CÉSAR AUGUSTO MAYOR HERRERA

**OBTENÇÃO EM LARGA ESCALA DE TRANSMISSORES DE
PRESSÃO PIEZORESISTIVOS DE ALTO DESEMPENHO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.**

São Paulo

2014

CÉSAR AUGUSTO MAYOR HERRERA

**OBTENÇÃO EM LARGA ESCALA DE TRANSMISSORES DE
PRESSÃO PIEZORESISTIVOS DE ALTO DESEMPENHO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.**

**Área de Concentração:
Engenharia Elétrica**

Orientador: Prof. Dr. Edgar Charry

São Paulo

2014

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 7 de abril de 2014

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Mayor Herrera, César Augusto

Obtenção em larga escala de transmissores de pressão piezoresistivos de alto desempenho / C.A. Mayor Herrera. -- São Paulo, 2014.

88 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Instrumentação elétrica 2.Automação industrial 3.Medidas elétricas 4.Metrologia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Dedico este trabalho a meus pais pelo amor e apoio incondicional e a Guilherme com enorme gratidão por sua compreensão, carinho, presença e incansável apoio durante todo o tempo de elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Ao Laboratório de Sistemas Integráveis – LSI da Universidade de São Paulo, à MEMS – Microssistemas Integrados Híbridos de Pressão Indústria e Comércio Ltda.

Ao professor Edgar Charry pelas discussões e instruções referentes à parte técnica deste trabalho.

Aos amigos Deivid Tellez, Alejandro Rodriguez, Vitor Matosinho e a todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

RESUMO

É apresentado um sistema para redução do tempo de calibração e compensação de sensores piezoresistivos de pressão para aplicações de automação e controle com características de alto desempenho, com compensação de diversas fontes de erro, especialmente, compensação de não-linearidade e influência da temperatura na medição, baseado em uma concepção que privilegia a precisão e exatidão da medida, a qualidade e a confiabilidade.

O sistema projetado permite a automação do processo de calibração e compensação térmica de transmissores de pressão por meio de um sistema de medição e programação múltiplo, que possibilita a aquisição dos sinais em um único computador para até 16 transmissores simultâneos, aperfeiçoando o tempo total do processo, permitindo efetuar essa operação para uma produção a nível industrial.

O tempo total do processo de compensação e calibração de mais de um transmissor foi reduzido em aproximadamente 6 horas por cada transmissor adicional. No caso de 16 transmissores o sistema sem multiplexação demoraria 114 horas enquanto o sistema com multiplexação demora 24 horas para efetuar o processo completo, representando uma diminuição de 78,9% no tempo total do processo.

Os transmissores calibrados e compensados usando o sistema de multiplexação apresentam TEB menor que 0,1% FS, mostrando que o sistema projetado permite que os transmissores de pressão produzidos cumpram com características de desempenho iguais às atingidas pelo sistema de compensação e calibração simples.

Palavras chave: Instrumentação 3. Automação Industrial. Metrologia. Calibração de sensores. Compensação de erro. Sensores para Automação.

ABSTRACT

Is presented a system for time optimization of the calibration and compensation process of piezoresistive pressure sensors for automation and control applications with high performance characteristics, with compensation of several error sources, specially, compensation of temperature dependencies and nonlinearity, based in an approach that privileges accuracy and precision in the measurements, quality and reliability.

The designed system enables the automation of the calibration process and temperature compensation of pressure transmitters through a measuring and multiple programming system that enables the acquisition of signals on a single computer for up to 16 simultaneous transmitters, improving the overall process time, allowing to perform this operation for a production of industrial level.

The total process time of compensation and calibration of more than one transmitter has been reduced by about 6 hours for each additional transmitter. In the case of 16 transmitters, the system without multiplexing would take 114 hours while the system with multiplexing takes 24 hours to make the entire process, representing a decrease of 78.9% in the total process time.

The transmitters calibrated and compensated using the multiplexing system have TEB less than 0.1% FS, showing that the designed system allows pressure transmitters produced comply with performance characteristics equal to those achieved by the original compensation and calibration system.

Keywords: Electric Instrumentation. Industrial Automation. Metrology. Sensor Calibration. Error Compensation. Sensors for Automation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema das séries 641 e 642.....	22
Figura 2 - Diagrama de blocos do sistema das séries 643 e 644.....	22
Figura 3 - Sensor piezoresistivo usado nos transmissores de pressão.....	23
Figura 4 - Saída típica do sensor de pressão (Maxim, 1998).	24
Figura 5 - Diagrama funcional do MAX1464 (Maxim, 2005).....	25
Figura 6 - Circuito conversor de corrente 4-20mA.....	27
Figura 7 - Simulação corrente de saída (mA) vs tensão do DAC do MAX1464 (V)...	27
Figura 8 - Circuito conversor de corrente de saída 4-20mA com ajuste de zero e span.	28
Figura 9 - Parâmetros de desempenho do transdutor relacionados com a exatidão.	29
Figura 10 - Saída do sensor sem calibrar e compensar vs entrada em %FS e temperatura	30
Figura 11 - Saída desejada do sensor depois de ser calibrado e compensado.	30
Figura 12 - Erros de não-linearidade e histerese (Fernandes da Luz, 2008).	34
Figura 13 - Erro a temperaturas constantes em função da pressão.....	37
Figura 14 - Total Error Band incluindo TCO e TCS.	37
Figura 15 - Diagrama em blocos do algoritmo para compensação do sensor e condicionamento do sinal	40
Figura 16 - Ilustração do transmissor de pressão com saída em corrente de 4-20mA	44
Figura 17. Ilustração da câmara climática com os transmissores de pressão e o sistema de distribuição de pressão de ar	44
Figura 17. Montagem do sistema de multiplexação para calibração e compensação dos transmissores de pressão.....	45
Figura 16 - Diagrama de Blocos do sistema MUX.....	45
Figura 17 - Diagrama de fluxo do software programado no microcontrolador do sistema MUX	48
Figura 18 - Simulação do protocolo de comunicação serial entre o MUX e o Desktop	48
Figura 19 - Interface de usuário	49
Figura 20 - Interface de usuário - Módulo 1 - Seção de medições.	50

Figura 21 - Interface de usuário - Módulo 1 - Seção de coeficientes e programação.	51
Figura 22 - Interface de usuário - Módulo 1 - Seção de verificação.	51
Figura 23 - Interface de usuário - Módulo 1 - Seção de configurações avançadas (portas).	52
Figura 24 - Interface de usuário - Módulo 1 - Seção de configurações avançadas (outras opções).	52
Figura 25 - Interface de usuário - Módulo 2.	53
Figura 26 - Interface de usuário - Módulo 3.	54
Figura 27 - Interface de usuário - Módulo 4.	54
Figura 28 - Diagrama de blocos da interface de usuário.	56
Figura 29 – Interface de usuário: opções para criar pastas e definir pastas de trabalho	57
Figura 30 - Interface de usuário: "Create Test Condition"	59
Figura 31 - Diagrama de fluxo da configuração do sistema	64
Figura 32 - Diagrama de fluxo do procedimento de medição	65
Figura 33 - Diagrama de fluxo da geração dos coeficientes e programação do MAX1464.	66
Figura 34 - Saída do sensor vs porcentagem do span de entrada.	69
Figura 35 - Diferença entre valor medido e valor ideal em porcentagem do span ideal a 20°C vs porcentagem do span de entrada e vs temperatura.	70
Figura 36 - Diferença entre valor medido e valor ideal em porcentagem do span ideal a 20°C vs porcentagem do span de entrada para 5 temperaturas.	70
Figura 37 - Diferença entre valor medido e reta de melhor ajuste (BFSL) em porcentagem do span ideal vs porcentagem do span de entrada.	71
Figura 38 - Saída do transmissor compensado e calibrado vs porcentagem do span de entrada.	72
Figura 39 - Erro da saída do transmissor calibrado e compensado vs porcentagem do span de entrada e vs temperatura.	73
Figura 40 - Erro da saída do transmissor calibrado e compensado vs porcentagem do span de entrada para 5 temperaturas.	73
Figura 41 - Erro da saída do transmissor calibrado e compensado em porcentagem do span ideal vs porcentagem do span de entrada.	74

Figura 42 - Comparação do tempo total do processo de calibração e compensação.
.....75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resumo de Testes para os Transmissores	31
Tabela 3.2 - Quantidade de ciclos de medição e quantidade e localização dos pontos de teste	32
Tabela 4.1 - Descrição do conteúdo do arquivo "_raw_data_file.txt"	60
Tabela 5.1 - Medições da saída de um sensor sem compensar e calibrar sujeito a vários ciclos variando a pressão de entrada.	69
Tabela 5.2 - Medições da saída de um transmissor compensado e calibrado sujeito a vários ciclos variando a pressão de entrada.	72
Tabela 5.3 - Resultado das medições dos 4 sensores antes da calibração e compensação.	76
Tabela 5.4 - Resultado das medições dos transmissores de pressão calibrados e compensados.	76
Tabela 5.5 - Comparação dos resultados das medições dos transmissores de pressão antes e depois do processo de calibração e compensação.	76
Tabela 10.1 - Explicação dos coeficientes de compensação e calibração	86

LISTA DE SÍMBOLOS

mA	Mili Amperes
bar	Unidade de Pressão
mbar	Mili Bar
P	Pressão
T	Temperatura em graus Celsius
V	Volts
Tmin	Temperatura mínima em graus Celsius
Tintr	Temperatura média em graus Celsius
Tmax	Temperatura máxima em graus Celsius
Pmin	Pressão mínima
Pmed	Pressão média
Pmax	Pressão máxima
Vmin	Saída em tensão do DAC do MAX1464 para a pressão mínima
Vmax	Saída em tensão do DAC do MAX1464 para a pressão máxima
Imin	Saída em corrente do transmissor para a pressão mínima
Imax	Saída em corrente do transmissor para a pressão máxima
Span	Diferença entre valor máximo e mínimo da saída
Offset	Saída para a pressão mínima
TCO	<i>Temperature Coefficient of Offset</i> (Coeficiente térmico do zero)
TCS	<i>Temperature Coefficient of Span</i> (Coeficiente térmico do Span)

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor analógico para digital)
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i> (Conversor digital para analógico)
TEB	<i>Total Error Band</i> – Máxima desvio positivo ou negativo da saída com relação ao valor ideal na faixa de pressão e temperatura compensada.
DSSP	<i>Digital Signal Sensor Processor</i> .
MEMS	Microsistemas Integrados Híbridos de Pressão Indústria e Comércio Ltda.
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade central de processamento).
PWM	<i>Pulse-width modulation</i> (modulação por largura de pulso).
DLL	<i>Dynamic-link library</i> (biblioteca de vínculo dinâmico).

SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
1.1	Objetivo Principal	18
1.2	Objetivos específicos	18
2	Revisão de Literatura.....	19
2.1	Transmissores de pressão usados no estudo.....	21
2.2	Diagrama de Blocos - Serie 641/642.....	21
2.3	Diagrama de Blocos - Serie 643/644.....	21
2.4	Subsistemas dos transmissores das séries 641/642 e 643/644.....	23
2.4.1	Sensor de pressão.....	23
2.4.2	Microprocessador MAX1464	24
2.4.3	Circuito conversor de corrente - Série 641/642	26
2.4.4	Circuito conversor de corrente - Série 643/644 - Ajuste de zero e span.....	28
3	Processo de Calibração e Compensação.....	29
3.1	Normas de Avaliação de desempenho para Transmissores para uso em sistemas de controle de processos industriais, IEC 60770 e IEC 61298	31
3.1.1	Quantidade de ciclos de medição de pontos de teste	32
3.1.2	Processamento dos valores medidos	33
3.1.3	Exatidão.....	33
3.1.4	Não-linearidade	33
3.1.5	Histerese	34
3.1.6	Repetitividade	34
3.1.7	Testes para efeitos da Temperatura nas medições.....	35
3.1.8	Coeficiente de Temperatura do Offset (TCO)	36
3.1.9	Coeficiente de Temperatura do Span (TCS)	36
3.1.10	Total Error Band (TEB).....	37

3.2	Aquisição e Processamento das Medições.....	38
3.3	Algoritmo para compensação do sensor e condicionamento do sinal.....	39
3.3.1	Modelagem dos dados	41
3.3.2	Correção dos modelos.....	42
4	Sistema de Calibração e Compensação Multiplexado.....	43
4.1	Projeto do Hardware MUX	43
4.1.1	Protocolo de comunicações.....	43
4.1.2	Protocolo serial no microcontrolador do sistema MUX	46
4.2	Projeto do software (Interface de usuário)	49
4.2.1	Interface de Usuário - Módulo 1.....	50
4.2.2	Interface de Usuário - Módulo 2.....	53
4.2.3	Interface de Usuário - Módulo 3.....	53
4.2.4	Interface de Usuário - Módulo 4.....	54
4.3	Descrição das funções da interface de usuário.....	55
4.3.1	Inicialização	57
4.3.2	Medição	59
4.3.3	Programação da memória flash.....	61
4.4	Procedimento de calibração e compensação.....	63
4.4.1	Configuração do sistema	63
4.4.2	Procedimento de medição	64
4.4.3	Geração de coeficientes e programação do transmissor.....	65
4.4.4	Problemas associados às medições.....	67
5	Avaliação do sistema.....	68
5.1	Medições dos sensores sem calibrar e compensar	68
5.2	Medições dos transmissores Compensados e Calibrados.....	71
5.3	Comparação de tempo total do processo de compensação e calibração	75
5.4	Resumo dos resultados das medições.....	76

6	Análise dos resultados.....	77
7	Conclusões.....	78
8	Definições.....	79
9	Bibliografia.....	81
10	Anexos	84

1 INTRODUÇÃO

Os Transmissores de Pressão são instrumentos de medição que pertencem à área de automação industrial, que por sua vez faz parte de um segmento da economia do país conhecida como indústria eletroeletrônica. Segundo estimativas da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), este ramo da economia representou 3,4% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, atingindo a marca de R\$124,4 bilhões no ano 2010.

A automação industrial mostra que é um fator muito importante na economia na medida em que aumenta a competitividade tecnológica entre as empresas dos mais diversos setores, em busca de redução de custos e aprimoramento dos seus processos produtivos. Uma linha de produção à prova de falhas, possibilitada pela automação industrial, é a certeza de uma atividade perene, geradora de caixa e diretamente responsável pela rentabilidade do negócio (Fauzi Timaco, 2008).

No Brasil atualmente não se fabricam transmissores de pressão piezoresistivos de alta qualidade e existem muitas aplicações industriais em processos de automação que requerem este tipo de transmissores. Devido a que não se fabricam no Brasil é necessária sua importação. Por tanto é de vital importância o desenvolvimento de um sistema que permita a fabricação de este tipo de transmissores para uma produção a nível industrial de tal forma que ditos transmissores se ajustem aos padrões internacionais mais usados para transmissão de pressão.

Em essa ordem de ideias, a produção de transmissores de pressão com características de alto desempenho, baseada em uma concepção que privilegia a precisão e exatidão da medida, a qualidade e a confiabilidade, é um diferencial que oferece competitividade no segmento de automação industrial, com vantagens estratégicas para o mercado nacional, representando uma opção de qualidade para o melhoramento dos processos produtivos e consequente redução dos custos de produção.

Para que a produção seja competitiva a nível industrial é importantíssimo aperfeiçoar o tempo global do processo e por tanto é necessário o desenvolvimento do projeto proposto.

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Obter capacidade tecnológica para fabricação de transmissores de pressão piezoresistivos de baixo custo, alto desempenho e de alta qualidade, especialmente na exatidão da medida tendo em conta a grande influência da temperatura sobre esta medida, apropriados para serem comercializados na indústria nacional e internacional. Isto por meio de um sistema de programação de vários transmissores (CHIP + Sensores), que possibilite a aquisição de sinais em um único computador desktop e, portanto, aperfeiçoe o tempo global do processo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Automação do processo de calibração e compensação térmica dos transmissores de pressão por meio de um sistema eletromecânico, com uma interface de usuário amigável, que permita fazer essa operação de forma serial para uma produção a nível industrial.
- Verificação do processo de compensação e calibração dos transmissores de pressão produzidos por meio da aplicação desenvolvida.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Os sensores objeto de estudo da pesquisa são transmissores de pressão piezoresistivos para ambientes industriais agressivos e não agressivos. Nesses dispositivos, o processo de calibração e compensação do sinal do sensor de pressão é realizado de forma completamente digital, utilizando um chip ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) de condicionamento de sinal. O chip é programado para corrigir as não-linearidades e os erros térmicos do sensor de pressão piezoresistivo em silício, dos diferentes blocos funcionais que constituem o chip e dos demais componentes eletrônicos que conformam o circuito eletrônico de condicionamento.

Desde as primeiras fases do projeto foram consideradas diversas técnicas que permitissem obter um produto com características de imunidade à emissão eletromagnética ajustadas às exigências técnicas da Diretiva EMC 89/336/EEC e em conformidade com as normas internacionais de Compatibilidade Eletromagnéticas EM 61000-6-4 (Requisitos de Emissão) e EM 61000-6-2 (Requisitos de Imunidade).

Para cada protótipo foi feito um processo total de caracterização elétrica estática e dinâmica seguindo as normas internacionais IEC 60770-1, IEC 60770-2, IEC 1298-1, IEC 1298-2, IEC 61298-3 e IEC 1298-4.

As características gerais de todos transmissores de pressão produzidos pela MEMS são:

- Calibração e compensação feita usando técnicas DSSP.
- Projetado para ser utilizado em ambientes industriais.
- Combina as mais recentes tecnologias de medição de pressão e compensação eletrônica.
- CE compliant: Atende a diretiva EU EMC.
- Temperatura do fluido de -20°C até +85°C.
- Revestimento: Aço Inox AISI 316 L.
- Proteção: IP-65, opcional IP-68.
- Proteção contra inversão de polaridade.

- Meio: ar, gás ou líquido S.S. 316 L compatível.
- Isolado do meio (gás ou líquido)

Os transmissores de pressão produzidos pela MEMS são os seguintes:

Serie Descrição

641	Transmissor de pressão, saída em corrente 4-20mA, total error band 0,5% F.S., exatidão 0,1% F.S.
642	Transmissor de pressão, saída em corrente 4-20mA, total error band 0,1% F.S., exatidão < 0,1% F.S.
643	Transmissor de pressão com ajuste de zero e span de +/- 5%, saída em corrente 4-20mA, total error band 0,5% F.S., exatidão 0,1% F.S.
644	Transmissor de pressão com ajuste de zero e span de +/- 5%, saída em corrente 4-20mA, total error band 0,1% F.S., exatidão < 0,1% F.S.
645	Transmissor de pressão, saída em tensão 0-10V, 0-5V, 1-5V e 1-6V, total error band 0,1% F.S., exatidão <0,1% F.S.
646	Transmissor de nível, saída em corrente 4-20mA, total error band 0,1% F.S., exatidão < 0,1% F.S.
647	Sonda submergível com módulo de ajuste de zero e span externo de +/- 5%, saída em corrente 4-20mA, total error band 0,1% F.S.
648	Transmissor de pressão básico, saída em corrente 4-20mA, total error band 0,5% F.S., exatidão < 0,5% F.S.
650	Transmissor de pressão com protocolo MODBUS, saída dual RS485 e em corrente 4-20mA, saída RS232/RS485, total error band 0,1% F.S.

2.1 TRANSMISSORES DE PRESSÃO USADOS NO ESTUDO

Para o sistema projetado e para os testes foram usados unicamente os transmissores de pressão das séries 641/642 e 643/644 da MEMS. Nesse capítulo são explicadas as características mais relevantes das séries 641/642 e 643/644 para os objetivos do estudo.

2.2 DIAGRAMA DE BLOCOS - SERIE 641/642

Como dito anteriormente, os transmissores da série 641/642 são transmissores de pressão com saída em corrente de dois fios de 4-20mA. Para obter uma saída analógica calibrada e compensada em temperatura, o transmissor usa o MAX1464, que é um chip ASIC de condicionamento de sinal, além de vários subsistemas adicionais, como o regulador de tensão, o amplificador do sinal análogo e a proteção de compatibilidade eletromagnética. A Figura 1 mostra um diagrama de blocos com os subsistemas mais representativos do transmissor.

2.3 DIAGRAMA DE BLOCOS - SERIE 643/644

Os transmissores da série 643/644 são transmissores de pressão com saída em corrente de dois fios de 4-20 mA com ajuste de zero e span. O ajuste de zero e da Amplitude da faixa nominal (span) permite que o usuário possa modificar a relação entre as pressões mínimas e máximas de trabalho do transmissor, e o sinal de saída de 4-20mA. Estes transmissores estão baseados na arquitetura das series 641/642 e por isso a maior parte dos blocos funcionais são iguais. Então serão detalhados só aqueles blocos que são diferentes das series 641/642. A Figura 2 mostra o diagrama de blocos com os subsistemas mais representativos.

Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema das séries 641 e 642.

Figura 2 - Diagrama de blocos do sistema das séries 643 e 644.

As características do sensor de pressão, do microprocessador e do regulador de tensão são iguais que na series 641/642.

2.4 SUBSISTEMAS DOS TRANSMISSORES DAS SÉRIES 641/642 E 643/644

2.4.1 SENSOR DE PRESSÃO

Na Figura 1 observa-se o sensor de pressão como um dos blocos do sistema. Os sensores usados são sensores piezoresistivos de silício. O sensor está dentro de um encapsulado de aço inox 316L que possui um diafragma altamente resistente a corrosão. A conexão elétrica é feita por meio de um conector de cinco pinos que é soldado diretamente na placa de circuito impresso. O sensor é feito de quatro resistores em configuração ponte de Wheatstone como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Sensor piezoresistivo usado nos transmissores de pressão.

A Figura 4 mostra a saída típica do sensor de pressão e define os valores de offset, full-scale e full-span output em função da corrente de saída.

Figura 4 - Saída típica do sensor de pressão (Maxim, 1998).

2.4.2 MICROPROCESSADOR MAX1464

O MAX1464 (Maxim, 2005) é um chip ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) de condicionamento de sinal altamente integrado, de baixo consumo de potência, de vários canais de baixo ruído. O MAX1464 pode ser usado com sensores de saída única ou de saída diferencial com sensibilidades desde 1mV/V até 1V/V. Ele oferece amplificação do sinal do sensor, calibração, linearização do sinal e compensação de temperatura que permitem um desempenho global abordando a repetitividade inerente ao sensor sem necessidade de nenhum componente externo de ajuste. Na Figura 5 pode-se observar o diagrama funcional do MAX1464. Abaixo são enumeradas as características mais importantes:

- CPU de 16 bits. Amplificação programável, calibração, linearização, e compensação de temperatura.
- ADC de 16 bits com dois canais diferenciais ou quatro canais de única entrada.
- Pode ser usado com sensores de sensibilidade desde 1mV/V até 1V/V.
- Dois canais de saída DAC de 16 bits ou PWM de 12 bits.
- Memória Flash de 4 kB para o código e os coeficientes.
- Memória FLASH de 128 Bytes para informações de usuário.

- Uma interface de comunicações SPI.
- Duas portas de entrada/saída de uso geral (GPIO).
- Sensor de temperatura integrado.
- Bloco de dois amplificadores operacionais.
- Ganho e zero de entrada do sensor programáveis.
- Taxa de amostragem e resolução do sensor programável.
- Opera com uma fonte única de 5.0V.

O CI MAX1464 dos transmissores de pressão das series 641 a 647 é programado para compensar as características de não-linearidade e dependência da temperatura do sensor e calibrar a saída para que se ajuste ao intervalo desejado. O anterior é feito de maneira digital com a geração e programação de um conjunto de coeficientes que representam parâmetros das equações que modelam as características do sensor. Esses coeficientes são gerados após adquirir um conjunto de medições da saída do transmissor sendo submetido a condições controladas de pressão e temperatura. O procedimento de medição e o algoritmo para gerar os coeficientes de Calibração e Compensação são explicados no capítulo 3.

Figura 5 - Diagrama funcional do MAX1464 (Maxim, 2005).

Na Figura 5 podem se observar os blocos funcionais mais importantes do MAX1464. Começando com as entradas INP1, INM1, INP2 e INM2 que significam respectivamente “Input Plus 1” (entrada 1 positiva), “Input Minus 1” (entrada 1 negativa), “Input Plus 2” (entrada 2 positiva) e “Input Minus 2” (entrada 2 negativa). O sinal proveniente do sensor é medido com os pinos INP1 e INM1. É importante ressaltar que o sensor de Temperatura fica no chip e o sinal dele junto com os sinais de entrada são multiplexados para posteriormente serem amplificados e digitalizados no DAC. Esses sinais são amplificados com o PGA (*programmable gain amplifier*, ou amplificador de ganho programável) e eles são deslocados no zero como o CO DAC (coarse offset DAC), que também é programável. Esses dados são usados pelo CPU em conjunto com o programa e os coeficientes de compensação e calibração que estão na Memória Flash para obter o dado desejado que é programado no DAC1 para obter a saída correspondente à entrada, compensada e calibrada. Os outros módulos são usados para fins de programação, como a Interface Serial (“Serial Interface”), ou de controle da alimentação. As saídas digitais, o DAC2 e os PWM não são usados nos transmissores de pressão.

2.4.3 CIRCUITO CONVERSOR DE CORRENTE - SÉRIE 641/642

Na Figura 6 se apresenta o circuito conversor de corrente do transmissor com saída 4-20mA (serie 641/642) (Fernandez da Luz, 2006). A saída será de 4-20mA na fonte para uma tensão de saída do DAC do MAX1464 entre 0,5 e 4,5 V. A referência de tensão de 5V é fornecida por o CI MAX15006B que não está no esquema de simulação, mas o consumo geral da referência de tensão e do MAX1464 é representado pela fonte de corrente ICC. O Amplificador operacional usado no esquema também está dentro do MAX1464. Na Figura 7 se apresentam os resultados da simulação.

Figura 6 - Circuito conversor de corrente 4-20mA.

Figura 7 - Simulação corrente de saída (mA) vs tensão do DAC do MAX1464 (V).

Uma característica importante a destacar do circuito da Figura 6 é que a terra ou referência digital não é a mesma do negativo da fonte de alimentação. Isso leva a considerações especiais para projetar o sistema de multiplexado dos sinais que será visto no capítulo cinco.

2.4.4 CIRCUITO CONVERSOR DE CORRENTE - SÉRIE 643/644 - AJUSTE DE ZERO

E SPAN

Na Figura 8 se apresenta o circuito conversor de corrente do transmissor com saída 4-20mA com ajuste de zero e span (serie 643/644) (Ramirez Beltrán, 2009). A saída será de 4-20mA na fonte para uma tensão de saída do DAC do MAX1464 entre 0,5 e 4,5 V, com um ajuste de $\pm 5\%$ do span definido inicialmente. A referência de tensão de 5V é fornecida por o CI MAX15006B que não está no esquema de simulação, mas o consumo geral da referência de tensão e do MAX1464 é representado pela fonte de corrente ICC. O Amplificador operacional usado no esquema também está dentro do MAX1464.

Figura 8 - Circuito conversor de corrente de saída 4-20mA com ajuste de zero e span.

O funcionamento do circuito observado na Figura 8 se encontra detalhado no relatório *Estudo e projeto de um transmissor 4-20 mA a dois fios com ajuste de zero e span*, Jorge Beltran (Ramirez Beltrán, 2009).

3 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO E COMPENSAÇÃO

A produção de um transdutor de pressão baseado em um sensor piezoresistivo tem que levar em conta vários fatores relacionados com a exatidão para poder fazer com que a medição da variável do processo e sua correspondente representação elétrica estejam próximo ao valor real, ou seja, com o mínimo de erro possível, exata, com baixa incerteza, eliminando características de não-linearidade e dependência térmica. Na Figura 9 são mostrados os fatores relacionados com a exatidão do sistema. Essas fontes de erro são inerentes ao transdutor, mas a magnitude do erro de cada uma delas pode depender das entradas principais e menores do sistema.

(Honeywell, 2004)

Figura 9 - Parâmetros de desempenho do transdutor relacionados com a exatidão.

O objetivo é produzir um transmissor em conformidade com as normas internacionais para transmissores para uso em sistemas de controle de processos industriais (IEC 60770) (Ver seção 3.1).

A saída de um sensor piezoresistivo é altamente dependente da temperatura, assim como outras variáveis externas. O comportamento é similar ao mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Saída do sensor sem calibrar e compensar vs entrada em %FS e temperatura

O objetivo do processo de calibração e compensação é diminuir o erro de saída e obter uma superfície similar à mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Saída desejada do sensor depois de ser calibrado e compensado.

3.1 NORMAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO PARA TRANSMISSORES PARA USO EM SISTEMAS DE CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS, IEC 60770 E IEC 61298

O objetivo da norma IEC 60770 ((CENELEC, 1999) e (CENELEC, 2003)) é especificar métodos de teste uniformes para a avaliação do desempenho de transmissores com sinais de saída elétricos ou pneumáticos. Foi feita para ser usada por fabricantes para determinar o desempenho de seus produtos e para os usuários ou estabelecimentos independentes para verificar as especificações fornecidas pelos fabricantes. A norma especifica os métodos e procedimentos para avaliar o desempenho do transmissor indicando em qual norma estão esses procedimentos, e especificamente no relacionado com dispositivos para controle e medição de processos, indica os procedimentos e testes que devem ser feitos para determinar a exatidão, encontrados na norma IEC 61298 (CENELEC, 1995).

Na Tabela 3.1 é mostrada uma lista com uma seleção do conteúdo dos testes que devem ser realizados para transmissores para processos industriais, indicando em qual seção da norma IEC 61298 eles estão.

Tabela 3.1 - Resumo de Testes para os Transmissores

Descrição	Notas do método de teste	Referência
Considerações gerais		IEC 61298-1 (CENELEC, 1995)
Exatidão e erro medido	Entre três e cinco ciclos de	IEC 61298-2 (CENELEC, 1995)
Não-linearidade	medições em sentido crescente e	IEC 61298-2 (CENELEC, 1995)
Histerese	decrecente, medindo pelo menos	IEC 61298-2 (CENELEC, 1995)
Repetitividade	seis pontos.	IEC 61298-2 (CENELEC, 1995)
Efeitos da Temperatura	Dois ou três ciclos	IEC 61298-3 (CENELEC, 1998)
Geração de reportes		IEC 61298-4 (CENELEC, 1995)

3.1.1 QUANTIDADE DE CICLOS DE MEDIÇÃO DE PONTOS DE TESTE

O desempenho do dispositivo deve ser verificado em toda a faixa de operação para valores crescentes e decrescentes. A norma especifica a necessidade de realizar vários ciclos de pressão. A quantidade e a localização dos pontos de teste devem ser considerados dependendo do tipo de teste desejado, do grau de exatidão desejada e das características avaliadas. Na Tabela 3.2 são mostradas a quantidade de ciclos de medição e a quantidade e localização dos pontos de teste recomendados, dependendo das necessidades.

Tabela 3.2 - Quantidade de ciclos de medição e quantidade e localização dos pontos de teste

Tipo de teste	Quantidade de ciclos de medição	Quantidade de pontos de teste	Localização dos pontos de teste (% do span de entrada)
Avaliação de desempenho	3 ou 5	6	0-20-40-60-80-100
Testes de caracterização		11	0-10-20-30-40-50-60-70-80-90-100
Teste de rotina	1	5	0-25-50-75-100
Teste de exemplo			

Para os objetivos do projeto foi selecionado fazer três ciclos de pressão. Cada ciclo compreende uma rampa positiva e uma rampa negativa de pressão, sendo que os valores de pressão são variados em passos de 10% desde 0 até o valor máximo de pressão, ou seja, 11 pontos de medição. Os dados obtidos são usados para calcular os erros correspondentes.

Adicionalmente, o valor correspondente para cada ponto de teste para um valor único de referência é obtido com um conjunto de medições gerando uma média estatística, com a finalidade de eliminar erros de medição.

É importante ressaltar que uma vez atingido o valor correspondente a 100% de pressão para um determinado ciclo de subida, devem ser obtidos os valores da rampa negativa, ou seja, dos valores decrescentes de pressão. Isto significa que os valores dos ciclos da sequência positiva não devem ser gerados de forma consecutiva, por exemplo, começando em 0%, indo até 100% e imediatamente reiniciar com 0% de pressão e completar um novo ciclo. Procedendo dessa forma implicará em valores falsos de histerese e repetitividade. A forma correta então é

percorrer um ciclo de pressão positivo, e uma vez atingido o máximo valor de pressão iniciar a sequência decrescente de pressão.

3.1.2 *PROCESSAMENTO DOS VALORES MEDIDOS*

As diferenças entre os valores de saída medidos nos pontos de teste para cada ciclo crescente e decrescente e os correspondentes valores de referência, são usadas como erros de saída. Os erros são expressos como porcentagem do span ideal de saída.

Para cada ponto de teste, as medições obtidas em ciclos sucessivos crescentes ou decrescentes, respectivamente, são calculadas as médias para obter uma curva média crescente e outra decrescente, e para esses dois últimos conjuntos de dados também é calculada uma média para obter o valor médio nesse ponto de teste.

3.1.3 *EXATIDÃO*

A exatidão é determinada selecionando os maiores valores positivo e negativo das medições crescentes e decrescentes correspondentes aos 3 ciclos de medição.

3.1.4 *NÃO-LINEARIDADE*

De acordo com a norma, a não-linearidade, para dispositivos que têm uma relação entrada-saída linear é determinada a partir da curva usando o valor médio total dos correspondentes erros médios das rampas positivas e negativas. A não-linearidade então se calcula a partir do maior desvio dessa curva com a reta traçada selecionada com um critério de ajuste específico. É suficiente considerar como retas de ajuste, a reta traçada a partir dos pontos terminais (*terminal based*), e a reta de melhor ajuste (BFSL). Na Figura 12 pode se observar o erro de não-linearidade usando a reta de melhor ajuste (BFSL)

Figura 12 - Erros de não-linearidade e histerese (Fernandes da Luz, 2008).

3.1.5 HISTERESE

Segundo a definição, é a propriedade de um dispositivo ou instrumento pela qual mostra valores de saída diferentes em relação aos valores de entrada dependendo da direção da sequência em que os valores de entrada são aplicados. Ela é a diferença entre valores consecutivos crescentes e decrescentes para qualquer ciclo de medição em um único ponto de teste. É selecionada a maior diferença de todos os ciclos, expressa como porcentagem do span ideal de saída. Na Figura 12 pode se observar a histerese.

3.1.6 REPETITIVIDADE

A não repetitividade é a diferença algébrica entre os valores extremos obtidos por uma sequência de medições consecutivas da saída por um pequeno período de tempo, para o mesmo valor de entrada, nas mesmas condições de operação. É determinada como a máxima diferença entre todos os valores de saída para qualquer valor de pressão de entrada considerando as rampas de medições em

sentido ascendente e descendente separadamente. O máximo valor obtido corresponde ao valor da não repetitividade.

3.1.7 TESTES PARA EFEITOS DA TEMPERATURA NAS MEDIÇÕES

O transmissor de pressão tem que ser submetido a testes de temperatura para determinar os efeitos da influência dela nas características mais significativas, e neste caso são consideradas as mudanças no zero (offset) e na sensibilidade.

Para fazer este teste, deve ser permitido um tempo suficiente em cada ponto de teste de temperatura para que exista estabilização térmica antes que sejam feitas as medições. Foi definido um tempo de 2 horas como suficiente para o teste, baseado nas pesquisas que foram feitas anteriormente com os transmissores de pressão no relatório “*Verificação dos limites térmicos do Transmissor de Pressão MEMS-641series*” (Charry, 2007).

O procedimento de medição que está na norma IEC 61298-3 indica que devem ser feitas medições em intervalos de aproximadamente 20°C em toda a faixa de operação do transmissor, ou seja, no caso são feitos testes em 25°C (temperatura de referência), temperatura máxima, temperatura mínima, e finalmente em 25°C. Pode ser feito um segundo ou terceiro ciclo de variações de temperatura. Em cada ponto de temperatura devem ser efetuadas medições crescentes e decrescentes da saída a cada 25% do span.

Pode ser feita uma análise mais rigorosa, tomando mais dados, tanto em temperatura quanto no span, mas isso depende da disponibilidade dos equipamentos de medição e do tempo necessário para fazer as medições.

Posteriormente podem ser calculados os coeficientes de temperatura do offset (TCO) e da sensibilidade (TCS). As mudanças nos dados de saída são calculadas a partir a média dos ciclos crescentes e decrescentes e expressas como porcentagem do span de saída. Na Figura 13 pode se observar o efeito da temperatura na saída do sensor.

3.1.8 COEFICIENTE DE TEMPERATURA DO OFFSET (TCO)

O offset é a saída do sensor à temperatura de referência quando a pressão aplicada é zero, ou seja, é o desvio de zero do sinal de saída quando a entrada é zero (pressão). O offset varia com a temperatura. O coeficiente de temperatura do Offset é definido como o desvio máximo do offset na saída quando a temperatura varia desde a temperatura de referência (T_{ref}) até qualquer outra temperatura (T) na faixa de operação do sensor. É especificado como %FS/°C. Ver Figura 13. Para calcular o TCO pode ser estabelecida uma relação da seguinte forma:

$$\text{Offset}(T) = \text{Offset}(T_0) + \text{TCO}(T - T_0) \quad (1)$$

$$\text{TCO} = (\text{Offset}(T) - \text{Offset}(T_0)) / (T - T_0) \quad (2)$$

Onde "Offset(T_0)" é o offset à temperatura de referência, "T" é a temperatura, " T_0 " é a temperatura de referência e "TCO" é o coeficiente de temperatura do offset.

3.1.9 COEFICIENTE DE TEMPERATURA DO SPAN (TCS)

O coeficiente de temperatura do Span é definido como o desvio máximo no span na saída quando a temperatura varia desde a temperatura de referência (T_{ref}) até qualquer outra temperatura (T) na faixa de operação do sensor. É especificado como %FS/mA·°C ou %FS/[unidades da saída]·°C. Ver Figura 13. Para calcular o TCS pode ser estabelecida uma relação da seguinte forma:

$$\text{Span}(T) = \text{Span}(T_0) + \text{TCS}(T - T_0) \quad (3)$$

$$\text{TCS} = (\text{Span}(T) - \text{Span}(T_0)) / (T - T_0) \quad (4)$$

Onde "Span(T_0)" é o Span à temperatura de referência, "T" é a temperatura, " T_0 " é a temperatura de referência e "TCS" é o coeficiente de temperatura do span.

Figura 13 - Erro a temperaturas constantes em função da pressão.

3.1.10 TOTAL ERROR BAND (TEB)

Seguindo com a estimativa individual ou de grupos de componentes de incerteza e expressando-as como incertezas padrão, o próximo passo é calcular a incerteza padrão combinada, ou Total Error Band (TEB). O TEB é definido como a menor faixa que cobre todos os valores de erro em função da pressão e da temperatura dentro da faixa de operação.

Figura 14 - Total Error Band incluindo TCO e TCS.

Na Figura 14 (a) pode se observar o Total Error Band baseado na Figura 13. A Figura 14 (b) mostra o mesmo TEB, mas em uma representação 3D indicando o eixo da temperatura. Essas representações são aproximadas, mas usando dados reais o

TEB deve incluir também repetitividade, histerese e não-linearidade junto com os efeitos da temperatura.

3.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DAS MEDIÇÕES

O processo de correção das características do sensor está dividido em duas etapas fundamentais: a primeira delas é executada durante a fabricação do transmissor e consiste em obter numa bancada de calibração os coeficientes específicos que corrigem as características do sensor e do MAX1464. Estes coeficientes são específicos para cada conjunto sensor-MAX1464. O segundo momento é executado quando o transmissor está medindo, e consiste em executar em tempo real as funções de correção dos dados medidos pelo sensor e fornecer a saída ou resultado da medição corrigida. As funções de correção estão programadas no CPU do MAX1464 sendo que o que muda de um conjunto sensor-MAX1464 para outro são os coeficientes das funções que foram calculados na bancada de calibração.

É importante compreender a forma como são corrigidos os erros do sinal. Como observado na Figura 5, a CPU se encontra depois dos sensores de pressão e temperatura, mas antes do DAC. Como a correção acontece em tempo real na CPU, se na CPU são corrigidos somente os erros dos sensores, quando o sinal seja enviado ao DAC ele vai degradar a correção realizada porque ele também é sensível à temperatura. Para que isso não aconteça, o DAC também deve ser caracterizado para saber como ele vai afetar o sinal, e então fazer com que a CPU modifique o sinal enviado ao DAC de forma inversa, para compensar a saída e que ela esteja no intervalo desejado. Ou seja, os erros dos sinais de pressão e temperatura são corrigidos depois que acontecem e os erros do DAC são corrigidos antes.

Para adquirir os dados é usada uma interface de usuário em Labview (é explicada no capítulo 4.2). A interface permite configurar e ler os registradores do MAX1464, tendo acesso às leituras do ADC e conseguindo também configurar o DAC para obter qualquer saída desejada dentro dos limites permitidos.

Os transmissores passam por uma fase de aquisição de dados a três temperaturas e três pressões, tomando dados do ADC do sensor de pressão para cada pressão em

cada temperatura, do ADC do sensor de temperatura, e também tomando dados para dois pontos de corrente da saída correspondentes a dois valores de configuração do DAC para cada temperatura, para gerar uma matriz como a seguinte:

$$\begin{pmatrix} \text{AdcP}_{\text{Pmin},\text{Tmin}} & \text{AdcP}_{\text{Pmed},\text{Tmin}} & \text{AdcP}_{\text{Pmax},\text{Tmin}} & \text{AdcT}_{\text{Tmin}} & \text{Saída}_{\text{Dac}(-0,5),\text{Tmin}} & \text{Saída}_{\text{Dac}(0,5),\text{Tmin}} \\ \text{AdcP}_{\text{Pmin},\text{Tmed}} & \text{AdcP}_{\text{Pmed},\text{Tmed}} & \text{AdcP}_{\text{Pmax},\text{Tmed}} & \text{AdcT}_{\text{Tmed}} & \text{Saída}_{\text{Dac}(-0,5),\text{Tmed}} & \text{Saída}_{\text{Dac}(0,5),\text{Tmed}} \\ \text{AdcP}_{\text{Pmin},\text{Tmax}} & \text{AdcP}_{\text{Pmed},\text{Tmax}} & \text{AdcP}_{\text{Pmax},\text{Tmax}} & \text{AdcT}_{\text{Tmax}} & \text{Saída}_{\text{Dac}(-0,5),\text{Tmax}} & \text{Saída}_{\text{Dac}(0,5),\text{Tmax}} \end{pmatrix}$$

As temperaturas e pressões às que são submetidos os transmissores no processo de medição são as que determinam a faixa de operação. Por exemplo, se o objetivo do transmissor é fornecer uma saída Calibrada e Compensada de 0bar a 10bar para funcionar em um ambiente com temperaturas entre 0°C e 50°C, os valores para Tmin, Tmed, Tmax, Pmin, Pmed e Pmax seriam:

$$\text{Tmin} = 0^{\circ}\text{C} \quad \text{Tmed} = 25^{\circ}\text{C} \quad \text{Tmax} = 50^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Pmin} = 0\text{bar} \quad \text{Pmed} = 5\text{bar} \quad \text{Tmax} = 10\text{bar}$$

O procedimento completo de medição é detalhado no capítulo 4.4.

3.3 ALGORITMO PARA COMPENSAÇÃO DO SENSOR E CONDICIONAMENTO DO SINAL

O algoritmo para compensação do sensor e condicionamento do sinal foi desenvolvido pela MAXIM (Maxim, 2005), e esse algoritmo é usado no sistema com algumas modificações para adaptá-lo às necessidades. O diagrama em blocos do algoritmo para compensação do sensor e condicionamento do sinal é o mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Diagrama em blocos do algoritmo para compensação do sensor e condicionamento do sinal

Os termos abaixo são usados como parâmetros para o algoritmo.

- Tmin temperatura mínima em graus Celsius
- Tintr temperatura média em graus Celsius
- Tmax temperatura máxima em graus Celsius
- Pmin pressão mínima
- Pmed pressão média
- Pmax pressão máxima
- Vmin saída desejada do MAX1464 para a pressão mínima.
- Vmax saída desejada do MAX1464 para a pressão máxima.
- Temp coluna de medições de temperatura
- DACinM coluna de medições correspondente a 12,5% de FSO
- DACinP coluna de medições correspondente a 87,5% de FSO

A captura dos dados gera a matriz de entrada de dados (eq.(5)):

$$ad = \begin{pmatrix} 0 & Pmin & Pmed & Pmax & Temp & DACinM & DACinP \\ Tmin & ad_{1,1} & ad_{1,2} & ad_{1,3} & ad_{1,4} & ad_{1,5} & ad_{1,6} \\ Tintr & ad_{2,1} & ad_{2,2} & ad_{2,3} & ad_{2,4} & ad_{2,5} & ad_{2,6} \\ Tmax & ad_{3,1} & ad_{3,2} & ad_{3,3} & ad_{3,4} & ad_{3,5} & ad_{3,6} \end{pmatrix} \quad (5)$$

A seguir, os dados medidos são usados para modelar, corrigir e gerar coeficientes de compensação para o sensor de pressão, o sensor de temperatura e o DAC. A partir da matriz de dados, todos os valores de pressão e temperatura são normalizados em complemento de dois.

É importante observar que o algoritmo original foi feito para que a saída seja em tensão entre 0,5V até 4,5V diretamente na saída do DAC do MAX1464, mas como a saída precisa ser em corrente 4-20mA, no circuito depois do DAC existe um conversor Tensão-Corrente. Estes circuitos analógicos adicionais também possuem uma sensibilidade, offset e comportamento térmico que influencia na saída e que deve ser compensado e calibrado. Para fazer isto, no algoritmo é simplesmente considerar o bloco do DAC junto com o circuito analógico como se fosse um só. Desta forma os efeitos da temperatura na sensibilidade e no offset são combinados e a calibração é feita para um único conjunto. Os parâmetros de entrada do algoritmo serão os mesmos com a única diferença que V_{min} e V_{max} são substituídos por I_{min} e I_{max} , ou seja, 4mA e 20mA respectivamente.

3.3.1 *MODELAGEM DOS DADOS*

Esta seção faz a modelagem matemática dos dados do sensor de pressão, do sensor de temperatura e do DAC. As funções que são obtidas são usadas como modelo para cada um deles. Primeiro são modelados os dados do sensor de pressão para cada temperatura e posteriormente é modelada a variação dos coeficientes com a temperatura. Depois, combinando essas equações para incluir a dependência da temperatura são obtidas equações de segunda ordem que modelam o sensor. O sensor interno de temperatura do MAX1464 também tem que ser modelado. A função que modela a saída de temperatura do ADC é obtida com um modelo de segunda ordem. O DAC do MAX1464 tem que ser modelado para ajustar os valores de entrada às variações na temperatura e no processo (ganho e offset). Os modelos obtidos são usados posteriormente para obter os coeficientes e fazer a correção. O processo em detalhe para a obtenção dos modelos está no artigo *MAX1464 Signal-Conditioner, Sensor Compensation Algorithm, Application Note 3649* (Maxim, 2005).

3.3.2 CORREÇÃO DOS MODELOS

A correção dos modelos procura normalizar, centrar em zero, amplificar, eliminar as não-linearidades e a dependência da temperatura do sinal. É neste passo que são obtidos os coeficientes de compensação e calibração que são usados para programar o MAX1464.

4 SISTEMA DE CALIBRAÇÃO E COMPENSAÇÃO MULTIPLEXADO

O trabalho desenvolvido nesta etapa foi de vital importância para o melhoramento do sistema geral e para incrementar o número de transmissores que podem ser calibrados. Consiste basicamente no projeto de um sistema de multiplexação que será descrito abaixo, incluindo os cabos e conectores usados, assim como o protocolo de comunicações para fazer o controle desde o software em Labview.

4.1 PROJETO DO HARDWARE MUX

4.1.1 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÕES

Baseado nos requerimentos do sistema, o desenvolvimento do sistema de multiplexado inicia com a identificação de cada um dos sinais.

O hardware projetado efetua a multiplexação dos sinais necessários para o processo de compensação e calibração dos transmissores de pressão objetos do estudo. Os sinais multiplexados são os seguintes: comunicação SPI (5 fios: VDD, DGND, CS, DIO, SCLK) e alimentação do transmissor (2 fios: positivo e negativo da fonte de tensão). É importante lembrar que o negativo da fonte de tensão e o GND da comunicação SPI são sinais diferentes devido às características do hardware do transmissor de pressão (MEMS Ltda., 2008)).

O sistema de multiplexação esta preparado para utilizar os transmissores de pressão com saída em corrente 4-20mA baseados no MAX1464. Eles são conformados por o sensor de pressão, o MAX1464, os circuitos de condicionamento de sinal e as conexões e características mecânicas apropriadas para uso em processos industriais, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Ilustração do transmissor de pressão com saída em corrente de 4-20mA

Estes transmissores de pressão são colocados no sistema de controle de pressão, temperatura e humidade como ilustrado na Figura 5. Na Figura 5 as conexões pretas representam os cabos de alimentação, as conexões azuis representam os cabos de comunicação SPI de cada transmissor de pressão e a conexão cinza indica a entrada de ar pressurizado. Na Figura 17 são ilustrados unicamente 4 transmissores de pressão, mas o sistema está preparado para até 16 transmissores.

Figura 17. Ilustração da câmara climática com os transmissores de pressão e o sistema de distribuição de pressão de ar

A montagem dos transmissores de pressão dentro da câmara climática, em conjunto com o sistema de multiplexação, são ilustrados na Figura 18. Na Figura 18 as conexões pretas representam os cabos de alimentação, as conexões azuis representam os cabos de comunicação SPI de cada transmissor de pressão, a

conexão cinza indica a entrada de ar pressurizado, as conexões verdes indicam os cabos de comunicação RS232 entre o PC e os dispositivos e a conexão laranja indica a comunicação paralela gerada pelo PC para controlar o MAX1464; esta comunicação é convertida para SPI para poder adequar às características da porta de comunicações de cada MAX1464.

Figura 18. Montagem do sistema de multiplexação para calibração e compensação dos transmissores de pressão

O diagrama de blocos dos sinais, a fonte e o PC está na Figura 19.

Figura 19 - Diagrama de Blocos do sistema MUX

No diagrama da Figura 19, (A) representa um multímetro em modo de medição de corrente, (MUX) representa o multiplexor projetado, (TPPx) representa cada transmissor de pressão e (P2SPI) representa o módulo da MA-XIM para fazer a conversão de paralelo a SPI.

Os sinais multiplexados são os correspondentes ao protocolo SPI (5 fios) e à alimentação do transmissor (2 fios). Para o SPI todas as tensões estão na faixa 0-5V. O consumo de corrente no transmissor não é influenciado pela conexão SPI já que quando são realizadas as medições a porta SPI não é usada; ela é usada só para configuração dos registradores ou para programar a memória Flash do MAX1464. Para a alimentação do transmissor as tensões estão entre 12-32V. A corrente mínima é de 4 mA e a máxima é de 20 mA.

Para as especificações do Hardware do MUX foi usado o software Eagle (CadSoft Computer, 2010) que serve para fazer circuitos esquemáticos e as correspondentes placas de circuito impresso. Esse primeiro protótipo foi pensado para funcionar com uma fonte de alimentação de 9V, 5 multiplexores analógicos, 16 relays de duas linhas cada um, um microcontrolador para fazer o controle dos sinais dos multiplexores e para estabelecer a comunicação com o PC pela porta serial e outros componentes para adequar as potencias e níveis de tensão.

4.1.2 PROTOCOLO SERIAL NO MICROCONTROLADOR DO SISTEMA MUX

O protocolo de comunicações entre o sistema MUX e o PC foi projetado como um enlace ponto a ponto usando RS232. O sistema proposto permite uma comunicação suficientemente rápida e confiável para enviar os dados de configuração, comandos e mensagens de estado e erro entre o sistema Multiplexador e a interface de usuário. O diagrama de fluxo do software programado no microcontrolador do sistema MUX é ilustrado na Figura 17:

O programa desenvolvido foi implementado em linguagem C para um microcontrolador ATMEGA32 (Atmel Corporation, 2001) e compilado usando o software CodeVisionAVR versão 2.05.5 (HP InfoTech, 2011).

Foi usado o software ISIS de Labcenter Electronics para fazer a simulação do circuito e da comunicação serial. Na Figura 21 é mostrado o resultado da comunicação quando são enviadas as seguintes sequências de caracteres:

- SEL00
- SEL01
- SEL15

A comunicação é RS232, 9600 bps, 8 bits de dados, 1 bit de parada e sem paridade.

Como é observado na Figura 21, o microcontrolador responde com “TPPxx” cinco vezes quando recebe o conjunto de caracteres “SELxx” para que a máquina de estados no software em Labview não tenha problemas para reconhecer o que foi recebido. As simulações foram feitas no software ISIS do Proteus 7.5 SP3 de Labcenter Electronics.

Figura 21 - Simulação do protocolo de comunicação serial entre o MUX e o Desktop

4.2 PROJETO DO SOFTWARE (INTERFACE DE USUÁRIO)

A componente mais forte no trabalho desenvolvido foi a elaboração do software em Labview que serve como interface de usuário, para fazer a compensação e calibração de até 16 transmissores de pressão. A interface de usuário foi elaborada para dar acesso ao usuário a todas as funções de configuração, medição, geração de coeficientes e programação do MAX1464. Na Figura 22 é observado o painel frontal de interface de usuário.

Figura 22 - Interface de usuário

A distribuição geral da interface é por módulos. Tem quatro módulos que contêm todas as opções necessárias para fazer o processo de calibração e compensação. O primeiro módulo contém as opções para tomar os dados, a geração de coeficientes e programação do MAX1464, a verificação e algumas opções de avançadas de configuração. O segundo módulo contém informações do processo e indicadores de pressão do calibrador, temperatura e umidade da câmara climática e corrente de saída do laço. O terceiro módulo contém os controles para criar ou ler pastas de trabalho e para ativar ou desativar qualquer uma das dezesseis saídas do

multiplexador. E o quarto módulo contém as matrizes e gráficos para os dados medidos.

4.2.1 INTERFACE DE USUÁRIO - MÓDULO 1.

Seção de medições.

Esta seção contém as opções para definir as condições de teste para cada transmissor, para acessar os registradores do MAX1464, para fazer leituras do ADC e para guardar os dados medidos, além de alguns campos de informação acerca dos equipamentos usados no processo. Ver Figura 23.

Figura 23 - Interface de usuário - Módulo 1 - Seção de medições.

Seção de geração de coeficientes e programação do chip.

Esta seção contém os controles para criar os coeficientes de compensação e calibração, personalização do arquivo HEX para programar o MAX1464, programação da memória FLASH de programa e de usuário. Ver Figura 24.

Figura 24 - Interface de usuário - Módulo 1 - Seção de coeficientes e programação.

Seção de verificação.

Esta seção permite estabelecer uma pressão e calcular o erro na saída de corrente do transmissor usando a medição do multímetro e os valores máximos e mínimos de pressão configurados nas condições de teste. Ver Figura 25.

Figura 25 - Interface de usuário - Módulo 1 - Seção de verificação.

Seção de configurações avançadas.

Esta seção permite configurar as portas de comunicação serial usadas para os diferentes instrumentos de medição e controle do processo. Ver Figura 26.

Figura 26 - Interface de usuário - Módulo 1 - Seção de configurações avançadas (portas).

Seção de configurações avançadas (outras opções).

Esta seção oferece acesso às configurações avançadas, ressaltando os controles de execução do programa no MAX1464 como “initialize”, “reset”, “halt” e “start”. Essas funções são feitas usando os drivers de dispositivos da DLL (*Dynamic-link library*, ou biblioteca de vínculo dinâmico). Ver Figura 27.

Figura 27 - Interface de usuário - Módulo 1 - Seção de configurações avançadas (outras opções).

4.2.2 INTERFACE DE USUÁRIO - MÓDULO 2.

Esta seção contém informação do estado da comunicação com o transmissor, tempo de uso do sistema e controles para ativar ou desativar a visualização das variáveis de pressão, temperatura, umidade e corrente de laço. Figura 28.

Figura 28 - Interface de usuário - Módulo 2.

4.2.3 INTERFACE DE USUÁRIO - MÓDULO 3.

Esta seção contém os controles para ativar ou desativar cada um dos canais do MUX, usados pelos transmissores para sinais analógicos e digitais, e também para definir ou criar as pastas de trabalho a serem usadas no processo. Ver Figura 29.

Figura 29 - Interface de usuário - Módulo 3.

4.2.4 INTERFACE DE USUÁRIO - MÓDULO 4.

Por último, este módulo mostra os resultados das medições realizadas, em formato matricial e em gráficos. Ver Figura 30.

Figura 30 - Interface de usuário - Módulo 4.

4.3 DESCRIÇÃO DAS FUNÇÕES DA INTERFACE DE USUÁRIO.

A interface feita em Labview passa por uma fase inicial de declaração e inicialização de variáveis, e depois entra em um ciclo infinito esperando que aconteçam “eventos”, os quais são gerados ao modificar o estado de algum controle no painel frontal. O ciclo termina quando no painel frontal é apertado o botão “Stop”. Na Figura 31 pode se observar o diagrama de fluxo da interface de usuário.

Para efetuar o controle do hardware relacionado com o processo de calibração e compensação são utilizados vários subVIs que funcionam como Drivers. Estes drivers controlam os calibradores de pressão, a câmara climática, os multímetros e o MUX. Adicionalmente, o controle da comunicação SPI com os transmissores e todas as funções de leitura e escrita do MAX1464 são implementadas no LabView usando uma DLL (Dynamic-link library ou biblioteca de vínculo dinâmico) que foi feita pela Maxim e disponibilizada junto com o MAX1464 EV kit (kit de avaliação do MAX1464).

O módulo de LabView utilizado para fazer qualquer chamado de função da DLL é o “Call Library Function Node” e pode ser configurado indicando a quantidade de parâmetros de entrada e saída, assim como o tipo de dado, ou seja, se são números inteiros, de ponto flutuante, vetores, etc.

O calibrador DPI515 é controlado com o VI Init_DPI515. Esse controlador usa vários subVIs da livreria DPI515 que está na pasta “instr.lib” do LabView. O VI Init_DPI515 implementa a comunicação entre a Interface de usuário e o calibrador de pressão, que é feita usando o protocolo serial RS232 utilizando a linguagem de comandos SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments – comandos padrão para instrumentos programáveis). De forma geral, o software usa o Init_DPI515 para quatro eventos: medição da pressão atual, ajustar o ponto de referência, controlar até chegar à pressão desejada e finalizar a comunicação com o DPI515.

Figura 31 - Diagrama de blocos da interface de usuário

O calibrador PPC3 é controlado com o VI DHI PPC3. Este subVI usa vários subVIs da livreria PPC3H que está disponível no site da National Instruments e que deve estar na pasta instr.lib do LabView. Os subVIs da livreria PPC3H tiveram que ser modificados pois foram feitos originalmente para uma versão antiga do LabView (versão 5). O DHI PPC3 efetua a comunicação com o dispositivo via serial RS232 usando a norma IEEE 488.2. O DHI PPC3 tem várias opções de configuração, mas as tarefas básicas, ou seja, medição, modificar ponto de referência, controlar, e finalizar, são similares com o DPI515, mudando principalmente os nomes dos parâmetros usados.

O sistema MUX é controlado usando o sub-vi Mux_Serial. É usado para ativar cada um dos canais de comunicação ou desativar todos os canais. Isto é feito com o protocolo descrito na seção 4.1.2.

4.3.1 INICIALIZAÇÃO

Main Directory

Este subVI abre uma janela para selecionar um arquivo ou diretório e retorna o endereço correspondente. Neste caso, foi utilizado para estabelecer a pasta de trabalho principal. O endereço retornado, ou “path” é usado por outros subVIs para criar, ler e modificar os arquivos correspondentes a cada transmissor calibrado, ou seja, o “_test condition.txt”, o “_raw_data_file.txt”, o “_comp coef file.txt” e os arquivos HEX de programação do MAX1464.

Figura 32 – Interface de usuário: opções para criar pastas e definir pastas de trabalho

Create Working Directory

Este subVI abre uma janela pedindo para o usuário digitar um número identificador para o processo geral. Este número é associado com a pasta geral que contém as pastas de trabalho para cada transmissor. Depois de ter selecionado um número, o subVI cria uma pasta no endereço indicado em “Select Working Directory” com o nome formado pelo número escolhido, e a data atual, e dentro dessa pasta, cria 16 pastas, cada uma para 1 transmissor. Dentro de cada uma das 16 pastas, o subVI cola os arquivos HEX base, que posteriormente serão modificados com as informações específicas para cada transmissor.

Read Working Directory

Este subVI usa o endereço indicado em “Main Directory” para indicar o endereço da pasta principal que contém as pastas de trabalho para cada transmissor. É usado principalmente para retomar um processo de compensação e calibração iniciado previamente ou para ler dados de processos anteriores.

Create Test Condition

Este subVI abre uma janela na qual devem ser inseridos os parâmetros do processo de calibração e compensação, como pontos de temperatura e de pressão das medições, e as características do transmissor, como limites mínimo e máximo da saída analógica, unidades de pressão, tipo de transmissor, informações de usuário, etc. Todos esses campos são organizados em um arquivo TXT (_test condition.txt) que é único para cada transmissor.

Figura 33 - Interface de usuário: "Create Test Condition"

Read Test Condition

Este subVI utiliza o endereço da pasta de trabalho do transmissor selecionado para ler o arquivo “_test condition.txt” correspondente, e carregar os dados contidos nele para usá-los como parâmetros no processo de calibração e compensação. Esta função é importante para retomar um processo de medição iniciado previamente ou simplesmente para visualizar dados de processos anteriores.

4.3.2 MEDIÇÃO

Read Raw Data File

Este subVI acessa o arquivo “_raw_data_file.txt” e coloca o conteúdo do arquivo nas variáveis globais correspondentes da interface de usuário para poder usar-las para outras funções. O conteúdo do arquivo “_raw_data_file.txt” é descrito na Tabela 4.1.

Write Raw Data File

Este subVI cria o arquivo “_raw_data_file.txt” com o conteúdo explicado na Tabela 4.1 a partir das variáveis globais correspondentes da interface de usuário.

Tabela 4.1 - Descrição do conteúdo do arquivo "_raw_data_file.txt"

Parâmetro	Descrição
User settings	Informação de usuário (128 caracteres)
Temperature settings	Configurações dos pontos de temperatura dos testes (Tmin, Tmed e Tmax)
Pressure settings	Configurações dos pontos de pressão dos testes (Pmin, Pmed e Pmax)
ADC Data	Dados medidos do ADC (pressão e temperatura)
DAC output	Dados medidos da saída do DAC (corrente, tensão, etc)
Time of measurements	Hora em que foram feitas as medições
Contents of module registers	Valores de configuração dos registradores do MAX1464 com os quais foram feitas as medições

Clear Data

Este subVI apaga as variáveis globais que tem a informação das medições do transmissor de pressão e prepara a interface de usuário para um novo conjunto de medições de outro transmissor.

Select Transmitter

Este subVI ativa o canal do MUX selecionado e informa à interface de usuário se a comunicação com o transmissor de pressão foi bem sucedida, o que significa que o processo de medição ou programação do transmissor pode ser iniciado.

Release Transmitter

Este subVI desativa os canais do MUX e faz um "Clear Data" na interface de usuário.

Configure Device

Este subVI permite ler e modificar cada um dos registradores de configuração do MAX1464.

Set Temperature

Com este subVI é modificada a temperatura da câmara climática usando como novo ponto de temperatura um dos três pontos configurados previamente, ou seja, T_{min} , T_{med} ou T_{max} .

Set Pressure

Com este subVI é modificada a pressão do calibrador (o DPI515 ou o DHI PPC3) usando como novo ponto de pressão um dos três pontos configurados previamente, ou seja, P_{min} , P_{med} ou P_{max} .

Characterize DAC

Este subVI é usado para fazer as medições do DAC. Ele usa os drivers de dispositivos da DLL para a comunicação com o MAX1464 modificando os valores do DAC seguindo o algoritmo de compensação e calibração, e medindo a saída correspondente usando os drivers de dispositivos para controlar o multímetro.

Read ADC

Este subVI usa os drivers de dispositivos da DLL para se comunicar com o MAX1464 e obter o valor da leitura do ADC correspondente aos pontos de pressão e temperatura selecionados.

4.3.3 PROGRAMAÇÃO DA MEMÓRIA FLASH

Create Comp Coeff

Este subVI usa os drivers de dispositivos da DLL para gerar os coeficientes de calibração e compensação a partir dos parâmetros de entrada e dos dados medidos,

que são um conjunto de 10 números de precisão dupla de ponto flutuante (dados de referência das medições), um conjunto de 12 inteiros curtos com sinal (medições do ADC), e um conjunto de 6 números de precisão dupla de ponto flutuante (medições do DAC). Depois gera o arquivo “_comp_coef_file.txt” contendo os 36 coeficientes calculados, correspondentes ao transmissor selecionado.

Personalize Flash File

Este subVI utiliza os 36 coeficientes de compensação e calibração, previamente gerados, para modificar o arquivo HEX de programação da memória Flash do MAX1464 incluindo os valores correspondentes ao transmissor selecionado.

Write Prog to Flash

Este subVI usa os drivers de dispositivos da DLL para programar a memória Flash do MAX1464, usando o arquivo HEX de programação, previamente personalizado, correspondente ao transmissor selecionado.

Read User Flash

Este subVI usa os drivers de dispositivos da DLL para ler o conteúdo da memória de usuário do MAX1464 (128 bytes).

Write User Flash

Este subVI usa os drivers de dispositivos da DLL para escrever na memória de usuário do MAX1464 (128 bytes).

4.4 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO E COMPENSAÇÃO

Para fazer a calibração e compensação dos transmissores de pressão é necessário seguir um procedimento básico. Mesmo assim, a interface permite continuar o processo a partir de alguns pontos previamente feitos. O manual de usuário contém o procedimento detalhado de como fazer a calibração e compensação dos transmissores de pressão usando esta interface de usuário. Com tudo, será descrito de maneira geral o procedimento.

Existem três fases no procedimento. A primeira fase é de configuração do sistema, a segunda é de aquisição de dados e a terceira é de geração de coeficientes e programação do transmissor.

Inicialmente, tendo um transmissor funcional pronto para ser calibrado e compensado, devem ser configurados os registradores com os valores padrão. O valor do registrador que configura o ganho do PGA deve ser ajustado para obter um melhor desempenho e maximizar o intervalo do conversor ADC do MAX1464. Para isso deve ser selecionada a temperatura para a qual a sensibilidade do sensor é maior, e aplicar pressão máxima e mínima. Assim, deve ser selecionado o ganho do PGA e o coarse offset que maximizem a saída do ADC nessas condições (o PGA, ou Amplificador de Ganho Programável, e o coarse offset fazem parte do registrador ADC_CONFIG_1A).

4.4.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

Na fase de configuração do sistema o usuário tem que criar as pastas de trabalho de cada transmissor onde serão armazenados os arquivos de condições de teste, medições, coeficientes gerados e arquivos HEX para programar o MAX1464. Na Figura 34 é mostrado o diagrama de fluxo desta fase.

Figura 34 - Diagrama de fluxo da configuração do sistema

4.4.2 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

Na fase de medições o usuário tem que ajustar os pontos de temperatura na câmara climática e esperar a estabilização térmica para posteriormente fazer medições das

diferentes pressões e a temperatura do MAX1464. Na Figura 35 é mostrado o diagrama de fluxo desta fase.

Figura 35 - Diagrama de fluxo do procedimento de medição

4.4.3 GERAÇÃO DE COEFICIENTES E PROGRAMAÇÃO DO TRANSMISSOR

Esta fase exige que o arquivo Raw data file já tenha sido gerado previamente, já que contém as medições de pressão e temperatura e os valores dos registradores com

que foram feitas essas medições. Na Figura 36 é mostrado o diagrama de fluxo desta fase.

Figura 36 - Diagrama de fluxo da geração dos coeficientes e programação do MAX1464

4.4.4 PROBLEMAS ASSOCIADOS ÀS MEDIÇÕES

No procedimento de medição podem se apresentar vários problemas devidos a fatores externos e de manipulação do transmissor que influenciam na confiabilidade dos dados medidos. Estes problemas estão relacionados principalmente com o tempo necessário de estabilização térmica antes de fazer a medição. As diferenças térmicas influenciam principalmente as medições de saída de corrente para mudanças nos valores do DAC e as medições do ADC do sensor de temperatura.

Em cada um dos valores do DAC usados para o processo de Calibração e Compensação é necessário aguardar pelo menos um minuto desde que é configurado até o momento de realizar a medição. Isso para cada uma das três temperaturas usadas (T_{min} , T_{intr} e T_{max}).

A outra medição que precisa de tempo de estabilização adicional é a medição do ADC do sensor interno de Temperatura do MAX1464. Antes de fazer esta medição é necessário que o DAC do MAX1464 esteja configurado no ponto médio para que a saída seja aproximadamente 12mA (isto para os transmissores com saída em corrente). O anterior é importante porque a temperatura do MAX1464 é influenciada em uma pequena proporção pela saída em corrente, ou seja, sofre de um efeito de auto aquecimento devido ao transistor de saída. A saída do DAC deve estar no ponto médio pelo menos por dez minutos antes de fazer a medição do ADC do sensor de temperatura para que esses dados sejam confiáveis.

5 AVALIAÇÃO DO SISTEMA

Os testes para avaliar o sistema foram feitos com sensores de pressão piezoresistivos antes e depois de serem integrados com os circuitos de condicionamento de sinal que conformam os transmissores de pressão, e antes de passar pelo procedimento de compensação e calibração, para poder comparar os resultados do procedimento e do sistema desenvolvido. O anterior foi feito seguindo os procedimentos descritos no item 3.1 *Normas de Avaliação de desempenho para Transmissores para uso em sistemas de controle de processos industriais, IEC 60770 e IEC 61298*.

Os testes que devem ser feitos efetuar a caracterização do Hardware do sistema Multiplexador estão descritos nos Anexos (Processo de Caracterização do Multiplexador).

5.1 MEDIÇÕES DOS SENSORES SEM CALIBRAR E COMPENSAR

Os sensores usados para os testes foram submetidos ao procedimento de medição descrito no item 3.1, usando o software de aquisição de dados programado em LabView e submetendo os sensores a condições controladas de temperatura e humidade. Foram usados 4 sensores Keller PR 9FL, com faixa de pressão de 20bar, submetidos a excitação constante de 1mA.

A quantidade de dados coletados é muito grande, mas como exemplo é apresentada a tabela de medições de um dos sensores (Tabela 5.1).

As medições foram plotadas em gráficos de saída do sensor (em Volts) vs porcentagem do span de entrada. A Figura 37 ilustra o resultado.

Tabela 5.1 - Medições da saída de um sensor sem compensar e calibrar sujeito a vários ciclos variando a pressão de entrada.

Entrada (%span)	Rampa positiva V	Rampa negativa V	Rampa positiva V	Rampa negativa V	Rampa positiva V	Rampa negativa V	Rampa positiva V	Rampa negativa V	Rampa positiva V	Rampa negativa V
0	0.00151	0.00151	0.00151	0.00151	0.00151	0.00151	0.00151	0.00151	0.00151	0.00151
10	0.02125	0.02124	0.02125	0.02125	0.02127	0.02125	0.02125	0.02126	0.02125	0.02125
20	0.04100	0.04099	0.04099	0.04099	0.04099	0.04099	0.04099	0.04099	0.04099	0.04099
30	0.06072	0.06071	0.06072	0.06072	0.06072	0.06072	0.06072	0.06072	0.06072	0.06073
40	0.08044	0.08043	0.08044	0.08043	0.08044	0.08044	0.08044	0.08044	0.08045	0.08044
50	0.10014	0.10014	0.10014	0.10014	0.10014	0.10014	0.10016	0.10014	0.10013	0.10015
60	0.11984	0.11983	0.11983	0.11983	0.11983	0.11984	0.11983	0.11984	0.11984	0.11985
70	0.13952	0.13951	0.13951	0.13951	0.13952	0.13951	0.13952	0.13952	0.13952	0.13952
80	0.15918	0.15918	0.15918	0.15918	0.15918	0.15918	0.15919	0.15919	0.15919	0.15919
90	0.17884	0.17883	0.17884	0.17884	0.17885	0.17884	0.17885	0.17884	0.17885	0.17886
100	0.19848	0.19847	0.19848	0.19847	0.19849	0.19849	0.19848	0.19848	0.19849	0.19849

Figura 37 - Saída do sensor vs porcentagem do span de entrada.

No gráfico de Saída do sensor vs porcentagem de entrada é possível ver como a sensibilidade do sensor muda para diferentes temperaturas, mas é difícil ver aspectos como não-linearidade e histerese. Para isso foi feito um processamento dos dados usando como referência uma reta aproximada por mínimos quadrados obtida com as medições do sensor com temperatura de referência de 20°C. O resultado dessas medições de cada sensor foi ilustrado em gráficos como o da Figura 38 e da Figura 39:

Figura 38 - Diferença entre valor medido e valor ideal em porcentagem do span ideal a 20°C vs porcentagem do span de entrada e vs temperatura.

Figura 39 - Diferença entre valor medido e valor ideal em porcentagem do span ideal a 20°C vs porcentagem do span de entrada para 5 temperaturas.

Como era de se esperar, o sensor antes de ser calibrado e compensado é altamente dependente às mudanças na temperatura e também apresenta não-linearidade e histerese. Tanto a sensibilidade como o zero do sensor mudam drasticamente com a temperatura.

Adicionalmente, para este conjunto de dados, assim como para todos os outros ciclos de medição de cada sensor foram calculados os parâmetros de erro, não-linearidade, histerese e repetitividade, usando como referência uma reta aproximada por mínimos quadrados, como pode ser observado na Figura 40:

Figura 40 - Diferença entre valor medido e reta de melhor ajuste (BFSL) em porcentagem do span ideal vs porcentagem do span de entrada.

5.2 MEDIÇÕES DOS TRANSMISSORES COMPENSADOS E CALIBRADOS

De forma parecida com as medições dos sensores antes da compensação e calibração, a quantidade de dados medidos é muito grande. Por isso, a maneira de exemplo, é apresentado o conjunto de medições de um dos transmissores. Pode ser observado na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Medições da saída de um transmissor compensado e calibrado sujeito a vários ciclos variando a pressão de entrada.

Entrada (%span)	Rampa positiva mA	Rampa negativa mA	Rampa positiva mA	Rampa negativa mA	Rampa positiva mA	Rampa negativa mA	Rampa positiva mA	Rampa negativa mA	Rampa positiva mA	Rampa negativa mA
0	4.0115	4.0128	4.0121	4.0132	4.0127	4.0133	4.0130	4.0138	4.0133	4.0140
10	5.6067	5.6073	5.6079	5.6077	5.6077	5.6079	5.6084	5.6086	5.6086	5.6089
20	7.2041	7.2051	7.2053	7.2053	7.2057	7.2057	7.2058	7.2065	7.2070	7.2066
30	8.8021	8.8033	8.8037	8.8041	8.8041	8.8039	8.8045	8.8047	8.8051	8.8049
40	10.4015	10.4025	10.4028	10.4028	10.4032	10.4032	10.4038	10.4038	10.4043	10.4039
50	12.0002	12.0007	12.0020	12.0013	12.0024	12.0016	12.0025	12.0025	12.0032	12.0020
60	13.5993	13.5992	13.6011	13.6001	13.6012	13.6006	13.6013	13.6009	13.6015	13.6008
70	15.1983	15.1975	15.1994	15.1984	15.1996	15.1990	15.2002	15.1994	15.2003	15.1995
80	16.7971	16.7968	16.7982	16.7975	16.7987	16.7975	16.7988	16.7985	16.7993	16.7987
90	18.3926	18.3920	18.3930	18.3920	18.3941	18.3931	18.3945	18.3933	18.3944	18.3935
100	19.9864	19.9861	19.9871	19.9864	19.9879	19.9873	19.9883	19.9878	19.9887	19.9879

As medições foram plotadas em gráficos de saída do sensor (em mA) vs porcentagem do span de entrada. A Figura 41 mostra o resultado.

Figura 41 - Saída do transmissor compensado e calibrado vs porcentagem do span de entrada.

No gráfico da Figura 41 de Saída do transmissor vs porcentagem de entrada não é possível ver como a sensibilidade do sensor muda para diferentes temperaturas, e adicionalmente é difícil ver aspectos como não-linearidade e histerese. Fazendo a diferença entre o valor medido e o valor ideal, que no caso seria uma reta de 4 a 20 mA, podem ser observados os erros como porcentagem de FS. O resultado dessas

medições de cada transmissor foi ilustrado em gráficos como o da Figura 42 e da Figura 43:

Figura 42 - Erro da saída do transmissor calibrado e compensado vs porcentagem do span de entrada e vs temperatura.

Figura 43 - Erro da saída do transmissor calibrado e compensado vs porcentagem do span de entrada para 5 temperaturas.

Adicionalmente, para este conjunto de dados, assim como para todos os outros ciclos de medição de cada sensor foram calculados os parâmetros de erro, não-linearidade, histerese e repetitividade, como pode ser observado na Figura 44:

Figura 44 - Erro da saída do transmissor calibrado e compensado em porcentagem do span ideal vs porcentagem do span de entrada.

5.3 COMPARAÇÃO DE TEMPO TOTAL DO PROCESSO DE COMPENSAÇÃO E CALIBRAÇÃO

O tempo total do processo de calibração e compensação foi registrado comparando o sistema sem multiplexação e para o sistema com multiplexação para um ou mais transmissores. Os resultados são ilustrados na Figura 45.

Figura 45 - Comparação do tempo total do processo de calibração e compensação.

O processo de medições nas duas condições de teste corresponde ao descrito na seção 3.1. Na seção 5.4 se encontra um resumo das medições realizadas que apresenta as características dos transmissores de pressão, resultantes do processo de calibração e compensação usando o sistema de multiplexação projetado.

5.4 RESUMO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Tabela 5.3 - Resultado das medições dos 4 sensores antes da calibração e compensação.

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Não-linearidade [%FS saída]	0.0425519	0.0352679	0.0435904	0.0439221
Histerese [%FS saída]	0.0119600	0.0412747	0.0303151	0.0124570
Repetitividade [%FS saída]	0.0801107	0.0740104	0.0678578	0.0919708
TCS [%FS saída/(%FS entrada*°C)]	0.0948689	0.0898897	0.0894178	0.0961491
TCO [%FS saída/°C]	0.7748586	0.9972228	2.2229179	0.1984825
Erro médio [%FS saída]	1.1184394	0.6975372	0.6668505	1.0180332
Total Error Band [%FS saída]	6.1504187	4.7469234	4.7526390	5.9174000

Tabela 5.4 - Resultado das medições dos transmissores de pressão calibrados e compensados.

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Não-linearidade [%FS saída]	0.0223522	0.0243097	0.0209189	0.0266530
Histerese [%FS saída]	0.0288281	0.0168853	0.0123125	0.0116875
Repetitividade [%FS saída]	0.0231085	0.0240768	0.0126875	0.0148750
TCS [%FS saída/(%FS entrada*°C)]	0.0011825	0.0008999	0.0008139	0.0003781
TCO [%FS saída/°C]	0.0919207	0.0893383	0.1360736	0.0258982
Erro médio [%FS saída]	0.0598875	0.0767490	0.0819375	0.0625625
Total Error Band	0.0607256	0.0877017	0.0981250	0.0825000

Tabela 5.5 - Comparação dos resultados das medições dos transmissores de pressão antes e depois do processo de calibração e compensação.

	Antes	Depois
Não-linearidade [%FS saída]	0.04133309	0.02355846
Histerese [%FS saída]	0.02400170	0.01742835
Repetitividade [%FS saída]	0.07848741	0.01868696
TCS [%FS saída/(%FS entrada*°C)]	0.09258139	0.00081860
TCO [%FS saída/°C]	1.04837045	0.08580773
Erro médio [%FS saída]	0.87521508	0.07028412
Total Error Band [%FS saída]	5.39184529	0.08226306

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como pode ser observado comparando os resultados das medições e as ilustrações da Figura 38 e da Figura 42, os sensores antes de ser compensados e calibrados apresentam uma alta dependência à temperatura, além de apresentar características como não-linearidade e histerese.

No caso da não-linearidade e da histerese é observado na média uma diminuição dessas grandezas, mas o caso mais notável é a diminuição da dependência da sensibilidade e do offset em relação à temperatura. Para os sensores sem compensar e calibrar o erro médio é de quase **1% FS** e o **TEB** chega até **6% FS**. Agora, para as medições dos transmissores compensados e calibrados o erro médio é aproximadamente **0,07% FS**, enquanto o **TEB** não supera o **0,1% FS**.

Esses resultados coincidem com a diminuição do TCO e TCS devido ao processo de calibração e compensação. Para os sensores sem calibrar e compensar o **TCO** chega a ter mais de **2 %FS saída/°C** e o **TCS** chega até **0,1 %FS saída/(%FS entrada*°C)**. Já para os transmissores compensados e calibrados o **TCO** é aproximadamente **0,1 %FS saída/°C** e o **TCS** de aproximadamente **0,001 %FS saída/(%FS entrada*°C)**, significando uma grande diminuição da dependência dos transmissores à temperatura.

A Tabela 5.5 apresenta uma comparação dos resultados das medições permitindo observar as melhorias no desempenho dos transmissores depois do processo de compensação e calibração.

7 CONCLUSÕES

Os transmissores calibrados e compensados usando o sistema de multiplexação projetado cumprem com as características de desempenho desejadas, iguais ou melhores que as atingidas pelo sistema de compensação e calibração simples (de um único transmissor de pressão por vez).

O tempo total do processo de compensação e calibração de mais de um transmissor foi reduzido em aproximadamente 6 horas por cada transmissor adicional, até um máximo de 16 transmissores simultâneos. No caso de 16 transmissores o sistema sem multiplexação demoraria 114 horas enquanto o sistema com multiplexação demora 24 horas para efetuar o processo completo.

O sistema de multiplexação projetado permite produzir transmissores de pressão com características de alto desempenho com uma redução muito significativa no tempo total do processo.

Com futuras versões do sistema de multiplexação seria interessante efetuar uma verificação automática da estabilidade das medições em função do tempo de estabilização térmica para evitar possíveis erros e aumentar a confiabilidade de cada medição. Adicionalmente seria interessante diminuir ainda mais a intervenção do usuário para deixar o sistema mais automatizado.

Os resultados desta pesquisa foram publicados no congresso DINCON 2013, Fortaleza – CE, 13-17 de outubro de 2013, com o título “Obtenção em Larga Escala de Transmissores de Pressão Piezoresistivos de Alto Desempenho” (Mayor, et al., 2013).

8 DEFINIÇÕES

Intervalo: Região dos valores entre os limites inferior e superior da quantidade em consideração.

Span: Diferença algébrica entre os limites superior e inferior de um intervalo.

Exatidão da medição: A proximidade do acordo entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando (ISO, 1993).

NOTA 1: "Exatidão" é um conceito qualitativo.

NOTA 2: O termo "precisão" não deve ser usado para "exatidão".

Precisão: O grau de concordância entre resultados de ensaios independentes obtidos sob condições estipuladas (ISO, 1993).

NOTA 1. A precisão depende apenas da distribuição de erros aleatórios e não se relaciona com o valor verdadeiro ou o valor especificado.

NOTA 2. A medida de precisão é normalmente expressa em termos de imprecisão e computada como um desvio padrão dos resultados do teste. Menor precisão é refletida por um maior desvio padrão.

NOTA 3. "Resultados de ensaios independentes" significa os resultados obtidos de uma maneira não influenciada por qualquer resultado anterior sobre o objeto de teste igual ou similar. Medidas quantitativas de precisão dependem criticamente sobre as condições estipuladas.

Condições de repetitividade e reprodutibilidade são conjuntos específicos de condições extremas estipuladas.

Incerteza (de medição): Parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos ao mensurando (ISO, 1993).

NOTA 1. O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio padrão (ou um múltiplo dado dele), ou a largura de um intervalo de confiança.

NOTA 2. Incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns destes componentes podem ser avaliados a partir da distribuição estatística dos resultados de uma série de medições e podem ser caracterizados por desvios padrão experimentais. Os outros componentes, que também podem ser caracterizados por desvios padrão, são avaliados a partir de distribuições de probabilidade assumidas baseadas na experiência ou outras informações.

NOTA 3. Entende-se que o resultado da medição é a melhor estimativa do valor do mensurando e que todos os componentes de incerteza, incluindo aqueles decorrentes de efeitos sistemáticos, como os componentes associados com correções e padrões de referência, contribuem para a dispersão.

Erro (de medição): O resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando (ISO, 1993).

NOTA 1. Uma vez que o valor verdadeiro não pode ser determinado, na prática o valor verdadeiro convencional é usado.

9 BIBLIOGRAFIA

Atmel Corporation Getting Started with CodeVisionAVR [PDF]. - San Jose, California : Atmel Corporation, 2001. - Application Note AVR033.

CadSoft Computer Eagle Manual [PDF]. - Pembroke Pines, Florida : CadSoft Computer, 2010. - 011185110.

CENELEC BS EN 60770-1 - Transmitters for use in industrial - process control systems: Methods for performance evaluation [European Standard]. - 1999.

CENELEC BS EN 60770-2 - Transmitters for use in industrial - process control systems: Methods for inspection and routine testing [European Standard]. - 2003.

CENELEC IEC 61298 - 1 Process measurement and control devices - General methods and procedures for evaluating performance: General considerations [European Standard]. - 1995.

CENELEC IEC 61298 - 2 Process measurement and control devices - General methods and procedures for evaluating performance: Tests under reference conditions [European Standard]. - 1995.

CENELEC IEC 61298 - 3 Process measurement and control devices - General methods and procedures for evaluating performance: Tests for the effects of influence. - 1998.

CENELEC IEC 61298 - 4 Process measurement and control devices - General methods and procedures for evaluating performance: Evaluation report content [European Standard]. - 1995.

Charry Edgar Verificação dos limites térmicos do Transmissor de Pressão MEMS-641series [Relatório]. - São Paulo : [s.n.], 2007.

Fauzi Timaco Jorge Plano de Negocio MEMS [Relatório]. - São Paulo : [s.n.], 2008.

Fernandes da Luz Sidney Projeto e Desenvolvimento de Transmissores de Pressão Piezoresistivos com Saída em Tensão nos Padrões Industriais [Relatório]. - São Paulo : MEMS, 2008.

Fernandez da Luz Sidney Microssistema Transmissor de Pressão Piezorressistivo de 4-20mA de Alta Precisão [Relatório]. - São Paulo : [s.n.], 2006.

Honeywell Pressure Transducer Accuracy in Application. Technical Note [Online] // Sensing and Control. - Honeywell International Inc, 2004. - 29 de Agosto de 2011. - http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/pressure/technical/008111_1.pdf.

HP InfoTech Codevision AVR User Manual [PDF]. - Bocharrest, Romania : HP InfoTech, 2011. - Version 2.05.5.

ISO International Vocabulary of basic and general terms in Metrology [Livro]. - Geneva : [s.n.], 1993. - ISBN 92-67-10175-1.

ISO ISO 3534:1993. Statistics - Vocabulary and Symbols [Livro]. - Geneva : [s.n.], 1993.

Maxim MAX1458 1%-Accurate, Digitally Trimmed Sensor Signal Conditioner [Online] // Maxim Integrated. - Maio de 1998. - Janeiro de 2013. - <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/ds/MAX1458.pdf>.

Maxim MAX1464 Low-Power, Low-Noise Multichannel Sensor Signal Processor, Overview [Online] // Maxim. - Fevereiro 2005. - Agosto 10, 2010. - <http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/4590>.

Maxim MAX1464 Signal-Conditioner, Sensor Compensation Algorithm, Application Note 3649 [Datasheet]. - [s.l.] : Maxim, 2005.

Mayor César e Charry Edgar Obtenção em Larga Escala de Transmissores de Pressão Piezoresistivos de Alto Desempenho [Conferência] // DINCON 2013 - Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações. - Fortaleza, CE : [s.n.], 2013. - p. 6. - Publicação 4059.

MEMS Ltda. Relatório do Transmissor de Pressão Piezoresistivo con Saída em Corrente [Relatório]. - São Paulo : MEMS Ltda., 2008.

Ramirez Beltrán Jorge Estudo e projeto de um transmissor 4-20 mA a dois fios com ajuste de zero e span [Relatório]. - São Paulo : MEMS, 2009.

10 ANEXOS

PROCESSO DE CARACTERIZAÇÃO DO MULTIPLEXADOR

O processo de caracterização do multiplexador deve seguir os seguintes procedimentos.

1. Estabelecer uma temperatura e humidade controlada, preferivelmente 25 graus centígrados e 50% de humidade relativa, usando uma câmara climática.
2. Colocar em funcionamento o sistema sem nenhum transmissor conectado e medir a corrente consumida quando não está sendo efetuando nenhum tipo de comunicação com a interface de usuário.
3. Efetuar a medição da corrente instantânea consumida pelo sistema durante um processo de comunicação com a interface de usuário.
4. Utilizar pelo menos um transmissor de pressão que tenha sido calibrado e compensado sem usar o sistema de multiplexação, instalado em um sistema pneumático de controle de pressão e efetuar as medições de consumo de corrente do transmissor de pressão para três pressões diferentes (pressão mínima, intermediária e máxima).
5. Instalar no sistema de multiplexação o mesmo transmissor de pressão utilizado no passo anterior e repetir a medição de consumo de corrente do sistema e do transmissor de pressão para três pressões diferentes (pressão mínima, intermediária e máxima) quando o sistema não está efetuando nenhum tipo de comunicação com a interface de usuário.
6. Utilizando as mesmas condições do passo anterior, efetuar a medição da corrente instantânea consumida pelo sistema e pelo transmissor durante um processo de comunicação com a interface de usuário.
7. Utilizando as mesmas condições do passo anterior, efetuar a medição da corrente instantânea consumida pelo sistema e pelo transmissor durante um processo de configuração ou leitura dos registradores do MAX1464 do transmissor de pressão.

8. Repetir a medição anterior depois de ter efetuado uma configuração ou leitura dos registradores do MAX1464 do transmissor de pressão sem gerar nenhum outro tipo de comunicação entre o sistema e a interface de usuário.
9. Repetir os procedimentos desde o item 5 até o 8 com todos os canais do sistema de multiplexação utilizando um único transmissor por cada vez em cada canal.
10. Instalar no sistema 16 transmissores de pressão com características de consumo de corrente conhecidas que tenham sido calibrados e compensados sem usar o sistema de multiplexação, instalados em um sistema pneumático de controle de pressão.
11. Efetuar a medição de consumo de corrente para cada um dos 16 transmissores quando o sistema não está efetuando nenhum tipo de comunicação com a interface de usuário.
12. Utilizando as mesmas condições do passo anterior, efetuar a medição da corrente instantânea consumida pelo sistema e pelos transmissores durante um processo de comunicação com a interface de usuário.
13. Utilizando as mesmas condições do passo anterior, efetuar a medição da corrente instantânea consumida pelo sistema e pelos transmissores durante um processo de configuração ou leitura dos registradores do MAX1464 de um transmissor de pressão.
14. Repetir a medição anterior depois de ter efetuado uma configuração ou leitura dos registradores do MAX1464 do transmissor de pressão sem gerar nenhum outro tipo de comunicação entre o sistema e a interface de usuário.
15. Registrar todas as medições fazendo um comparativo entre cada uma das condições de teste, identificando as diferenças e a influência do sistema de multiplexação nas medições dos transmissores de pressão.

COEFICIENTES DE COMPENSAÇÃO

Como resumo se apresenta na Tabela 10.1 cada um dos 36 coeficientes e uma pequena descrição da função que realiza.

Tabela 10.1 - Explicação dos coeficientes de compensação e calibração

Coeficientes de compensação dos dados de temperatura

No.	Nome	Descrição
1	Toff	Coeficiente usado para centrar em zero a função Tdata(T).
2	tgain	Usado para expandir junto a ntgainshfts a função OCTdata(T) de -0.9 a +0.9.
3	ntgainshfts	Potência de 2 usada para decompor rtgain em $2^{ntgainshfts}tgain$
4	tnl ₀	Coeficiente independente da função Tnl(T). Esta função tem como variável independente a temperatura corrigida em offset e amplificada e como variável dependente a função oposta da não-linearidade do sensor de temperatura.
5	tnl ₁	Coeficiente do termo lineal da função Tnl(T).
6	tnl ₂	Coeficiente do termo de segunda ordem da função Tnl(T).
7	tnl ₃	Coeficiente do termo de terceira ordem da função Tnl(T).
8	tnl ₄	Coeficiente do termo de quarta ordem da função Tnl(T).

Coeficientes de compensação dos dados de pressão.

No.	Nome	Descrição
9	tcc _{0,0}	Coeficiente independente da função NL0(T). A função NL0(T) representa como muda o coeficiente independente da função OLC(T,P) com a temperatura.
10	tcc _{1,0}	Coeficiente do termo lineal da função NL0(T).
11	tcc _{2,0}	Coeficiente do termo de segunda ordem da função NL0(T)
12	tcc _{3,0}	Coeficiente do termo de terceira ordem da função NL0(T).
13	tcc _{0,1}	Coeficiente independente da função NL1(T). A função NL1(T) representa como muda o coeficiente do termo lineal da função OLC(T,P) com a temperatura.
14	tcc _{1,1}	Coeficiente do termo lineal da função NL1(T).

15	tcc _{2,1}	Coeficiente do termo de segunda ordem da função NL1(T)
16	tcc _{3,1}	Coeficiente do termo de terceira ordem da função NL1(T).
17	tcc _{0,2}	Coeficiente independente da função NL2(T). A função NL2(T) representa como muda o coeficiente do termo de segunda ordem da função OLC(T,P) com a temperatura.
18	tcc _{1,2}	Coeficiente do termo lineal da função NL2(T).
19	tcc _{2,2}	Coeficiente do termo de segunda ordem da função NL2(T)
20	tcc _{3,2}	Coeficiente do termo de terceira ordem da função NL2(T).
21	tcc _{0,3}	Coeficiente independente da função NL3(T). A função NL2(T) representa como muda o coeficiente do termo de terceira ordem da função OLC(T,P) com a temperatura..
22	tcc _{1,3}	Coeficiente do termo lineal da função NL3(T).
23	tcc _{2,3}	Coeficiente do termo de segunda ordem da função NL3(T)
24	tcc _{3,3}	Coeficiente do termo de terceira ordem da função NL3(T).
25	fns _{c0}	Coeficiente independente da função fnSensC(T). A função fnSensC(T) é obtida quando se descompõe a função SensCorrection(T) na multiplicação de $2^{nsgainshfts}$ e fnSensC(T) para obter coeficientes entre -1 e +1.
26	fns _{c1}	Coeficiente do termo lineal da função fnSensC(T).
27	fns _{c2}	Coeficiente do termo de segunda ordem da função fnSensC(T).
28	fns _{c3}	Coeficiente do termo de terceira ordem da função fnSensC(T).
29	fns _{c4}	Coeficiente do termo de quarta ordem da função fnSensC(T).

Coeficientes de compensação do DAC

No.	Nome	Descrição
30	doc ₀	Coeficiente independente da função dacOffsetCorrection(T). A função dacOffsetCorrection(T) faz a correção do offset do DAC.
31	doc ₁	Coeficiente do termo lineal da função dacOffsetCorrection(T).
32	doc ₂	Coeficiente do termo de segunda ordem da função dacOffsetCorrection(T).
33	dgc ₀	Coeficiente independente da função dacGainCorrection(T). A função

`dacGainCorrection(T)` faz a correção do ganho do DAC.

34 `dgc1` Coeficiente do termo lineal da função `dacGainCorrection(T)`.

35 `dgc2` Coeficiente do termo de segunda ordem da função `dacGainCorrection(T)`.

36 `nsgainshfts` Potência de dois que é necessária para decompor a função `SensCorrection(T)` na multiplicação de $2^{nsgainshfts}$ e `fnSensC(T)` se obtendo os coeficientes `fnsc` entre -1 e +1.