ou rápida de temperatura T_e na saída de H? Para isto é necessário conhecer o bloco H. Não é fácil aplicar qualquer entrada no bloco H, porque é um sistema térmico e o seu comportamento depende do tipo e da quantidade de gás contida em seu interior. Supondo-se que o seu comportamento é semelhante ao de um sistema de primeira ordem, então um sinal em degrau foi aplicado na entrada estimar os parâmetros do bloco H.

Depois de realizada a coleta dos dados da aplicação de um degrau de aquecimento e utilizando o *Simulink* do *Matlab*, fez-se uma análise gráfica dos dados. Por inspeção visual do sinal de temperatura T_g em função do tempo, viu-se que era exponencial; então a análise foi iniciada supondo ser um sistema de primeira ordem, mas o menor erro encontrado por simulação foi considerável, maior do 10%; logo este modelo não era satisfatório. Então partiu-se para um sistema de segunda ordem, ajustando-se os parâmetros desta função de tal modo que a faixa do erro fosse aceitável, menor do que 5%. A resposta ao degrau de aquecimento e a simulação do modelo encontrado são mostrados na Figura 5.2. Esta figura apresenta um sistema com duas constantes de tempo e que pode ser representado pela equação 5.1,

$$\begin{aligned}
H(s) &= \frac{K_{1H}}{\tau_{1H}s + 1} + \frac{K_{2H}}{\tau_{2H}s + 1}, \\
&= \frac{0,58}{240s + 1} + \frac{1,17}{2500s + 1}, \\
&= \frac{1730,8s + 1,75}{600000s^2 + 2740s + 1},
\end{aligned} \tag{5.1}$$

sendo que neste modelo observam-se duas constantes de tempo $\tau_{1H} = 240s$ e $\tau_{2H} = 2500s$.

Neste primeiro ensaio, a variação de calor aplicada deve ser bem lenta para que o gás dentro da câmara de pressão possa estar em equilíbrio termodinâmico com o sensor de temperatura. Desta maneira, a temperatura medida de T_g pode ser considerada a própria temperatura do gás T_e , a menos de uma constante dada pela calibração estática do capítulo 4.

Estes ensaios possibilitam também avaliar o comportamento do sensor de pressão em relação à variação de T_g , relacionar P com T_g e permitem verificar se a variação de Y_s é qualitativamente diferente da variação de P .

A Figura 5.3 apresenta os resultados de T_g e T_{amb} para o ensaio no qual foi aplicado um sinal de aquecimento. A temperatura ambiente pode ser considerada constante se comparada à variação de T_g . A medição de P e Y_s é apresentada na Figura 5.4. A diferença entre a pressão P e a saída do sensor Y_s pode ser definida como sendo o erro que pode ser calculado pela equação 5.4 e é da ordem de $\pm 2\%$. Como o sensor de pressão está a 5cm da fonte de calor e o DPG está a 3m de distância, pode-se considerar que o DPG não sofre a influência da variação da temperatura T_g , apenas mede a variação de pressão que é devida à expansão do gás, que sofre uma transformação termodinâmica.

Sabendo-se que o sensor de pressão encontra-se perto da fonte de calor, sofrendo influência da temperatura de T_g , e, que o DPG encontra-se longe da fonte de calor, não sofrendo esta influência, então, pode-se afirmar que a leitura no DPG é a pressão P dentro da câmara de pressão, e o erro é devido apenas ao efeito de T_g sobre o sensor de pressão S . A função de saída do sensor de pressão Y_s , pode ser escrita como,

$$Y_s(T_e, P) = f(T_e, P) = f_1(T_e) + f_2(P), \tag{5.2}$$

sendo $f_2(P)$ a função encontrada pela curva de calibração à temperatura ambiente, dada como,

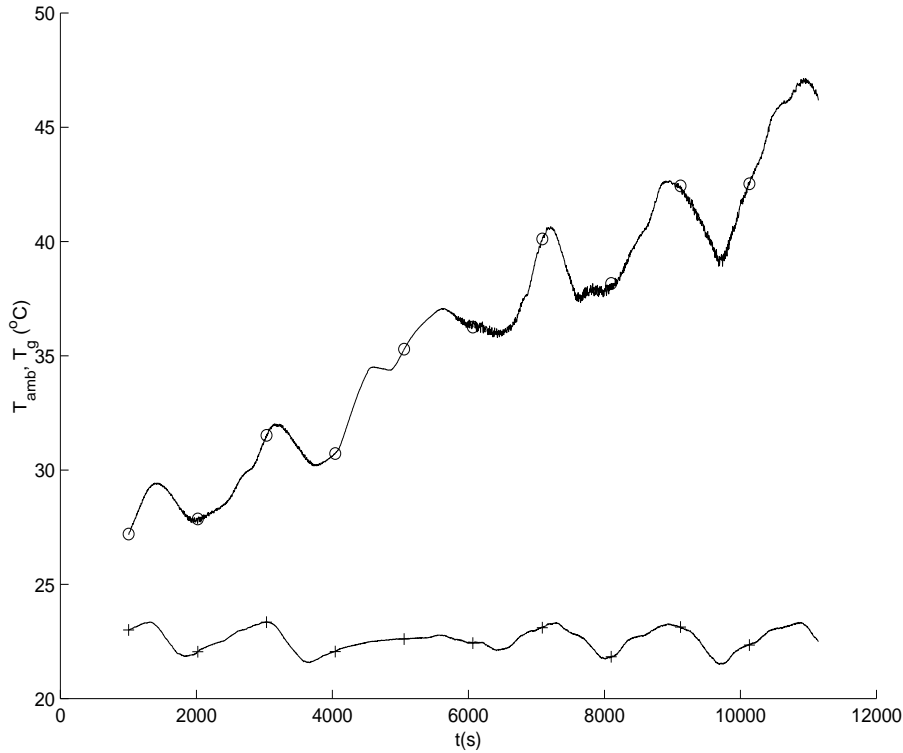


Figura 5.3: Resultados de T_g e T_{amb} para variações lentas de aquecimento, EN1007: (+) T_{amb} é a temperatura ambiente e (o) T_g é a temperatura do gás manométrico.

$$f_2(P) = P(Y_{s_{mV}}) = 186,3663 \cdot Y_{s_{mV}} - 1,3016, \quad (5.3)$$

sendo que $Y_{s_{mV}}$ é a saída do sensor de pressão em mV, $P(Y_{s_{mV}})$ é a saída do sensor em kPa. A função erro $e(T_e, P)$ pode ser definida como,

$$e(T_e, P) = Y_s(T_e, P) - f_2(P), \quad (5.4)$$

ou seja, a função erro é a saída do sensor de pressão menos a pressão indicada no DPG. Esta função representa a componente do sinal Y_s que diverge da curva de calibração encontrada à temperatura ambiente. Então o erro é

$$e(T_e, P) = f_1(T_e), \quad (5.5)$$

que é devido apenas à variação da temperatura T_g sobre o sensor de pressão S.

O maior erro que é encontrado aplicando-se a equação 5.4 e apresentado na Figura 5.4(b) é da ordem de 2%.

A transformação termodinâmica do gás ocorrida dentro da câmara de pressão pode ser analisada tomando-se os valores da pressão P e da temperatura T_e . Para

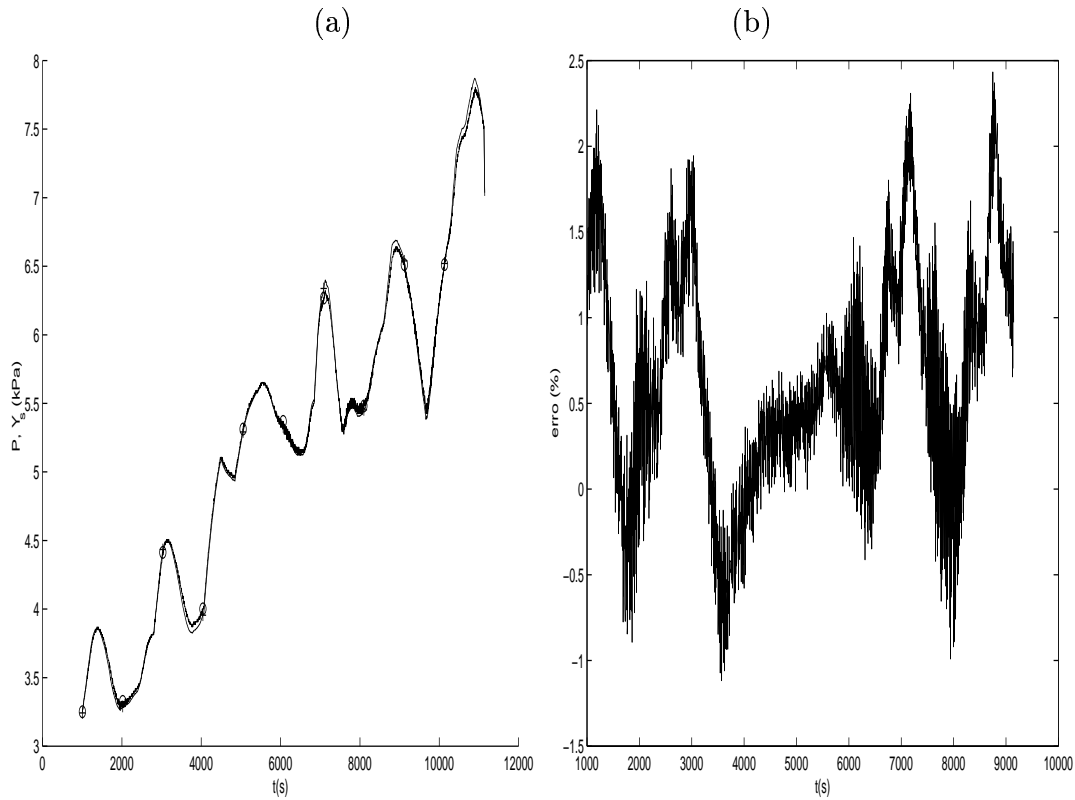


Figura 5.4: Resultado da resposta ao sinal lento de temperatura, EN1007: (a) P e \hat{Y}_s , (+) P - pressão na câmara de pressão e (o) \hat{Y}_s - valor estimado da saída do sensor de pressão, pela curva de calibração; (b) Diferença em % entre P e \hat{Y}_s calculada segundo a equação 5.4.

este caso, em que a temperatura do gás varia lentamente, a temperatura T_g pode ser considerada T_e .

Sabendo-se que há conservação da massa do gás dentro da câmara de pressão, pode-se fazer uma análise da transformação sofrida pelo gás manométrico levando-se em conta a variação dos estados. A variação dos estados como temperatura, pressão, entalpia e entropia indicam que a mais provável é a transformação politrópica. A função desta transformação é mostrada na equação 5.6,

$$\hat{P} = k_e(T_e)^n, \quad (5.6)$$

sendo \hat{P} a pressão estimada dentro da câmara, T_e é a temperatura do gás manométrico em Kelvin, $n=2$, $k_e = 0,00037$ é constante encontrada empiricamente em $\frac{\text{kPa}}{\text{K}^{-2}}$ e neste caso é considerada T_g . O resultado para esta transformação é mostrado na Figura 5.5.

Um sistema é politrópico quando a relação entre as variáveis de estado não

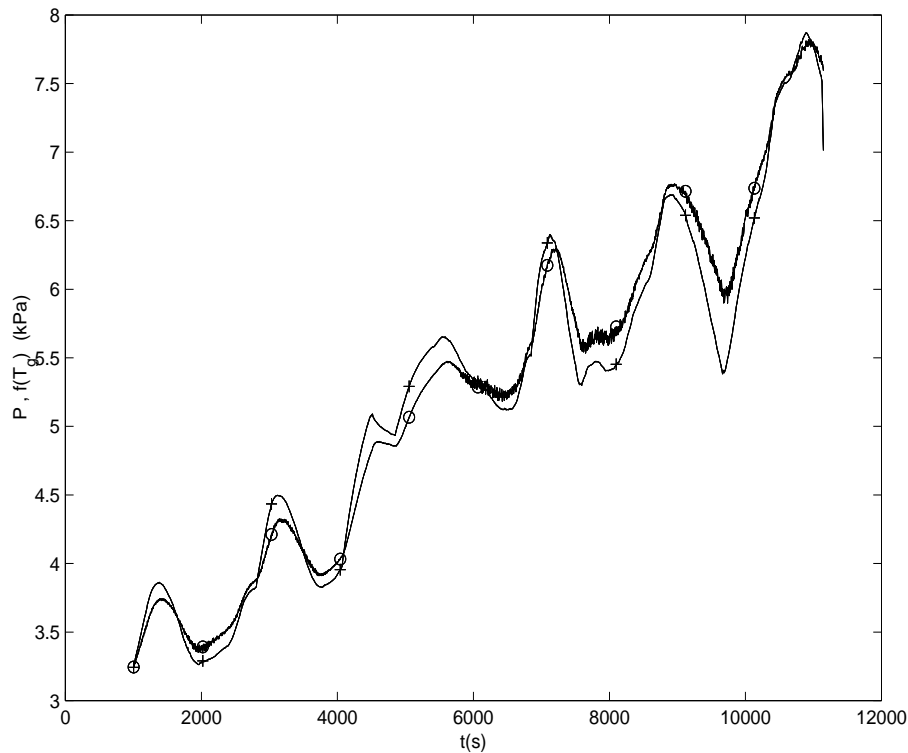


Figura 5.5: Resultado da transformação do gás manométrico dentro da câmara de pressão para a equação 5.6, EN1007.

pertencem a uma curva definida para gases ideais, ou seja, não é uma isoterma ou isobárica ou isovolumétrica. Então, pode-se considerar que a transformação sofrida pelo gás dentro da câmara de pressão é uma transformação politrópica. Pode-se considerar que há transformação termodinâmica no gás por vários motivos tais como: ser um circuito fechado, sem realimentação e sabendo que há algumas condições reais que devem ser consideradas, como por exemplo:

1 - A comunicação do DPG com a câmara é feita por meio de uma mangueira plástica de 6,35mm de diâmetro externo e 3,175mm de diâmetro interno e com 3m (três metros) de comprimento. O aquecimento ocorre na câmara onde se encontra o sensor de pressão, que está a 5cm (cinco centímetros) de distância da fonte de calor. Nota-se que, devido ao comprimento da linha de pressão que faz a conexão do DPG com a câmara de pressão, o DPG não é influenciado pela variação de temperatura do gás.

2 - Não é conhecida a temperatura do gás na entrada do DPG. Para ser conhecida, basta instalar um medidor de temperatura no fosso apropriado e fazer a aquisição da mesma, via VXI; porém, esta medição não foi realizada. Como a distância da fonte de calor é de 3m, não há circulação do gás e o DPG possui uma massa metálica muito superior a do sensor de pressão, a influência da temperatura do gás no DPG foi considerada desprezível.

3 - A temperatura é medida com seis algarismos, porém apenas 4 são significativos. Isto se deve ao fato de haver fontes de alimentação perto do sistema, como por exemplo, a do VXI, a do DPG e a fonte do sensor de pressão. Uma solução seria afastar o VXI, mas se a distância entre o VXI e a câmara fosse maior haveria comprometimento entre a resistência do cabo de medição do RTD868, o ruído nele introduzido por harmônicos e o efeito antena seria maior. Outra solução seria a instalação de filtros na saída do RTD868, porém a grandeza a ser medida não seria diretamente a variável com a temperatura e sim uma grandeza manipulada e então sujeita à influência de fontes externas ou fontes auxiliares, e neste caso poderia comprometer o sinal de temperatura.

4 - A pressão é medida com 7 algarismos, porém apenas 4 são estáveis para medições realizadas quando a temperatura do gás está variando, e depende da variação da temperatura ambiente, ou seja, é estável na 3^a casa decimal quando o sistema de unidade do DPG for kPa, a instabilidade aparece da ordem de Pa; porém o DPG foi fabricado para trabalhar com pressões da ordem de 0,01Pa (centésimos de Pa). Então é possível que a incerteza das calibrações, utilizando-se o DPG possa ser reduzida para ordem de décimos de Pa, o que implica em um ganho de 2 algarismos significativos em uma calibração. Estas seriam condições ótimas para o instrumento DPG, pois a incerteza das medições com o DPG reduziria significativamente.

Não deixando de observar estas restrições inerentes ou não ao sistema, pode-se fazer a avaliação de qual é a relação entre a pressão e a temperatura do gás no circuito fechado com o DPG trabalhando em malha aberta (sem realimentação). Esta relação é mostrada na equação 5.6, na qual considera-se T_e igual a T_g .

5.2 Descrição da montagem para aplicação de um sinal chaveado de temperatura

A aplicação de um sinal chaveado de temperatura permite avaliar os efeitos de T_g sobre S e tem como objetivo avaliar os efeitos de variações rápidas da temperatura T_g . A variação de calor aplicada deve ser mais rápida do que no ensaio anterior. Neste ensaio, aplica-se uma variação rápida para que o gás dentro da câmara de pressão não atinja o equilíbrio termodinâmico com o sensor de temperatura. Desta maneira, será que a temperatura medida de T_g pode ser considerada a temperatura do gás T_e ?

A identificação dos parâmetros do bloco G realizada no capítulo 4, apresentada na equação 4.11, será utilizada para estimar a temperatura T_e , visto que a medição do sinal de T_g é conhecido. Fazendo-se uma análise no domínio da

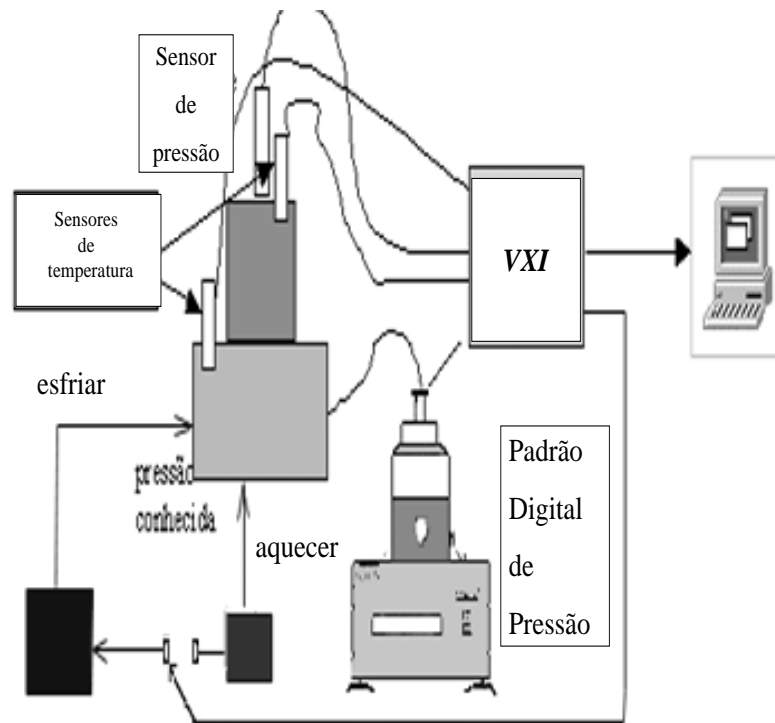


Figura 5.6: Esquema da montagem para aplicação de um sinal chaveado.

freqüência de $G(j\omega)$ e de $T_g(j\omega)$ é possível encontrar o módulo e a fase de $T_e(j\omega)$ que serão vistos na próxima seção.

Uma variação rápida do sinal de aquecimento ou resfriamento é conseguida energizando-se o banco de resistências ou a bomba de resfriamento, e isto quer dizer que são aplicados degraus na entrada de H , e que, depois de analisados vários tipos de sinais, concluiu-se que o mais adequado para estudar o comportamento do bloco H é o sinal binário. Os sinais binário pseudo-aleatórios podem ser usados no processo de identificação de sistemas e têm algumas vantagens no que diz respeito à aplicação de ferramentas matemáticas, proporcionando uma maior facilidade no processamento dos dados, principalmente para grandes volumes de dados, e apresenta uma maior robustez ao ruído. A discussão destes sinais pode ser encontrada no Anexo D: Teoria básica dos sinais binários no processo de identificação.

Para conseguir uma variação da temperatura do gás foi preciso colocar a entrada do sensor de pressão em uma pequena câmara, mostrada na Figura 3.1. Nesta câmara foram colocadas duas resistências elétricas de 30W cada uma, utilizadas

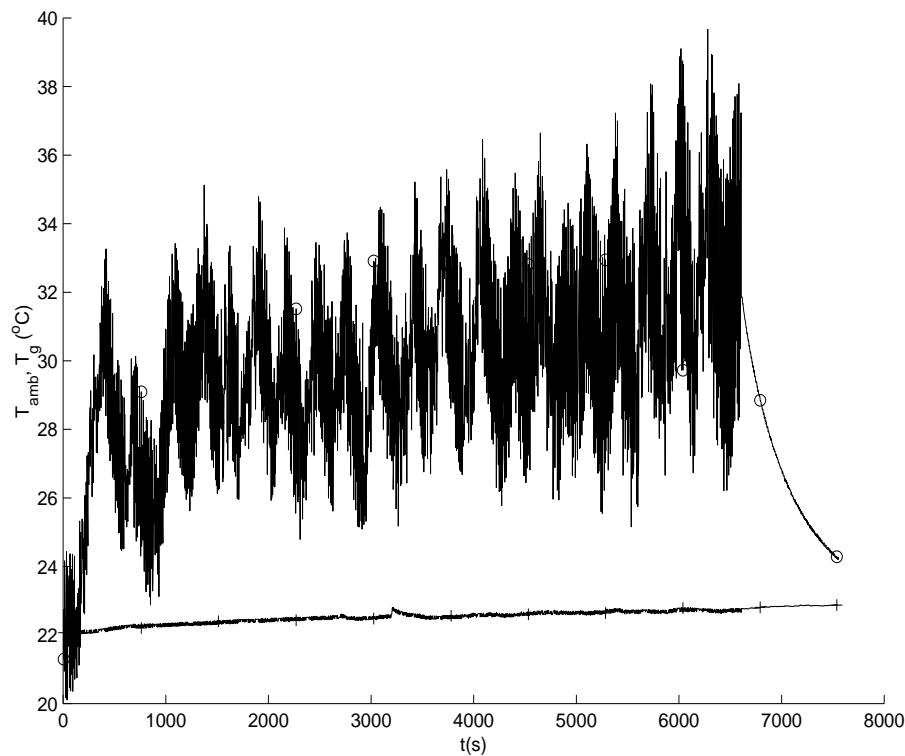


Figura 5.7: Resultados das temperaturas antes, durante e depois da aplicação do sinal chaveado, PRBS003: (+) Temperatura ambiente T_{amb} e (o) temperatura do gás manométrico T_g .

para o aquecimento do fluido manométrico¹, e um tubo de cobre em serpentina no qual pode circular a água para o arrefecimento deste fluido.

O sistema de arrefecimento é composto de um tubo de cobre em serpentina ligado a uma bomba hidráulica através de mangueira plástica.

Um programa de computador foi desenvolvido no sistema operacional Windows para gerar um sinal binário-aleatório e aplicá-lo no sistema. Este programa foi escrito e compilado no software HPVEE da *Hewlett Packard* (VEE, 1995)(Helsel, 1995) e tem dois objetivos básicos: gerar um número aleatório e ler as saídas dos sensores de pressão e temperatura. A aquisição dos dados dos sensores de pressão e temperatura foi feita por meio do sistema VXI (VME eXtend Instrumentation) descrito em detalhes no Anexo B, do qual foram utilizadas três placas: um multímetro HP1326 (hp4, 1995; hp1, 1995; hp2, 1995; hp6, 1996), um multiplexador HP1345 (hp5, 1995) e um relé HP1364 (hp3, 1995). Para cada placa utilizada foi desenvolvido um *driver* que define os protocolos de entradas

¹O fluido manométrico neste caso é nitrogênio com 99,997% de pureza.

e saídas. O programa desenvolvido, apresentado no Anexo C: Programa para gerar e aplicar sinal binário.

O sistema estudado, o qual incorpora o sensor de pressão, temperatura do gás, temperatura ambiente, a câmara e o DPG é representado pelo diagrama em blocos mostrado na Figura 5.1.

5.3 Resultados da aplicação de um sinal chaveado

Para verificar a influência dinâmica da temperatura do gás manométrico no sensor de pressão, é necessário aplicar uma variação de temperatura do gás manométrico e coletar os seguintes dados de medições: temperatura do gás, temperatura ambiente, pressão no padrão DPG e saída do sensor de pressão. O esquema é mostrado na Figura 5.6. Em outras palavras, é necessário conhecer T_e , P e T_g para verificar quais são as suas influências e, se houver, quantificar estas influências sobre a saída do sensor de pressão Y_s . Os procedimentos para a aplicação do sinal chaveado são apresentados na seção 3.9.

Porém, não é possível medir T_e mais rápido do que medir P ; isto porque, antes que o sensor de temperatura perceba a variação de temperatura do gás manométrico, o gás sofrerá uma expansão ou contração, que ocorrerá durante o transporte do calor até o sensor de temperatura. Então, se o volume do sistema for mantido constante e se não houver realimentação da pressão, haverá uma variação da pressão P , e isto ocorrerá antes da medição da temperatura do gás, já que a constante de tempo do sensor de pressão é da ordem de milissegundos (10ms) e do medidor de temperatura é da ordem de segundos (6s).

Como não se conhece T_e , a solução encontrada foi estimar um valor mais adequado através da saída do medidor de temperatura, a variável T_g e do modelo identificado de G . Para isto, foi aplicado um sinal de aquecimento e resfriamento de tal forma que o tempo de duração de aquecimento ou resfriamento fosse aleatório, desta forma procurou-se aproximar de um sinal PRBS.

A Figura 5.7 mostra uma comparação entre a temperatura do gás manométrico e a temperatura ambiente. Como pode ser visto, a temperatura ambiente aumentou suavemente, menos de 1°C durante o teste, não interferindo neste ensaio.

O sinal da saída do bloco S para esta entrada no bloco H é apresentado na Figura 5.8.

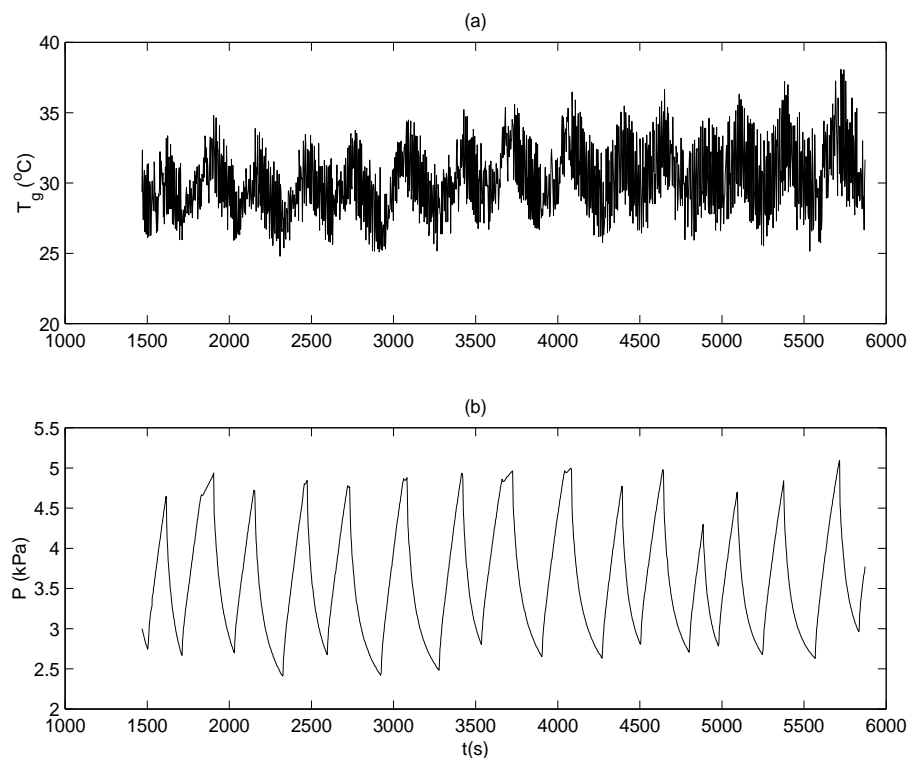


Figura 5.8: Aplicação de um sinal chaveado de temperatura, PRBS003: (a) temperatura medida do gás manométrico, T_g em graus centígrados e (b) medida da pressão pelo DPG, P , em kPa.

Neste caso, foi escolhido um intervalo de amostragem de aproximadamente 3,5s. Este intervalo de tempo foi determinado em função de limitações do programa utilizado, que gasta de 1,8s a 2,0s para executar todas as rotinas e sub-rotinas durante a aquisição de um conjunto de amostras. Por este motivo, foi acrescentado um tempo de atraso de mais 1,5s para que o programa pudesse ter um maior controle no tempo de amostragem, ou seja, o intervalo de tempo gasto pelo programa para executar suas tarefas é cronometrado, porém não há controle sobre ele. Quando neste é somado um tempo de espera, o valor total do tempo de duração de aquisição de cada amostra é praticamente constante.

O outro parâmetro que foi levado em consideração para a escolha do intervalo de amostragem foi a menor constante de tempo de interesse do sistema, que é de 240s como visto na equação 5.1. Foi então determinado um intervalo de tempo constante de amostragem que coletasse pelo menos dez amostras durante este tempo. Normalmente são escolhidas de 10 a 15 amostras durante o intervalo de tempo da menor constante de tempo de interesse, mas neste caso, há mais amostras do que o necessário, porém a super-amostragem é uma situação mais confortável do que sub-amostragem.

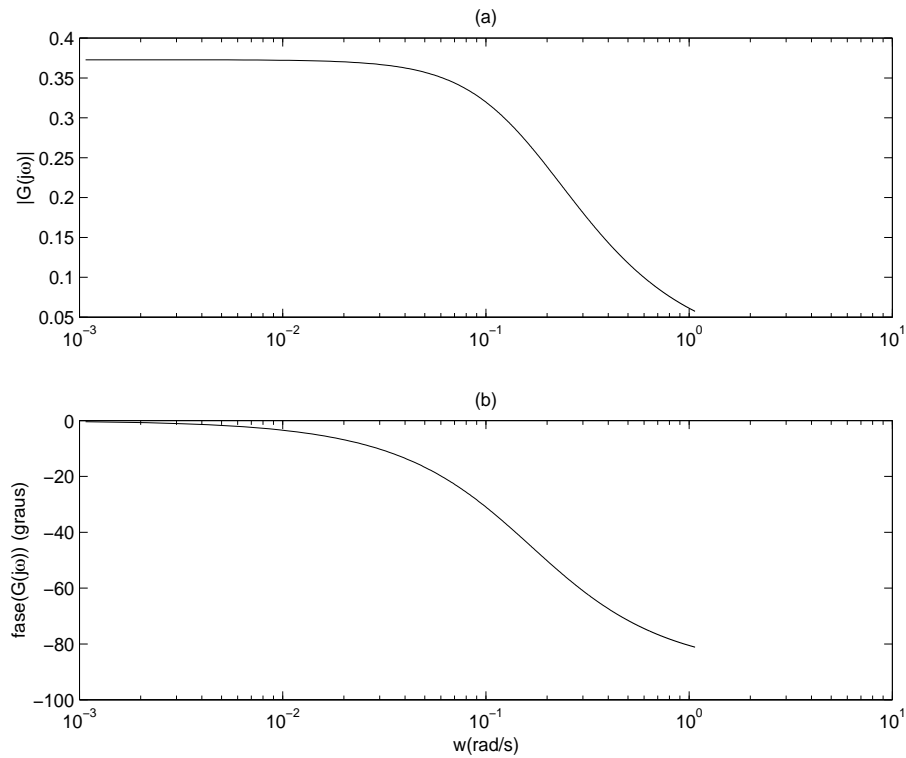


Figura 5.9: Diagrama de Bode de $G(j\omega)$.

Para estimar o valor de T_e , toma-se o sinal medido da temperatura do gás manométrico, T_g , e aplica-se a FFT passando para o domínio da frequência. Podem-se comparar os espectros de frequência de T_g com G , objetivando-se ter uma estimativa da forma do sinal T_e . Para tornar possível a identificação visual das faixas de frequências do sinal de interesse, os módulos não são apresentados nos gráficos em dB (decibel) .

Lembrando-se que é conhecida a função $G(s)$ que é a função de transferência do sensor de temperatura RTD868 mostrada na equação 4.11, cujo diagrama de Bode de $G(j\omega)$ é apresentado na Figura 5.9. Então, pode-se estimar T_e fazendo a análise no domínio da frequência.

A Figura 5.9(a) mostra o ganho de $G(j\omega)$, $|G(j\omega)|$ e a Figura 5.9(b) mostra a fase em graus de $G(j\omega)$, $\angle(G(j\omega))$, ambos em relação a frequência em rad/s.

Aplicando-se a FFT ao sinal T_g mostrado na Figura 5.8, obtêm-se as amplitudes e fases para uma dada faixa de frequências, que são mostradas na Figura 5.10. A Figura 5.10(a) mostra o ganho de $T_g(j\omega)$, $|T_g(j\omega)|$ e a Figura 5.10(b) mostra a fase em graus de $T_g(j\omega)$, $\angle(T_g)(j\omega)$, ambos em relação à frequência em rad/s.

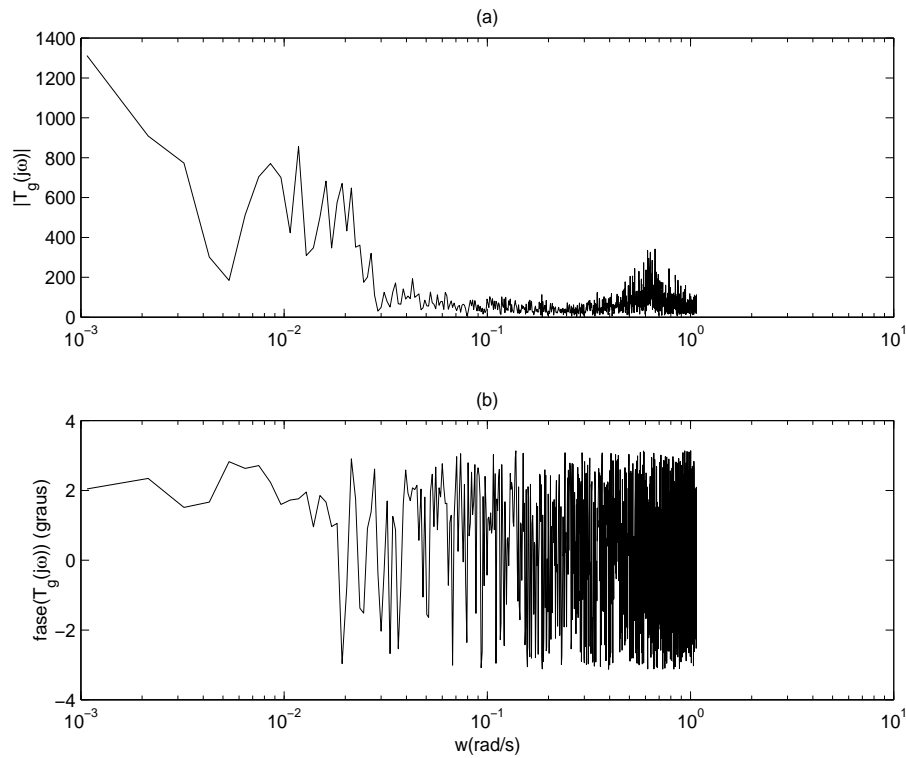


Figura 5.10: FFT do sinal chaveado, PRBS003: (a) módulo do resultado da FFT do sinal de $T_g(j\omega)$, mostrada na Figura 5.8, e (b) fase do resultado FFT do sinal de $T_g(j\omega)$.

Componentes de frequência que se encontram acima de 0,03rad/s confundem-se com erros numéricos e não serão considerados na análise.

Comparando-se o módulo da transformada de Fourier do sinal de $T_g(j\omega)$, $|T_g(j\omega)|$, com o módulo da função $G(j\omega)$ nas mesmas faixas de frequências, pode-se ver que o sinal $T_g(j\omega)$ encontra-se na faixa de passagem de $G(j\omega)$. Este resultado é mostrado na Figura 5.11, podendo-se ver que o sinal de $T_g(j\omega)$ só tem potência espectral significativa em baixas frequências e a resposta em frequência de $G(j\omega)$ mostra que este bloco se comporta como um filtro passa baixa. Logo as componentes dos sinais de $T_e(j\omega)$ pertencentes às baixas frequências estão no sinal de $T_g(j\omega)$ multiplicadas por uma constante e as componentes pertencentes às altas frequências praticamente não estão presentes no sinal de $T_g(j\omega)$ e consideradas sinal de ruído.

Observando o espectro de frequências apresentado na Figura 5.12 e comparando-se as fases do resultado da transformada de Fourier do sinal T_g , $\angle T_g(j\omega)$, com a fase da função $G(j\omega)$ para as mesmas faixas de frequências, pode-se ver que a fase do sinal de $T_g(j\omega)$ é praticamente nula em todo o espectro. Já a fase de $G(j\omega)$ é menor que 15° para frequências abaixo de 0,03rad/s. Logo os efeitos

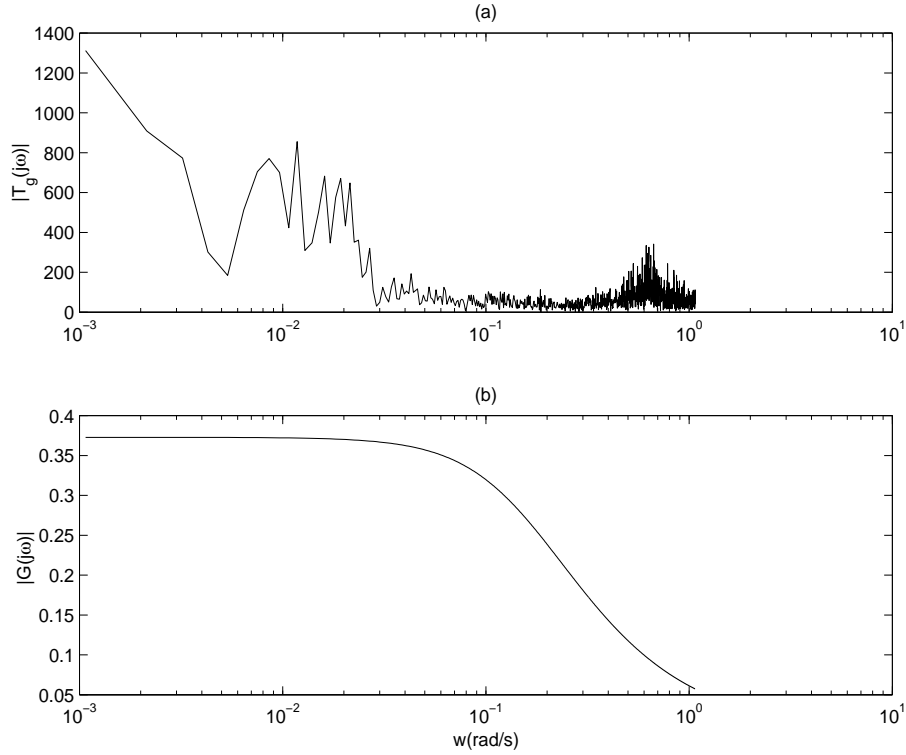


Figura 5.11: Comparação dos módulos de $T_g(j\omega)$ e de $G(j\omega)$, PRBS003: (a) módulo de $T_g(j\omega)$, (b) módulo de $G(j\omega)$.

da fase de $T_g(j\omega)$ pertencentes às baixas frequências são desprezíveis no sinal de $T_e(j\omega)$, porém, nas altas frequências, o sinal de $T_e(j\omega)$ sofre influência da fase de $G(j\omega)$. Para estimar as características do sinal de $T_e(j\omega)$ do diagrama em blocos mostrados na Figura 5.1, aplica-se a equação

$$T_e(j\omega) \cdot G(j\omega) = T_g(j\omega), \quad (5.7)$$

desenvolvendo a equação 5.7 com o objetivo de relacionar o sinal medido de $T_g(j\omega)$ com o modelo de $G(j\omega)$, encontra-se,

$$T_e(j\omega) = \kappa \cdot e^{j\theta} = |T_e(j\omega)| \cdot e^{j\angle(T_e(j\omega))}, \quad (5.8)$$

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| \cdot e^{j\angle(G(j\omega))}, \quad (5.9)$$

$$T_g(j\omega) = |T_g(j\omega)| \cdot e^{j\angle(T_g(j\omega))}, \quad (5.10)$$

substituindo em 5.7, obtém-se

$$|T_e(j\omega)| \cdot e^{j\angle(T_e(j\omega))} \cdot |G(j\omega)| \cdot e^{j\angle(G(j\omega))} = |T_g(j\omega)| \cdot e^{j\angle(T_g(j\omega))}, \quad (5.11)$$

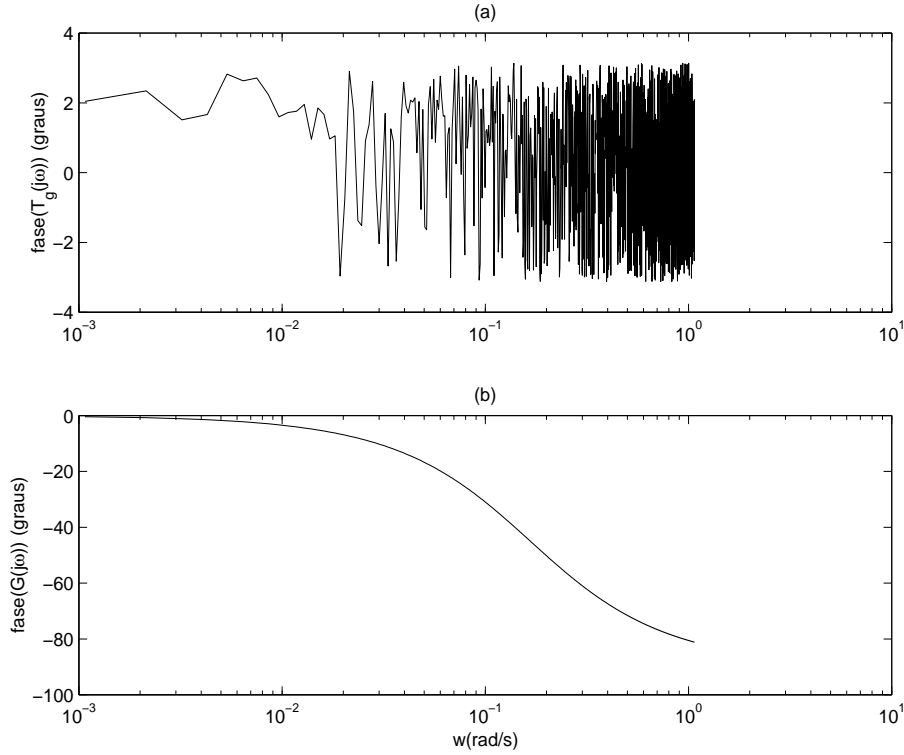


Figura 5.12: Comparação das fases de $T_g(j\omega)$ e de $G(j\omega)$, PRBS003: (a) fase de $T_g(j\omega)$, (b) fase de $G(j\omega)$.

$$|T_e(j\omega)| \cdot e^{\angle(T_e(j\omega))} = \frac{|T_g(j\omega)| \cdot e^{\angle(T_g(j\omega))}}{|G(j\omega)| \cdot e^{\angle(G(j\omega))}}, \quad (5.12)$$

$$|T_e(j\omega)| \cdot e^{\angle(T_e(j\omega))} = \frac{|T_g(j\omega)|}{|G(j\omega)|} \cdot e^{\angle(T_g(j\omega)) - \angle(G(j\omega))}, \quad (5.13)$$

tomando os módulos e as fases separadamente,

$$|T_e(j\omega)| = \frac{|T_g(j\omega)|}{|G(j\omega)|}, \quad (5.14)$$

$$\angle(T_e(j\omega)) = \angle(T_g(j\omega)) - \angle(G(j\omega)). \quad (5.15)$$

Aplicando as equações 5.14 e 5.15 nos dados coletados, são encontrados dois vetores que contêm as informações de módulo e fase do sinal estimado de $T_e(j\omega)$, apresentados nas Figuras 5.13(a) e 5.14(a).

O resultado da comparação dos módulos de $T_e(j\omega)$ e $T_g(j\omega)$ no domínio da frequência mostra que ambos os sinais encontram-se na mesma faixa de frequências e é apenas multiplicado por uma constante. Então, o sinal T_g pode ser

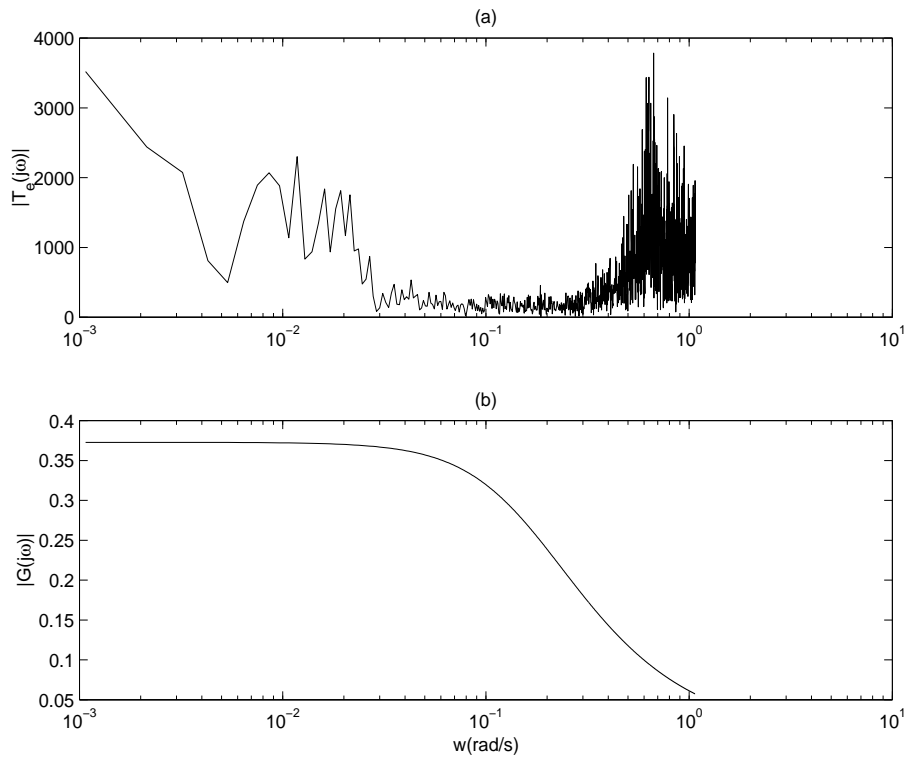


Figura 5.13: Comparação dos módulos de $T_e(j\omega)$ e de $G(j\omega)$, PRBS003: (a) módulo de $T_e(j\omega)$, (b) módulo de $G(j\omega)$.

considerado proporcional ao sinal T_e .

Levando-se em conta que este é um dos sinais mais rápidos que se pode aplicar à câmara de pressão, conclui-se que a forma do sinal de temperatura medido pelo sensor de temperatura, T_g , pode ser considerado a própria forma do sinal da temperatura T_e para qualquer variação de aquecimento ou resfriamento.

A Figura 5.15(a) mostra uma comparação entre a pressão no indicador do DPG e a saída do sensor de pressão em kPa, dada pela relação encontrada na calibração estática. Já a Figura 5.15(b) mostra o erro desta comparação que é da ordem de $\pm 0,2$ kPa, correspondendo a $\pm 4\%$ em relação à leitura. Este é um erro que pode ser aceitável. O erro é calculado antes, durante e depois do regime permanente do sistema, então pode-se ver que qualitativamente as taxas de variação da saída de Y_s e de P são próximas. Sabendo-se que o DPG é conectado ao sensor de pressão a uma distância de 3m e não há circulação de gás, pode-se considerar que o DPG não é afetado pela variação de T_g .

Para este caso, em que também há conservação da massa do gás dentro da câmara de pressão, pode-se fazer a análise da transformação sofrida pelo gás ma-

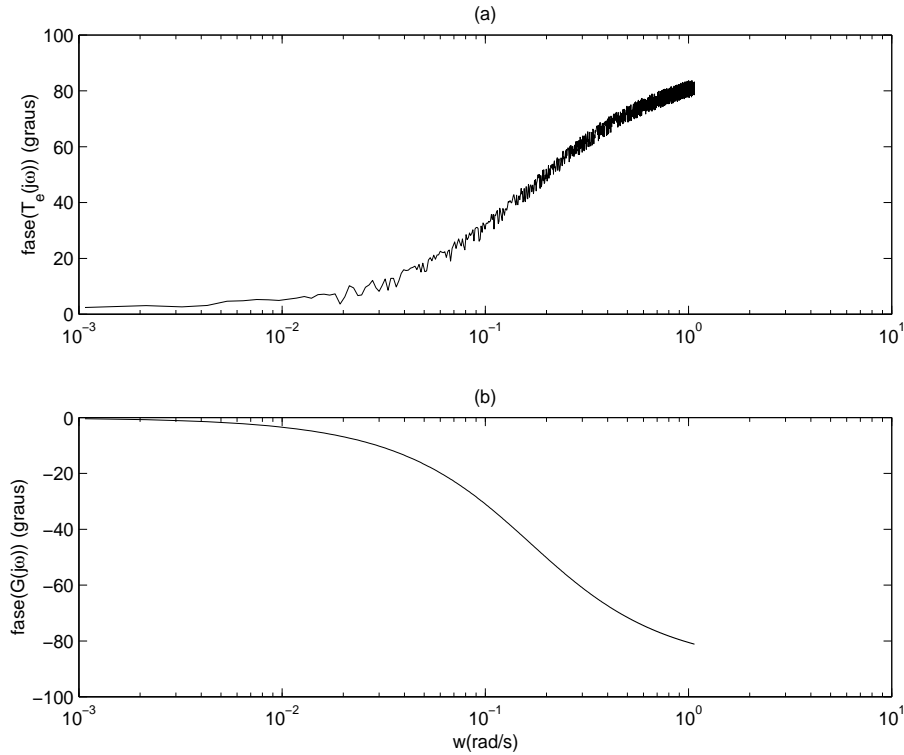


Figura 5.14: Comparação das fases de $T_e(j\omega)$ e de $G(j\omega)$, PRBS003: (a) fase de $T_e(j\omega)$, (b) fase de $G(j\omega)$.

nométrico. A verificação dos estados indica que a mais provável é também a transformação politrópica, função que é mostrada na equação 5.6 e o resultado para esta transformação é apresentado na Figura 5.16 que apresenta a diferença entre P e o resultado da função de transformação termodinâmica é maior do que a do ensaio de variação lenta, isto se deve ao fato de que o tempo de duração de cada nível do sinal chaveado não é suficiente para que o sistema entre em equilíbrio termodinâmico e a transformação do gás seja completa.

Para ambos os ensaios a definição da função erro aplicada é mostrada na equação 5.4. No ensaio de variação lenta, a frequência de variação do sinal T_g é de $0,004\text{rad/s}$, está bem abaixo da frequência de corte da câmara de pressão que é da ordem de $0,03\text{rad/s}$, provocando, portanto, um desvio de $\pm 2\%$ em relação ao fundo de escala. A frequência de corte da câmara é calculada como sendo $\omega_{cH} = 2\pi \frac{1}{\tau_{1H}} = 2\pi \frac{1}{240}\text{rad/s}$. Já no ensaio de variação rápida, a frequência de variação do sinal T_g é de $0,03\text{rad/s}$; esta é a maior variação de aquecimento e resfriamento que pode ser aplicada na entrada do bloco H e que é capaz de produzir uma variação de T_g mensurável. Este valor de frequência de excitação conseguida para a câmara de pressão é bem próximo da frequência natural da

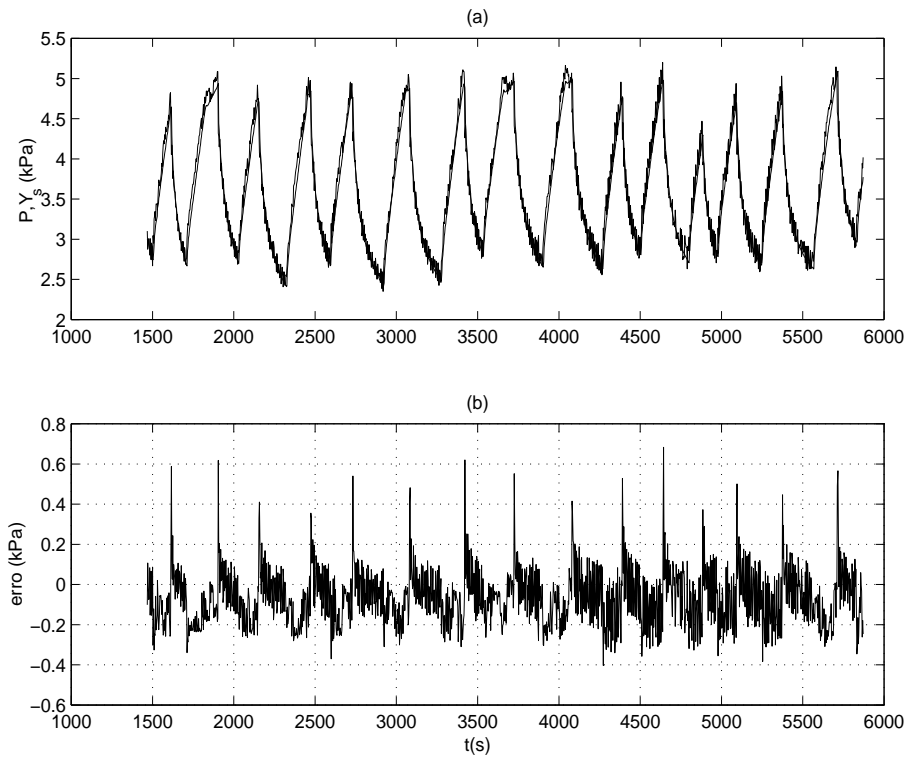


Figura 5.15: Resultado da aplicação de um sinal chaveado, PRBS003: (a) mostra uma comparação entre a pressão no indicador do DPG em kPa e o resultado da calibração do sensor de pressão, por meio da relação encontrada na calibração estática. (b) mostra o erro desta comparação em kPa.

câmara; isto significa que todo sinal na entrada de H com frequências acima de ω_{c_H} terão suas amplitudes bastante atenuadas.

Para avaliar a influência da dinâmica de T_g em S deve-se aplicar um sinal de temperatura T_e e manter a pressão P constante. Porém os dois ensaios demonstram que quando a temperatura T_g varia a pressão também é alterada. O sensor S percebe a alteração da pressão mais rápido do que a alteração na temperatura. O fato é que a constante de tempo de S é da ordem de 1ms (um milésimo), dados de sensores similares do mesmo fabricante, então $\omega_{c_S} \approx 2000\pi \text{ rad/s}$ que é da ordem de 10^6 vezes ω_{c_H} . Isto quer dizer que se houver uma mudança em T_g , esta causará uma alteração na pressão, e a saída do sensor de pressão acompanhará esta alteração tão rápido quanto se possa variar T_g . Então a variação na saída de S é devida à variação de P e não à de T_g . O coeficiente de correlação entre T_g e P é 0,9897 para o ensaio de variação lenta e 0,7007 para o de variação rápida; já o coeficiente de correlação entre T_g e Y_s é 0,9908 para o ensaio de variação lenta e de 0,6472 para o de variação rápida. Os resultados da correlação cruzada mostram que o sinal de temperatura é altamente correlacionado com o sinal de

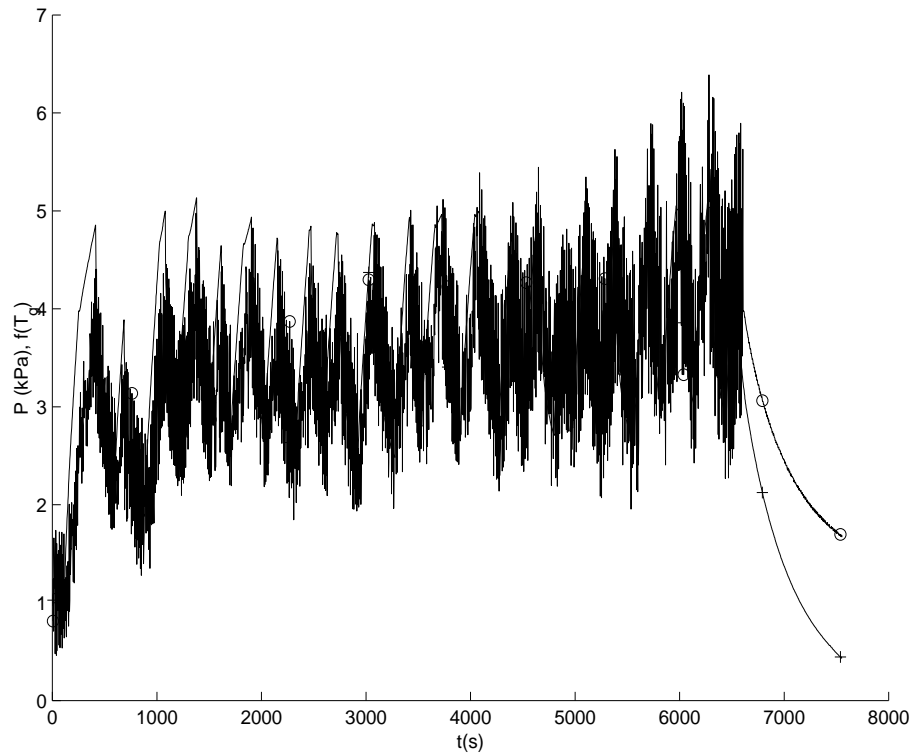


Figura 5.16: Resultado da transformação do gás manométrico dentro da câmara, PRBS003: (a) pressão P em kPa, (b) resultado da equação 5.6 aplicado para T_g deste segundo ensaio e (c) diferença entre P e $f(T_g)$.

pressão. Nota-se que não é possível variar T_g rapidamente sem alterar a pressão. Portanto, não é necessário fazer a compensação dinâmica de T_g , pois a maior taxa de variação conseguida para T_g não é suficiente para provocar alteração na saída de S mais rápido do que a variação de P . Então pode-se concluir que os efeitos das variações de T_g não são percebidos dinamicamente pelo sensor de pressão e sim, apenas estaticamente, logo o próximo capítulo estudará a necessidade da compensação estática, já que do ponto de vista do sensor de pressão a variação de T_g é tão lenta que pode ser considerada estática e os resultados dos dois ensaios apresentaram erros bem próximos entre si e superiores a 0,5% da faixa nominal.

Capítulo 6

Ensaaios para a compensação estática de T_g

O capítulo anterior discutiu a necessidade da compensação dinâmica da temperatura do gás manométrico, T_g . Foi mostrado que não há necessidade de realizar a compensação dinâmica da variação de T_g , mas, devido ao fato de a variação de T_g ser vista pelo sensor de pressão como estática, sabendo que o sensor é utilizado em calibrações estáticas e que estas calibrações têm duração de tempo muito longa, estas variações podem afetar os ensaios. Com o objetivo de quantificar a influência estática de T_g , este capítulo apresenta os resultados dos ensaios em uma faixa de temperatura de T_g , 20 a 65°C para alguns valores de pressão. Estes valores foram escolhidos de acordo com o fundo de escala do sensor de pressão. Este capítulo apresenta também um estudo para a compensação desta influência de T_g no sensor de pressão e uma sugestão de equação que pode ser usada na compensação. Mostra também uma análise dos resultados da faixa de pressão aplicada no sensor, bem como a comparação dos erros sem e com compensação, utilizando-se a equação de reta. E, finalmente, apresenta a validação dos coeficientes para a compensação, a validação da curva de interpolação dos coeficientes e a validação da compensação estática implementada.

6.1 Avaliação do efeito de T_g a pressão constante

Após os ensaios para avaliação da influência da dinâmica de T_g e conhecida a transformação termodinâmica do gás, pode-se comprovar que a saída do sensor de pressão varia de acordo com a variação da pressão que é devida à variação de T_g . Então devem-se buscar respostas para as seguintes questões: se a pressão permanece constante qual é a influência da temperatura na saída do sensor de pressão Y_s ? Se houver influência, que tipo de compensação poderá ser aplicada?

Com o objetivo de obter respostas para estas questões, foram realizados ensaios nos quais procurou-se manter a pressão e a temperatura do gás constantes, cujos procedimentos foram apresentados no capítulo 3 e consistiram basicamente da variação da temperatura do gás manométrico através do sistema de aquecimento e resfriamento. Já a pressão é controlada pelo PPC1 que é um controlador ligado ao DPG, cujo controle é conseguido pelo tempo de abertura de válvulas. Esta pressão foi mantida constante em vários valores diferentes que foram escolhidos de acordo com o fundo de escala do sensor de pressão. Para este sensor, cujo fundo de escala nominal é de $1,5\text{PSI} \approx 10\text{kPa}$, foram escolhidas as pressões de 2kPa, 4kPa, 6kPa e 8kPa que correspondem respectivamente a 20%, 40%, 60% e 80 % do fundo de escala, a descrição mais detalhada do funcionamento do DPG e do PPC1 no Anexo B.

Para cada ensaio a pressão foi controlada em um determinado valor e a temperatura do gás foi variada de modo que permanecesse em alguns patamares. O valor dos patamares de temperatura foram conseguidos aleatoriamente. Um exemplo da variação da temperatura do gás manométrico é mostrado na Figura 6.1 como também a pressão indicada no mostrador do padrão DPG. O tempo de duração da coleta de dados é em média de 4 horas, isto após o condicionamento dos equipamentos, o que implica um total de aproximadamente 6 horas para cada ensaio. Este tempo varia muito de ensaio para ensaio porque depende do controle da temperatura do gás que é conseguido manualmente, através de um varivolt.

Foram realizadas algumas tentativas com o propósito de automatizar este controle. A primeira tentativa foi colocar um controle liga/desliga substituindo o varivolt, e apresentou uma oscilação na temperatura de $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Esta variação de temperatura acarreta uma variação de mais de 1kPa na pressão, não permitindo que o PPC1 conseguisse estabilizar a pressão no valor desejado. A segunda tentativa foi substituir o controle liga/desliga por um controlador PID (Proporcional Integral e Derivativo) com um sensor de temperatura termopar tipo - K, obtendo-se uma variação da temperatura do gás de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Esta variação de temperatura acarreta uma variação de mais de 500Pa na pressão, não permitindo que o PPC1 conseguisse estabilizar a pressão no valor desejado. A terceira tentativa foi substituir o sensor de temperatura do controlador, que era um termopar, por um RTD. Depois de ajustados os parâmetros do PID, a variação da temperatura do gás foi de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Esta variação de temperatura acarreta uma variação de mais de 100Pa na pressão, não permitindo que o PPC1 conseguisse estabilizar a pressão no valor desejado.

Tendo em vista estes resultados, decidiu-se realizar o controle manualmente, conseguindo uma variação de pressão da ordem de 1Pa, sendo este valor considerado elevado, pois o DPG pode medir pressões da ordem de 0,01Pa. Este bom resultado apresentado se deve ao fato de que os controladores utilizados são do

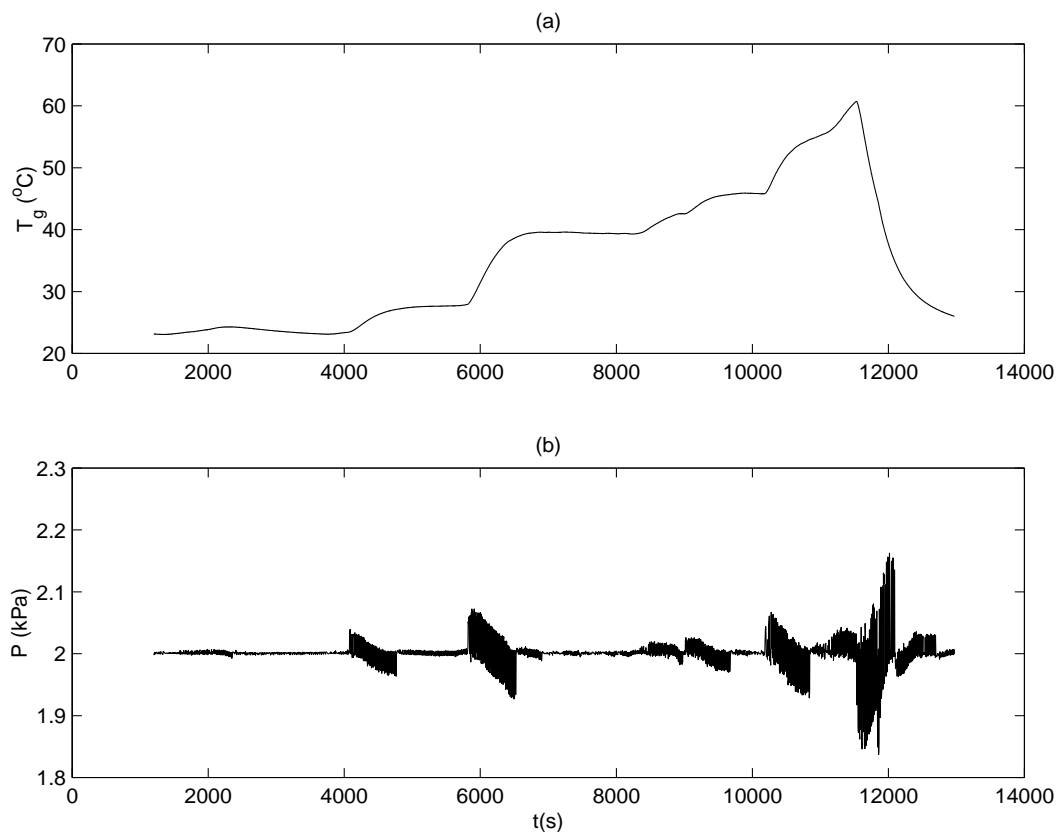


Figura 6.1: Exemplo de um ensaio a 2kPa: a) variação da temperatura do gás manométrico com DPG controlando a 2kPa e b) pressão indicada pelo DPG, EN1707A.

tipo relé, ou seja liga/desliga. Mesmo o PID possui o atuador do controle um relé que depende do tempo de acionamento. Estes controles aplicam uma entrada em degrau na resistência que muda de estado muito rápido se comparado ao tempo gasto para que o sensor de temperatura do controlador perceba a mudança de estado, ou seja existe um tempo morto e é significativo para o controle deste sistema.

Para este exemplo, pressão de 2kPa mostrada na Figura 6.1, foram alcançados cinco patamares de temperatura, ou seja, foram conseguidos cinco valores de temperatura com o correspondente desvio da saída do sensor de pressão. Este desvio pode ser visto na Figura 6.2, e ainda observado que, para cada patamar de temperatura há um valor de desvio diferente, o que implica em uma dependência da saída do sensor de pressão com temperatura do gás.

Considerando-se que, a partir da calibração estática, a saída do sensor varia linearmente em relação à variação de pressão, que é aplicada em suas entradas e que a equação que descreve esta relação é apresentada na equação 4.3, pode-se comparar a saída do sensor com a pressão medida pelo DPG. Aplicando-se o mo-

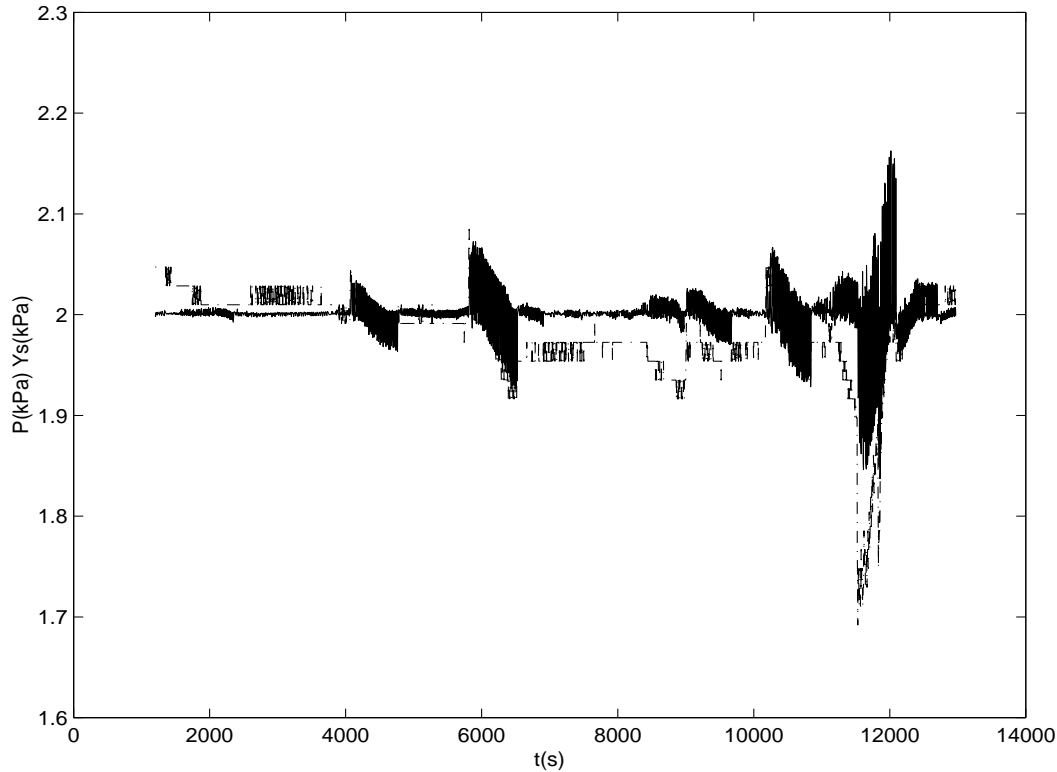


Figura 6.2: Pressão P e saída do sensor de pressão, Y_s , com DPG controlando a 2kPa, EN1707A. O sinal P é aquele cuja média mantém em 2kPa.

delo encontrado na equação 4.3 que foi obtido da calibração estática do sensor em relação ao padrão DPG, é possível calcular os desvios e analisar a melhor compensação. A Figura 6.2 mostra estes desvios para vários patamares de temperatura. A diferença significativa entre as duas curvas já é percebida para temperatura de 25°C correspondente ao intervalo de tempo de 2000s a 5000s e que não é uma faixa elevada se comparada à faixa de trabalho do laboratório, $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ou seja, os efeitos indesejáveis começam a serem significativos em uma faixa de temperatura na qual o sensor poderá ser utilizado.

Neste ensaio o gás manométrico não é o mesmo todo o tempo; então não se pode aplicar uma lei de transformação termodinâmica para a transformação do gás manométrico ocorrida dentro da câmara, pois não há conservação de massa dentro do volume de controle.

O estudo para estimação da função que descreve os desvios pode ser iniciado pela avaliação dos parâmetros e variáveis que são conhecidos do sistema, ou seja, pressão, temperatura e as características do gás.

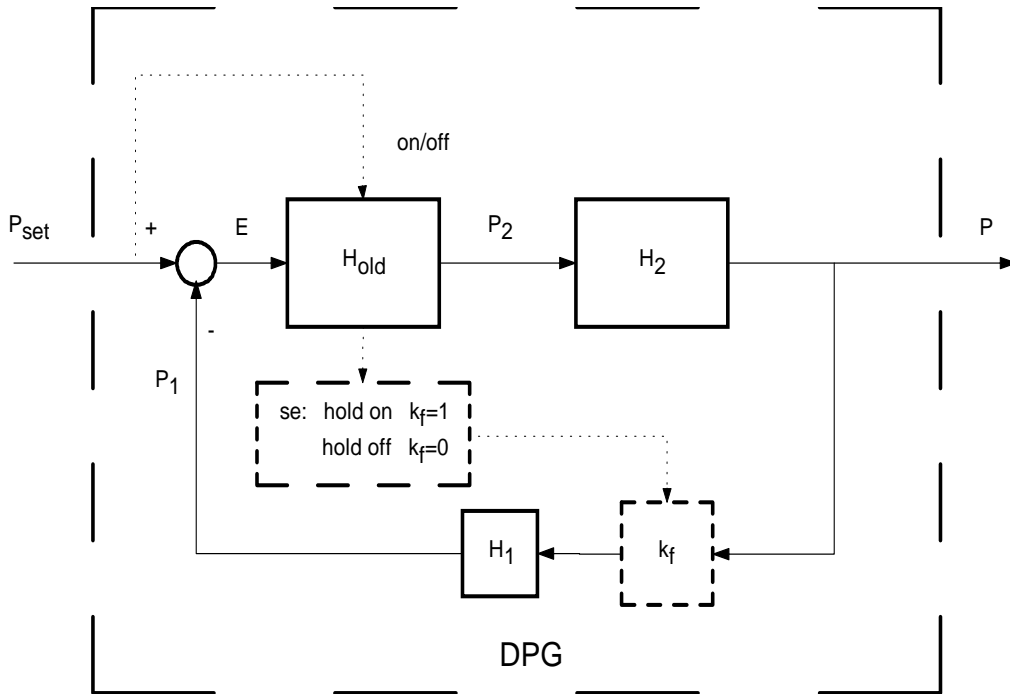


Figura 6.3: Detalhamento do bloco DPG.

Lembrando que agora o PPC1 está operando em malha fechada e que há controle da pressão dentro da câmara de pressão, o sistema descrito na Figura 5.1 mostra o diagrama em blocos deste sistema, e o bloco do DPG pode ser complementado pelo diagrama mostrado na Figura 6.3 que é um detalhamento do bloco DPG.

Na Figura 6.3 pode-se ver que P_{set} é a entrada do valor desejado de pressão no DPG. Na prática este sinal contém duas informações; a primeira é o valor da pressão a qual o DPG vai aplicar em sua saída e o segundo é se ele vai ou não controlar a pressão neste valor. Em outras palavras, se o comando for por exemplo $ps = 2$, o PPC1 vai aplicar pressão até atingir 2 e não vai controlar a pressão. Se houver algum vazamento a pressão vai diminuir ou se houver alguma fonte de pressão o valor vai aumentar. Porém, se o comando for $psh = 2$, o PPC1 vai aplicar pressão até atingir 2 e vai controlar neste valor, introduzindo ou retirando gás para manter a pressão no valor determinado. O comando ps significa "*pressure set*" e o comando psh significa "*pressure set with hold*".

As faixas foram escolhidas de acordo com o fundo de escala do sensor de pressão e com base nas informações do catálogo do fabricante e os dados técnicos do sensor de pressão são apresentados no Anexo B. Por medida de segurança, esta faixa não ultrapassou $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, para que nem sensor nem o DPG fossem agredidos por grandes variações de temperatura, já que é intenção do laboratório utilizá-lo como padrão de transferência, caso a validação da compensação de T_g seja realizada com sucesso. O sensor de pressão utilizado é baseado no efeito piezoresistivo; isto significa que o sensor pode sofrer uma maior influência da temperatura do gás se comparado aos sensores baseados em *strain gauge* ou capacitivo (Patra and Baliarsingh, 1994). O efeito da temperatura do gás pode ser analisado em várias faixas de pressão e com isto é avaliada a não linearidade do sistema.

Tendo como base os resultados da calibração e dos ensaios anteriores, este sensor de pressão pode ser usado como medidor de pressão de uso geral ou até mesmo como padrão de transferência de pressão. Caso seja usado como medidor de uso geral, não há necessidade de ser realizada a compensação da influência da temperatura do gás manométrico, pois na faixa de temperatura ambiente o desvio em relação ao padrão DPG é da ordem de 1% em relação ao fundo de escala. Entretanto, caso seja usado como padrão de transferência de pressão, é necessário que haja uma redução deste desvio. Padrão de transferência é um padrão secundário que deve possuir algumas características importantes previstas em normas, como por exemplo erro de repetibilidade menor do que a do medidor a ser calibrado, erro de exatidão também menor, reprodutibilidade dos resultados ao longo do tempo e rastreabilidade. Segundo a norma (ABNT-NBR8189, 1998) item 6.1.3(a), "o manômetro-padrão deve ter uma classe de exatidão quatro vezes superior à classe do manômetro submetido a calibração". Como a maioria dos manômetros que são calibrados na faixa de pressão de 10kpa podem apresentar até 4% de erro segundo a classificação no item 3 da referente norma, então o erro após a compensação não deve exceder a 1% da faixa nominal do sensor de pressão para ser usado como padrão secundário de pressão. As normas referentes a pressão da Organização Internacional da Metrologia Legal (OIML) também especificam condições para os padrões, bem como procedimentos para o uso dos mesmos (of Legal Metrology, 1973; of Legal Metrology, 1975; de Métrologie Légale, 1982; de Métrologie Légale, 1990; de Métrologie Légale, 1991; de Métrologie Légale, 1993; de Métrologie Légale, 1994).

6.1.1 Resultado dos ensaios estáticos

Os ensaios realizados foram iniciados na faixa de pressão de 2kPa, os resultados foram conseguidos basicamente controlando a pressão no valor desejado, atuando na temperatura do gás manométrico e depois de estabilizada fazendo a aquisição dos dados. Os procedimentos para executar o ensaio são apresentados no

capítulo 3. Com os resultados e utilizando-se o *software MATLAB*[©] podem-se construir os gráficos referentes aos dados coletados e obter graficamente os respectivos valores de pressão e saída do sensor para uma dada temperatura T_g . Com os resultados obtidos, verifica-se a melhor função que represente esta distribuição. A implementação da função de compensação escolhida pode ser realizada de várias formas, como por exemplo através de circuitos lineares ou de circuitos integrados programáveis ou através de *software* depois de ser realizada a aquisição dos dados. A dificuldade de implementação depende do usuário e do uso do sensor, caso o sensor seja usado em equipamentos portáteis, por exemplo, recomendam-se os circuitos lineares ou circuitos integrados programáveis. Se, além de ser usado em equipamentos portáteis for requerido baixo custo, então recomendam-se os circuitos lineares. Apesar de ser usado neste trabalho um sistema de aquisição de dados e de realizar a compensação via *software*, procurou-se adotar as funções de compensação fáceis de serem implementadas em circuitos eletrônicos e, utilizando componentes como: resistores, capacitores e amplificadores operacionais.

A função escolhida para representar a distribuição do erro é definida como sendo

$$e_i = Y_{s_i} - f_2(P), \quad (6.1)$$

é uma equação de reta; escolhida pelo fato de ser fácil a sua implementação em circuito eletrônico. Para uma dada faixa de pressão de $ikPa$ é encontrado um desvio de $\pm e_{i_{kPa}} \%$, que é calculado tomando-se como referência o valor nominal da pressão aplicada no sensor de pressão à temperatura ambiente. Os ensaios foram realizados na faixa de temperatura de 20 a 65°C.

A equação de compensação é estimada por regressão linear e será aplicada na minimização do erro apresentado pelos valores coletados para a pressão de $ikPa$. Aplicando-se a definição do erro no sinal coletado, tem-se

$$\hat{Y}_{s_i} = Y_{s_i} - e_i, \quad (6.2)$$

$$\hat{Y}_{s_i} = Y_{s_i} - (Y_{s_i} - f_2(P)), \quad (6.3)$$

$$\hat{Y}_{s_i} = f_2(P), \quad (6.4)$$

A função erro definida na equação 6.1 possui os seguintes parâmetros: inclinação e seu desvio-padrão, a interseção e o seu desvio padrão e como variável independente a temperatura do gás manométrico T_g . Esta equação é apresentada a seguir para as respectivas faixas de pressão.

$$\hat{Y}_{s_i} = (m \pm \sigma_{m_i}) \cdot T_g + (b \pm \sigma_{b_i}) + Y_{s_i}, \quad (6.5)$$

$$\hat{Y}_{s_2} = (0,074 \pm 0,0012) \cdot T_g + (-0,1709 \pm 0,0332) + Y_{s_2}, \quad (6.6)$$

Tabela 6.1: Resumo dos valores de m

P(kPa)	m_e
2	0,074
4	0,020
6	0,040
8	0,057

Sendo P a pressão aplicada e m_e o valor da inclinação da reta de compensação.

$$\hat{Y}_{s_4} = (0,020 \pm 0,0108) \cdot T_g + (-0,0160 \pm 0,0128) + Y_{s_4}, \quad (6.7)$$

$$\hat{Y}_{s_6} = (0,040 \pm 0,0004) \cdot T_g + (-0,1096 \pm 0,0146) + Y_{s_6}, \quad (6.8)$$

$$\hat{Y}_{s_8} = (0,057 \pm 0,0007) \cdot T_g + (-0,0661 \pm 0,0276) + Y_{s_8}, \quad (6.9)$$

sendo T_g a temperatura do gás manométrico em $^{\circ}C$, \hat{Y}_{s_i} o valor estimado da saída do sensor de pressão a i kPa. Então, os erros e_i apresentados para os respectivos valores de pressão são :

$$e_i = (m \pm \sigma_{m_i}) \cdot T_g + (b \pm \sigma_{b_i}), \quad (6.10)$$

$$e_2 = (0,074 \pm 0,0012) \cdot T_g + (-0,1709 \pm 0,0332), \quad (6.11)$$

$$e_4 = (0,020 \pm 0,0108) \cdot T_g + (-0,0160 \pm 0,0128), \quad (6.12)$$

$$e_6 = (0,040 \pm 0,0004) \cdot T_g + (-0,1096 \pm 0,0146), \quad (6.13)$$

$$e_8 = (0,057 \pm 0,0007) \cdot T_g + (-0,0661 \pm 0,0276). \quad (6.14)$$

Aplicando a função mostrada na equação 6.1 aos dados coletados para a compensação do efeito de T_g , pode-se observar que a distribuição dos pontos compensados proximou-se do padrão DPG, ou seja, o erro após a compensação foi reduzido. Este erro foi calculado em relação ao valor da pressão aplicada, i kPa, e os valores da inclinação da reta de compensação podem ser resumidos na Tabela 6.1.

Para atender à norma (ABNT-NBR8189, 1998) este erro deve ser calculado em relação à faixa nominal à temperatura ambiente,

$$e = \frac{\text{leitura} - V_{cc}}{\text{faixa nominal}}, \quad (6.15)$$

Como ainda é fase de projeto, o erro foi calculado em relação à leitura,

$$e = \frac{\text{leitura} - V_{cc}}{\text{leitura}}. \quad (6.16)$$

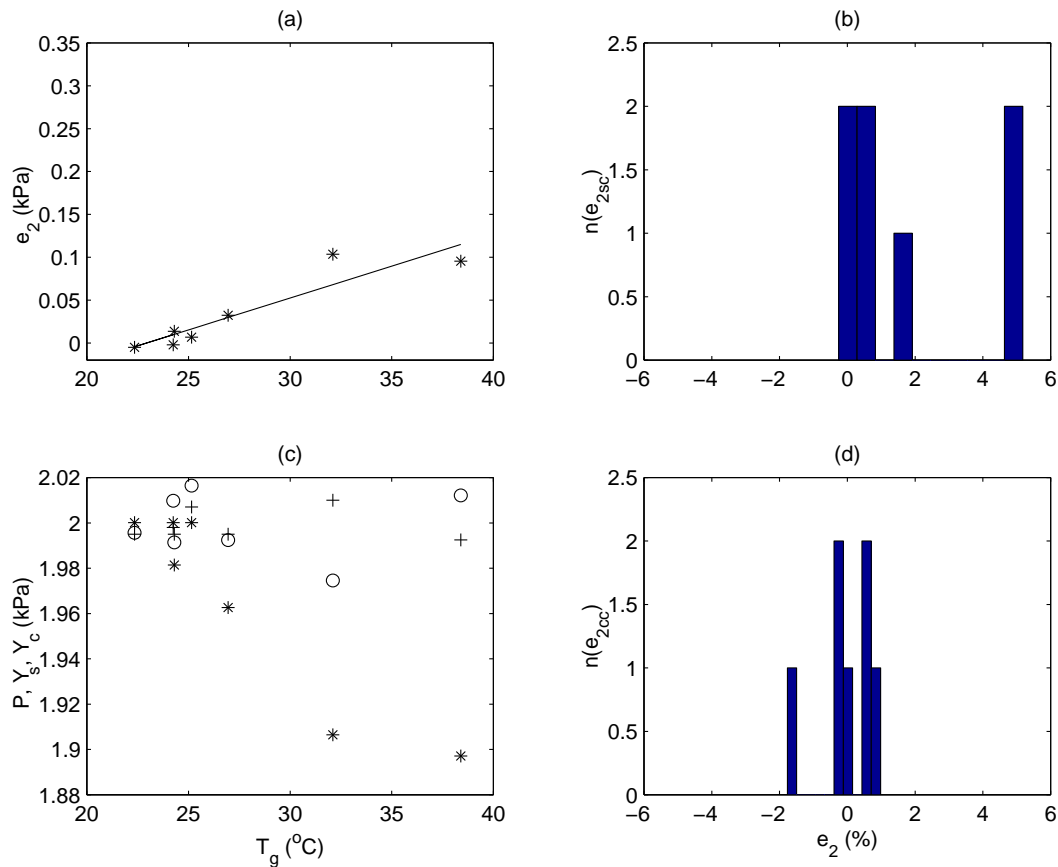


Figura 6.4: Resultados da saída do sensor de pressão para aplicação de 2kPa, CALC2KPA: (a) sem compensação de T_g , (b) com compensação de T_g , (c) e (d). Valores medidos e estimados para a pressão de 2kPa: (+) saída do DPG, (*) saída do sensor de pressão sem compensação, Y_{s2} e (o) valores de pressão com compensação feita usando-se a equação 6.6. Erro em kPa da leitura saída do sensor de pressão para 2kPa de pressão aplicada sem compensação de temperatura, e_{sc} é o erro sem compensação, (*) valores medidos e (-) valores estimados pela equação 6.1.

Neste caso, a leitura é sempre menor do que a faixa nominal, então garantindo uma incerteza que atenda este requisito, logo a norma será atendida.

Para 2kPa, como pode ser visto na Figura 6.4, não foram conseguidos patamares de temperatura acima de 45°C, mas os pontos encontrados mostram claramente a tendência do desvio da saída do sensor de pressão com a temperatura e é possível analisar a tendência dos desvios causados pela variação de T_g . Os dados coletados para a pressão de 2kPa estão gravados nos arquivos: EN0808, EN1707A, EN2407E e estão integrados no arquivo CALC2KPA. Os resultados obtidos a partir destes dados são apresentados Figura 6.4.

A Figura 6.4(a) mostra os erros para um total de sete pontos referentes aos

desvios apresentados pela saída do sensor de pressão devido à variação de T_g . Como pode ser observado na Figura 6.4(b), a população de pontos está polarizada e possui uma média definida como erro médio, $\overline{err}_{sc_2} = 1,746\%$ com uma faixa de abrangência que vai de 0 a 5%, ou seja um desvio padrão σ_{sc_2} igual a 2,290. Já a Figura 6.4(d) apresenta um erro médio $\overline{err}_{cc_2} = 0\%$ e um desvio padrão $\sigma_{cc_2} = 0,887$ correspondente a uma faixa de -1,5% a 1,0%.

Para a pressão de 4kPa, os dados coletados estão armazenados nos arquivos: EN0908A, EN1108A, EN1408A, EN1408B, EN1408C, EN1707B e resumidos no arquivo CALC4KPA. Para esta faixa de pressão de 4kPa foi encontrado um desvio de $\pm 3,0\%$ em relação ao valor da pressão aplicada. Estes ensaios foram realizados na faixa de temperatura de 20 a 60°C, como pode ser visto na Figura 6.5.

A distribuição dos pontos devido à compensação, mostrada na Figura 6.5, aproximou-se do esperado, ou seja o erro após a compensação foi reduzido à $\pm 1\%$ em relação ao valor da pressão aplicada, neste caso 4kPa, como é mostrado na Figura 6.5(a). O cálculo do erro em relação à faixa nominal à temperatura ambiente é de $\pm 1,2\%$ sem compensação e $\pm 0,4\%$ com compensação de T_g .

Nos ensaios a 4kPa o número de patamares de temperatura conseguido foi maior do que para 2kPa, o que significa um número maior de pontos utilizados para a regressão linear. A Figura 6.5(a) mostra um total de 22 pontos referentes aos desvios na saída do sensor de pressão devido à variação de T_g . Neste caso, sem compensação, a população de pontos se mostrou polarizada com um erro médio $\overline{err}_{sc_4} = 1,368$ e um desvio padrão $\sigma_{sc_4} = 0,658$, que corresponde a uma faixa de 0 a 3%. Já a Figura 6.5(b) apresenta um erro médio $\overline{err}_{cc_4} = 0$ e um desvio padrão $\sigma_{cc_4} = 0,433$ que corresponde a uma faixa de -1,0% a 1,0%.

Para a pressão de 6kPa, os dados coletados foram armazenados nos arquivos: EN1608B, EN1707C e resumidos em CALC6KPA. Com estes valores foi encontrado um desvio de $\pm 3,0\%$, calculado em relação a 6kPa de pressão. Estes ensaios foram realizados na faixa de temperatura de 20°C a 65°C, como pode ser visto na Figura 6.6.

Como pode ser visto na Figura 6.6, a distribuição dos pontos devido à compensação aproximou-se mais do padrão DPG, ou seja o erro após a compensação foi reduzido para $\pm 0,5\%$ em relação ao valor da pressão de 6kPa, como mostrado na Figura 6.6. A maioria das normas calculam este erro em relação à faixa nominal à temperatura ambiente, então para este caso seria de $\pm 1,8\%$ sem compensação e $\pm 0,3\%$ com compensação. Para estes ensaios, a 6kPa, o número de patamares de temperatura conseguido foi menor do que a 4kPa, o que significa um número menor de pontos. Como mostrado na Figura 6.6 o total é de 12 pontos referentes aos desvios da saída do sensor de pressão devido à variação da temperatura do gás.

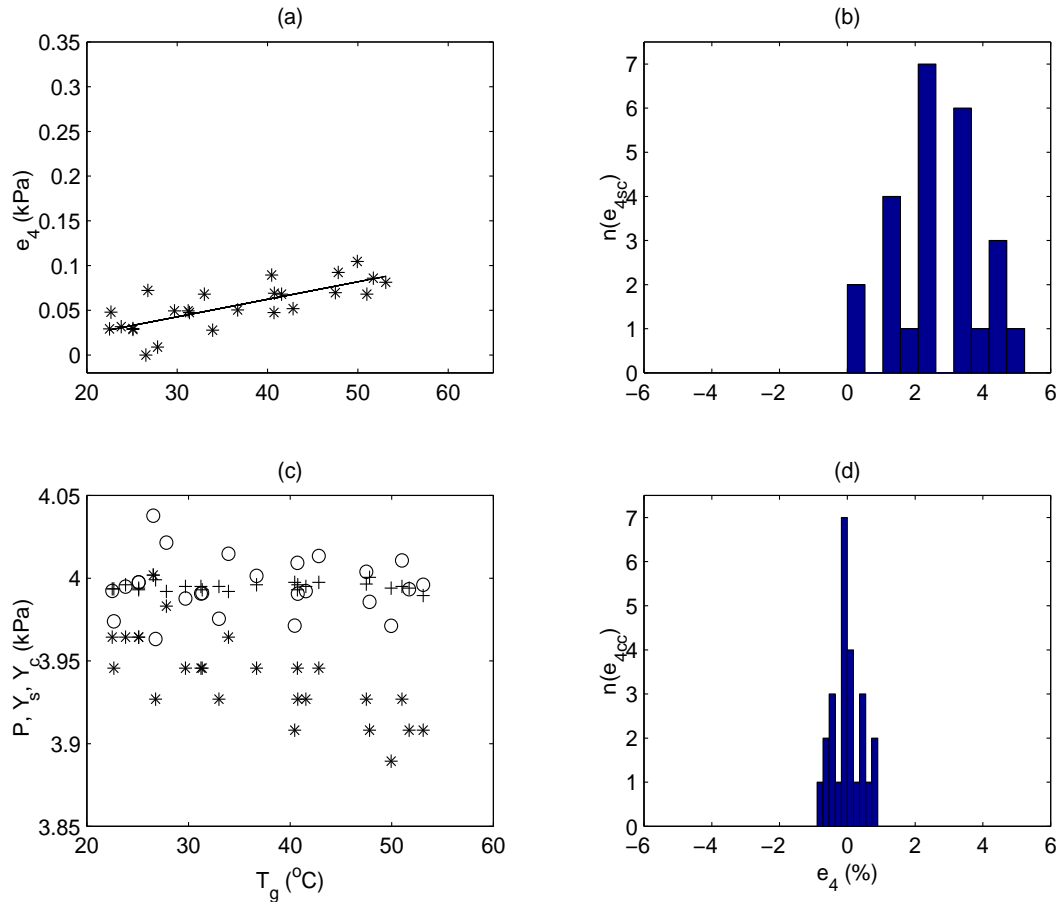


Figura 6.5: Erro em kPa da saída do sensor de pressão em relação a 4kPa de pressão aplicada e sem compensação de temperatura, CALC4KPA: (o) valores medidos e (-) valores estimados pela equação 6.1. Valores medidos e estimados para a pressão de 4kPa, CALC4KPA: (+) saída do DPG, (*) saída do sensor de pressão e (o) valores estimados para a compensação de temperatura. Erro em % da saída do sensor de pressão em relação à 4kPa, CALC4KPA: (a) sem compensação de T_g e (b) com compensação de T_g .

Neste caso, sem compensação, a população de pontos se mostrou polarizada com um erro médio $\overline{err}_{sc6} = 0,794$ e um desvio padrão $\sigma_{sc6} = 0,737$, que corresponde a uma faixa de 0 a 2%. Já a Figura 6.6(b) apresenta um erro médio $\overline{err}_{cc6} = 0$ e um desvio padrão $\sigma_{cc6} = 0,220$ que corresponde a uma faixa de -0,5% a 0,5%.

Finalmente para a última faixa de pressão a ser avaliada, 8kPa, os dados coletados foram armazenados no arquivo EN1608E e resumidos em CALC8KPA. Para esta faixa de pressão, o desvio encontrado foi de $\pm 4,0\%$ que foi calculado tomando como referência o valor de pressão aplicada. Estes ensaios foram realizados na faixa de temperatura de 20 a 50°C, como pode ser observado na Figura 6.7. E, que também mostra a distribuição dos pontos devido a compensação aproximou-se mais do esperado que é o padrão DPG, ou seja o erro após

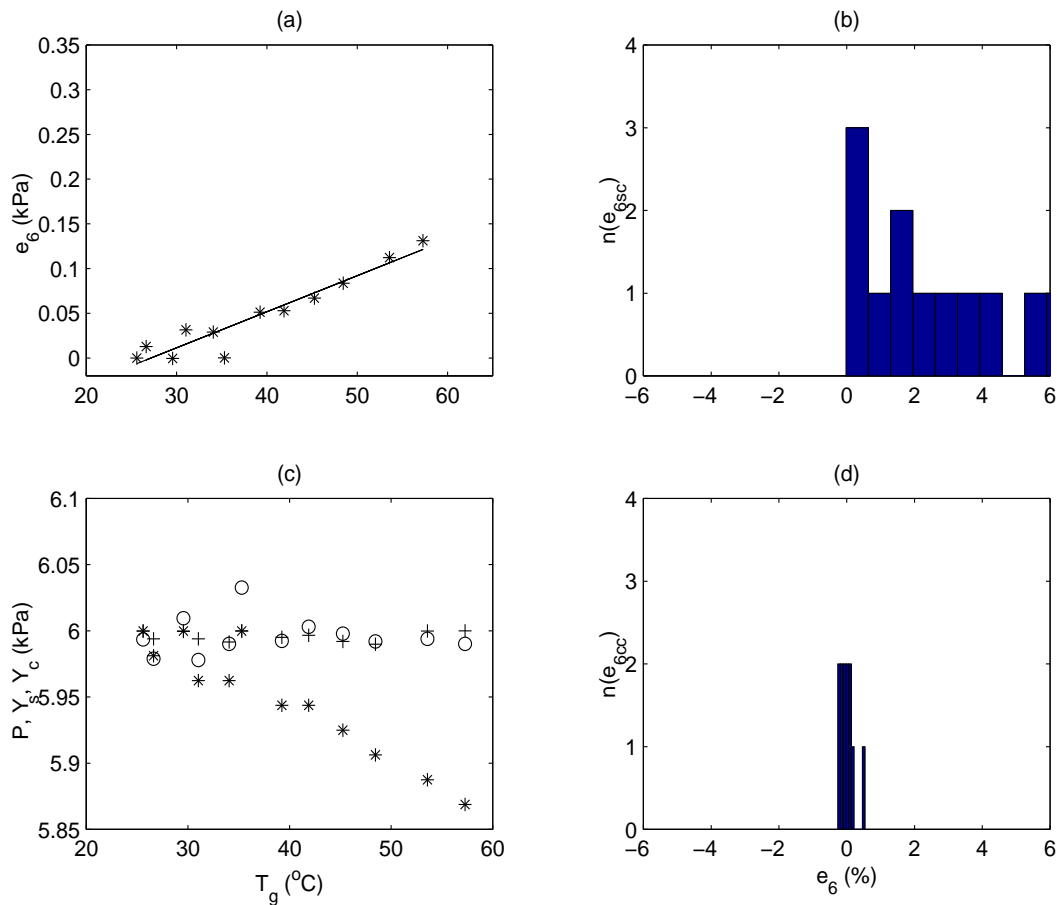


Figura 6.6: Erro em kPa da saída do sensor de pressão em relação a 6kPa de pressão aplicada e sem compensação de temperatura, CALC6KPA: (*) valores medidos e (-) valores estimados pela equação 6.1. Valores medidos e estimados para a pressão de 6kPa, CALC6KPA: Saída do DPG(+), saída do sensor de pressão (*) e a compensação de temperatura (o) para a pressão de 6kPa. Erro em % da saída do sensor de pressão em relação à 6kPa, CALC6KPA: (a) sem compensação de T_g e (b) com compensação de T_g .

a compensação foi reduzido para $\pm 1\%$ em relação ao valor da pressão aplicada, 8kPa, como mostrado na Figura 6.7(b). A maioria das normas calculam este erro em relação à faixa nominal à temperatura ambiente e para este caso seria de $\pm 3,2\%$ sem compensação e $\pm 0,8\%$ com compensação.

Para os ensaios a 8kPa o número de patamares de temperatura conseguido foi maior do que a 2kPa, o que significa um número maior de pontos. A Figura 6.7 mostra um total de 22 pontos referentes aos desvios na saída do sensor de pressão devido à variação da temperatura do gás. Neste caso, sem compensação, a população de pontos se mostrou polarizada com um erro médio $\overline{err}_{sc8} = 1,968$ e um desvio padrão $\sigma_{sc8} = 1,022$, que corresponde a uma faixa de 0 a 4%. Já a Figura 6.7(b) apresenta um erro médio $\overline{err}_{cc8} = 0$ e um desvio padrão $\sigma_{cc8} = 0,5033$ que

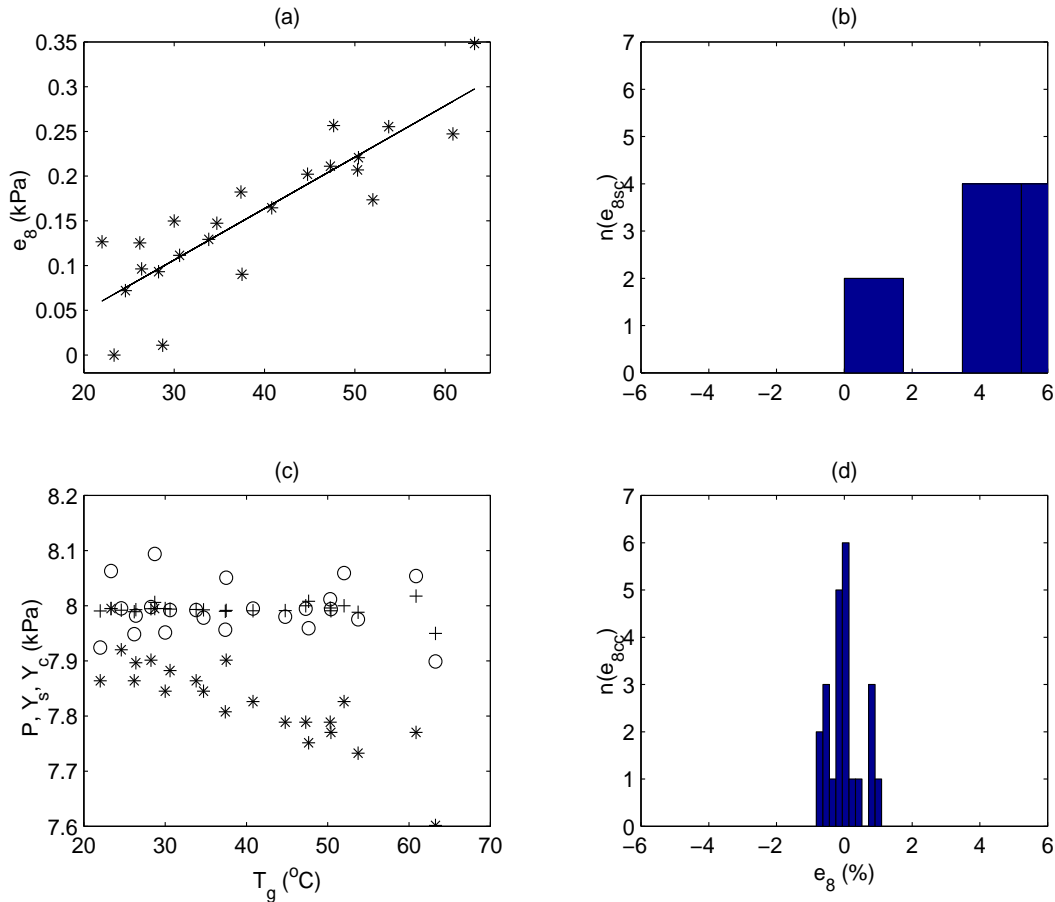


Figura 6.7: Erro em kPa da saída do sensor de pressão em relação a 8kPa de pressão aplicada e sem compensação de temperatura, CALC8KPA: (o) valores medidos e (-) valores estimados pela equação ???. Valores medidos e estimados para a pressão de 8kPa, CALC8KPA: Saída do DPG(+), saída do sensor de pressão (*) e a compensação de temperatura (o) para a pressão de 8kpa. Erro em % da saída do sensor de pressão em relação à 8kPa, CALC8KPA: (a) sem compensação de T_g e (b) com compensação de T_g .

corresponde a uma faixa de -1,0% a 1,0%.

Os resultados apresentados para os ensaios a 2, 4, 6 e 8kPa podem ser resumidos na Tabela 6.2. De acordo com esta tabela, pode-se ver que um aumento na dispersão de P , que deveria permanecer constante, provoca um aumento na dispersão dos erros das leituras da saída do sensor, Y_s . Isto significa que a pressão teve variações as quais são sentidas pelo sensor de pressão. Este fato é esperado porque se a pressão P não permanecer constante, como desejado, necessariamente ocorrerá variação na saída do sensor, Y_s , devido à variação de pressão e não devido à variação de T_g . O desvio padrão σ_{sc} é um indicativo da dispersão dos valores da saída do sensor de pressão, Y_s . Na Tabela 6.2, pode-se ver que o desvio padrão do erro sem compensação, σ_{sc} , para 2kPa é muito maior se comparado

Tabela 6.2: Resumo dos erros estimados compensação de T_g

P		sem comp.	sem comp.	com comp.	com comp.
kPa	σ_P	$e_{rr}\%$	σ_{sc}	$e_{rr}\%$	σ_{cc}
2	0,0068	5,0	2,290	1,5	0,887
4	0,0027	3,6	0,658	1,0	0,433
6	0,0038	2,3	0,737	0,5	0,220
8	0,0117	4,4	1,022	1,0	0,503

Sendo: P a pressão aplicada no sensor,
 σ_P é o desvio padrão das leituras do DPG,
 σ_{sc} é o desvio padrão das saídas do sensor de pressão sem compensação,
 σ_{cc} é o desvio padrão das saídas do sensor de pressão com compensação,
 e_{rr} é o erro calculado em relação à leitura de pressão.

aos demais desvios apresentados para as outras faixas de pressão. O valor do desvio σ_{sc} a 2kPa é mais que o dobro dos demais desvios. Este resultado é um indicativo de que pode ter ocorrido alguns fatores diferentes durante o teste a esta pressão. O fator mais agravante e que pode ter ocorrido durante a coleta dos dados a 2kPa é a não estabilização da temperatura do gás manométrico, T_g . Outro fator importante é o fato de ser o início da faixa de medição do sensor de pressão. Pequenas variações de pressão são proporcionalmente mais significativas do que para valores maiores de pressão. Na Tabela 6.2 pode-se ver também que a compensação provoca um maior agrupamento dos valores em torno de P, isto pode ser observado pela redução nos valores dos desvios padrão, comparando os desvios padrão sem compensação, σ_{sc} , com os desvios depois da compensação, σ_{cc} .

6.2 Validação da compensação da temperatura do gás manométrico

A compensação dos efeitos indesejáveis de T_g , proposta na seção anterior é baseada na análise dos resultados dos ensaios a 2, 4, 6 e 8 kPa. Agora será mostrada a viabilidade do desenvolvimento e escolha de uma função que possa ser usada para interpolar os coeficientes para a compensação dos efeitos de T_g para pressões diferentes das ensaiadas. Em seguida apresentados os resultados da validação da função de interpolação conseguida com a comparação entre o sensor de pressão e o DPG.

6.2.1 Validação dos coeficientes da reta de compensação

Como pode ser visto nas figuras dos resultados a 2, 4, 6 e 8kPa, o número de pontos conseguidos para cada faixa de pressão variou. Esta variação não possui correspondência com o valor da pressão aplicada e sim com o número de ensaios realizados e com a quantidade de patamares de temperatura controlados. A grande dificuldade de se conseguir o mesmo número de pontos para todos os ensaios é atribuída à dificuldade de estabilizar a temperatura nos mesmos valores e também devido ao fato de cada ensaio possuir um período muito longo de duração. A duração média de cada ensaio é da ordem de 6 horas e para cada valor de pressão foram realizados em média 4 ensaios, com um aproveitamento de aproximadamente 4 patamares de temperatura por ensaio. Isto mostra a grande dificuldade de controlar a temperatura T_g em um valor desejado e conseguir cada par ordenado (T_g, P, Y_s) . Os arquivos para a validação da curva de interpolação são: EN1109A, EN1109B e resumidos em VALIDA.

Estes erros foram calculados em relação à leitura da pressão aplicada. O cálculo do valor do erro em relação à leitura apresenta um valor maior do que se fosse calculado em relação à faixa nominal, ou seja, o cálculo do erro em relação à leitura é mais rigoroso do que se tomado em relação à faixa nominal. Se for garantida uma faixa de menos de 1% com esta referência, então será garantido um erro menor do que se for tomado como referência o fundo de escala.

Observando-se a Tabela 6.2, pode-se dizer que os erros foram reduzidos significativamente em todas as faixas de pressão. Para 2kPa, o erro foi reduzido de 5,0 para 1,5%, para 4kPa, o erro foi reduzido de 3,6 para 1,0%, para 6kPa, o erro foi reduzido de 2,3 para 0,5%, e para 8kPa, o erro foi reduzido de 4,4 para 1,0%. Isto significa que para toda a faixa do sensor o erro é menor do que $\pm 1,0\%$ calculado em relação à leitura, a menos de um ponto apresentado no ensaio a 2kPa. Este ponto 2kPa corresponde a 1,5% de erro e que pode ser atribuído a vários fatores como por exemplo a não estabilização da temperatura. Observa-se na Figura 6.4(b) que este ponto aparece isolado da população, o que implica a ocorrência de algum fator diferente dos demais.

O erro de polarização, que é o erro sistemático apresentado em todos os patamares de pressão, pode ser corrigido facilmente com um bloco somador na entrada e com valor constante, de amplitude igual ao erro sistemático e de sinal contrário. É bom lembrar que o erro sistemático depende das condições no início da calibração e, este erro é minimizado zerando a indicação do sensor para a pressão barométrica, no início de seu uso. A equação resultante para o valor estimado de Y_s é

$$\hat{Y}_s = m \cdot T_g + b + Y_s,$$

na qual pode-se ver que o valor estimado \hat{Y}_s é composto de duas partes. Na primeira parcela, $\underbrace{m \cdot T_g}$, há uma dependência da temperatura do gás. Como a função para compensação escolhida é a equação de uma reta, logo m é a inclinação desta reta. Já na segunda parcela, $\underbrace{b + Y_s}$, não há dependência da temperatura do gás T_g , porém aparece um erro sistemático caracterizado por b , este erro é basicamente um erro de zero. Deve-se lembrar que nos ensaios anteriores o sensor não foi zerado.

6.2.2 Verificação da equação para a compensação estática

Os valores de m resumidos na Tabela 6.1 correspondentes aos valores de pressão aplicada e pode ser estimado por uma regressão polinomial tomando-se como base os valores encontrados da Tabela 6.1. A equação de interpolação facilita estimar os valores de m para pressões que não foram ensaiadas, porém a sua implementação não é tão fácil quanto uma reta, já que devido à não linearidade na relação $m = f_3(P)$, normalmente é encontrado um polinômio de grau superior a 1 (um).

A escolha da equação para a interpolação de m , inclinação da reta de compensação, baseou-se na facilidade de sua implementação. O modelo de equação escolhido foi o polinomial. A equação do polinômio de menor grau, cujo erro máximo apresentado é menor que 0,1% é apresentado na equação 6.17.

$$\hat{m} = -0,0001604 \cdot P^3 + 0,00285 \cdot P^2 - 0,015308 \cdot P + 0,0279, \quad (6.17)$$

sendo \hat{m} o coeficiente estimado por interpolação para os valores de m em qualquer pressão P em kPa pertencente à faixa nominal.

Para a validação da equação de interpolação, equação 6.17, deve-se realizar novas coletas de dados a pressões não ensaiadas anteriormente, ou seja, não pode ser 2, 4, 6 nem 8kPa. As pressões escolhidas para estes testes foram 3 e 5kPa. A escolha do valor de pressão 3kPa se deve ao fato de ser um valor inteiro mais próximo do início da escala e que pode ser interpolado, lembrando que no início da escala o erro percentual normalmente é maior do que as demais faixas. Já a escolha do valor 5kPa se deve ao fato de ser a metade do fundo de escala, a qual o sensor é projetado para trabalhar. Os resultados são apresentados nas Figuras 6.8 e 6.9

Como pode ser visto nestas figuras, a implementação do bloco com a equação de compensação permite avaliar se os cálculos dos coeficientes estão de acordo com o esperado. Para o caso de 3kPa, Figura 6.8, foi observado que o desvio

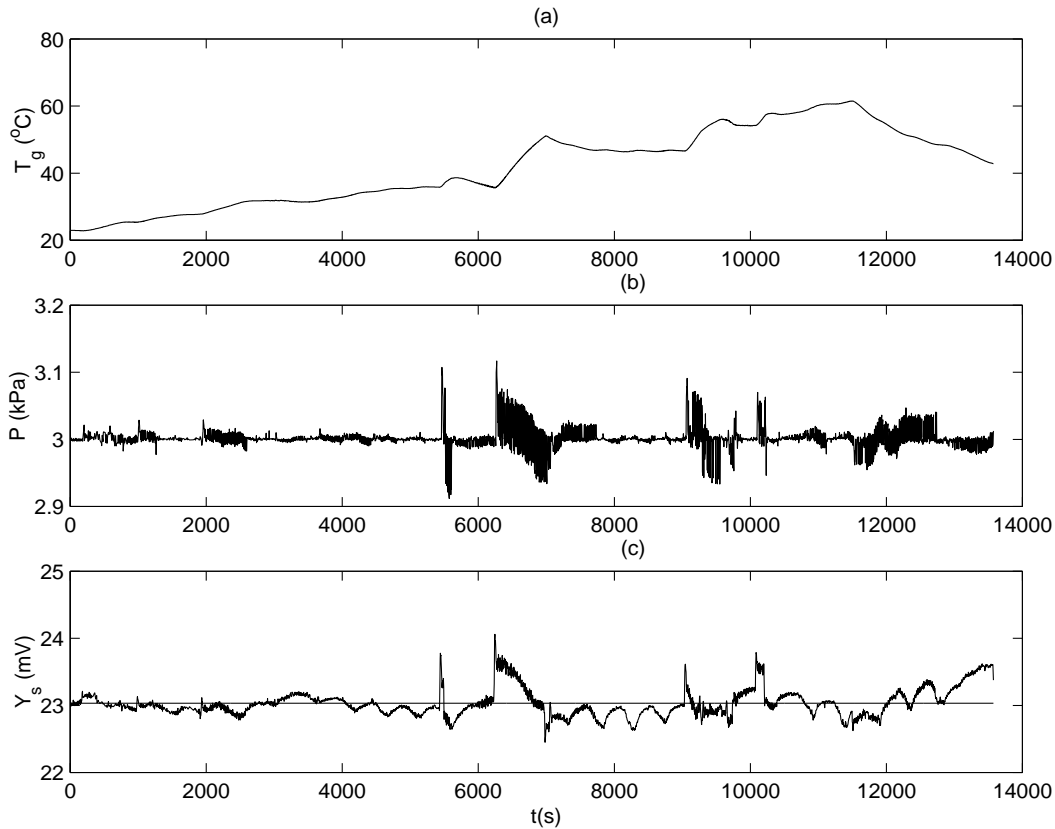


Figura 6.8: Validação dos parâmetros para compensação a pressão de 3kPa, VALIDA3.

continuava considerável, caso seja aplicada a correção resultante dos ensaios anteriores. Então o coeficiente foi alterado, empiricamente, até ser encontrado um valor de m_e que correspondesse a um erro próximo de 0. Para 5kPa foi feito o mesmo e os resultados são mostrados na Figura 6.9. Os resultados dos ensaios para a validação da equação 6.17, realizados a 3 e 5kPa, são apresentados na Tabela 6.3.

Observando a Tabela 6.3, o resultado do valor de $\hat{m}(3) = 0,031$ encontrado pela equação de interpolação não corresponde ao valor resultante $m_e(3) = 0,020$ dos dados coletados nos ensaios a 3kPa. Já o resultado do valor de $\hat{m}(5) = 0,030$ encontrado pela equação de interpolação é bem próximo de $m_e(5) = 0,028$ resultante dos dados coletados a 5kPa, sendo que o desvio padrão do cálculo de m_3 é $\sigma_3 = 3,5 \cdot 10^{-3}$ e o desvio padrão de m_5 é $\sigma_5 = 1,05 \cdot 10^{-3}$. Pode-se ver ainda que o valor obtido no resultado do ensaio a m_{e_3} não correspondeu ao estimado pela equação 6.17. A causa mais provável é que o valor de m_{e_2} não esteja correto, devido ao fato de um dos pontos estarem longe da população e esta população possuir poucos pontos se comparada às outras faixas de pressão ensaiadas.

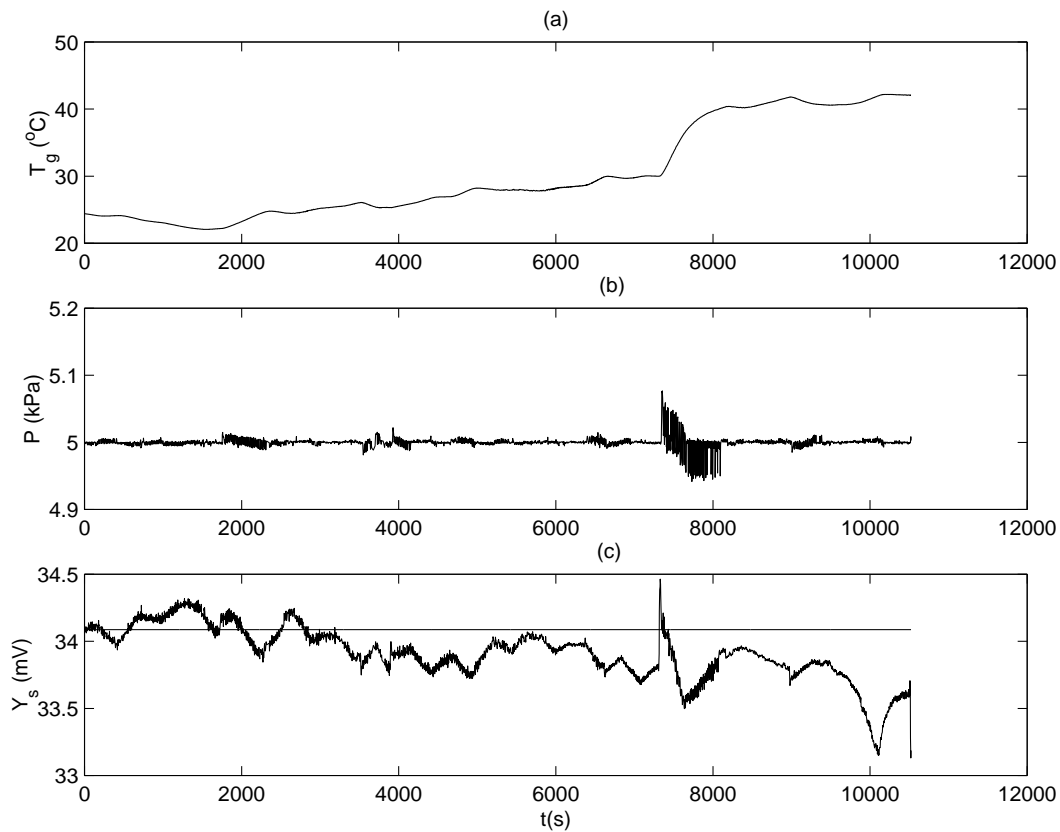


Figura 6.9: Validação dos parâmetros para compensação a pressão de 5kPa, VALIDA5.

6.2.3 Validação da compensação estática

Para a validação das equações de compensação encontradas na seção 6.1, foram escolhidas três faixas de pressão, de tal forma que pudesse ser avaliado o início, o meio e o final da faixa do sensor de pressão. Ou seja, foram escolhidos os valores de pressão de 2kPa, 5kPa e 8kPa.

Controlando a pressão em 2kPa, foram aplicados alguns patamares de temperatura no sistema da mesma maneira que o ensaio a 2kPa para o levantamento da função de correção, descrito na seção 3.10. Porém, um bloco somador foi introduzido no programa de aquisição de dados para a implementação da função de correção. Os resultados dos ensaios realizados a 2kPa com o valor de $m(2)=0,074$, mostrado na Tabela 6.1 não foi satisfatório e, empiricamente, foi encontrado um novo valor $m_e(2)=0,025$.

A suspeita de que o valor de m_2 não estava correto, foi comprovada na validação da equação de compensação a 2kPa. De fato, os resultados práticos da validação mostram o valor de $m_{e2} = 0,025$ e não $m_{e2}=0,074$ encontrado nas

Tabela 6.3: Verificação dos valores de m

P (kPa)	\hat{m}	m_e
3	0,031	0,020
5	0,030	0,028

Sendo P a pressão aplicada, \hat{m} é o valor estimado pela equação 6.17 e m_e é o valor encontrado empiricamente nos testes práticos.

Tabela 6.4: Validação dos novos valores de m

P (kPa)	\hat{m}	m_e
3	0,017	0,020
5	0,025	0,028

Sendo P a pressão aplicada, \hat{m} o valor estimado pela equação 6.18 e m_e é o valor encontrado nos testes práticos.

equações 6.6 e 6.11. O novo valor para o coeficiente m_2 foi encontrado realizando novos ensaios a 2kPa e implica uma nova equação de interpolação que é mostrada na equação 6.18,

$$\hat{m} = -0,0006 \cdot P^3 + 0,0101 \cdot P^2 - 0,0469 \cdot P + 0,083. \quad (6.18)$$

Os novos valores \hat{m} para 3 e 5 kPa são 0,017 e 0,026, respectivamente, e estão apresentados na Tabela 6.4

Com os novos valores dos coeficientes de m foram realizadas calibrações estáticas para três valores de temperatura T_g . Os resultados são mostrados na Figura 6.10, e resumidos na Tabela 6.5, podendo-se observar que são bem próximos dos valores encontrados nos ensaios.

Os procedimentos adotados são os mesmos procedimentos para a calibração estática à temperatura ambiente, descritos na seção 3.2. A Figura 6.10(a) mostra a resposta do sensor sem compensação da temperatura e a Figura 6.10(b) apresenta os resultados com compensação da influência da temperatura T_g , podendo-se comparar os valores médios do ganho, da linearidade e do *off-set*.

A média apresentada na Tabela 6.5 representa a média dos valores medidos nas respectivas temperaturas T_g e o desvio padrão destes valores.

Analisando o ganho do sensor, percebe-se uma diferença de 1,4% em relação ao valor do ganho compensado e o desvio padrão do ganho após a compensação

Tabela 6.5: Validação da compensação

T_g (°C)	Y _s sem correção		Y _s com correção	
	α_1	β_1	α_2	β_2
22,5	1,0077	0,1311	0,9979	0,0053
45,0	0,9878	0,0109	0,9937	0,0400
62,0	0,9794	0,1171	1,0142	0,1025
média	0,9916	0,0864	1,0060	-0,005
dispersão	0,0145	0,0657	0,0003	0,0280

sendo que:

T_g é a temperatura do gás,

α é o valor da inclinação da reta de calibração,

β é o valor de *off-set* da reta de calibração,

$$Y_s = \alpha \cdot P + \beta.$$

Tabela 6.6: Validação da compensação, continuação

T_g (°C)	sem correção		com correção		erro de linearidade (%)	
	σ_{α_1}	σ_{β_1}	σ_{α_2}	σ_{β_2}	sem	com
22,5	0,8873	0,0283	0,0045	0,0195	0,70	0,42
45,0	1,0470	0,0374	0,0063	0,0332	0,68	0,57
62,0	0,4265	0,0141	0,0071	0,0332	0,34	0,64
média	0,7869	0,0266	0,0060	0,0286	0,573	0,543
dispersão	0,3222	0,0117	0,0013	0,0079	0,202	0,112

Sendo σ o valor do desvio-padrão dos parâmetros da reta de calibração.

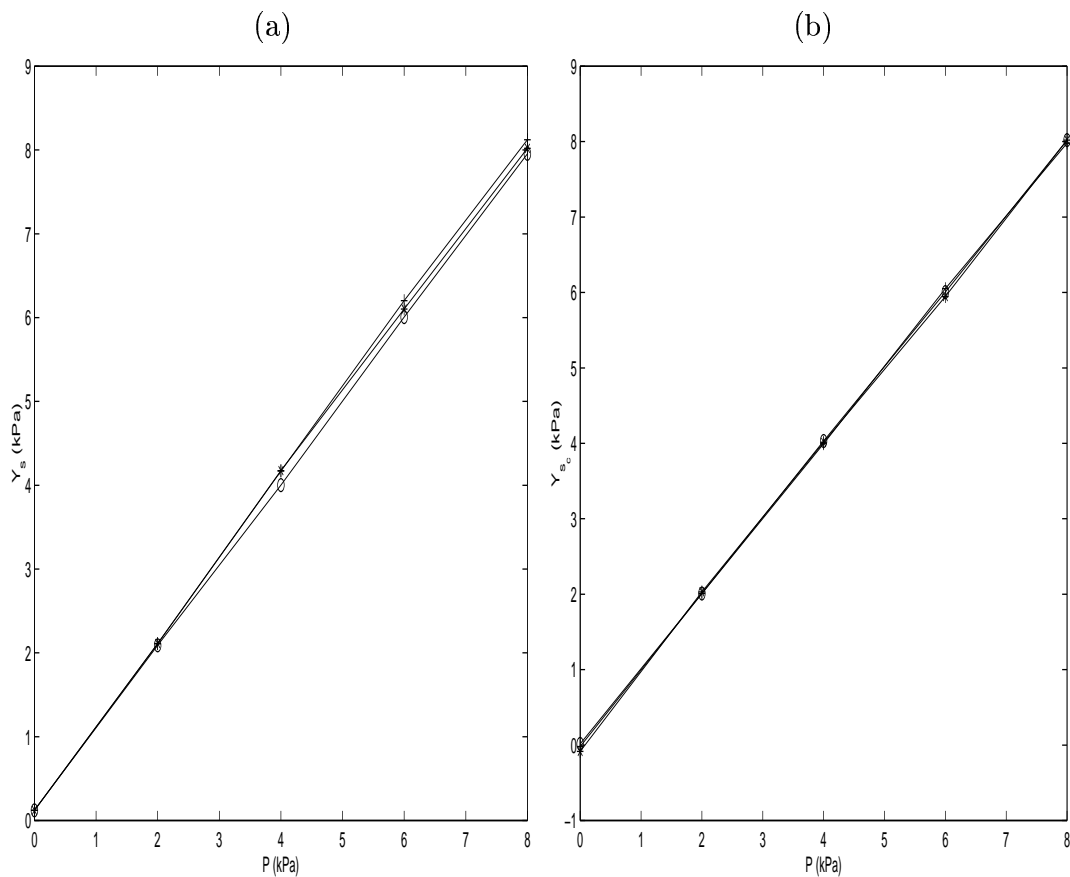


Figura 6.10: Validação dos parâmetros para compensação, VALIDA: (a) sem compensação e (b) com compensação.

é $\frac{1}{5}$ do valor do desvio padrão sem compensação.

Já para o valor do *off-set*, representado pelo símbolo β , é de 0,9% da faixa nominal sem compensação e 0,05% da faixa nominal com compensação. Para este caso, a dispersão dos valores de *off-set*, depois da compensação não apresentou redução no valor. Isto significa que a exatidão melhorou mas a precisão continua a mesma para os valores próximos de zero.

Finalmente, os valores das linearidades possuem os valores médios próximos, porém o desvio padrão após a compensação é a metade do desvio sem compensação. Isto significa que a dispersão dos valores encontrados para as linearidades são menores quando há compensação, o que é um resultado desejável.

Capítulo 7

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Este capítulo apresenta a análise dos resultados da compensação estática da temperatura do gás em um sensor de pressão de baixo custo e a análise dos efeitos da temperatura T_g no padrão DPG. Apresenta também algumas soluções possíveis para o problema causado pelo efeito da variação de T_g no DPG, e, finalmente, algumas sugestões de temas para trabalhos futuros.

Os resultados da correlação cruzada mostram que o sinal de temperatura é altamente correlacionado com o sinal de pressão. Nota-se que não é possível variar T_g rapidamente sem alterar a pressão. Portanto, não é necessário fazer a compensação dinâmica de T_g , pois a maior taxa de variação conseguida para T_g não é suficiente para provocar alteração na saída de S antes da variação de P. Então, pode-se concluir que as variações de T_g não são percebidas dinamicamente pelo sensor de pressão e sim estaticamente.

Já os resultados dos ensaios mostram que a temperatura realmente é uma entrada modificante, pois altera a função da saída do sensor de pressão. Tomando-se os resultados da compensação estática e comparando-se com a dispersão dos parâmetros: ganho, *off-set* e erro de linearidade, pode-se ver que com a compensação os desvios padrão destes parâmetros diminuíram significativamente, especialmente a do ganho que era de 0,7869 e reduziu para 0,0060, mostrada na Tabela 6.6. Isto implica em uma menor incerteza. A "incerteza" destes parâmetros pode ser dada pela combinação da dispersão dos valores do ganho, *off-set* e do erro da linearidade, ou seja, pode ser obtida pela dispersão dos valores encontrados em função da temperatura, dada por $u_{cd} = \sqrt{\sigma_{\alpha_d}^2 + \sigma_{\text{off-set}_d}^2 + \sigma_{e_{l_d}}^2}$, e que pode ser calculada, tanto para o caso de não haver a compensação, 0,3805, quanto para o caso de haver a compensação, 0,1123. Estes resultados mostram que antes da compensação, a influência da temperatura é mais significativa sobre o ganho e, depois da compensação, o efeito da temperatura é mais significativo sobre o valor

do erro de linearidade que é o que provoca o aumento da incerteza do sensor depois da compensação.

Enfim, conclui-se que o sensor pode ser usado como medidor de uso geral, mesmo sem compensação. Porém aplicando as devidas compensações e sendo bem sucedidas, o sensor compensado pode ser usado como referência para medidores de uso geral até 10kPa. Esta faixa de pressão é a mais solicitada para o DPG e é empregada para realização de calibração de medidores de uso geral. Com este sensor pode-se poupar o padrão DPG, aumentando a sua vida útil. A "incerteza" da calibração que é tomada pelos desvios dos valores medidos, $u_{cal} = \sqrt{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\text{off-set}}^2}$, reduziu de 7,87 para 0,29% da faixa nominal. O valor de u_{cal} é um indicativo da dispersão dos valores de ganho e de off-set, então, pode-se ver que a dispersão destes parâmetros reduziram significativamente.

No que diz respeito ao efeito da temperatura T_g sobre o DPG, pode-se ver nos gráficos das pressões em função do tempo que a transição de um dado patamar de temperatura a outro provoca uma instabilidade no controle da pressão. Esta instabilidade não foi compensada, pois o DPG é usado para calibrações estáticas e sob temperatura ambiente controlada.

A temperatura ambiente medida dentro do laboratório é de 23°C e sua variação influi nas medições de pressão. A variação da temperatura ambiente é devida ao controle do ar condicionado. Um ciclo foi medido em um dia, cuja temperatura externa era 20°C , em aproximadamente 20 minutos, sendo realizada no instante em que a frequência de entrada/saída de pessoas no laboratório era intensa. Logo uma proposta de solução para este problema é colocar um equalizador para a fonte de gás na entrada de alimentação do PPC1. Um esquema para este equalizador pode ser visto na Figura 7.1, o volume V_1 é um cilindro que seria utilizado para armazenar o gás do qual a temperatura seria equalizada. O cilindro possui em uma extremidade a entrada do gás e na outra a saída do gás.

Para o caso do laboratório estar trabalhando sob uma temperatura controlada na faixa de 23°C , a parte do arrefecimento poderia não ser utilizada se a temperatura alvo para o sistema fosse 25°C ou acima da temperatura ambiente. Neste caso o controlador trabalharia apenas com o aquecedor. O volume da câmara V_1 , mostrado na Figura 7.1, pode ser estimado totalizando o número de calibrações que cada cilindro de nitrogênio é capaz de realizar. Como é conhecido o volume do cilindro, pode-se estimar o volume/calibração. O volume V_1 deve ser no mínimo igual a três vezes o volume/calibração, para que se possa fazer pelo menos duas calibrações em um dia e ter um volume/calibração de reserva, de modo que a nova quantidade de gás a ser usada seja equalizada durante a noite.

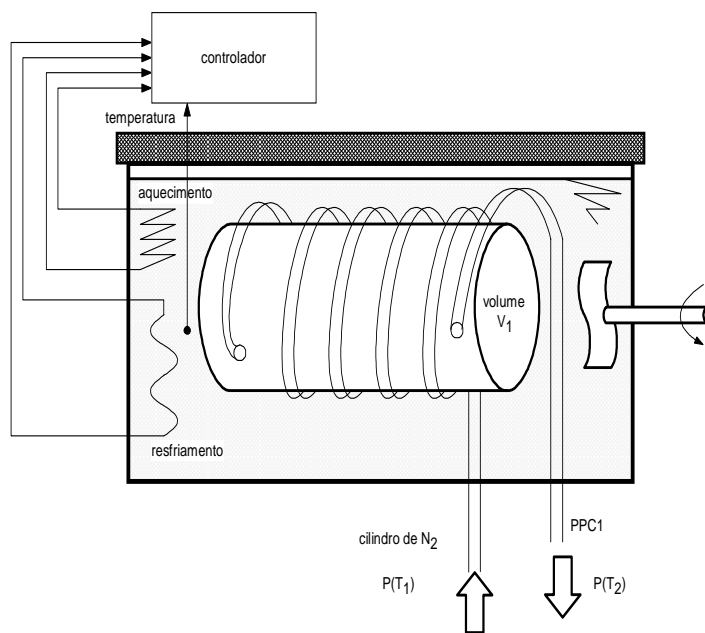


Figura 7.1: Câmara equalizadora e controladora da temperatura do gás manométrico.

Com este sistema, o gás entra no laboratório com uma pressão P e uma temperatura T_1 , é condicionado e sai para alimentação do PPC1 com pressão P e temperatura T_2 .

Há outros fatores que interferem na calibração de instrumentos de medição de pressão e que foram observados durante a realização dos testes no Laboratório Isaac Newton. Um destes fatores é percebido quando o ar-condicionado é ligado ou desligado. Quando o ar-condicionado liga ocorre um aumento de pressão dentro do laboratório, porém, esta variação que é da ordem de 25Pa, é compensada pelo PPC1 quando este está controlando a pressão. Um outro fator é o fluxo de ar provocado também pelo ar condicionado. O problema neste caso é que o PPC1 compensa esta variação, mas o instrumento a ser calibrado não, provocando um erro. Uma solução seria ligar a tomada de pressão atmosférica do instrumento a ser calibrado à tomada de pressão atmosférica do DPG, quando esta for acessível. Isto minimizaria os efeitos da variação de fluxo de ar que provoca uma variação na indicação do DPG. Um terceiro fator é a abertura das portas do laboratório. O laboratório possui dois portões de $2,5 \times 4,20\text{m}$ com uma distância de 1,80m entre eles, formando uma sala de condicionamento. Em cada um destes portões há uma porta de $0,8 \times 2,10\text{m}$, utilizada para o trânsito de pessoas. Esta estrutura pode ser vista na Figura 7.2. Com todas as portas e portões fechados e o ar condicionado em regime estacionário, abre-se a porta interna de fluxo de pessoas, e a variação de pressão indicada pelo DPG é da ordem de 20Pa. Este problema

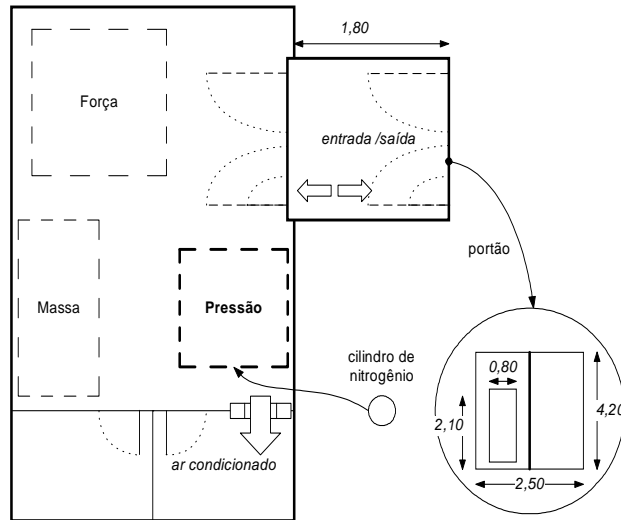


Figura 7.2: Croquis do Laboratório Isaac Newton do CETEC, localização do laboratório de pressão.

já é minimizado com o controle do número de pessoas dentro do laboratório.

Pode-se fazer várias sugestões para a continuação deste trabalho. Uma delas é realizar a análise dos efeitos eletromagnéticos provocados por radiação sobre os sensores de pressão.

Outra sugestão é desenvolver um sensor de pressão cujo sensor primário, sistema mostrado na Figura 2.1, incorporasse o sensor de temperatura, objetivando a correção de toda e qualquer influência térmica na medição de pressão e ainda proporcionando o desenvolvimento de um sensor de pressão inteligente.

Atualmente, no Brasil não são encontrados laboratórios que possuem métodos e procedimentos normalizados para ensaios e calibrações dinâmicas de sensores de pressão. Há uma deficiência muito grande na normalização para este tipo de ensaio. Portanto, o desenvolvimento de equipamentos e metodologia para testar dinamicamente sensores de pressão seria uma contribuição bem-vinda.

Finalmente, poderia se desenvolver um sensor inteligente para ser usado como padrão de pressão na faixa de 0 a 5kPa, com exatidão, precisão e incertezas compatíveis com esta faixa. Há uma deficiência muito grande para calibrar medidores de pequenas pressões, 0 a 5kPa. Os medidores usados nesta faixa são empregados, principalmente, em equipamentos biomédicos e normalmente não são calibrados.

Referências Bibliográficas

- (1990). *Fundamental Digital Pressure Standard type 23000M Positive - Shutoff Pressure controller1 (PPC1's) DH Desgranges et Hout*. DH - Desgranges et Huot, France.
- (1995). *HP 75000 Series B Manuals*. Hewallett Packard, Hewallett Packard Company - US.
- (1995). *HP E1300A/E1301A Mainframe - HP E1306A Command Module - Memory Module*. Hewallett Packard, Hewallett Packard Company - US.
- (1995). *HP E1326B/E1411B, 5 1/2 - Digit Multimeter Module, User's Manual*. Hewallett Packard, Hewallett Packard Company - US.
- (1995). *HP Instruments BASIC*. Hewallett Packard, Hewallett Packard Company - US.
- (1995). *HP VEE References*. Hewallett Packard, Hewallett Packard Company - US.
- (1995). *Using HP Instrument Basic with the HP E1300A/E1301A, User's Manual*. Hewallett Packard, Hewallett Packard Company - US.
- (1996). *HP Standard Instrument Control Library - User's Guide for Windows*. Hewallett Packard, Hewallett Packard Company - US.
- ABNT-MB-3082 (1989). *Manômetros - verificação das características*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Av. Treze de Maio, 13 - CEP:20003-900. classificação de sensores.
- ABNT-NBR8189 (1995). *Manômetro com sensor de elemento elástico*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Av. Treze de Maio, 13 - CEP:20003-900. nomenclatura para sensores de pressão.
- ABNT-NBR8189 (1998). *Manômetros com sensor de elemento elástico - recomendações de fabricação e uso*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Av. Treze de Maio, 13 - CEP:20003-900. tolerâncias.

- Aguirre, L. A. (2000). *Introdução à Identificação de Sistemas*. Editora UFMG.
- Chotai, A.; Young, P. C. and Behzadi, M. A. (1991). Self-adaptive design of a nonlinear temperature control system. *IEE - PROCEEDINGS-D*, 138(1):41–49.
- de Métrologie Légale, B. I. (1982). *Metrological characteristics of elastic sensing elements used for measurement of pressure determination methods*. International Organization of Legal Metrology, n. 53 edition.
- de Métrologie Légale, O. I. (1990). *Barometers*. International Organization of Legal Metrology, n. 97 edition.
- de Métrologie Légale, O. I. (1991). *Indication and redording pressure gauges, vacuum gauges and pressure-vacuum gauges whith elastic sensing elements (ordinary instruments)*. International Organization of Legal Metrology, n. 101 edition.
- de Métrologie Légale, O. I. (1993). *Pressure gauges and vacuum gauges with elastic sensing elements (standard instruments)*. International Organization of Legal Metrology, n. 109 edition.
- de Métrologie Légale, O. I. (1994). *Pressure balances (manomètres à piston)*. International Organization of Legal Metrology, n. 110 edition.
- Doebelin, E. O. (1990). *Measurement Systems*. McGraw Hill Publishing Company, 4th edition.
- Helsel, R. (1995). *A tutorial for HP VEE Graphical Programming*. A Prentice Hall PTR. HP Company.
- Karl, F. A. (1998). A successor to the wheatstone bridge: Nasa's anderson loop. *Cal Lab - The Internetional Jornal of metrology*, pages 23–32.
- Kayatas, E.; Katsikas, S. T. and Loumos, V. (1998). Automatic temperature compensation in fuel volume couting (fue tc). *Elsevier - Measurement*, 24:103–108.
- Molinar, G.; Bray, A. W. R. M. R. and Nespoli, L. (1992). Pressure transducer for pressure measurements in liquids up to 0,5gpa. *Elsevier - Measurement*, 24:161–172.
- Norton, J. P. (1986). *An Introduction to Identification*. Academic Press.
- of Legal Metrology, I. O. (1973). *Manometers for instruments for measuring blood pressure*. International Organization of Legal Metrology, n. 16 edition.

- of Legal Metrology, I. O. (1975). *Tyre pressure gauges for motor vehicles*. International Organization of Legal Metrology, n. 23 edition.
- Ogata, K. (1990). *Engenharia de Controle Moderno*. Prentice/Hall do Brasil, 2th edition.
- Patra, J. C.; Panda, G. and Baliarsingh, R. (1994). Artificial neural network-based nonlinearity estimation of pressure sensors. *IEEE Transactions Instrumentation and Measurement*, 43(6):874–881.
- Patra, J. C. (1997). An artificial neural network-based smart capacitive pressure sensor. *Elsevier - IMEKO Intl. Jnl. Measurement*, 22(3):113–121.
- Patra, J. C. and Bos, A. (1999). Modeling and development of an artificial neural network-based smart pressure sensor in a dynamic environment. *Elsevier - IMEKO Intl Jnl Measurement*, 26(4):249–262.
- Patra, J. C. and Bos, A. (2000a). Auto-calibration and compensation of a pressure sensor using multilayer perceptrons. *Elsevier - ISA Transactions*, 39(2):175–190.
- Patra, J. C. and Bos, A. (2000b). Modeling of an intelligent pressure sensor using functional link artificial neural networks. *Elsevier - ISA Transactions*, 39:15–27.
- Patra, J. C. and Panda, G. (1998). Artificial neural network-based intelligent pressure sensor in noisy environment. *Elsevier - IMEKO Intl Jnl Measurement*, 23(4):229–238.
- Pereira, J. M. D. P. O. and Girão, P. M. B. S. (1998). A temperature - compensated system for magnetic field measurements based on artificial networks. *IEEE - Transactions on Instrumentation and Measurement*, 47(2):494–498.
- Yang, Fuqian; Kao, I. (2000). Analysis of fluid flow and deflection for pressure-balanced mems diaphragm valves. *Elsevier - Sensores and Actuators - A*, 79:31–35.

Anexo A

O Anexo está dividido em quatro partes: A primeira parte, Anexo A, apresenta as terminologias e nomenclaturas usadas no texto. A segunda parte, Anexo B, mostra os dados técnicos dos equipamentos, dos sensores utilizados e do sistema de aquisição de dados. A terceira parte mostra alguns programas e *softwares* utilizados na aquisição dos dados das montagens. E, finalmente, a quarta parte apresenta as teorias básicas de alguns tópicos importantes: Teoria básica de sistemas lineares, de sinais aleatórios.

Terminologia

- **Ajuste** - operação realizada para que a indicação do instrumento esteja dentro da tolerância especificada, ajustando-se os parâmetros do instrumento e comparando-se com um padrão
- **Alcance** - limite das pressões inferior e superior da escala
- **Barômetro** - medidor da pressão barométrica
- **Calibração** - operação através da qual encontra-se a relação entre o valor indicado em um instrumento e um padrão
- **Condições ambientais** - condições externas que envolvam o instrumento, umidade, névoa salina, vibração, atmosfera corrosiva, etc., que podem afetar a vida ou a exatidão do instrumento
- **Condições de serviço** - condições internas inerentes ao processo, incluindo pulsações da pressão, meio corrosivo, viscosidade, etc., que podem afetar a vida ou a exatidão do instrumento
- **Erro de exatidão** - diferença entre as médias das leituras de um instrumento e valor do padrão

- **Erro de linearidade** - máximo desvio entre a leitura real (média das leituras ascendentes e descendentes) e a linha reta ajustada por regressão linear
- **Erro de repetibilidade** - diferença máxima entre as indicações para uma mesma pressão aplicada em iguais condições de operação, abordadas em um mesmo sentido
- **Erro por histerese** - diferença máxima entre leituras ascendentes e descendentes em qualquer ponto da escala, obtida durante a deflexão do elemento elástico e retorno completo do ponteiro, após terem sido minimizados os erros por atrito
- **Erro por temperatura** - erro de indicação causado pela diferença existente entre a temperatura ambiente e a temperatura do fluido, com a temperatura na qual o manômetro foi calibrado
- **Escala** - graduações e valores numéricos correspondentes, gravados no mostrador
- **Faixa** - valor de pressão compreendido dentro do alcance de indicação do instrumento
- **Graduações** - divisões e subdivisões da escala
- **Manômetro** - instrumento para medir e indicar pressão maior que a pressão ambiente ou menor que a pressão ambiente (vacuômetro), ou ambas (manovacuômetro), usando a pressão ambiente como ponto de referência
- **Montagem** - maneira pela qual o instrumento é fixado na bancada e ligado ao padrão
- **Pressão barométrica** - indicação da pressão atmosférica local
- **Pressão estável** - pressão com uma variação total até 6% no minuto da pressão total da escala
- **Pressão inicial de escala** - valor numérico na graduação da escala, correspondente à menor pressão de medição
- **Sobrepessão** - aplicação de uma pressão que ultrapassa a pressão total de escala
- **Tolerância** - desvio máximo permitido, comparado a um padrão, expresso em porcentagem, da faixa do instrumento. Os erros de tolerância incluem histerese e repetibilidade, mas não o erro causado por atrito

Anexo B

Descrição dos materiais e equipamentos utilizados

B.1 Lista dos principais materiais utilizados

- Sensor de pressão, (Figura B.1)
 1. marca: Omega
 2. modelo: PX
 3. faixa nominal: 1,5PSI
 4. sensibilidade: 50mV/PSI
 5. tipo: piezoresistivo
 6. excitação: 1,5mA (5,0V)
- Padrão Digital de Pressão
 1. marca: Desgranés & Hout - DH
 2. modelo: 2300 M
 3. faixa nominal: 40kPa
 4. princípio: pistão - classe S2
 5. incerteza: $\pm(2,00Pa + 5,010^{-5} \times P)$
- Controlador do Padrão Digital de Pressão, PPC1
 1. marca: Desgranés & Hout - DH
 2. modelo: 55693A
 3. faixa nominal: 100PSIG
 4. incerteza: $\pm 0,2\%$ da faixa nominal
- Sistema VXI (aquisição de dados)

1. marca: Hewlett Packard
 2. modelo: 75000A
 3. placas disponíveis:
 - (a) voltímetro 5 1/2 dígitos HP E1326
 - (b) multiplexador a relé 16 canais HP E1345
 - (c) multiplexador CMOS 16 canais HP E1355
 - (d) conversor analógico/digital HP E1328
 - (e) entrada/saída HP E1356
 - (f) relé HP E1364
- Estufa de secagem e esterilização
 1. marca: EANEM
 2. modelo: 320-SE
 3. controle: on-off
 4. ajuste de controle: 0-10 (ambiente a aproximadamente 300 °C)
 5. indicador de temperatura: não
 - Medidor de temperatura
 1. marca: Tektronix
 2. modelo: DTM 510
 3. resolução: 3 1/2 dígitos
 4. sensor: termopar tipo K
 - Manômetro
 1. tipo: coluna d'água
 2. comprimento: 950 mm
 3. material da coluna: Parflex 6,35mm
 4. fluido manométrico: água
 - Corante
 1. marca: DWYER Instruments Inc.
 2. tipo: corante fluorescente verde
 3. finalidade: fluido para medidor
 4. preparo: misturar uma quantidade em água destilada
 - Escala graduada

1. marca: Mitutoyo
 2. modelo: 182 - 165
 3. comprimento: 24" ou 600mm
 4. resolução: $\frac{1}{128}$ " ou $\frac{1}{2}$ mm
- Aplicador de pressão
 1. tipo: mangueira cirúrgica de borracha flexível
 2. tamanho: 20cm
 3. aplicador: duas placas paralelas apertadas por parafusos
 4. diâmetro da mangueira: 6,35mm
 - Fonte de alimentação, (Figura B.2)
 1. marca: fabricação própria
 2. tensão de alimentação: 127V
 3. saída: 0-30 Vdc
 4. ripple: $10\mu V$
 - multímetro, (Figura B.2)
 1. marca: Hewlett Pacard
 2. modelo: 34420A
 3. resolução: 10nV
 4. canais: 2

B.2 Detalhamento dos principais equipamentos

B.2.1 Sensor de pressão

Os parâmetros do sensor de pressão mostrado na Figura B.1, são encontrados no catálogo do fabricante. O parâmetro que fornece o tempo de acomodação do sensor de pressão utilizado não é encontrado neste catálogo, porém o fabricante fornece este parâmetro para sensores similares, e pode ser encontrado também no catálogo de sensores do fabricante DRUCK, que fornece a faixa de passagem de frequência em função da pressão aplicada. De acordo com os catálogos da OMEGA e DRUCK, a menor frequência de corte é de 10kHz, sendo este valor tomado como referência para análise no domínio da frequência.

O sensor utilizado é do tipo diferencial e é o de número 4 da Figura B.1(a). O encapsulamento é de metal amarelo, latão, apresentando grande facilidade no

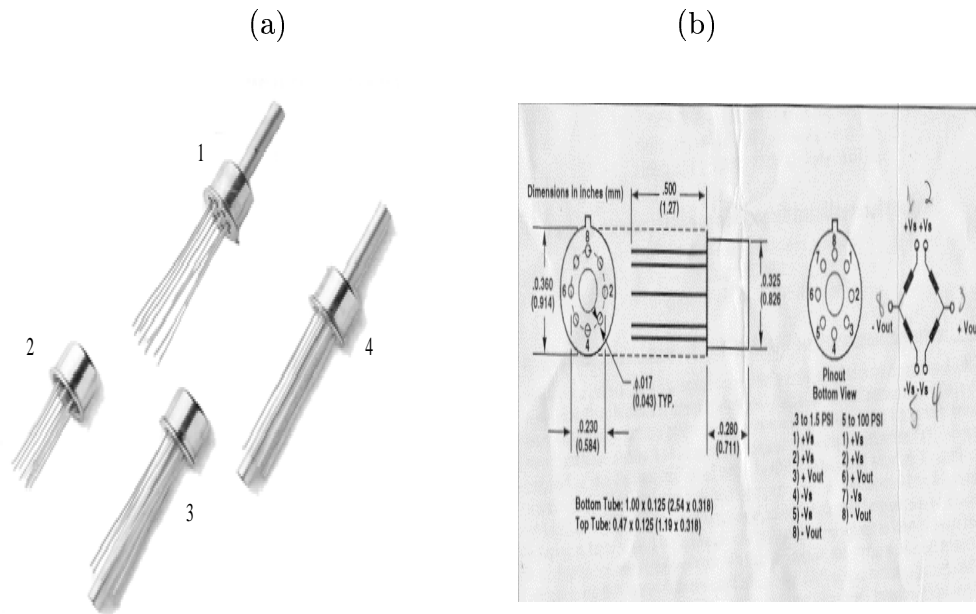


Figura B.1: Sensor de Pressão: (a) Modelos de encapsulamento de sensor da série PX, 4 - Sensor de pressão utilizado e (b) Pinagem do sensor.

processo de soldagem. A grande desvantagem deste modelo é que a pinagem encontra-se no mesmo sentido de uma das tomadas de pressão dificultando a confecção do cabo, composto pelos fios de alimentação e transmissão do sinal do sensor.

B.2.2 Multímetro

O multímetro utilizado (Figura B.2) é capaz de medir tensão da ordem de 10nanovolts ($10 \times 10^{-9}V$) em dois canais, e de apresentar uma operação matemática destes canais. No caso desta montagem, um canal foi usado para medir a tensão de alimentação e o outro para medir o sinal de saída, apresentando no mostrador a relação saída/entrada em $\mu V/V$.

B.2.3 Sistema de aquisição de dados - VXI

O que é o sistema VXI? .

Antes de 1987, o principal padrão de arquitetura para instrumentação existente era o *General Purpose Interface Bus* (GPIB). Embora o GPIB fosse extensamente usado, não satisfazia as necessidades das estações de testes portáteis, nem apresentava soluções para a demanda de mercado para ensaios mais rápidos

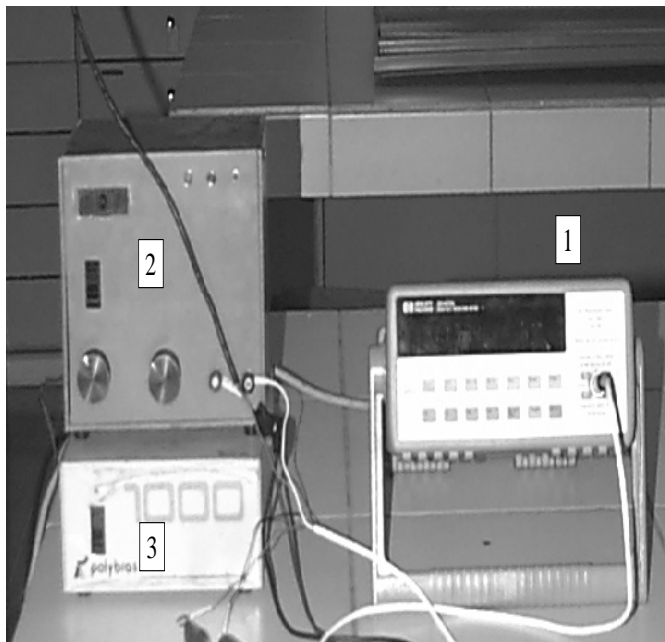


Figura B.2: 1 - Multímetro HP, 2 - Fonte de de alimentação e 3 - Estabilizador de tensão.

e com um melhor custo-benefício.

Em 1987, um consórcio de companhias de ensaios e medidas apresentou um novo padrão para arquitetura de instrumentos, o VXIbus (**V**MEbus e**X**tensions for **I**nstrumentation) que foi desenvolvido para satisfazer as necessidades das aplicações portáteis e prover um padrão arquitetura aberta, modular, para integrar-se aos sistemas de ensaios que já utilizavam o tradicional GPIB e para aplicações em funcionamento *stand-alone*. Foi projetado para ser um padrão de arquitetura aberto para os instrumentos que usava cartões, permitindo que um instrumento de qualquer fabricante possa operar no mesmo mainframe¹ de outro fabricante.

O VXI foi desenvolvido para uma arquitetura completamente nova. O Consórcio de VXIbus decidiu aumentar as exigências para o padrão existente e que funcionasse bem na aquisição de dados em alta velocidade e que fossem usados em computadores comerciais, o VMEbus.

A arquitetura de VMEbus, conhecida por seu *backplane* computacional ex-

¹envólucro onde são colocadas a placa, fonte e instrumentos que compõe o equipamento VXI

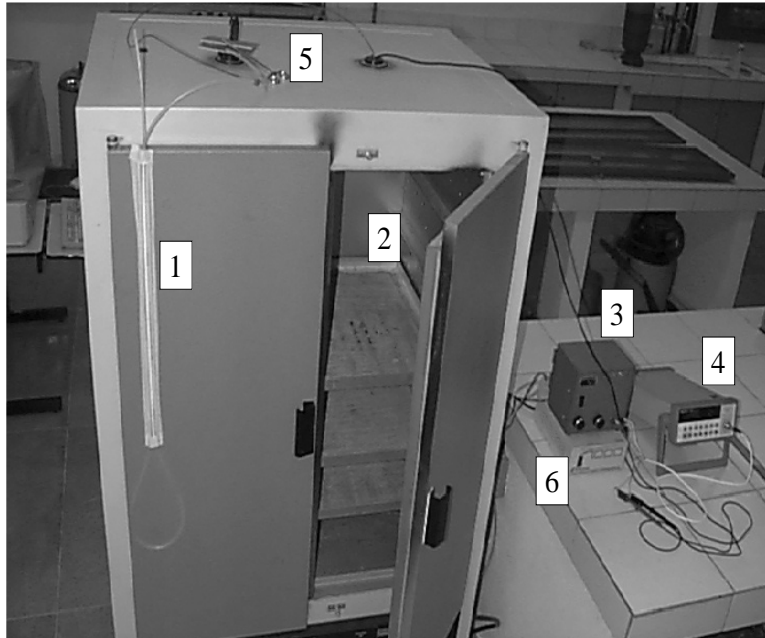


Figura B.3: Câmara de esterilização. 1 - Manômetro de coluna d'água, 2 - Interior da câmara de esterilização, 3 - Fonte de alimentação, 4 - Multímetro HP, 5 - Aplicador de pressão e 6 - Estabilizador de tensão.

celente, é capaz de coletar dados em alta velocidade com taxa de 40 MB/s, juntamente com os protocolos de comunicação necessários. Este sistema trouxe a idéia de instrumento ideal para a construção de instrumentos com processamentos rápidos de dados. O VXIbus incorpora a facilidade do uso às características dos instrumentos inteligentes do GPIB (por exemplo, programação no nível ASCII) em seu dispositivo *message-based*, e também tira proveito da capacidade de alto processamento de dispositivos VME que são programados e comunicam diretamente em binário (*dispositivos register-based*).

Embora VME seja um *backplane* de computador excelente, não é adequado para instrumentação, se não for adicionada uma padronização especial. Então, o Consórcio de VXIbus aumentou as exigências do padrão de VMEbus definindo parâmetros para que, posteriormente, possa permitir que os usuários facilmente configurem um sistema executável. Alguns dos encarecimentos adicionados ao padrão de VMEbus eram:

- 1 - Opções de cartões maiores para instrumentos de desempenho mais altos e com proteção.
- 2 - Definição de todos os sinais no *backplane*, evitando problemas devido a sinais

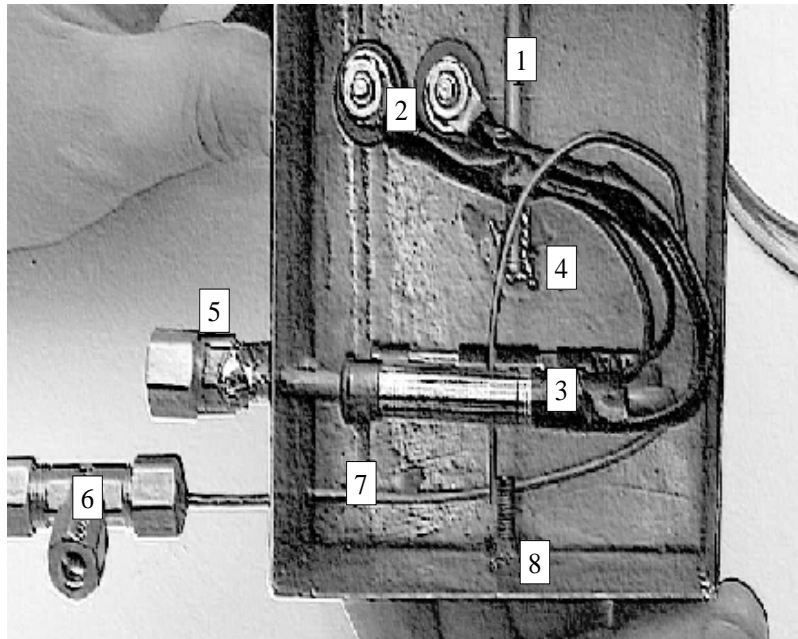


Figura B.4: Câmara de condicionamento do fluido manométrico (nitrogênio): 1 - Sensor de temperatura RTD868, 2 - Terminais de alimentação do aquecimento, 3 - Resistências para o aquecimento, 4 - Superfície onde foi soldado o sensor de pressão, 5 - Terminais de conexão do sistema de arrefecimento, 6 - Conexão "T" para ligação da linha de pressão e o DPG, 7 - Tubo para tomada de pressão e 8 - Parafuso.

definidos pelo usuário no VMEbus.

3 - Adição de controle de temperatura interna, esfriando e apresentando especificações de potência.

4 - Não apresentar interferência eletromagnética nas placas dos instrumentos e com facilidade de integração do sistema.

5 - Definição de protocolos de comunicação para facilitar a integração com sistemas de testes existentes.

6 - Adição de fontes de tensão para instrumentos de alto desempenho.

Um sistema VXIbus ou subsistema consiste em um VXIbus *mainframe*, dispositivos VXIbus, um cartão de VXIbus *slot-0*, VXIbus gerente de recurso, e controlador principal. O *slot-0* possui encaixes para placas de instrumentos e faz a administração de *backplane*, inclui partes como relógio, fontes e gerenciamento de movimentação de dados. O módulo que entra neste *slot* tem que executar estas funções de *hardware* e suas funções normais. O gerenciador de recursos configura os módulos para operação própria, sempre que o sistema é ligado ou é resetado, permitindo que o usuário construa seu *software* para seu ensaio usando o sistema com um ponto de partida conhecido. O gerente de recurso não é

envolvido, uma vez que o sistema de VXIbus começa a operação normal. O *Mainframe* do VXIbus aloja os instrumentos VXIbus e contém a fonte de alimentação e o mecanismo de refrigeração que mantém estes instrumentos, como também o *backplane* de comunicação na temperatura adequada de trabalho. O VXIbus não foi projetado para substituir nenhum padrão existente, mas sim como uma ferramenta adicional para ajudar em ensaios ou soluções de aquisição de dados. Para este fim vários métodos de comunicando com dispositivos de VXIbus foram definidos e habilitam soluções para que o VXIbus seja integrado ao VMEbus, GPIB ou como soluções portáteis *stand-alone*.

No que se refere às comunicações, que é outra área de padronização de VXIbus, são especificados vários tipos de dispositivos e protocolos, como também *handshakes* de comunicação; porém, deixa uma parte flexível para o programador que até pode controlar o *mainframe* de VXIbus e a arquitetura de abertura de dispositivos. Um sistema de VXIbus ou subsistema pode ser controlado usando um computador externo que pode ter sistema operacional ou plataforma independente, i.e., Windows, DOS, UNIX. Se um computador externo é usado, a interface ao barramento VXIbus também pode ser flexível, i.e., GPIB/VXI, MXI/VXI, RS-232/VXI, Ethernet/VXI. Qualquer aproximação usada tem suas vantagens e desvantagens dependendo das exigências do sistema global. Cada *mainframe* de VXIbus tem que ter um cartão *slot-0*. Por causa da avaliação de estado real, as funções do *slot-0* são tipicamente integradas com a *interface* para o processador externo ou com o processador embutido.

O Consórcio das maiores empresas que fabricam o sistema VXI, conhecida como Aliança VXIplug&play, criou especificações para unificar os *drivers*² de instrumentos, painéis frontais agradáveis de operar, *software* de *interface* de comunicações de entrada/saída, programas de instalação e documentação de ajuda *on-line*. São definições baseadas nos tipos de computador e sistema operacional a serem usados. O sistema mais comum é o *Windows* e é suporte para fabricação de todos os instrumentos virtuais. Fisicamente, o sistema é menor, mais rápido, menos caro se comparado aos instrumentos tradicionais. A natureza competitiva do mercado de hoje está colocando demandas crescentes em provedores de instrumentação, e o VXIbus é bem apropriado para suprir estas demandas agora e no futuro. *Software* com dispositivos de densidades mais altas e instrumentos modulares de mais baixo custo estão sendo usados para conectar os dispositivos a novos barramentos, provendo soluções de sistema ainda indefinidos e promovendo o desenvolvimento de cartões específicos para aplicações específicas em todas as áreas industriais, onde o sistema VXI está sendo novidade e está causando impacto.

²Programas de computador para trocar dados com dispositivos

B.2.4 Descrição do VXI utilizado

O VXI utilizado na aquisição dos dados é composto de uma placa mãe, fontes de alimentação, placas de interfaces serial e GPIB, um multímetro HPE1328, uma placa multiplexadora HPE1345, uma placa multiplexadora HPE1355, uma placa de relés HPE1364, uma placa de entrada/saída digital HPE1326 e um circuito pré-programado com o IBASIC interno, um gabinete de (50 × 20 × 50)cm. Na parte frontal está localizado um teclado para programação e seleção de parâmetros das placas internas. Na parte traseira encontram-se os *slots* para encaixe dos terminais usados para conexão de cabos e fios. A seleção entre o modo de operação local ou remoto é conseguido por meio de uma chave localizada na parte traseira do módulo VXI. Os endereços e sub-endereços eletrônicos usados no equipamento VXI são os definidos nos manuais do fabricante.

B.2.5 Padrão Digital de Pressão

O padrão utilizado é um padrão secundário com o princípio de funcionamento baseado na detecção de nulo. Possui um pistão que é forçado a permanecer sempre na mesma posição e fica localizado dentro de uma camisa que é forçada a girar por um motor. O movimento da camisa em relação ao pistão favorece a redução do atrito entre estes dois corpos. Quando o pistão sofre algum deslocamento, um sistema magnético faz com que volte a posição inicial e a medida da corrente necessária para realizar esta operação é função da pressão aplicada no pistão, que fica flutuando em uma determinada posição.

A resolução do DPG é da ordem de 0,01Pa, possui uma incerteza de $\pm(2,00Pa + 5,010^{-5} \times P)$ e é utilizado para a maioria das calibrações até a faixa de 40kPa.

B.2.6 Controlador de Pressão, PPC1

O PPC1 é o controlador de pressão acoplado ao DPG para manter a pressão em um valor desejado e possui três válvulas de diferentes aberturas. Seu princípio de funcionamento é baseado no tempo de abertura da válvula e a escolha da válvula a ser utilizada no controle é feita automaticamente pelo controlador. Um dos critérios de escolha é o volume de gás requerido pelo sistema para atingir uma determinada pressão. Para que o PPC1 determine o volume de controle é necessário que se faça a configuração do PPC1 antes de iniciar o seu uso. Caso não seja executada a configuração do PPC1, pode ser que o controle não seja adequado. A observação mais comum para este caso é a demora para atingir a pressão desejada; porém, há casos em que o volume de uma montagem é tão reduzido em relação a anterior que pode haver sobre-pressão, principalmente para valores próximos da faixa nominal do medidor a ser calibrado.

Anexo C

C.1 Programas para aquisição de dados

O programa para aquisição dos dados foi desenvolvido com as ferramentas do *software* HPVÉE no sistema operacional *Windows*, podendo ser utilizado também no sistema operacional MS-DOS. A Figura C.1 mostra o painel do programa que é a interface amigável entre o programa e o usuário. Já a Figura C.2 apresenta os blocos e as linhas de fluxo do programa, cujo painel é mostrado na Figura C.1. Para a aplicação do sinal chaveado foi desenvolvido outro programa que é mostrado na Figura C.3 necessita de três sub-rotinas: a primeira sub-rotina é a aquisição de dados, já mostrada; a segunda é para gerar um sinal chaveado cujo detalhamento é mostrado na Figura C.4. Finalmente, a terceira sub-rotina é para aplicar o sinal chaveado, mostrado na Figura C.5. Este programa consiste basicamente em gerar um número aleatório, e este número será o tempo de aquecimento. Decorrido este período de tempo, outro número aleatório é gerado e será o tempo de resfriamento, e então volta a gerar outro número aleatório para o aquecimento. Estes números aleatórios são gravados em um arquivo, de tal forma que depois de ter ocorrido uma quantidade pré-determinada de chaveamentos, o índice dos números aleatórios passa a apontar para o primeiro número aleatório gerado e então repete-se a seqüência de chaveamentos. Com este programa procurou-se aproximar o sinal chaveado de um sinal PRBS, apresentado em detalhes no Anexo D.

- passo 1 → gera um número aleatório,
- passo 2 → zera o cronômetro,
- passo 3 → começa a contar o tempo,
- passo 4 → muda o estado do relé,
- passo 5 → quando o tempo for igual ao número aleatório gerado, então,
- passo 6 → gera outro número aleatório,
- passo 7 → zera o cronômetro,
- passo 8 → começa a contar o tempo,
- passo 9 → muda o estado do relé,

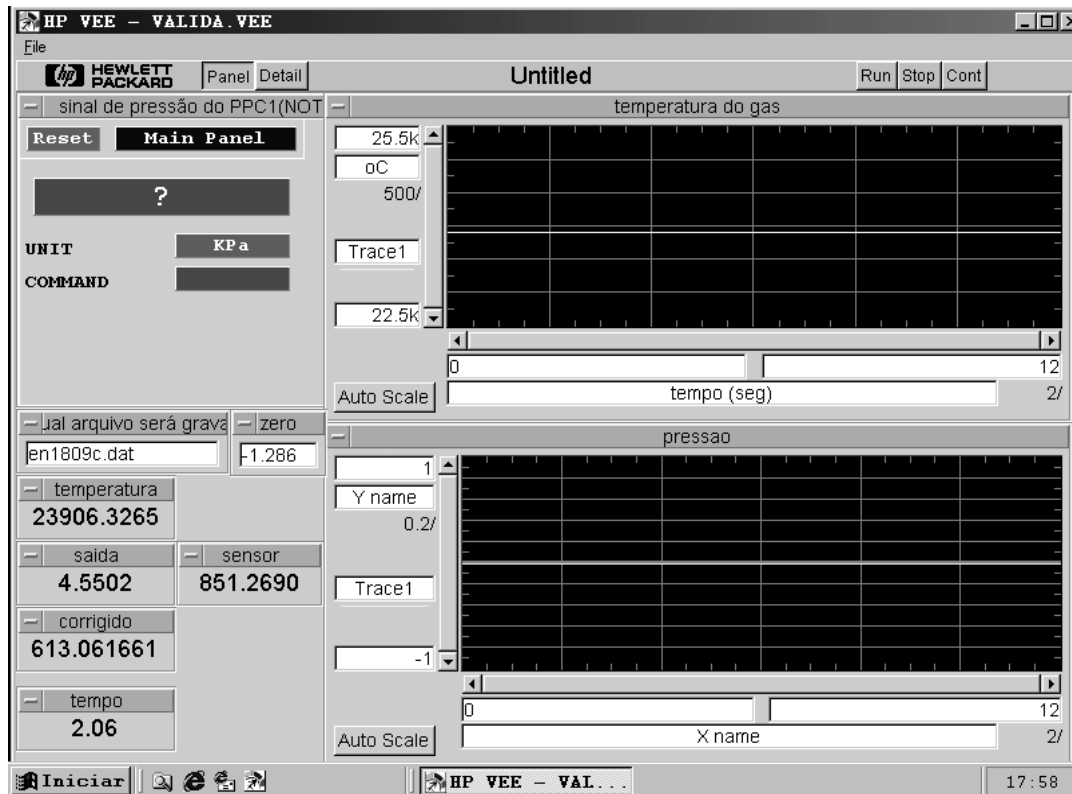


Figura C.1: Painel do programa desenvolvido para coleta de dados.

passo 10 → quando o tempo for igual ao número aleatório gerado, então,
 passo 11 → volta ao passo 1.

A grande dificuldade encontrada foi no comando de um relé para executar o chaveamento do aquecimento e resfriamento. Para comandar este relé foi escrito um programa apresentado na próxima seção como "Driver para instrumento da HP E1364A 16 canais". Este programa define o protocolo de comunicação da placa de relés com o computador.

C.2 Driver para instrumento da HP E1364A 16 canais

```

=====
Francisco Magalhães
CETEC / 2000
REVISION 1.00;
=====

```

```

COMPONENT RESET NOTSAVED;          ITG standard RESET component
TYPE DISCRETE;

```

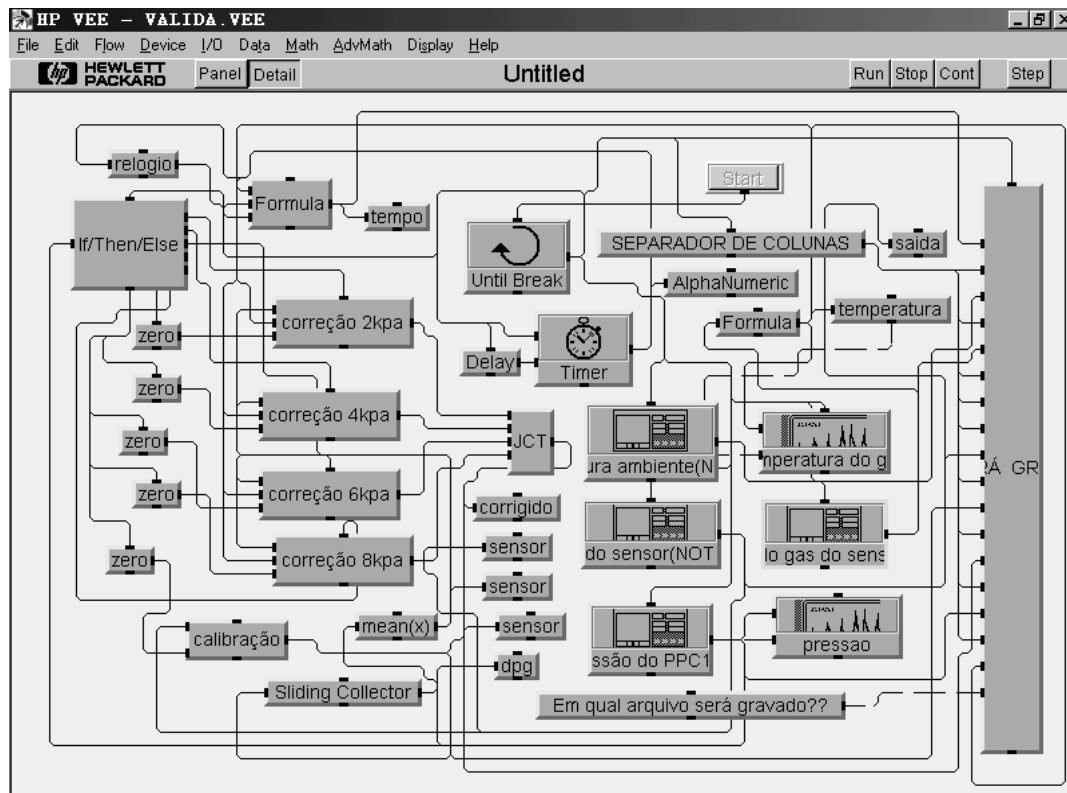


Figura C.2: Detalhamento do programa desenvolvido para coleta de dados.

```

VALUES DONT, BOX, CARD, LBLs;
INITIAL DONT;
SET ACTIONS;
  GOSUB SEND-RESET;
END ACTIONS;
END COMPONENT;
COMPONENT STARTUP NOTSAVED;
TYPE INTEGER;
VALUES RANGE 0 1;
INITIAL 0;
SET ACTIONS;
  POKEINITIAL;
  DISABLE RESET DONT;
  ENABLE RESET BOX, CARD, LBLs;
  GOSUB NEW-LABELS;
  FETCH (RESET) BOX;
  STORE RESET;
  GOSUB SEND-RESET;
  GOSUB DISP-SUB-PANEL;
END ACTIONS;
END COMPONENT;
INITIALIZE STARTUP;
COMPONENT SUB-PANEL NOGEN NOERRCHECK;
TYPE DISCRETE;
VALUES SWITCH, STATUS, ABOUT-ID;
INITIAL SWITCH;
PANEL SET ACTIONS DISP-SUB-PANEL;

```

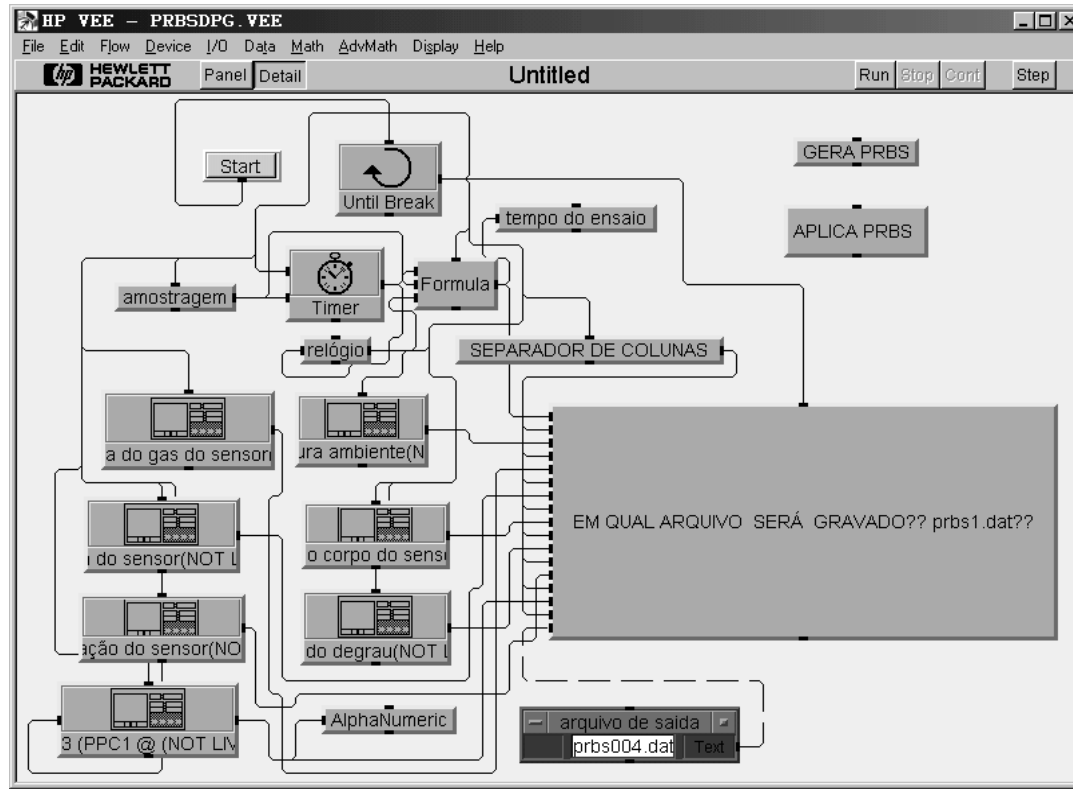


Figura C.3: Painel do programa desenvolvido para gerar e aplicar um sinal binário.

```

END COMPONENT;
COMPONENT CARD-EQ-PANEL NOTSAVED NOGEN NOERRCHECK;
TYPE DISCRETE;
VALUES NO, YES;
INITIAL YES;
SET ACTIONS;
    FETCH CARD-EQ-PANEL;
    STORE PANEL-STATE-DISP;
END ACTIONS;
END COMPONENT;
COMPONENT PANEL-STATE-DISP NOTSAVED NOGEN NOERRCHECK;
TYPE DISCRETE;
VALUES NEQ, EQ;
INITIAL EQ;
SET ACTIONS;
    FETCH CARD-EQ-PANEL;
    STORE PANEL-STATE-DISP;
END ACTIONS;
END COMPONENT;
COMPONENT SWITCH-NUM NOTSAVED NOGEN NOERRCHECK;
TYPE INTEGER;
VALUES RANGE 0, 99;
INITIAL 0;
END COMPONENT;
COMPONENT REV NOTSAVED NOGEN NOERRCHECK;
TYPE INTEGER;
INITIAL 10189;

```

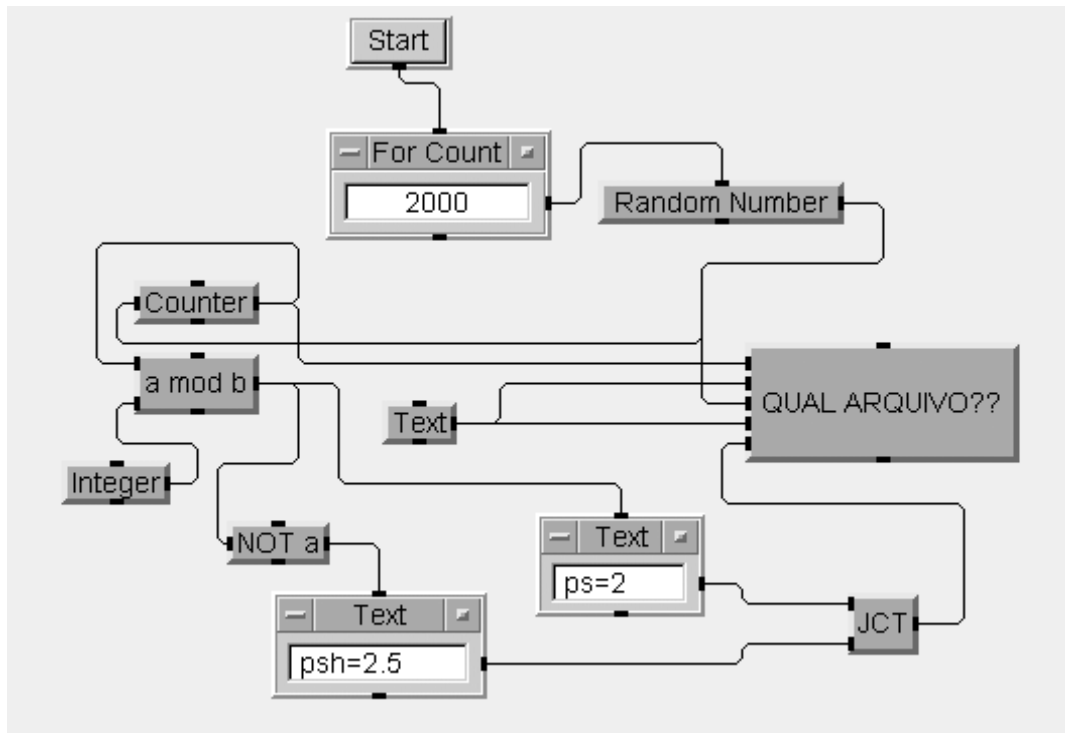


Figura C.4: Detalhamento do programa desenvolvido para gerar um sinal binário.

```

END COMPONENT;
COMPONENT TEMP-STRING NOTSAVED NOGEN NOERRCHECK;
  TYPE STRING 25;
END COMPONENT;
Este componente está com o cartão onde vários números de chaves
podem ser usadas no cartão
COMPONENT SWITCH-0 NOERRCHECK;
  TYPE DISCRETE;
  VALUES OPEN, CLOSED;
  INITIAL OPEN;
  SET ACTIONS;
    FETCH (CARD-EQ-PANEL) NO;
    STORE CARD-EQ-PANEL;
    SET PANEL-STATE-DISP;
  END ACTIONS;
END COMPONENT;
COMPONENT SWITCH-1 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-2 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-3 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-4 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-5 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-6 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-7 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-8 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-9 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-10 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-11 CLONE SWITCH-0;

```

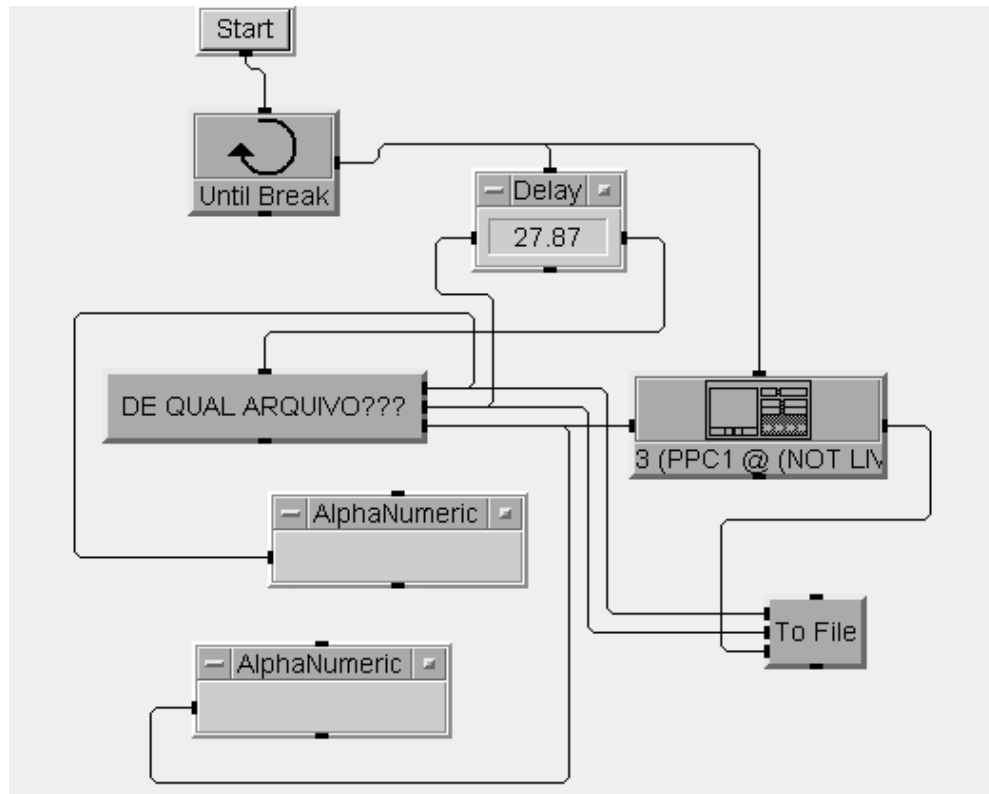


Figura C.5: Detalhamento do programa desenvolvido para aplicar um sinal binário.

```

COMPONENT SWITCH-12 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-13 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-14 CLONE SWITCH-0;
COMPONENT SWITCH-15 CLONE SWITCH-0;

```

```

=====
OUTROS COMPONENTES
=====

```

```

COMPONENT LABEL-0 NOGEN NOERRCHECK ;
  TYPE STRING 10;
  INITIAL " Whatever ";
  SET ACTIONS;
END ACTIONS;
END COMPONENT;
COMPONENT LABEL-1 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-2 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-3 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-4 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-5 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-6 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-7 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-8 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-9 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-10 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-11 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-12 CLONE LABEL-0;

```

```
COMPONENT LABEL-13 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-14 CLONE LABEL-0;
COMPONENT LABEL-15 CLONE LABEL-0;
ESTE COMPONENTE É UM BOTÃO USADO PARA LER O ESTADO ATUAL DO CARTÃO
COMPONENT READ-CARD NOTSAVED;
  TYPE INTEGER;
  VALUES RANGE 0,1;
  INITIAL 0;
  SET ACTIONS READ-FROM-CARD;
END COMPONENT;
COMPONENT WRITE-CARD NOTSAVED;
  TYPE INTEGER;
  VALUES RANGE 0,1;
  INITIAL 0;
  SET ACTIONS WRITE-TO-CARD;
END COMPONENT;
COMPONENT PUSH-BUTTON NOTSAVED NOGEN NOERRCHECK;
  TYPE INTEGER;
  VALUES RANGE 0,1;
  INITIAL 0;
END COMPONENT;
COMPONENT ANSWER NOTSAVED NOGEN NOERRCHECK;
  TYPE INTEGER;
  VALUES RANGE 0, 9;
END COMPONENT;
COMPONENT OPEN-CLOSE-FLAG NOTSAVED NOGEN NOERRCHECK;
  TYPE INTEGER;
  VALUES RANGE 0,1;
  INITIAL 0;
END COMPONENT;
COMPONENT CLEAR-8 NOTSAVED NOERRCHECK;
  TYPE INTEGER;
  VALUES RANGE 0,1;
  INITIAL 0;
  SET ACTIONS;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-0;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-1;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-2;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-3;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-4;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-5;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-6;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-7;
    FETCH (CARD-EQ-PANEL) NO;
    STORE CARD-EQ-PANEL;
    SET PANEL-STATE-DISP;
  END ACTIONS;
END COMPONENT;
COMPONENT CLEAR-8-MORE NOTSAVED NOERRCHECK;
  TYPE INTEGER;
  VALUES RANGE 0,1;
  INITIAL 0;
  SET ACTIONS;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-8 ;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-9 ;
```

```

    FETCH 0;
    STORE SWITCH-10;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-11;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-12;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-13;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-14;
    FETCH 0;
    STORE SWITCH-15;
    FETCH (CARD-EQ-PANEL) NO;
    STORE CARD-EQ-PANEL;
    SET PANEL-STATE-DISP;
  END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT WAIT-FOR-DONE;
  TYPE DISCRETE;
  VALUES NO, YES, NOW;
  INITIAL YES;
  SET ACTIONS;
    SELECT WAIT-FOR-DONE;
    CASE (WAIT-FOR-DONE) NO;
      SKIP ERRCHECK;
    CASE ELSE;
      GOSUB WAIT;
    END SELECT;
  END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

-----
  COMPONENTES PARA O ESTADO DO PAINEL
-----

```

```

COMPONENT Serial-Poll NOTSAVED NOERRCHECK;
  TYPE INTEGER;
  INITIAL INVALID;
  GET ACTIONS;
    SPOLL;
    STORE DEFAULT;
  END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT Status-Byte NOTSAVED;
  TYPE INTEGER;
  VALUES RANGE -32768, 32767;
  INITIAL INVALID;
  GET ACTIONS;
    OUTPUT STRING "*STB?";
    ENTER DEFAULT FORMAT 'K';
  END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT Clear-Status NOTSAVED;
  TYPE INTEGER;
  COUPLED Serial-Poll, Status-Byte, Standard-Event, ERR-STRING, ERROR;
  SET ACTIONS;
    OUTPUT STRING "*CLS";
    FLUSH;
    GOSUB WAIT;
  END ACTIONS;
END COMPONENT;

```



```

COMPONENT Status-Enable;
TYPE INTEGER;
VALUES RANGE 0, 255;
INITIAL INVALID; ! para a opção IEEE 488.2 este estado não é afetaedo pelo *RST
                  ! assim sendo o valor inicial setado INVALID
SET ACTIONS;
  OUTPUT DEFAULT FORMAT '*SRE ',K';
  FLUSH;
  GOSUB WAIT;
END ACTIONS;
PANEL SET ACTIONS;
  INVALIDATE Serial-Poll;
  INVALIDATE Status-Byte;
END ACTIONS;
GET ACTIONS;
  OUTPUT STRING '*SRE?';
  ENTER DEFAULT FORMAT 'K';
END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT Standard-Event NOTSAVED;
TYPE INTEGER;
INITIAL INVALID;
GET ACTIONS;
  OUTPUT STRING '*ESR?';
  ENTER DEFAULT FORMAT 'K';
END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT Event-Enable;
TYPE INTEGER;
VALUES RANGE 0, 255;
INITIAL INVALID; ! para a opção IEEE 488.2 este estado não é afetaedo pelo *RST
SET ACTIONS;
  OUTPUT DEFAULT FORMAT '*ESE ',K';
  FLUSH;
  GOSUB WAIT;
END ACTIONS;
PANEL SET ACTIONS;
  INVALIDATE Serial-Poll;
  INVALIDATE Status-Byte;
  INVALIDATE Standard-Event;
END ACTIONS;
GET ACTIONS;
  OUTPUT STRING '*ESE?';
  ENTER DEFAULT FORMAT 'K';
END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

registros de operação

```

COMPONENT Operate-Event NOTSAVED;
TYPE INTEGER;
INITIAL INVALID;
GET ACTIONS;
  OUTPUT STRING 'STAT:OPER?';
  ENTER DEFAULT FORMAT 'K';
END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT Oper-Enable;
TYPE INTEGER;
VALUES RANGE 0, 255;
INITIAL INVALID; ! para a opção IEEE 488.2 este estado não é afetaedo pelo *RST
SET ACTIONS;

```

```

    OUTPUT DEFAULT FORMAT '"STAT:OPER:ENAB ",K';
    FLUSH;
    GOSUB WAIT;
END ACTIONS;
PANEL SET ACTIONS;
    INVALIDATE Serial-Poll;
    INVALIDATE Status-Byte;
    INVALIDATE Operate-Event;
END ACTIONS;
GET ACTIONS;
    OUTPUT STRING "STAT:OPER:ENAB?";
    ENTER DEFAULT FORMAT 'K';
END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT Oper-Cond NOTSAVED;
    TYPE INTEGER;
    INITIAL INVALID;
    GET ACTIONS;
        OUTPUT STRING "STAT:OPER:COND?";
        ENTER DEFAULT FORMAT 'K';
    END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

registros "Questionable"

```

COMPONENT Questionable-Event NOTSAVED;
    TYPE INTEGER;
    INITIAL INVALID;
    GET ACTIONS;
        OUTPUT STRING "STAT:QUES?";
        ENTER DEFAULT FORMAT 'K';
    END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT Questionable-Enable;
    TYPE INTEGER;
    VALUES RANGE -32768, 32767;
    INITIAL INVALID;
    SET ACTIONS;
        OUTPUT DEFAULT FORMAT '"STAT:QUES:ENAB ",K';
        FLUSH;
        GOSUB WAIT;
    END ACTIONS;
    PANEL SET ACTIONS;
        INVALIDATE Serial-Poll;
        INVALIDATE Status-Byte;
        INVALIDATE Standard-Event;
        INVALIDATE Questionable-Event;
        INVALIDATE Questionable-Cond;
    END ACTIONS;
    GET ACTIONS;
        OUTPUT STRING "STAT:QUES:ENABLE?";
        ENTER DEFAULT FORMAT 'K';
    END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT Questionable-Cond NOTSAVED;
    TYPE INTEGER;
    INITIAL INVALID;
    GET ACTIONS;
        OUTPUT STRING "STAT:QUES:COND?";
        ENTER DEFAULT FORMAT 'K';
    END ACTIONS;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT ERR-STRING NOTSAVED NOERRCHECK;
  TYPE STRING 80;
  INITIAL INVALID;
  GET ACTIONS ACT-ERR;
END COMPONENT;

```

```

COMPONENT ERROR NOTSAVED NOERRCHECK;
  TYPE INTEGER;
  INITIAL INVALID;
  GET ACTIONS ACT-ERR;
END COMPONENT;

```

```

ERROR COMPONENT ERROR;

```

```

=====
          AÇÕES
=====

```

```

ACTIONS SEND-RESET;
  SELECT RESET;
  CASE (RESET) DONT;
    ! No action
  CASE (RESET) CARD;
    FETCH (RESET) DONT;
    STORE RESET;
    INVALIDATE ERROR;
    INVALIDATE ERR-STRING;
    SET CLEAR-8;
    SET CLEAR-8-MORE;
    CLEAR;
    GOSUB WRITE-TO-CARD;
  CASE (RESET) BOX;
    FETCH (RESET) DONT;
    STORE RESET;
    INVALIDATE ERROR;
    INVALIDATE ERR-STRING;
    SET CLEAR-8;
    SET CLEAR-8-MORE;
    CLEAR;
    OUTPUT STRING "*RST";
    FLUSH;
    GOSUB WAIT;
    FETCH (CARD-EQ-PANEL) YES;
    STORE CARD-EQ-PANEL;
    SET PANEL-STATE-DISP;
  CASE (RESET) LBLS;
    FETCH (RESET) DONT;
    STORE RESET;
    GOSUB NEW-LABELS;
    SKIP ERRCHECK;
  END SELECT;
  FETCH SUBADDR; STORE TEMP-STRING;
  SELECT TEMP-STRING;
  CASE "";
    NOTIFY "atenção: Sem subendereço no Config.";
    NOTIFY "Subendereço assumido 1.";
  CASE ELSE;
  END SELECT;
END ACTIONS;

```

```

ACTIONS NEW-LABELS;
  FETCH STRING "canal 0 ";
  STORE LABEL-0;
  FETCH STRING "canal 1 ";

```

```

STORE LABEL-1;
FETCH STRING "canal 2 ";
STORE LABEL-2;
FETCH STRING "canal 3 ";
STORE LABEL-3;
FETCH STRING "canal 4 ";
STORE LABEL-4;
FETCH STRING "canal 5 ";
STORE LABEL-5;
FETCH STRING "canal 6 ";
STORE LABEL-6;
FETCH STRING "canal 7 ";
STORE LABEL-7;
FETCH STRING "canal 8 ";
STORE LABEL-8 ;
FETCH STRING "canal 9 ";
STORE LABEL-9 ;
FETCH STRING "canal 10";
STORE LABEL-10;
FETCH STRING "canal 11";
STORE LABEL-11;
FETCH STRING "canal 12";
STORE LABEL-12;
FETCH STRING "canal 13";
STORE LABEL-13;
FETCH STRING "canal 14";
STORE LABEL-14;
FETCH STRING "canal 15";
STORE LABEL-15;
END ACTIONS;

```

AÇÕES PELO DISPLAY

```

ACTIONS DISP-SUB-PANEL;                                ! CONTROLES PARA O NÍVEL ALTO
GOSUB HIDE-ALL-SWITCHES;
HIDE SWITCH,ABOUT-ID;
HIDE SWITCH,STATUS;
SELECT SUB-PANEL;
CASE SWITCH;
  SHOW SWITCH, SET-BANK-8;
CASE ABOUT-ID;
  SHOW SWITCH,ABOUT-ID;
CASE STATUS;
  SHOW SWITCH,STATUS;
END SELECT;
END ACTIONS;

```

```

ACTIONS HIDE-ALL-SWITCHES;                             ! ESCONDE TODOS OS CARTÕES DO MENU DOS SUBPAINÉIS
HIDE SWITCH, SET-BANK-8;
HIDE SWITCH, SET-BANK-16;
END ACTIONS;

```

```

!
!   AÇÕES DE LOG HP BÁSICO                               LEIA O ESTADO DO CARTÃO
!

```

```

ACTIONS READ-FROM-CARD;
OUTPUT STRING ":CLOSE? ";
GOSUB CARD-NUM;
OUTPUT STRING "0:15)";
ENTER SWITCH-0 FORMAT "\#,D";
ENTER SWITCH-1 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-2 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-3 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-4 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-5 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-6 FORMAT "\#,X,D";

```

```
ENTER SWITCH-7 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-8 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-9 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-10 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-11 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-12 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-13 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-14 FORMAT "\#,X,D";
ENTER SWITCH-15 FORMAT "X,D";
FETCH (CARD-EQ-PANEL) YES;
STORE CARD-EQ-PANEL;
SET PANEL-STATE-DISP;
END ACTIONS;
```

```
ACTIONS WRITE-TO-CARD;
  FETCH 0;
  STORE OPEN-CLOSE-FLAG;
  FETCH 0;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 1;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 2;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 3;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 4;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 5;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 6;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 7;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 8;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 9;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 10;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 11;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 12;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 13;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 14;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
  FETCH 15;
  STORE SWITCH-NUM;
  GOSUB SWITCH-OPEN;
```

```

SELECT OPEN-CLOSE-FLAG;

CASE 0;
! sem ação
CASE 1;
  OUTPUT STRING "));
END SELECT;

FETCH 0;
STORE OPEN-CLOSE-FLAG;
FETCH 0;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 1;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 2;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 3;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 4;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 5;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 6;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 7;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 8;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 9;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 10;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 11;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 12;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 13;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 14;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
FETCH 15;
STORE SWITCH-NUM;
GOSUB SWITCH-CLOSED;
SELECT OPEN-CLOSE-FLAG;

CASE 0;
! sem ação
CASE 1;
  OUTPUT STRING "));";
END SELECT;

```

```
FLUSH;
GOSUB WAIT;
FETCH (CARD-EQ-PANEL) YES;
STORE CARD-EQ-PANEL;
SET PANEL-STATE-DISP;
END ACTIONS;

ACTIONS SWITCH-OPEN;
GOSUB FETCH-SWITCH;
SELECT STACK;
CASE 0;
  SELECT OPEN-CLOSE-FLAG;
  CASE 0;
    OUTPUT STRING ":OPEN ";
    GOSUB CARD-NUM;
    FETCH 1;
    STORE OPEN-CLOSE-FLAG; !
  CASE 1;
    OUTPUT STRING ",";
  END SELECT; ! OPEN-CLOSE-FLAG
  OUTPUT SWITCH-NUM FORMAT "K";
CASE 1;
  ! a chave não está aberta
END SELECT;
END ACTIONS;

ACTIONS SWITCH-CLOSED;
GOSUB FETCH-SWITCH;
SELECT STACK;
CASE 1;
  SELECT OPEN-CLOSE-FLAG;
  CASE 0;
    OUTPUT STRING ":CLOSE ";
    GOSUB CARD-NUM;
    FETCH 1;
    STORE OPEN-CLOSE-FLAG; !
  CASE 1;
    OUTPUT STRING ",";
  END SELECT; ! OPEN-CLOSE-FLAG
  OUTPUT SWITCH-NUM FORMAT "K";
CASE 0;
  ! a chave não está fechada
END SELECT;
END ACTIONS;

ACTIONS WAIT;
SELECT WAIT-FOR-DONE;
CASE (WAIT-FOR-DONE) YES;
  FLUSH;
  OUTPUT STRING "*OPC?";
  ENTER TEMP-STRING;
CASE (WAIT-FOR-DONE) NOW;
  OUTPUT STRING "*OPC?";
  ENTER TEMP-STRING;
  FETCH (WAIT-FOR-DONE) NO;
  STORE WAIT-FOR-DONE;
CASE (WAIT-FOR-DONE) NO;
  FLUSH;
END SELECT;
END ACTIONS;

ACTIONS CARD-NUM;
OUTPUT STRING "@1";
! FETCH SUBADDR; STORE TEMP-STRING;
```

```
! SELECT TEMP-STRING;
! CASE ""; OUTPUT STRING "1";
! CASE ELSE; OUTPUT SUBADDR;
! END SELECT;
  OUTPUT STRING "(";
END ACTIONS;

ACTIONS WHICH-SWITCH;
  FETCH SELF;
  STORE TEMP-STRING;
  SELECT TEMP-STRING;
  CASE "SWITCH-0";
    FETCH 0;
  CASE "SWITCH-1";
    FETCH 1;
  CASE "SWITCH-2";
    FETCH 2;
  CASE "SWITCH-3";
    FETCH 3;
  CASE "SWITCH-4";
    FETCH 4;
  CASE "SWITCH-5";
    FETCH 5;
  CASE "SWITCH-6";
    FETCH 6;
  CASE "SWITCH-7";
    FETCH 7;
  CASE "SWITCH-8";
    FETCH 8 ;
  CASE "SWITCH-9";
    FETCH 9 ;
  CASE "SWITCH-10";
    FETCH 10;
  CASE "SWITCH-11";
    FETCH 11;
  CASE "SWITCH-12";
    FETCH 12;
  CASE "SWITCH-13";
    FETCH 13;
  CASE "SWITCH-14";
    FETCH 14;
  CASE "SWITCH-15";
    FETCH 15;
  CASE ELSE;
    NOTIFY "Driver com Erro >> WHICH-SWITCH";
    FETCH -1;
  END SELECT;
  STORE SWITCH-NUM;
END ACTIONS;

ACTIONS FETCH-SWITCH;
  SELECT SWITCH-NUM;
  CASE 0;
    FETCH SWITCH-0;
  CASE 1;
    FETCH SWITCH-1;
  CASE 2;
    FETCH SWITCH-2;
  CASE 3;
    FETCH SWITCH-3;
  CASE 4;
    FETCH SWITCH-4;
  CASE 5;
    FETCH SWITCH-5;
  CASE 6;
```



```

    FETCH SWITCH-6;
CASE 7;
    FETCH SWITCH-7;
CASE 8;
    FETCH SWITCH-8;
CASE 9;
    FETCH SWITCH-9;
CASE 10;
    FETCH SWITCH-10;
CASE 11;
    FETCH SWITCH-11;
CASE 12;
    FETCH SWITCH-12;
CASE 13;
    FETCH SWITCH-13;
CASE 14;
    FETCH SWITCH-14;
CASE 15;
    FETCH SWITCH-15;
END SELECT;
END ACTIONS;
!.....
!
!           AÇÕES PARA ESTADOS DO SUBPAINEL
!
!.....
ACTIONS ACT-ERR;
    OUTPUT STRING "SYST:ERR?";
    ENTER ERROR FORMAT '\#,K';
    ENTER ERR-STRING FORMAT 'K';
    IF LIVEMODE THEN; ELSE;
        FETCH STRING "sem erro (modo: Not Live)"; STORE ERR-STRING;
        FETCH 0; STORE ERROR;
    END IF;
END ACTIONS; ! ACT-ERR
!=====
!
!           PANEIS
!
!=====
! PANEL Hierarchy:
!
!           SWITCH
!           SET-BANK-8
!           SET-BANK-16
!           ABOUT-ID
!           STATUS
!           END SWITCH

PANEL SWITCH;
    POSITION 1,1;
    SIZE 428,213;

DISCRETE RESET;
    POSITION 5,189;
    BACKGROUND (0,130,70).0;
    SIZE 55,19;
    LABEL "Resete","Resete switchbox","Resete este cartão","Resete os nomes";
END DISCRETE;

TEXT "16 relés ";
    POSITION 70, 187;
    FONT 15, 25;
END TEXT;

```

```

DISCRETE SUB-PANEL;
  POSITION 287,189;
  SIZE 136,19;
  BACKGROUND (75,0,240),0;
  LABEL "Painel de Chaves","Estados do Painel","Sobre o Painel";
END DISCRETE;

```

```

!-----
!                               Pannel do cartão de 16-canaís
!
!-----

```

```

PANEL SET-BANK-8;
  POSITION 0, 0;
  SIZE 428,186;
  FOREGROUND (255,255,255),100;  ! cria borda

```

```

TEXT "estado";
  POSITION 47, 160;
END TEXT;

```

```

TEXT "nome";
  POSITION 122, 160;
END TEXT;

```

```

TEXT "Ch 0";
  POSITION 5, 140;
END TEXT;

```

```

TOGGLE SWITCH-0;
  POSITION 42, 140;
  STYLE "HIGHLIGHT";
  LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;

```

```

INPUT LABEL-0;
  POSITION 100, 140;
  FORMAT "AAAAAAAAAAA";
END INPUT;

```

```

TEXT "estado";
  POSITION 260, 160;
END TEXT;

```

```

TEXT "nome";
  POSITION 337, 160;
END TEXT;

```

```

TEXT "Ch 1";
  POSITION 217, 140;
END TEXT;

```

```

TOGGLE SWITCH-1;
  POSITION 255, 140;
  STYLE "HIGHLIGHT";
  LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;

```

```

INPUT LABEL-1;
  POSITION 313, 140;
  FORMAT "AAAAAAAAAAA";
END INPUT;

```

```

TEXT "Ch 2";
  POSITION 5, 120;
END TEXT;

```

```
TOGGLE SWITCH-2;
  POSITION 42, 120;
  STYLE "HIGHLIGHT";
  LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;
```

```
INPUT LABEL-2;
  POSITION 100, 120;
  FORMAT "AAAAAAAAAA";
END INPUT;
```

```
TEXT "Ch 3";
  POSITION 217, 120;
END TEXT;
```

```
TOGGLE SWITCH-3;
  POSITION 255, 120;
  STYLE "HIGHLIGHT";
  LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;
```

```
INPUT LABEL-3;
  POSITION 313, 120;
  FORMAT "AAAAAAAAAA";
END INPUT;
```

```
TEXT "Ch 4";
  POSITION 5, 100;
END TEXT;
```

```
TOGGLE SWITCH-4;
  POSITION 42, 100;
  STYLE "HIGHLIGHT";
  LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;
```

```
INPUT LABEL-4;
  POSITION 100, 100;
  FORMAT "AAAAAAAAAA";
END INPUT;
```

```
TEXT "Ch 5";
  POSITION 217, 100;
END TEXT;
```

```
TOGGLE SWITCH-5;
  POSITION 255, 100;
  STYLE "HIGHLIGHT";
  LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;
```

```
INPUT LABEL-5;
  POSITION 313, 100;
  FORMAT "AAAAAAAAAA";
END INPUT;
```

```
TEXT "Ch 6";
  POSITION 5, 80;
END TEXT;
```

```
TOGGLE SWITCH-6;
  POSITION 42, 80;
  STYLE "HIGHLIGHT";
  LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;
```

```

INPUT LABEL-6;
  POSITION 100, 80;
  FORMAT "AAAAAAAAAA";
END INPUT;

TEXT "Ch 7";
  POSITION 217, 80;
END TEXT;

TOGGLE SWITCH-7;
  POSITION 255, 80;
  STYLE "HIGHLIGHT";
  LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;

INPUT LABEL-7;
  POSITION 313, 80;
  FORMAT "AAAAAAAAAA";
END INPUT;

BUTTON PUSH-BUTTON;
  POSITION 152, 55;
  HIT ACTIONS;
    HIDE SWITCH,SET-BANK-8;
    SHOW SWITCH,SET-BANK-16;
  END ACTIONS;
  LABEL "VER CANAIS 8-15";
END BUTTON;

TOGGLE PANEL-STATE-DISP;
  POSITION 102, 30;
  BACKGROUND (220,211,184), 0;    ! PARCIALMENTE BRANCO (SAND)[PANEL BKGRND]
  FOREGROUND ( 0, 0, 0),100;    ! PRETO
  STYLE "HIGHLIGHT";
  LABEL "Painel sem cartão", "cartão encontrado";
END TOGGLE;

BUTTON READ-CARD;
  POSITION 5, 5;
  BACKGROUND (238,150,0), 35;    !
  LABEL "Leia o cartão";
END BUTTON;

BUTTON WRITE-CARD;
  POSITION 154, 5;
  BACKGROUND (238,150,0), 35;    !
  LABEL "aplique o painel";
END BUTTON;

BUTTON CLEAR-8;
  POSITION 320, 5;
  LABEL "abrir 0-7 ";
END BUTTON;

END PANEL;    !    SET-BANK-8

!=====

PANEL SET-BANK-16;
  POSITION 0, 0;
  SIZE 428,186;
  FOREGROUND (255,255,255),100;    ! cria bordas

TEXT "estado";

```

```
    POSITION 47, 160;
END TEXT;

TEXT "nome";
    POSITION 122, 160;
END TEXT;

TEXT "Ch 8";
    POSITION 5, 140;
END TEXT;

TOGGLE SWITCH-8 ;
    POSITION 42, 140;
    STYLE "HIGHLIGHT";
    LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;

INPUT LABEL-8 ;
    POSITION 100, 140;
    FORMAT "AAAAAAAAAAA";
END INPUT;

TEXT "estado";
    POSITION 260, 160;
END TEXT;

TEXT "nome";
    POSITION 337, 160;
END TEXT;

TEXT "Ch 9";
    POSITION 217, 140;
END TEXT;

TOGGLE SWITCH-9 ;
    POSITION 255, 140;
    STYLE "HIGHLIGHT";
    LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;

INPUT LABEL-9 ;
    POSITION 313, 140;
    FORMAT "AAAAAAAAAAA";
END INPUT;

TEXT "Ch10";
    POSITION 5, 120;
END TEXT;

TOGGLE SWITCH-10;
    POSITION 42, 120;
    STYLE "HIGHLIGHT";
    LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;

INPUT LABEL-10;
    POSITION 100, 120;
    FORMAT "AAAAAAAAAAA";
END INPUT;

TEXT "Ch11";
    POSITION 217, 120;
END TEXT;

TOGGLE SWITCH-11;
```

```
    POSITION 255, 120;
    STYLE "HIGHLIGHT";
    LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;
```

```
INPUT LABEL-11;
    POSITION 313, 120;
    FORMAT "AAAAAAAAAAA";
END INPUT;
```

```
TEXT "Ch12";
    POSITION 5, 100;
END TEXT;
```

```
TOGGLE SWITCH-12;
    POSITION 42, 100;
    STYLE "HIGHLIGHT";
    LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;
```

```
INPUT LABEL-12;
    POSITION 100, 100;
    FORMAT "AAAAAAAAAAA";
END INPUT;
```

```
TEXT "Ch13";
    POSITION 217, 100;
END TEXT;
```

```
TOGGLE SWITCH-13;
    POSITION 255, 100;
    STYLE "HIGHLIGHT";
    LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;
```

```
INPUT LABEL-13;
    POSITION 313, 100;
    FORMAT "AAAAAAAAAAA";
END INPUT;
```

```
TEXT "Ch14";
    POSITION 5, 80;
END TEXT;
```

```
TOGGLE SWITCH-14;
    POSITION 42, 80;
    STYLE "HIGHLIGHT";
    LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;
```

```
INPUT LABEL-14;
    POSITION 100, 80;
    FORMAT "AAAAAAAAAAA";
END INPUT;
```

```
TEXT "Ch15";
    POSITION 217, 80;
END TEXT;
```

```
TOGGLE SWITCH-15;
    POSITION 255, 80;
    STYLE "HIGHLIGHT";
    LABEL "C > NF", "C > NA";
END TOGGLE;
```

```

INPUT LABEL-15;
  POSITION 313, 80;
  FORMAT "AAAAAAAAA";
END INPUT;

BUTTON PUSH-BUTTON;
  POSITION 152, 55;
  HIT ACTIONS;
    HIDE SWITCH,SET-BANK-16;
    SHOW SWITCH,SET-BANK-8;
  END ACTIONS;
  LABEL "VER CANAIS 0-7";
END BUTTON;

TOGGLE PANEL-STATE-DISP;
  POSITION 102, 30;
  BACKGROUND (220,211,184), 0;      ! PARCIALMENTE BRANCO (SAND)[PANEL BKGRND]
  FOREGROUND ( 0, 0, 0),100;      ! PRETO
  STYLE "HIGHLIGHT";
  LABEL "Painel sem cartão", "cartão encontrado";
END TOGGLE;

BUTTON READ-CARD;
  POSITION 5, 5;
  BACKGROUND (238,150,0), 35;      !
  LABEL "Leia o estado do cartão";
END BUTTON;

BUTTON WRITE-CARD;
  POSITION 154, 5;
  BACKGROUND (238,150,0), 35;      !
  LABEL "aplique o novo painel";
END BUTTON;

BUTTON CLEAR-8-MORE;
  POSITION 320, 5;
  LABEL "abrir 8-15";
END BUTTON;

END PANEL;      !      SET-BANK-16
!=====
!
!      OUTROS SUB PAINÉIS
!
!=====
PANEL STATUS;
  POSITION 0,0; SIZE 428,186; FOREGROUND (255,255,255),100;

TEXT 8, 160, "Serial Poll";
DISPLAY Serial-Poll;
  POSITION 115, 159; SIZE 85, 19; FORMAT "DDDDD"; STYLE "NOENGR";
END DISPLAY;

TEXT 11, 138, "      Event cond enab";
TEXT 8, 116, "Quest";

DISPLAY Questionable-Event;
  POSITION 63, 116; SIZE 46, 19; FORMAT "DDDDD"; STYLE "NOENGR";
END DISPLAY;

DISPLAY Questionable-Cond;
  POSITION 109, 116; SIZE 46, 19; FORMAT "DDDDD"; STYLE "NOENGR";
END DISPLAY;

CONTINUOUS Questionable-Enable;

```

```

    POSITION 155, 116; SIZE 46, 19; FORMAT "DDDDD"; STYLE "NOENGR";
END CONTINUOUS;

TEXT 8, 96, "Oper";

DISPLAY Operate-Event;
    POSITION 63, 96; SIZE 46, 19; FORMAT "DDDDD"; STYLE "NOENGR";
END DISPLAY;

DISPLAY Oper-Cond;
    POSITION 109, 96; SIZE 46, 19; FORMAT "DDDDD"; STYLE "NOENGR";
END DISPLAY;

CONTINUOUS Oper-Enable;
    POSITION 155, 96; SIZE 46, 19; FORMAT "DDDDD"; STYLE "NOENGR";
END CONTINUOUS;

BUTTON Clear-Status;
    POSITION 294,160; SIZE 130,19;
    LABEL "Limpa os estados";
END BUTTON;

TEXT 217, 138, "      Registro abilitato";

TEXT 211, 116, "StatusByte";
DISPLAY Status-Byte;
    POSITION 304, 116; SIZE 54, 19; FORMAT "DDD"; STYLE "NOENGR";
END DISPLAY;
CONTINUOUS Status-Enable;
    POSITION 370, 116; SIZE 54, 19; FORMAT "DDD"; STYLE "NOENGR";
END CONTINUOUS;

TEXT 211, 94, "Std Event";
DISPLAY Standard-Event;
    POSITION 304, 94; SIZE 54, 19; FORMAT "DDD"; STYLE "NOENGR";
END DISPLAY;
CONTINUOUS Event-Enable;
    POSITION 370, 94; SIZE 54, 19; FORMAT "DDD"; STYLE "NOENGR";
END CONTINUOUS;

TEXT 48,55 "esperando para modo de operação completa";
DISCRETE WAIT-FOR-DONE;
    POSITION 370,56; SIZE 54,19;
    LABEL "desliga","liga","nada";
END DISCRETE;

TEXT 49,31 "Número errado";
DISPLAY ERROR;
    POSITION 165,29; SIZE 76,19; STYLE "NOENGR"; FORMAT "DDDDDD";
END DISPLAY;
TEXT 249,31 "e erro de String:";
DISPLAY ERR-STRING; POSITION 10,6; SIZE 408,19; END DISPLAY;

END PANEL; ! STATUS

!-----

PANEL ABOUT-ID;
    POSITION 0,0;
    SIZE 428,186;
    FOREGROUND (255,255,255),100;
    TEXT "PLACA HP E1364A";
        POSITION 115,131;
        FONT 15,25;
    END TEXT;

```



```
TEXT 115,114 " 16 CANAIS COM CHAVES GP ";
TEXT 138, 83 "Revisão: A.00.02";
TEXT 100, 60 "Feito por Francisco Magalhães";
TEXT 100, 30 "CETEC / MG - LAB ISAACK NEWTON";
TEXT 196, 10 "2000";
END PANEL; ! ABOUT-ID

END PANEL; ! >>>> SWITCH
```


Anexo D

TEORIA BÁSICA

D.1 Teoria básica da análise de sistemas lineares

Para uma melhor compreensão do Apêndice D e tendo em vista que os prováveis usuários destes sensores necessitam recorrer às referências bibliográficas, é acrescentada a teoria básica da análise de sistemas lineares. É apresentada uma análise no domínio das frequências para sinais que possam ser usados no processo de identificação de sistemas lineares.

A necessidade da compensação dinâmica de uma determinada entrada espúria pode ser feita de várias formas. A forma mais simples deve ser escolhida levando-se em conta vários fatores, principalmente a execução prática dessa entrada baseando-se na seguinte hipótese: se esta entrada espúria for variada e aplicada ao sistema, de tal forma que a taxa de variação seja menor do que a velocidade de resposta do sistema, então este sistema é suficientemente rápido para acompanhar a entrada. Com os dados deste ensaio, encontra-se uma função¹ que relacione esta entrada aplicada e a saída. Encontrada esta função, varia-se novamente esta entrada, porém, agora, com uma taxa de variação maior que a velocidade de resposta do sistema, mas de tal forma que se possa medir a variação da saída do sistema. Para estes novos conjuntos de dados, encontra-se a nova função² que relaciona a entrada e a saída. Quanto maior for a diferença entre as duas funções, maior a necessidade da compensação dinâmica. Por outro lado, quanto mais próximas forem, menor é a necessidade da compensação dinâmica.

A forma mais adequada para a entrada espúria a ser aplicada no sistema deve ser escolhida levando-se em conta vários fatores, principalmente a execução prática dessa entrada. A seguir são discutidos os tipos de entrada mais comuns a serem aplicadas a um sistema.

Um primeiro sinal que é interessante aplicar como entrada de um sistema

linear é a **função impulso unitário**, porque a transformada de uma função impulso unitário é a unidade. Então, a resposta do sistema a esta entrada, é a função de transferência do sistema. Em outras palavras, para um sistema linear, invariante no tempo, a função de transferência $G(s)$ é

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}, \quad (\text{D.1})$$

sendo que $X(s)$ é a transformada de Laplace da entrada e $Y(s)$ é a transformada de Laplace da saída. Segue-se que a saída $Y(s)$ pode ser escrita como o produto de $G(s)$ e $X(s)$, ou

$$Y(s) = G(s) \cdot X(s). \quad (\text{D.2})$$

Note que a multiplicação no domínio de Laplace é equivalente à convolução no domínio do tempo, e, portanto a transformada inversa de Laplace da equação D.2 é dada pela integral de convolução

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)g(t - \tau)d(\tau) = \int_0^t g(\tau)x(t - \tau)d(\tau), \quad (\text{D.3})$$

sendo que $g(t)=x(t)=0$ para $t < 0$.

Considerando-se a saída (resposta) de um sistema submetido a uma entrada de impulso unitário em que as condições iniciais são nulas, pode-se obter a transformada de Laplace da função impulso unitário cujo resultado é a unidade. Então, pode-se escrever que a transformada de Laplace da saída do sistema é simplesmente

$$Y(s) = G(s), \quad \text{para } X(s) = 1. \quad (\text{D.4})$$

A transformada inversa de Laplace da saída do sistema, dada pela equação D.4, é a função resposta ao impulso, ou

$$y(t) = g(t) = \text{função resposta ao impulso.}$$

A função resposta ao impulso $g(t)$ é, portanto, a resposta de um sistema linear a uma entrada em impulso unitário quando as condições iniciais são nulas. A transformada de Laplace desta função nos dá a função de transferência. Portanto, a função de transferência e a função resposta ao impulso de um sistema linear invariante no tempo contêm a mesma informação sobre a dinâmica do sistema. Desta forma, é possível obter a informação completa sobre as características dinâmicas do sistema excitando-o com uma entrada impulsiva e medindo a sua resposta. Na prática, uma entrada em forma de pulso, cuja duração é muito

curta comparada com as constantes de tempo significativas do sistema, pode ser considerada como impulsiva (Ogata, 1990).

Um segundo sinal que pode ser utilizado na identificação de um sistema é a **resposta ao degrau unitário**. Considerando-se um sistema de primeira ordem, a relação entrada/saída é dada como, por exemplo,

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1}, \quad (\text{D.5})$$

considerando-se que as condições iniciais são nulas.

Note que todos os sistemas com a mesma função de transferência irão exibir a mesma saída em resposta à mesma entrada. Sabendo-se que a transformada de Laplace da função degrau unitário é $\frac{1}{s}$, substituindo $X(s) = \frac{1}{s}$ na equação D.5, obtém-se

$$Y(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \frac{1}{s}, \quad (\text{D.6})$$

reescrevendo em frações parciais, tem-se

$$Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1}, \quad (\text{D.7})$$

fazendo a transformada inversa de Laplace da equação D.7, obtém-se

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} (t \geq 0). \quad (\text{D.8})$$

A equação D.8 mostra que, inicialmente, a saída $y(t)$ é nula e finalmente se torna unitária. Uma das características importantes desta curva de resposta exponencial $y(t)$ é que em $t = \tau$ o valor de $y(t)$ é 0,632, ou a resposta $y(t)$ alcançou 63,2% de sua variação total (Ogata, 1990).

O sistema estudado pode ser representado de várias formas, sendo uma delas o diagrama de blocos (Figura D.1) que foi adotado como o que melhor representa o sistema estudado.

A identificação do modelo para o sensor de temperatura RTD868 baseou-se na aplicação de um degrau positivo e outro negativo de temperatura e, após encontrado o modelo, usou-se a resposta do RTD868 ao degrau negativo de temperatura para a validação do modelo encontrado para o RTD868. A Figura 4.7 mostra a resposta ao degrau aplicado ao RTD868 isoladamente, ou seja, antes da montagem na câmara e juntamente com a resposta da simulação ao modelo encontrado. E este modelo é mostrado na equação D.9.

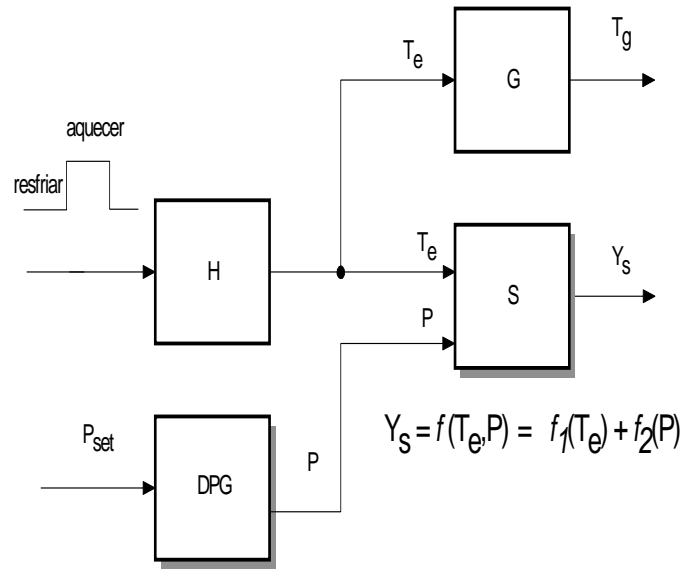


Figura D.1: Diagrama de blocos do sistema estudado.

$$t_G(t) = \frac{k_G}{\tau_G} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_G}} * t_e(t) \Rightarrow T_G(s) = \frac{k_G}{\tau_G s + 1} \cdot T_e(s), \quad (D.9)$$

$$G(s) = \frac{k_G}{\tau_G s + 1}, \quad (D.10)$$

sendo: t_e o sinal temperatura sentida pelo RTD868, $k_G=0,3728$, $\tau_G = 6s$ é a constante de tempo do RTD868 e t_g é a saída temporal do RTD868. O símbolo * (asterisco) que aparece na equação D.9 é o operador convolução apresentado pela integral de convolução na equação D.3.

A Figura 4.8 mostra a resposta ao degrau aplicado ao RTD juntamente com a resposta da simulação ao modelo mostrado na equação D.10. Este degrau foi aplicado no RTD868 antes de ser montado na câmara.

Iniciando-se a análise pelos componentes individualmente, pode-se ver que a constante de tempo referente à resposta do transdutor de temperatura RTD868 é da ordem de 6s (seis segundos), como mostrado na equação D.9 e o da planta é da ordem de 240s (duzentos e quarenta segundos), como mostrado na Figura 5.2, mas para a planta a constante de tempo depende da faixa de temperatura em que será aplicado o degrau. Comparando-se as duas constantes de tempo, vê-se que

$\tau_{\text{sistema}} \gg \tau_G$, significa que a resposta da montagem à temperatura é mais lenta do que a resposta do transdutor de temperatura; então este pode ser usado para fazer a aquisição de dados de temperatura deste sistema.

D.2 Teoria básica dos sinais binários no processo de identificação

Os sinais binário-aleatórios podem ser usados no processo de identificação de sistemas com algumas vantagens no que diz respeito à aplicação de ferramentas matemáticas por apresentar uma maior robustez ao ruído.

Alguns exemplos de ferramentas matemáticas são as funções de correlação cruzada e auto-correlação, ferramentas que são muito importantes num processo de identificação. A função de auto-correlação de um sinal $u(t)$ é definida como sendo

$$r_{uu}(\tau, t) = E[u(t)u(t + \tau)], \quad (\text{D.11})$$

$$r_{uu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot T} \int_{-T}^{+T} [u(t) \cdot u(t + \tau)] dt, \quad (\text{D.12})$$

como o sistema em questão não se altera ao longo do tempo para as mesmas condições, sistema invariante no tempo, pode-se substituir a esperança matemática $E[\cdot]$ pela média temporal. Esta condição foi avaliada e os resultados são mostrados nas curvas de calibração estática (Figura 4.5) para vários dias diferentes. E para este caso, em que o sistema em questão se encontra em regime estacionário, pode-se eliminar a dependência da função de auto-correlação com o tempo. Porém os dados disponíveis são oriundos dos transdutores analógicos que passam por conversores analógicos/digitais; então, neste caso, o sinal é discreto no tempo e a definição da equação D.11 torna-se

$$r_{uu}(k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N + 1} \sum_{i=-N}^N [u(i)u(i + k)], \quad (\text{D.13})$$

sendo k um número inteiro e, na prática, N deve ser grande. Já a função de correlação cruzada entre um sinal $u(t)$ e $y(t)$ é definida como sendo

$$r_{uy}(\tau, t) = E[u(t)y(t + \tau)] = E[y(t)u(t + \tau)] \quad (\text{D.14})$$

$$r_{uy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} u(t)y(t + \tau)dt \quad (\text{D.15})$$

$$r_{uy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} y(t)u(t + \tau)dt \quad (\text{D.16})$$

como o sistema em questão pode ser considerado ergódico ¹, pode-se substituir a esperança matemática $E[\cdot]$ pela média temporal e, para o caso, eliminar a dependência da função de auto-correlação com o tempo. Sabendo-se que é um sinal discreto, a definição da equação D.11 torna-se

$$r_{uy}(k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N + 1} \sum_{i=-N}^N [u(i)y(i + k)] = \quad (\text{D.17})$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N + 1} \sum_{i=-N}^N [y(i)u(i + k)] = r_{yu}, \quad (\text{D.18})$$

Porém, a aplicação destas ferramentas matemáticas tem algumas dificuldades de ordem prática. O registro do sinal num período finito de tempo é um exemplo de dificuldade, pois na maioria das equações espera-se que o número de amostras N seja infinito, ou seja, $N \rightarrow \infty$, o que não acontece. Uma outra dificuldade é a garantia de aplicar um sinal aleatório. Na prática, deve-se analisar quão é a aproximação do sinal a ser aplicado de um sinal aleatório, isto é, quando é conseguido que este seja gerado, pois estes sinais não são fáceis de serem gerados e utilizados em qualquer sistema, ou seja, nem todos os sistemas permitem a aplicação direta de sinais desta natureza. Porém existe uma classe de sinais que podem ser gerados e processados de forma simples e que possuem a propriedade

$$r_{uu}(k) \approx 0 \quad \forall k \neq 0. \text{ Estes são chamados pseudo-aleatórios.}$$

Dentre os sinais pseudo-aleatórios, os binários são os mais conhecidos e mais fáceis de serem conseguidos. Estes sinais são conhecidos também como PRBS que do inglês *pseudo-random binary sequence* (Norton, 1986).

Estes sinais de entrada só podem assumir dois valores, por isto a denominação binário. Em um sinal PRBS, as mudanças entre os valores de entrada ocorrem em instantes bem definidos $t = 0, T_b, 2T_b, \dots$. Estas mudanças são determinísticas e podem ser geradas repetidas vezes. Outra característica da PRBS é que são periódicas com período $T = NT_b$, sendo N um número ímpar. Ao longo de um período há $\frac{(N+1)}{2}$ intervalos num nível binário e $\frac{(N-1)}{2}$ intervalos no outro nível

¹Um sistema é ergódico quando entra em regime estacionário e o seu comportamento não se altera ao longo do tempo para as mesmas condições. Ergodicidade implica em estacionariedade.

(Norton, 1986).

O intervalo de tempo entre *bits*, T_b , deve ser compatível com a menor constante de tempo de interesse. Se for muito grande, o sistema interpretará o sinal PRBS como sendo um degrau. Por outro lado, se for muito pequeno, o sistema não terá tempo de responder a uma transição antes de chegar a próxima. Uma forma de determinar T_b , que geralmente oferece bons resultados, é (Norton, 1986):

$$\text{round}\left[\frac{\tau_{\min}}{10}\right] \leq T_b \leq \text{round}\left[\frac{\tau_{\min}}{3}\right],$$

sendo que τ_{\min} é a menor constante de tempo de interesse e o operador $\text{round}[\cdot]$ fornece o inteiro mais próximo.

Na identificação de sistemas lineares é comum escolher T_b mais próximo do limite inferior, ao passo que para sistemas não lineares bons resultados têm sido obtidos tomando-se T_b mais próximo do limite superior (Aguirre, 2000). A aplicação na entrada de um sinal PRBS permite fazer a estimação dos parâmetros do sistema e minimizar os efeitos de outros sinais aleatórios por meio de ferramentas matemáticas. Estes parâmetros estimados pertencem tanto à parte estática quanto à parte dinâmica do sistema.

A entrada a ser aplicada ao sensor de pressão é a temperatura do fluido manométrico. A saída é o sinal da saída do sensor que pode ser expressa em relação à tensão de alimentação do mesmo.

