

JOSÉ CARLOS DOS SANTOS

**SISTEMA ELETRÔNICO PARA AQUISIÇÃO,
PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE SINAIS
BIOLÓGICOS BASEADO NA NORMA IEEE 1451.4**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

São Paulo

2006

JOSÉ CARLOS DOS SANTOS

**SISTEMA ELETRÔNICO PARA AQUISIÇÃO,
PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE SINAIS
BIOLÓGICOS BASEADO NA NORMA IEEE 1451.4**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Microeletrônica

Orientador: Professor-Doutor Walter Jaimes Salcedo

**São Paulo
2006**

“Aos meus pais, Aparecida P. dos Santos e Joaquim dos Santos
(*in memoriam*) que me trouxeram ao mundo e sempre me
apoiaram e ensinaram a ser justo e honesto.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao querido Professor Francisco Javier Ramirez-Fernandez que me acolheu, me co-orientou e teve infinita paciência na execução deste trabalho.

Agradeço ao Professor Walter Jaimes Salcedo que sempre se mostrou disponível para conversarmos e discutirmos o andamento do trabalho.

Agradeço profundamente a Prof^a. Silvia Maria Farani Costa que sempre me incentivou nos momentos mais difíceis e muito tempo dispensou para revisão deste texto.

Ao meu irmão e companheiro Joaquim Carlos, por todos os ensinamentos, todo o meu respeito e admiração.

Agradeço também a Maria Lucia Farani Costa que nos proporcionou aconchego durante as diversas revisões em sua casa.

Ao amigo Diego Nunes, que mesmo aos fins de semana e feriados, sempre esteve disponível para ajudar-me nas soluções dos problemas. Muito mais que os problemas que ficaram para trás, agradeço a dedicação e amizade verdadeira.

Ao Henrique que se mostrou gentil e sempre colaborou durante a utilização dos laboratórios.

Tenho certeza que agradei apenas uma pequena fração das pessoas a quem devo muito e peço especial perdão àquelas que omiti.

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, José Carlos dos

Sistema eletrônico para aquisição, processamento e armazenamento de sinais biológicos baseado na norma IEEE 1451.4 / J.C. dos Santos. --São Paulo, 2006.

p.

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

**1.Processamento de sinais 2.Sensores inteligentes 3.Normatização
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.**

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
1 Capítulo 1	14
1.1 Interface Eletrônica de Aquisição, Processamento e Armazenamento de Sinais Biológicos	14
1.1.1 Diagrama Geral para Sensores Inteligentes.....	16
1.2 O Modelo IEEE 1451	16
1.2.1 Nota Histórica Sobre Transdutores Inteligentes.....	17
1.2.2 Norma IEEE 1451.1.....	18
1.2.3 Norma IEEE 1451.2.....	20
1.2.3.1 Descrição dos Tipos de Estrutura TEDS.....	22
1.2.4 Norma IEEE 1451.3.....	23
1.2.5 Norma IEEE 1451.4.....	24
1.2.5.1 Interfaces MMI Classe 1 e 2.....	26
1.2.5.2 A Estrutura TEDS Conforme IEEE 1451.4.....	28
1.2.5.3 O TEDS Básico - Norma IEEE 1451.4.....	29
1.2.5.4 Modelo Padrão para Tipos de Transdutores.....	30
1.2.5.5 Interface Digital TEDS Conforme IEEE 1451.4.....	31
1.2.6 Interfaces IEEE 1451.5 e IEEE 1451.6.....	32
1.3 Desenvolvimento do Protótipo de Aquisição de Sinais Biológicos	33
1.4 Diagrama Simplificado do Sistema de Aquisição de Sinais Biológicos	33
2 Capítulo 2	35
2.1 Interface Eletrônica dos Sensores	35
2.2 Memória Descritiva TEDS 1Wire ou I2C	36
2.3 Interface MMI para Sensor de Temperatura	37
2.4 Interface MMI para Sensor de Pressão	39
2.5 Interface MMI para Sensor de pH	40
2.6 Porque o pH é uma Medida Importante	42
2.7 Aplicações da Medida de pH	43
2.8 Compensação da Temperatura na Medida do pH	44
2.9 Compensação da Temperatura na Medida de pH por Software	45
3 Capítulo 3	47
3.1 Módulo de Transdução Inteligente (STIM)	47
3.1.1 Conversor A/D Interno do PIC.....	48
3.1.2 Introdução ao Conversor A/D.....	48
3.1.3 Recursos e Características do A/D do PIC.....	48
3.1.4 Arquitetura do STIM.....	51

3.2	Memória Descritiva TEDS	53
3.2.1	Parâmetros do TEDS e seus Respectivos Endereços.....	54
3.3	Microcontrolador do Módulo STIM - PIC16F877	54
3.4	Implementação do Módulo STIM Conforme a Norma IEEE 1451.4.....	55
3.4.1	PCI - Vista Superior do Módulo STIM.....	56
3.5	A Implementação do Programa de Controle.....	57
3.5.1	Protocolo Serial de Identificação	58
3.5.2	<i>Software</i> de Monitoramento do STIM	59
4	<i>Capítulo 4 – Resultados e Discussões</i>	69
4.1	Introdução aos Ensaios.....	69
4.2	Ensaio Preliminares dos Sensores.....	69
4.3	Ensaio dos Canais do Módulo STIM.....	72
4.3.1	Medida de Temperatura	74
4.3.2	Medida de Pressão	79
4.3.3	Medida de pH	80
4.3.3.1	Pré-calibração do Amplificador do pH	80
4.3.3.2	Medida de pH Termo-Compensada	81
4.3.3.3	Medida de pH utilizando Solução Padrão.....	83
4.3.4	Discussão dos Resultados Obtidos.....	85
	<i>Capítulo 5 - Conclusão e Perspectivas Futuras</i>	88
	<i>BIBLIOGRAFIA</i>	91

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama Simplificado do Sistema de Aquisição de Sinais	9
Figura 2: Monitoramento do mar e de imagens via satélite	10
Figura 3: Sistema de monitoramento de embarcação	11
Figura 4: Classificação de sensores e atuadores	14
Figura 5: Termopar recebendo o estímulo (calor da vela) transforma em tensão elétrica ΔE	15
Figura 6: Diagrama geral de transdutores inteligentes	16
Figura 7: Quadro geral IEEE 1451	17
Figura 8: Módulo NCAP conforme norma IEEE 1451.1	18
Figura 9: Exemplo de um sistema distribuído para controle e aquisição de sinais baseados no modelo IEEE 1451	20
Figura 10: Diagrama de Blocos do módulo STIM	21
Figura 11: Estrutura TBIM - Norma IEEE 1451.3	24
Figura 12: Interface Mista com Sensor Analógico	25
Figura 13: Interface modo Misto – MMI – IEEE 1451.4	26
Figura 14: Exemplo de MMI Classe 1 com 3 fios	27
Figura 15: Exemplo de MMI classe 2 Multifios com transdutor 4 – 20mA	28
Figura 16: Exemplo de MMI classe 2 Multifios para sensor em ponte	28
Figura 17: Quadro geral IEEE 1451 com as novas versões em estudo	33
Figura 18: Sistema de Aquisição de Sinais Biológicos	34
Figura 19: Adequando um Sensor comum à norma IEEE 1451.4	35
Figura 20: EEPROM Serial 2Kbytes	36
Figura 21: LM35 com rabicho e conector	37
Figura 22: Diagrama simplificado do módulo MMI para temperatura	38
Figura 23: Placa de circuito do módulo MMI para Temperatura	38
Figura 24: Sensor de Pressão MPX5050DP	39
Figura 25: Placa de circuito do Módulo MMI para Pressão	40
Figura 26: Placa amplificadora para sensor de pH	41
Figura 27: Conjunto amplificador de pH com adendo TEDS	41
Figura 28: Meia-célula indicadora de pH	42
Figura 29: Medidas típicas de pH	43
Figura 30: Valores de pH x DDP (milivolts) de um eletrodo Ag/AgCl	45
Figura 31: Diagrama do PIC mostrando arquitetura Harvard	47
Figura 32: Diagrama de Blocos simplificado do A/D interno do PIC	49
Figura 33: Módulo STIM com seus principais componentes	51
Figura 34: PIC 16F877A	55
Figura 35: Interface do compilador utilizado para geração do código no PIC	55
Figura 36: Placa do STIM vista Superior	56
Figura 37: Interface Gráfica do Módulo STIM	60
Figura 38: Tela depois de conectado sensor de pressão no canal 4 do módulo STIM	60

Figura 39: Tela do editor TEDS com sensor de temperatura conectado no canal 1	61
Figura 40: arquivo bd_fabricantes.txt feito no notepad	62
Figura 41: arquivo de texto bd_transdutores.txt	62
Figura 42: Diagrama de Contexto (DFD de nível 0) – implementação residente no PC	63
Figura 43: DFD Nível 1 - implementação residente no PC	64
Figura 44: implementação do microcontrolador PIC referente ao módulo STIM	65
Figura 45: Explosão do módulo STIM	66
Figura 46: Gerenciamento do sensor 1 do módulo STIM	67
Figura 47: dispositivo de teste dos canais do módulo STIM	70
Figura 48: Aspecto físico do potenciômetro de Precisão (multivoltas)	71
Figura 49: Dispositivo de teste montado com potenciômetro multivoltas e dial graduado	71
Figura 50: gráfico referente à tensão de teste obtida com o Multímetro	73
Figura 51: gráfico referente à tensão de teste obtida pelo módulo STIM	73
Figura 52: arranjo experimental-1 para medida de temperatura 0°C	74
Figura 53: gráfico das medidas de temperatura 0°C – LM35	75
Figura 54: gráfico das medidas de temperatura 0oC – Termômetro de mercúrio	76
Figura 55: arranjo experimental-2 para medida de temperatura 100°C	76
Figura 56: gráfico das medidas de temperatura até atingir 100°C – LM35	78
Figura 57: gráfico das medidas de temperatura até atingir 100°C – Termômetro de Mercúrio	78
Figura 58: gráfico da medida de pressão	79
Figura 59: arranjo experimental-4 para medida do pH	80
Figura 60: Tela da associação do canal de temperatura para termo-compensação do pH	81
Figura 61: Caixa de diálogo para associar o canal do Transdutor	82
Figura 62: Tela que exibe os valores de pH termo-compensados	82
Figura 63: gráfico dos valores de pH com solução padrão 6,86	84
Figura 64: gráfico dos valores de pH com solução padrão 4,01	85
Figura 65: Interface gráfica do editor Teds de Brüel & Kjaer	86
Figura 66: diagrama simplificado de uma rede de sensores utilizando CAN	90
Figura 67: Esquema elétrico do módulo LM35 MMI	97
Figura 68: Layout da placa de circuito impresso do módulo LM35 MMI	98
Figura 69: Layout PCI módulo LM35 Lado inferior	99
Figura 70: Layout PCI módulo LM35 lado superior	99
Figura 71: Layout PCI módulo LM35 lado superior da máscara de componentes	100
Figura 72: Esquema elétrico do módulo MMI - sensor de pressão	101
Figura 73: Layout da placa de circuito do Módulo MMI - sensor de Pressão	102
Figura 74: Layout da PCI do módulo sensor de pressão lado inferior	103
Figura 75: Layout PCI do módulo sensor de pressão lado superior	103
Figura 76: Layout PCI do módulo sensor de pressão lado superior máscara de componentes	103
Figura 77: Esquema da placa adendo para sensor ISE/ISFET	104
Figura 78: Layout da placa de circuito impresso adendo para sensor ISE/ISFET	105

<i>Figura 79: Layout da PCI adendo para sensor ISE/ISFET lado inferior</i>	105
<i>Figura 80: Layout da PCI adendo para sensor ISE/ISFET lado superior</i>	106
<i>Figura 81: Layout da PCI ISE/ISFET lado superior da máscara de componentes</i>	106
<i>Figura 82: Esquema elétrico do amplificador ISE para sensor de pH</i>	107
<i>Figura 83: Layout da PCI amplificadora para ISE lado inferior</i>	108
<i>Figura 84: Layout da PCI amplificadora para ISE lado superior</i>	108
<i>Figura 85: Layout da PCI amplificadora para ISE lado superior da máscara de componentes</i>	109
<i>Figura 86: Esquema elétrico e detalhes da implementação</i>	110
<i>Figura 87: Layout da PCI do módulo STIM lado inferior</i>	111
<i>Figura 88: Layout da PCI do módulo STIM lado superior</i>	111
<i>Figura 89: Layout da PCI do módulo STIM lado superior da máscara de componentes</i>	112
<i>Figura 90: Esquema elétrico do módulo de teste com potenciômetro</i>	113
<i>Figura 91: Conector RJ11 -6P</i>	114
<i>Figura 92: Layout da PCI do Módulo STIM</i>	115
<i>Figura 93: eletrodo combinado de Ag/AgCl</i>	118
<i>Figura 94: circuito de carga do capacitor Sample Hold</i>	119
<i>Figura 95: circuito multiplexador do A/D</i>	119
<i>Figura 96: Mapa de pinos do PIC16F877A e suas Funções</i>	120

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1: Canais de comunicação – Norma 1451.3</i>	24
<i>Tabela 2: Transdutor com TEDS Básico Padrão</i>	29
<i>Tabela 3: Transdutor com TEDS Básico</i>	29
<i>Tabela 4: Características do TEDS Básico</i>	29
<i>Tabela 5: tipos de dados dentro de um modelo padrão</i>	30
<i>Tabela 6: Modelos Padronizados para Diversos</i>	31
<i>Tabela 7: Erro do pH em função da temperatura</i>	44
<i>Tabela 8: Comando de Leitura do TEDS feito pelo STIM</i>	53
<i>Tabela 9: Mapa de endereços dos parâmetros TEDS</i>	54
<i>Tabela 10: Mapa de endereços dos parâmetros TEDS</i>	58
<i>Tabela 11: Parâmetros TEDS obrigatórios</i>	59
<i>Tabela 12: Amostras de tensão lidas no canal 3 do módulo STIM</i>	72
<i>Tabela 13: temperaturas coletadas no arranjo experimental-1</i>	74
<i>Tabela 14: temperaturas coletadas no arranjo experimental-2</i>	77
<i>Tabela 15: valores de pressão coletados no arranjo experimental-3</i>	79
<i>Tabela 16: valores de pH com solução padrão 6,86</i>	83
<i>Tabela 17: valores de pH com solução padrão 4,01</i>	84

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de aquisição, processamento e armazenamento de sinais adquiridos de um arranjo de sensores embasado na norma IEEE 1451.4¹, resultando num sistema de sensores *plug&play*.

O sistema de aquisição de sinais proposto permitirá monitorar diversos tipos de sensores para as mais variadas aplicações nos campos da área biomédica, automação industrial, monitoramento ambiental dentre outras.

O sistema de aquisição proposto é constituído por um módulo chamado de STIM (“*Smart Transducer Interface Module*”) cujo elemento principal é um microcontrolador com arquitetura RISC de propósito geral, [Johnson 2001]. O módulo STIM é conectado a um computador via interface serial (RS232) para transmitir dados dos sensores e receber comandos de controle.

Os sensores analógicos aqui utilizados foram adequados ao sistema utilizando-se da técnica chamada MMI (*Mixed Mode Interface*) em conformidade com a norma IEEE 1451.4, transformando os sensores em um sistema *plug&play*. O módulo STIM é monitorado por um *software* residente no computador PC permitindo que os dados adquiridos dos sensores sejam visualizados e gravados em arquivo para posterior estudo.

A obtenção de um sistema de sensores *plug&play* foi desenvolvida utilizando a estrutura TEDS (*Transducer Electronic Data Sheet*) gravada em uma memória serial não volátil. O TEDS possui informações e especificações técnicas do transdutor de acordo com um modelo (*template*) conforme a norma IEEE 1451.4, tal que, quando um sensor é conectado, o sistema exibe na tela do computador informações tais como, o canal conectado, o tipo de sensor, o modelo, número de série, nome do fabricante e a data de fabricação.

Neste trabalho foram implementados três módulos MMI utilizando três sensores analógicos, temperatura, pressão e pH. Estes três módulos MMI possibilitaram realizar medidas comparativas que fundamentam o funcionamento do sistema.

Palavras-Chave: Norma IEEE 1451.4, STIM, TEDS, MMI, *plug&play*.

¹ IEEE=Institute of Electrical and Electronics Engineers

ABSTRACT

The purpose of this work was the development of an acquisition, processing and storage system of a signal from an arrangement of sensors based on IEEE 1451.4 standard, resulting in a *plug&play* sensors system.

The acquisition signal system proposed will permit to monitoring several kinds of sensors for a variety application in the fields of biomedical, industrial automation and environment and many others.

The system proposed is formed by a module, called STIM (Smart Transducer Interface Module) that the main element is a general purpose microcontroller with RISC architecture, [Johnson 2001]. The STIM module is connected with a PC computer by serial interface (RS232) to transmit the data from sensors and to receive the control commands.

The analog sensors here utilized was adapted to the system utilizing a technique called MMI (*Mixed Mode Interface*) attending the IEEE 1451.4 standard, transforming the sensors in a *plug&play* system. The STIM module is assisted by a PC via resident software that will permit the acquired data viewing and recording in file for further study.

The *plug&play* sensors system was developed utilize the TEDS structure (*Transducer Electronic Data Sheet*) recorded in a non volatile serial memory. The TEDS has specifications and technical information from the transducer according a model (template) in conformity of IEEE 1451.4 standard , as well, when a sensor is connected , the system shows information on the PC screen, as the connected channel , the kind of the sensor , the model , serial number , producer name and produced date.

In this work three MMI modules were implemented utilizing three analog sensors; temperature, pressure and pH. These three MMI modules let's realize comparative measurements that grounds the system operation.

Key Words: IEEE 1451.4 standards, STIM, TEDS, MMI, *plug&play*.

INTRODUÇÃO

O sistema de aquisição de sinais biológicos baseado na norma IEEE 1451.4 pode ser observado de forma simplificada na figura 1. É possível observar que os transdutores são conectados em um canal analógico que fazem parte de um módulo de sistema eletrônico de processamento de sinais biológicos conforme descrito na norma IEEE 1451. O módulo de processamento de sinais é um módulo STIM (*Smart Transducer Interface Module*) e possui uma interface de comunicação com o computador tipo PC (*Personal Computer*).

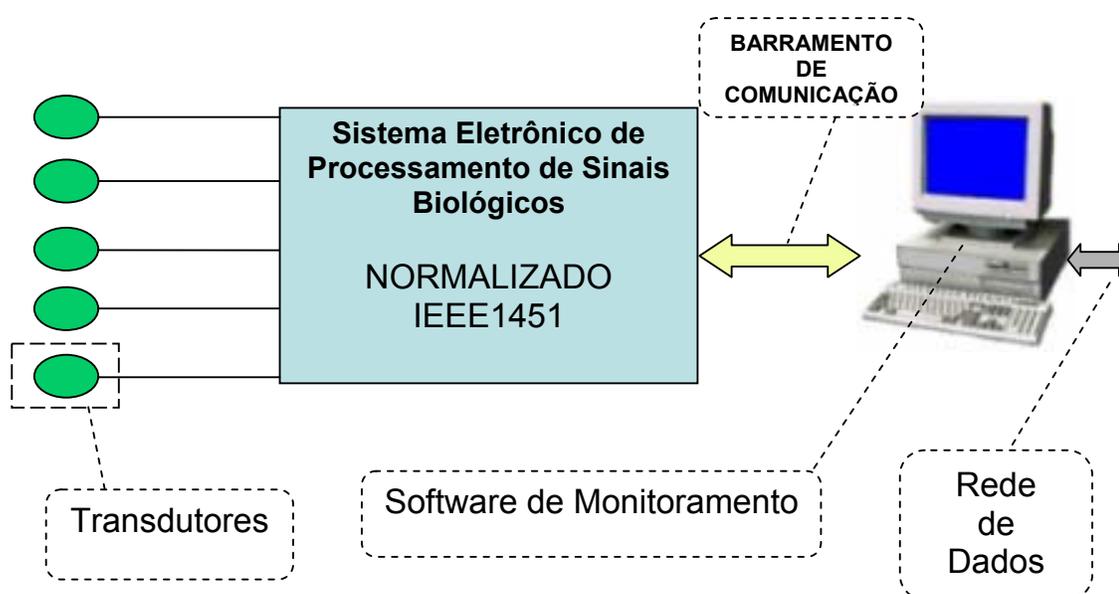


Figura 1: Diagrama Simplificado do Sistema de Aquisição de Sinais

A proposta deste trabalho engloba também a implementação de um software que viabilize a visualização dos dados coletados para posterior estudo. Desta forma, o computador possui um *software* especialmente desenvolvido para monitorar todos os sensores permitindo que os dados lidos sejam armazenados em arquivo formato ASCII² no modo tabela de dados. Este modo de armazenamento permite a exportação de dados para diversos *softwares* comerciais como, por exemplo, Excel, Origin-Lab e Matlab. A utilização destes programas permite analisar resultados através de gráficos e parâmetros estatísticos.

A norma IEEE 1451 vem sendo utilizada em diversas aplicações no ramo da instrumentação viabilizando principalmente a confiabilidade dos sistemas. Este é um dos

² ASCII – American Standard Code for Information Interchange

motivos pelos quais diversas empresas do mundo estão desenvolvendo produtos que obedecem à norma. Dentre os objetivos principais podemos destacar a compatibilidade na comunicação de dados, proporcionando facilidade de manutenção, pois a substituição de um sistema para outro deverá ser automática, [Woods et al. 1996]. Estes fatores fazem com que a norma IEEE 1451 seja propícia na aquisição de sinais biológicos bem como outras aplicações dentre as quais podemos citar a automação industrial e o monitoramento ambiental, [Peng et al. 2000].

Um fator relevante que merece destaque é a utilização da Internet (rede mundial de computadores) e a computação distribuída ou colaborativa que possibilitam monitorar diversas variáveis de qualquer parte do mundo. A computação distribuída vem sendo pesquisada com o uso da IEEE 1451 em um sistema chamado TC³ (*telecollaboration*) baseada em uma estrutura *Middleware*⁴, [Chaczko et al. 2005].

A norma IEEE 1451 vem sendo utilizada em diversas aplicações por diversos órgãos de segurança nos EUA e Europa, [Erinle 2005], tais como:

- Sensores *Wireless*, conforme IEEE 1451.5 utilizados para monitoramento do mar e de imagens via satélite, conforme figura 2, mostrada abaixo.

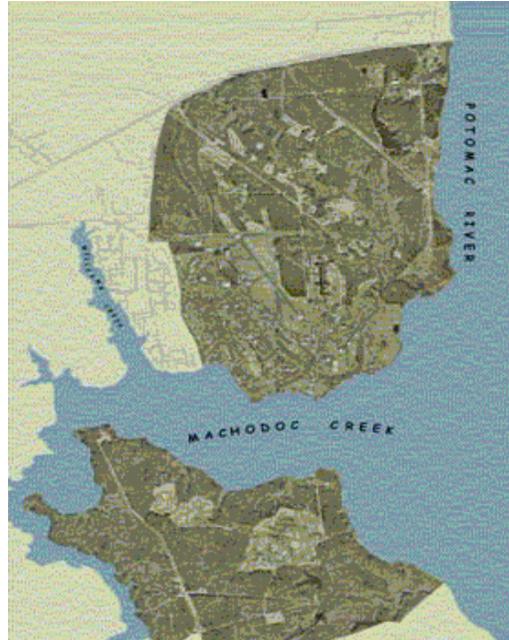


Figura 2: Monitoramento do mar e de imagens via satélite

³ TC = Telecollaboration = computação colaborativa.

⁴ Middleware= camada intermediária entre Sistema Operacional local e a Aplicação Distribuída.

- Sensores conforme IEEE 1451.4 e IEEE 1451.5 para monitoramento da guarda costeira e utilização de aplicações distribuídas no monitoramento de cidades e embarcações, conforme mostra a figura 3, [Lee 2005], [Perrussel 2005].

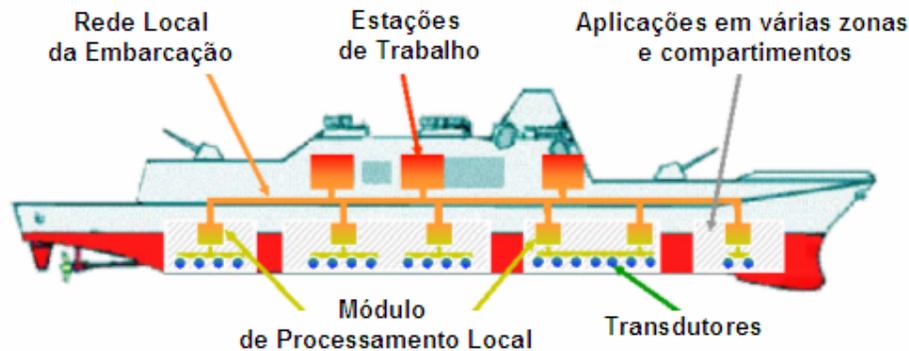


Figura 3: Sistema de monitoramento de embarcação

As aplicações da norma IEEE 1451 na área biomédica estão se proliferando devido à facilidade de funcionamento, auto-calibração e auto-reconhecimento dos elementos sensores, [Zywietz et al. 2000], [Axisa et al. 2003]. Uma das aplicações que podemos referenciar mostra o desenvolvimento de um *data logger*⁵ portátil baseado na IEEE 1451.2 para monitoramento fisiológico utilizando um microcontrolador PIC (*Peripheral Interface Controller*). Este equipamento permite medir a resposta galvânica da pele, a pressão sanguínea e a temperatura do corpo, [Luharuka et al. 2003].

Uma outra aplicação é o desenvolvimento de *rhythm analysis*, cujo equipamento mais conhecido por *Holter* pode ficar monitorando sinais de ECG⁶ durante 24 horas por vários dias, [Zywietz et al. 2000].

Dentre outras aplicações podemos citar o monitoramento de pacientes com dificuldade de locomoção onde se utilizou a tecnologia *bluetooth* em conformidade com a norma IEEE 1451.5, [Barnes 2002]. O *data logger* está instalado em uma cadeira de rodas e a transmissão de sinais acontece de tempos em tempos via RF⁷ para um terminal conectado ao PC.

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma interface eletrônica de aquisição de dados, processamento e armazenamento de sinais eletrônicos em um banco de memória não volátil. Uma das principais inovações a ser enfatizada é a implementação da estrutura TEDS em uma memória serial não volátil, controlada por apenas dois fios e fisicamente localizada na mesma placa amplificadora do transdutor, [Chen 1998]. Desta

⁵ Data logger = equipamento que armazena sinais biomédicos em uma memória não volátil

⁶ ECG = eletrocardiograma

⁷ RF = rádio frequência

forma, este sistema pode ser utilizado em campo para pesquisa científica, nas áreas da biologia, automação industrial, medicina e coleta de dados ambientais.

O módulo STIM aqui desenvolvido tem a finalidade de monitorar os sensores em conformidade com a norma IEEE 1451.4, [URL 1]. Este módulo utiliza um microcontrolador de propósito geral tipo PIC16F877.

A norma IEEE 1451.4 permite utilizar sensores digitais (inteligentes) e analógicos de uso geral que são mais comuns e que podem tornar-se adequado à norma utilizando-se uma interface MMI (*Mixed Mode Interface*) conectada ao módulo STIM.

A utilização da interface MMI e o armazenamento do TEDS em memória serial EEPROM permitem a construção de sensores tipo *plug&play*.

O módulo STIM implementado possui os benefícios que a norma IEEE 1451.4 proporciona com as seguintes vantagens, [Ulivieri 2005]:

- Permite a utilização de transdutores, independentemente dos fabricantes, pois possuem o mesmo protocolo de comunicação.
- Permite a substituição dos transdutores com o mínimo esforço, pois se trata de sensores *plug&play*.
- Elimina erros que podem ser ocasionados em configuração manual do sistema.
- Suporta um modelo geral de TEDS permitindo a auto-configuração (auto-calibração) e manutenção do transdutor (re-calibração via PC).

Este trabalho mostra o desenvolvimento de um módulo genérico de aquisição de sinais baseado na norma IEEE 1451.4 com cinco canais analógicos e 8 saídas digitais de propósito geral.

A aquisição de sinais biológicos é meramente uma questão física de implementação de um circuito apropriado que pode amplificar um sinal de um sensor para uma medida biológica qualquer, podendo este ser conectado em qualquer canal analógico do módulo STIM.

Esta facilidade de operação é viabilizada devido à utilização de uma memória não volátil que pode armazenar características importantes do sensor. Sendo assim, ao conectá-lo no módulo STIM, o sensor será imediatamente reconhecido e o *software* apontará suas características elétricas.

O cadastro dos transdutores está organizado em um arquivo texto que possuem os tipos de transdutores com as suas respectivas características elétricas. O arquivo texto gerado é chamado de *Transdutores.txt (template)*.

Neste trabalho foram construídos amplificadores para diversos tipos de medidas tais como temperatura, pressão e pH para exemplificar o uso em aplicações biológicas.

O primeiro capítulo desta dissertação enfoca a definição de transdutores inteligentes baseados na norma IEEE 1451 bem como a descrição geral destas normas. O capítulo 2 abrange o desenvolvimento das interfaces eletrônicas dos sensores. No capítulo 3, são mostradas as implementações de *hardware* e *software* do módulo STIM conforme IEEE 1451.4. No capítulo 4 são apresentados os resultados dos sinais coletados e discussões. A conclusão e perspectivas futuras são descritas no capítulo 5.

1 Capítulo 1

1.1 Interface Eletrônica de Aquisição, Processamento e Armazenamento de Sinais Biológicos

Os sistemas eletrônicos de aquisição de dados dependem fundamentalmente de elementos eletro-eletrônicos que permitem detectar a variável desejada. Estes elementos são conhecidos por transdutores. Primeiramente devemos conceituar o que é um dispositivo transdutor e como são classificados esses dispositivos, [Gregory 1984].

Um transdutor é um dispositivo elétrico ou eletromecânico que converte um tipo de energia de um meio físico para outro meio físico. Os transdutores podem ser de dois tipos, sensores e atuadores, conforme mostra a figura 4.

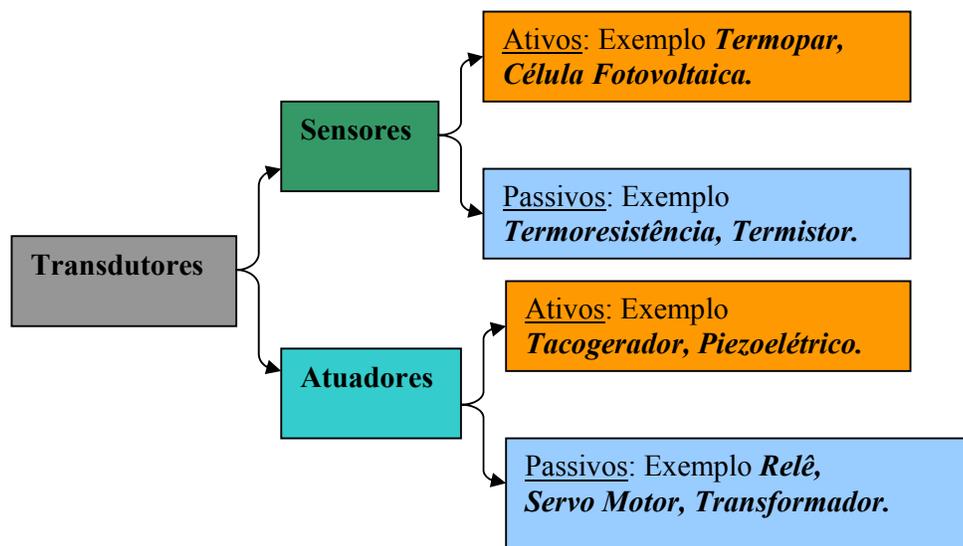


Figura 4: Classificação de sensores e atuadores

Na figura acima podemos observar que os transdutores e atuadores são subdivididos em ativos e passivos. Observe a explanação com os exemplos citados abaixo.

- Transdutor eletroacústico (alto-falante) converte sinais elétricos de áudio em movimento mecânico de um cone, que por sua vez transmite este movimento mecânico para o ar, resultando em um sinal audível, ou seja, o alto-falante sendo excitado por uma fonte é um atuador passivo.
- Um termopar é um transdutor que recebe estímulo (variação de temperatura) e produz na sua saída uma diferença de potencial elétrico, ou seja, como ele gera energia em função da temperatura é um sensor ativo.

Estes dois exemplos aqui utilizados ilustram a classificação de sensores e atuadores. Sensores são sempre elementos que podem liberar algum tipo de energia quando recebem algum tipo de estímulo, já os atuadores são elementos que recebem energia elétrica e convertem em outra forma de energia, [Norton 1989].

Exemplo de sensor tipo termopar usado para medir temperatura pode ser observado na figura 5.

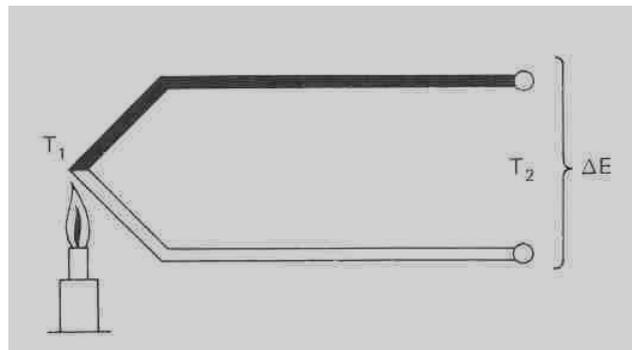


Figura 5: Termopar recebendo o estímulo (calor da vela) transforma em tensão elétrica ΔE

Sensores e atuadores são utilizados no dia a dia numa vasta gama de aplicações tais como, indústria química, petroquímica, de alimentos, laboratórios farmacêuticos, indústria automobilística e biomedicina.

O sistema de interface eletrônica de aquisição, processamento e armazenamento de sinais biológicos foi desenvolvido utilizando um microcontrolador RISC com o qual pode executar programas de correção de sinal de saída, auto-calibração, diagnóstico e identificação do transdutor. Existe a possibilidade de utilizar rotinas matemáticas para o tratamento das variáveis medidas tais como, média de diversas leituras, interpolação polinomial para acerto de curva ou otimização linear que poderão ser implementadas via *software*.

Este sistema está em conformidade com a norma IEEE 1451.4 apresentando desta forma uma padronização de sinais de controle, a fim de promover a flexibilidade e não apresente nenhuma limitação no uso de diversos tipos de transdutores, sejam eles inteligentes ou convencionais, tipo analógicos ou digitais, tanto os que tenham a saída de tensão como os que tenham saída de corrente no modo *loop* de corrente (4-20mA). Assim sendo, este projeto apresenta uma grande flexibilidade de interconexão de diversos tipos de sensores.

Atualmente existem diversas soluções proprietárias aplicadas a diversos tipos de sensores, porém não possibilitam a conexão a um dispositivo de propósito geral usando algum tipo de protocolo serial.

1.1.1 Diagrama Geral para Sensores Inteligentes

Abaixo apresentamos um diagrama geral simplificado para enfatizar um sensor inteligente, [URL 1]. Podemos observar na figura 6 um diagrama geral de blocos que descreve um sensor de temperatura inteligente. Supondo que o bloco transdutor seja um sensor de temperatura com saída de tensão igual a $10\text{mV}/^\circ\text{C}$. Este sinal passará pelo bloco de condicionamento, onde podemos amplificá-lo por um ganho 5, ou seja, teremos então $50\text{mV}/^\circ\text{C}$. Posteriormente, esta tensão passa por um conversor analógico digital, que por sua vez entra num bloco onde é possível fazer correções de linearidade em função de parâmetros armazenados na memória de dados. Finalmente a variável temperatura pode ser exibida em um display ou interface com o usuário.

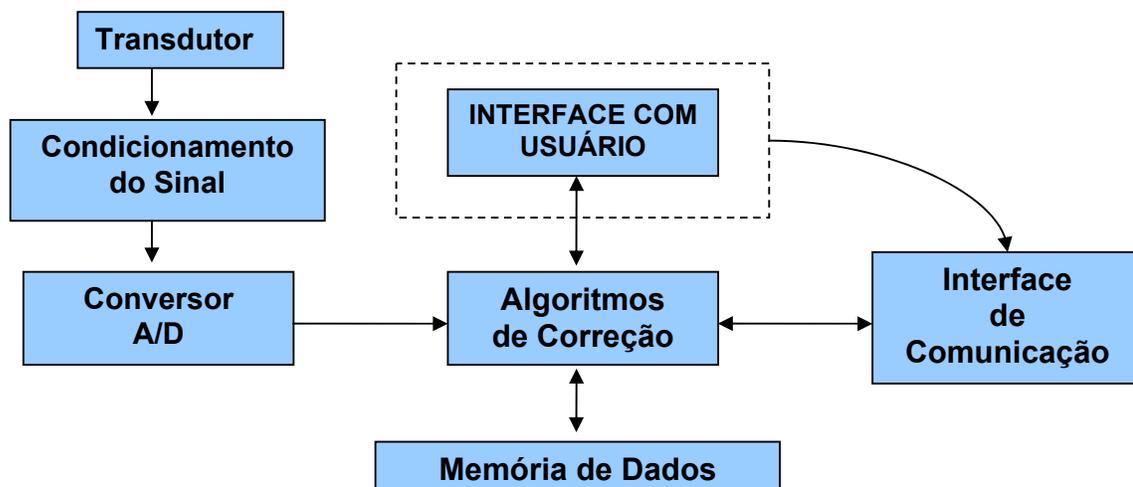


Figura 6: Diagrama geral de transdutores inteligentes

A seguir apresentamos a norma IEEE 1451.4 a fim de ilustrar e promover um melhor entendimento referente às vantagens da normalização de sensores inteligentes, [Licht 2003].

1.2 O Modelo IEEE 1451

A norma IEEE 1451 define um conjunto de interfaces normalizadas no âmbito de *hardware* e *software* que tem como objetivo principal compatibilizar diversos tipos de transdutores sem considerar aspectos do protocolo de comunicação. A proposta separa transdutores e os seus sistemas de interconexão. Este fato de separar o transdutor por tipo de comunicação que vai utilizar faz com que o sistema fique mais flexível e não dependa de um protocolo proprietário para a comunicação entre o transdutor e o módulo STIM.

1.2.1 Nota Histórica Sobre Transdutores Inteligentes

O NIST (*National Institute of Standards and Technology*) e o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) definiram padrões de normalização para transdutores inteligentes em 1993, [Eidson 1995]. Foram definidos quatro grupos de trabalho para o desenvolvimento de uma norma. Estes grupos trabalharam em 1994 e 1995 estudando a organização de uma rede de comunicação entre o transdutor e o processador de rede, [Chen 1998].

- 1º Grupo – P1451.1⁸ definiu a arquitetura do processador de rede NCAP - sistema de processamento de rede que interliga o transdutor inteligente a uma rede de comunicação.
- 2º Grupo – P1451.2 definiu um modelo de referência para o STIM. Este modelo descreve as funções do transdutor, sua interface de comunicação e suas características elétricas conhecida por TEDS que fica armazenada em uma memória não volátil.
- 3º Grupo – P1451.3 foi atribuída à tarefa de definir uma interface de comunicação digital para sistemas distribuídos de transdutores inteligentes.
- 4º Grupo – P1451.4 foi atribuída à tarefa de criar uma interface de comunicação mista para atender tanto os transdutores analógicos já existentes, como também os digitais, por exemplo, que usam o protocolo 1Wire®, [Mark 2004], [Hufnagel 2004].

IEEE 1451 Family of Smart Transducer Interface Standards

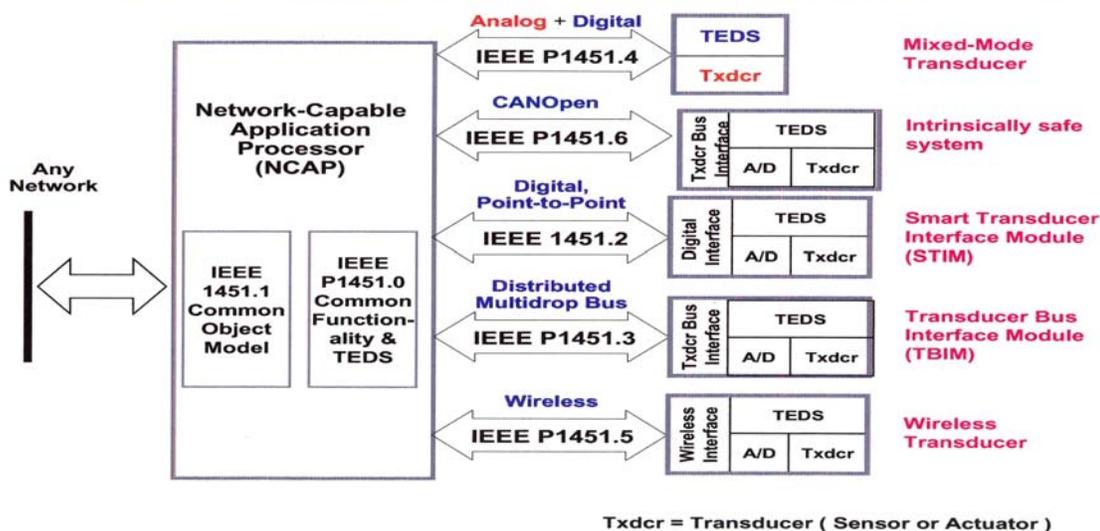


Figura 7: Quadro geral IEEE 1451

⁸ A letra P significa Projeto de Norma

A figura 7, retirada da referência [Lee 2004] mostra o quadro geral das normas IEEE 1451 e as suas variações de acordo com a interface de comunicação entre o módulo STIM e o módulo NCAP.

1.2.2 Norma IEEE 1451.1

Esta versão da norma definiu a arquitetura do processador de rede NCAP, ou seja, um modelo orientado a objetos para representar qualquer tipo de transdutor ligado em rede. A norma define que o processador de rede deve ser capaz de interpretar um protocolo de comunicação da rede e solicitar a interface STIM valores lidos dos sensores, transdutores e parâmetros do TEDS. Os valores lidos e também os parâmetros do TEDS poderão ser encaminhados para o solicitante conectado à rede, [Kareh 1995].

A figura 8 mostra o diagrama de blocos da estrutura NCAP conectada à rede e a um módulo STIM que está em conformidade com a norma IEEE 1451.1. Como podemos observar no diagrama de blocos da figura 7, nota-se que a norma não fixou um tipo de protocolo para ser utilizado entre o NCAP e a rede de dados, [____ 1998].

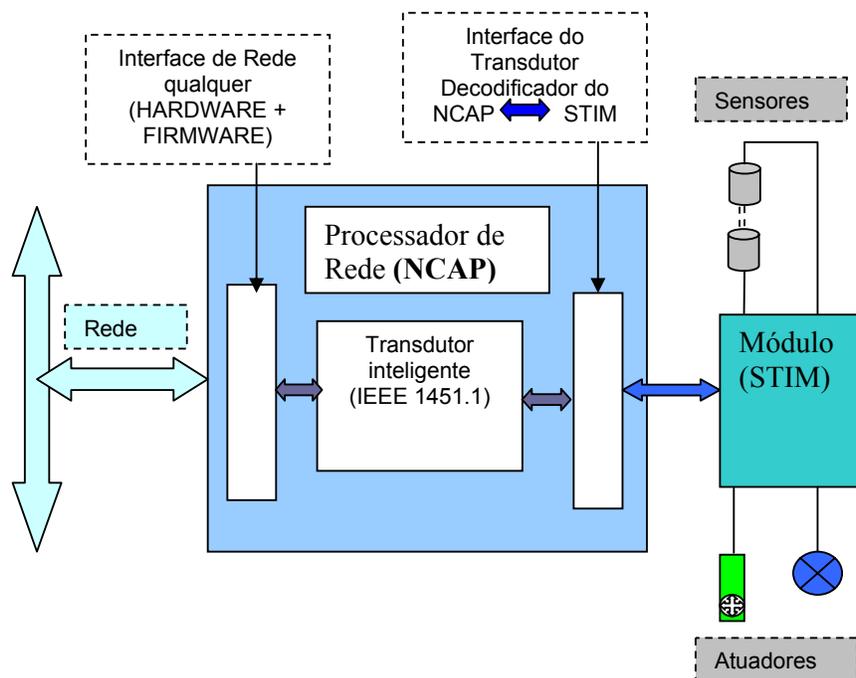


Figura 8: Módulo NCAP conforme norma IEEE 1451.1

O módulo NCAP é formado por quatro blocos apresentados a seguir.

Sistema Operativo: é um *software* que monitora o processador de rede a fim de estabelecer mecanismos de prioridade de processamento, comunicabilidade com os outros módulos, gerenciamento da memória e controle de interrupções.

Biblioteca de Classes: é uma biblioteca que contém blocos de funções com os quais o programador poderá desenvolver uma aplicação de controle ou de aquisição de dados. Esta biblioteca poderá ser implementada em linguagem C++, Delphi, Visual Basic 6, dot.Net, Java e XML sendo que as três últimas podem proporcionar acesso remoto via *Web*.

Bloco de Interface com o transdutor: este bloco permite um link de comunicação entre o processador de rede, módulo NCAP e o módulo STIM. Este módulo deve ser capaz de escrever no módulo STIM, ler o módulo STIM e disparar algum alarme ou relê de controle quando uma determinada variável atingiu um nível programado.

Bloco de Interface com a Rede: este bloco é responsável pela interconexão entre a rede de dados e o módulo NCAP. O módulo NCAP deve ser capaz de identificar o protocolo de rede e responder a uma chamada remota, quando requerida.

A interface de rede deve ser capaz de identificar um procedimento de chamada remota (*Remote Procedure Call*) proveniente de um cliente distribuído qualquer, [Veigas 2003]. Desta forma, o serviço de chamada remota utilizado em sistemas distribuídos fica transposto para os transdutores. O cliente remoto pode se apropriar dos dispositivos conectados no STIM de forma que a sua máquina fica transparente ao sistema NCAP parecendo que o STIM está localmente na sua máquina.

Um cliente remoto pode realizar diversas tarefas tais como:

- Adquirir dados dos sensores (por exemplo, amostras digitalizadas).
- Transmitir informações de controle (por exemplo, um atuador pneumático).
- Solicitar que o STIM reenvie dados (por exemplo, perda de dados enviados).
- Receber e mandar uma notificação de ocorrência de um determinado evento (por exemplo, quando um nível de um tanque chegou ao limite máximo, disparando um alarme e desligando uma bomba).

Um ambiente colaborativo pode ser estabelecido para caracterizar um sistema distribuído. Podemos observar na figura 9 um exemplo de controle de processo e aquisição de sinais da seguinte maneira:

- **Caso 1** – Um sensor de temperatura está monitorando uma estufa de secagem e quando a temperatura atinge um determinado valor, o sistema NCAP1 desliga o atuador (relê) que por sua vez desliga a resistência de aquecimento. Quando a temperatura da estufa começa a cair, o sensor detecta e o módulo NCAP1 manda o atuador (relê) ligar a resistência de aquecimento, controlando a temperatura da estufa.
- **Caso 2** – Um sensor de nível está conectado no módulo STIM2 e manda o sinal constantemente do nível de um tanque para o módulo NCAP2. O nível do tanque é controlado através de uma bomba que está ligada pelo atuador conectado ao STIM3. O computador ligado na rede pode através de um programa pré-estabelecido controlar o nível do tanque enviando um sinal para o NCAP3 e conseqüentemente comandando o STIM3, podendo desligar o atuador da bomba quando o nível do tanque atingir um determinado valor. Podemos observar neste exemplo que diferentes módulos, o NCAP e o STIM participaram da operação de monitoramento, como se fosse um único sistema conectado diretamente ao computador. Este exemplo caracteriza um sistema de controle distribuído.

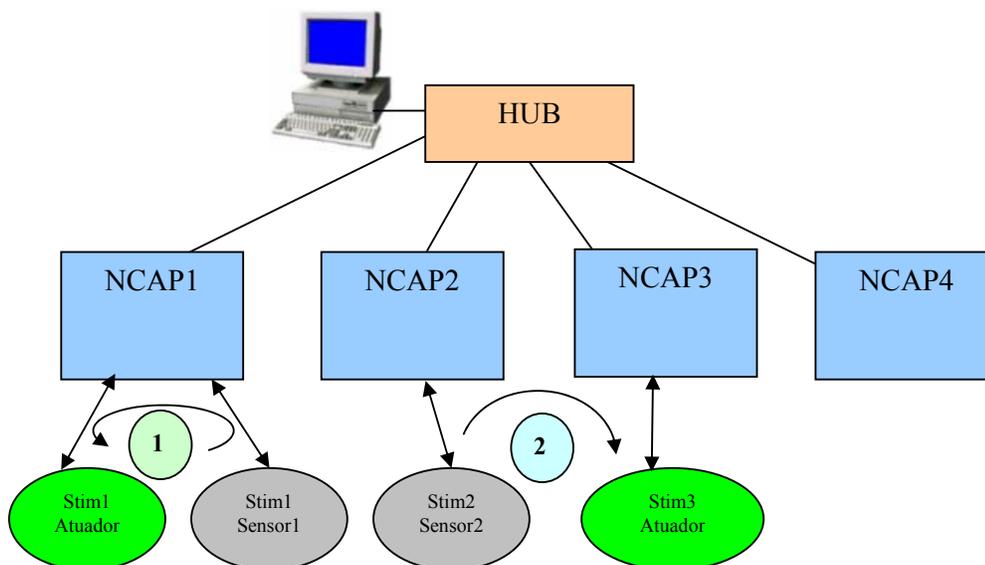


Figura 9: Exemplo de um sistema distribuído para controle e aquisição de sinais baseados no modelo IEEE 1451

1.2.3 Norma IEEE 1451.2

O módulo STIM deve possuir um canal analógico de entrada ligado a um conversor A/D (*Analogic to Digital*) e um canal analógico de saída que pode ser ligado a um conversor

D/A (*Digital to Analogic*). A figura 10 mostra os principais blocos do módulo STIM que são responsáveis pela aquisição, condicionamento e digitalização do sinal. Podemos observar na figura o bloco denominado TEDS constituído por uma memória EEPROM onde ficam armazenadas características do sensor e do atuador que estão conectados no módulo STIM.

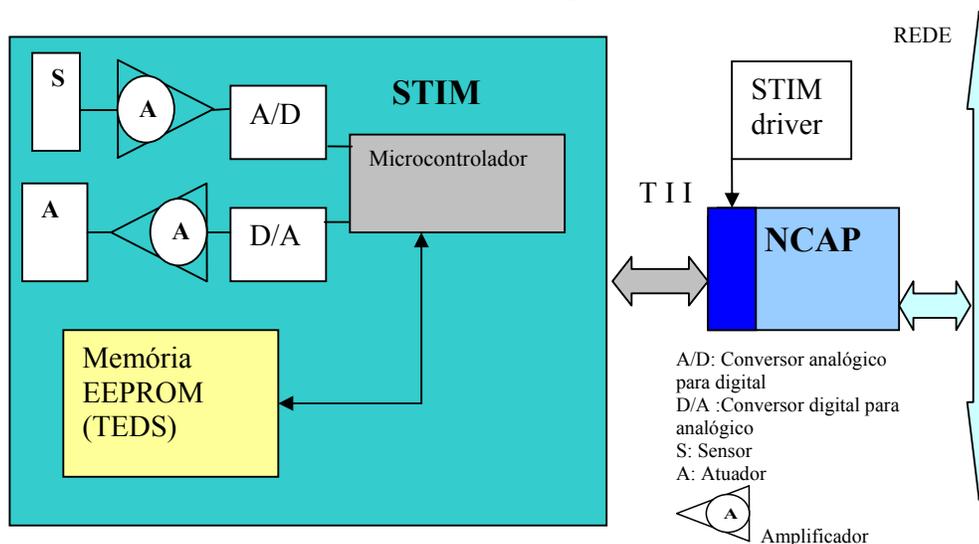


Figura 10: Diagrama de Blocos do módulo STIM

A norma 1451.2 não prevê nenhuma restrição aos sensores e atuadores ligados ao STIM. Esta norma regulamenta a comunicação e a acessibilidade entre o STIM e o NCAP como podemos ver a seguir.

1. Comunicação entre STIM e NCAP de acordo com norma 1451.2

A comunicação entre o STIM e o NCAP é chamada de “T I I” (*Transducer Independent Interface*) - interface independente do transdutor que é estabelecida através de um protocolo serial síncrono. O protocolo utilizado é o SPI (*Serial Peripheral Interface*) muito utilizado em memórias seriais e foi desenvolvido pela Motorola.

2. A norma define que o NCAP pode comandar o STIM em qualquer tempo, ou seja, o módulo NCAP tem acessibilidade total ao módulo STIM. Esta acessibilidade do STIM pelo NCAP é invocada através de um endereço de função e são encaminhadas para o sensor ou para um atuador através de um endereço de canal. O canal zero tem a propriedade de representar o módulo STIM por completo.

A norma 1451.2 confere ao módulo STIM a descrição do tipo de sensor que deve ser implementada em memória não volátil, cujo nome é TEDS, termo original do inglês e

significa *Transducer Electronic Data Sheet*. O TEDS armazena diversas características do sensor tais como, data de fabricação, escala com unidades padronizadas, faixa da tensão de operação, faixa de temperatura de trabalho, data de calibração, dentre outros parâmetros. O circuito NCAP terá a capacidade de identificar todos os parâmetros descritos na memória TEDS facilitando a configuração e funcionamento do sensor como se fosse um sistema *plug&play*, [Eidson 1995].

As características armazenadas no TEDS devem apresentar oito tipos de estruturas previstas na norma 1451.2, sendo duas obrigatórias e seis opcionais. Vale lembrar que alguns dados podem ser lidos e outros podem ser escritos e re-escritos como, por exemplo, dados de calibração. Os dados armazenados podem ser em formato texto (ASCII⁹) ou em número binário.

1.2.3.1 Descrição dos Tipos de Estrutura TEDS

- **Meta TEDS:** O tipo *meta* é uma estrutura ***obrigatória*** em formato binário que permite somente a leitura e contém as seguintes especificações: número de identificação (único), número de canais implementados, limite de tempo global e velocidade de comunicação com o módulo NCAP.
- **TEDS de Canal:** O tipo de *canal* é uma estrutura ***obrigatória*** em formato binário que permite somente a leitura e contém as seguintes especificações: tipo de canal, unidades físicas, valores máximo e mínimo, restrição de tempo e precisão. É previsto um TEDS para cada canal do STIM, menos para o canal zero que é definido pelo Meta TEDS.
- **TEDS de Calibração:** O tipo de *calibração* é uma estrutura tipo ***opcional*** em formato binário com direito de leitura e escrita. Supondo que o STIM necessite realizar um determinado tipo de calibração, esta pode ser feita pelas informações armazenadas no TEDS de calibração. O TEDS de calibração possui os fatores de correção e valores padronizados para determinadas medidas. Neste tipo de TEDS também podemos armazenar a hora, dia e ano da última calibração. Este fato é importantíssimo para os órgãos de certificações e para auditorias de acordo com a Norma ISO 9000.
- **Meta TEDS de Identificação:** O tipo *meta de identificação* é uma estrutura tipo ***opcional*** com formato de texto e permite apenas a leitura. Este tipo de TEDS armazena os seguintes dados: nome do fabricante, modelo, número de série e descrição resumida do transdutor.

⁹ ASCII – American Standard Code for Information Interchange

- **TEDS de Identificação de Canal:** É uma estrutura *opcional* de canal semelhante à estrutura *Meta TEDS de Identificação*, mas com o foco voltado para o canal do STIM e não do transdutor.
- **TEDS de Identificação de Calibração:** É uma estrutura *opcional* em formato texto e possibilidade de leitura e escrita. Esta estrutura pode armazenar informações referentes ao processo de calibração tais como: o valor da tensão de referência de certa variável ou a taxa de deriva térmica de alguma variável. Estes dados são importantes, porém não são imprescindíveis ao funcionamento do módulo STIM.
- **TEDS do Utilizador:** É uma estrutura *opcional* em formato texto que permite a leitura e escrita podendo armazenar as informações que o utilizador desejar. Pode-se armazenar, por exemplo, o nome da empresa, o número de patrimônio e até um número de telefone de emergência.
- **TEDS de Extensão:** Estrutura de memória *opcional* com direitos a serem definidos, reservadas para extensões futuras da norma 1451.2.

1.2.4 Norma IEEE 1451.3

A norma IEEE 1451.3 prevê uma interface normalizada para sistemas de transdutores distribuídos em diversos pontos. A norma não indica uma obrigatoriedade nos sistemas eletrônicos de aquisição e condicionamento dos sinais detectados dos sensores.

A interface descrita na norma indica um barramento de dados comum a diversos módulos que recebe o nome de TBIM, ou seja, módulo de transdução com interface a um único *bus*, [Lee 2000].

O sistema TBIM funciona com um par de fios que proporciona a alimentação elétrica e a comunicação de dados é feita por multiplexação em frequência. O módulo TBIM pode suportar até cinco canais de dados multiplexados em frequência, sendo que apenas dois canais são obrigatórios pela norma IEEE 1451.3. Quando um TBIM é implementado com apenas dois canais ele é chamado de nível zero (0). Os TBIM's de nível zero conferem um sistema mais simples e de baixo custo, pois utilizam o mesmo canal, ou seja, a mesma faixa de frequência para realizar a comunicação de dados e a sincronização. Na figura 11 podemos observar um diagrama de blocos que representa uma estrutura TBIM conectada a um NCAP, [URL 1].

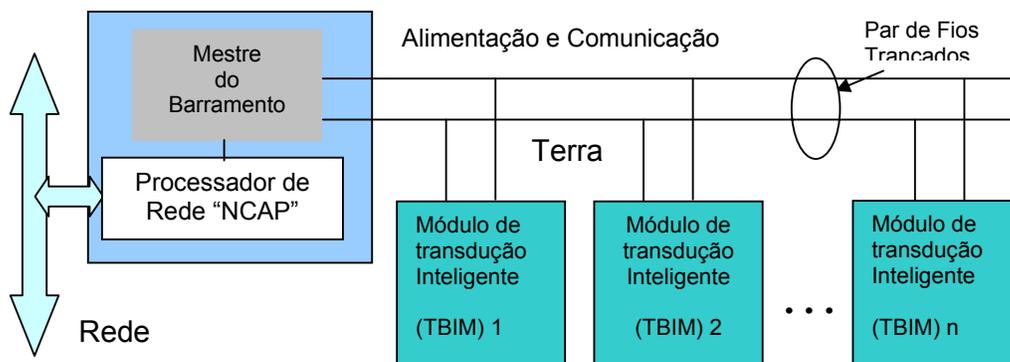


Figura 11: Estrutura TBIM - Norma IEEE 1451.3

O barramento de apenas dois fios mostrado na figura 11 permite transmitir os seguintes canais de comunicação, apontados na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1: Canais de comunicação – Norma 1451.3

Canal de Comunicação	Descrição do Sinal de Comunicação
Sincronização	Canal unidirecional utilizado para realizar a sincronização entre todos os TBIM's ligados no barramento.
Rede	É um canal bidirecional de comunicação que ocupa uma pequena faixa da frequência (FDM ¹⁰) usada para realizar a identificação dos TBIM's.
Controle	É um canal bidirecional que serve para controlar os módulos TBIM's por meio de máscara de interrupção.
Dados	É um canal bidirecional tipo FDM com largura de banda maior que todos os outros canais, pois é dedicado à transmissão e recepção de dados entre o TBIM e o NCAP.
Disparo	É um canal unidirecional que ocupa pequena faixa de frequência tendo a função de disparar cada TBIM por um código numérico identificador único.

1.2.5 Norma IEEE 1451.4

A norma IEEE 1451.4 apresenta uma diferença relevante com relação às antecessoras, ou seja, a preocupação com a compatibilidade dos diversos tipos de transdutores existentes no

¹⁰ FDM = Frequency Division Multiplex

mercado, sejam analógicos e digitais. O principal foco da norma é promover a compatibilidade de diversos tipos de transdutores em um módulo chamado MMI - interface de modo misto, analógica e digital. A interface permite que um sensor analógico comum possa ter uma memória descritiva TEDS permitindo identificar o tipo de sensor, realizar auto-calibração, transformando-o em um sensor *plug&play*, [Licht et al. 2003].

O sistema de comunicação pode ser visto na figura 12, entre o módulo NCAP e o módulo MMI. A comunicação é realizada através da comutação entre a memória descritiva TEDS e a saída analógica do transdutor, ou seja, cada sinal analógico e digital compartilha um único fio de comunicação, cada qual em um determinado instante de tempo.

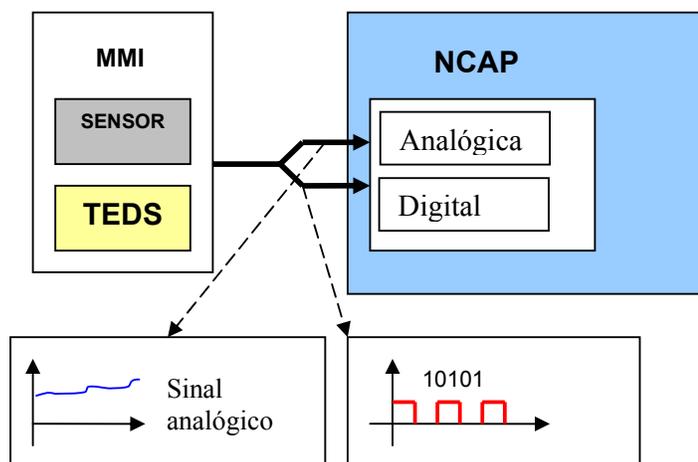


Figura 12: Interface Mista com Sensor Analógico

A norma inicialmente estabeleceu o funcionamento da interface por dois fios utilizando um sensor piezo-elétrico como um acelerômetro, mas também pode prever o uso de diferentes sensores como, *strain gauge*¹¹, termopar, RTD¹², entre outros.

Os objetivos principais propostos pela norma foram:

- Habilitar um sensor simples analógico transformando-o em um sensor *plug&play*.
- Simplificar a criação de sensores inteligentes.
- Facilitar a utilização de sensores inteligentes podendo conectá-los em diversos sistemas de rede.
- Utilizar a menor quantidade de memória possível para o TEDS.

¹¹ Strain Gauges – Transdutor de Medida Tração Compressão

¹² RTD = *Resistance Temperature Detectors*

A proposta da norma IEEE 1451.4 descreve os seguintes itens:

- O elemento de transdução pode ser um simples transdutor analógico adicionando apenas uma memória serial EEPROM para armazenar parâmetros do TEDS.
- A interface mista (MMI) requer um simples controlador máster para iniciar cada transação com o escravo que é o elemento transdutor mais a memória descritiva TEDS.
- O TEDS serve somente para armazenar dados referentes ao sensor ou ao atuador não fazendo parte da interface digital de controle.
- O TEDS obedece a um modelo (*template*) que é um *software* objeto contendo dados e estruturas dos transdutores. Esta implementação da linguagem descritiva residente no transdutor é chamada de *T-block*.
- O *software* que lê a memória descritiva TEDS ou o *T-block* fica armazenado no dispositivo máster que faz parte do NCAP.

Podemos observar que a interface mista analógica e digital MMI pode conter vários transdutores como mostra a figura 13. Podemos verificar que o mestre do barramento faz parte integrante do NCAP.

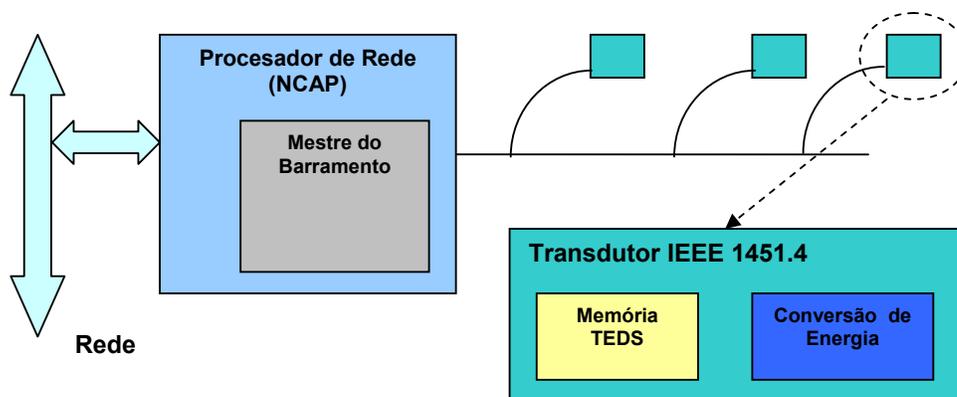


Figura 13: Interface modo Misto – MMI – IEEE 1451.4

1.2.5.1 Interfaces MMI Classe 1 e 2

A interface MMI (mista analógica e digital) pode ser utilizada multiplexada no tempo, sendo assim a interface é definida como classe 1. A interface pode ser ligada com linhas separadas para a interface digital e analógica, não utilizando a multiplexação entre os sinais analógicos e digitais, ou seja, as duas ficam ligadas constantemente, motivo pela qual é definida como interface de classe 2, [Chan 1999].

Exemplificando com diagramas, facilitará o entendimento. Observe na figura 14 uma interface de modo misto operando em classe 1, conectada com um elemento sensor tipo analógico alimentado por tensão.

O funcionamento da interface descrito a seguir mostra que a chave de multiplexação do controle está ligada no modo digital. Desta forma, uma tensão negativa é ligada na linha de alimentação fazendo com que o diodo D1 fique polarizado inversamente e D2 conduza corrente elétrica alimentando a memória TEDS, podendo assim ser lida. Quando ocorre o chaveamento para o modo analógico, o diodo D2 fica em corte e D1 conduz corrente elétrica alimentando o amplificador do elemento sensor, apresentando desta forma uma saída analógica em tensão. Vale lembrar que todas as interfaces MMI mostradas neste item utilizam memória serial do tipo *1Wire* para armazenar o TEDS, [Veigas 2003].

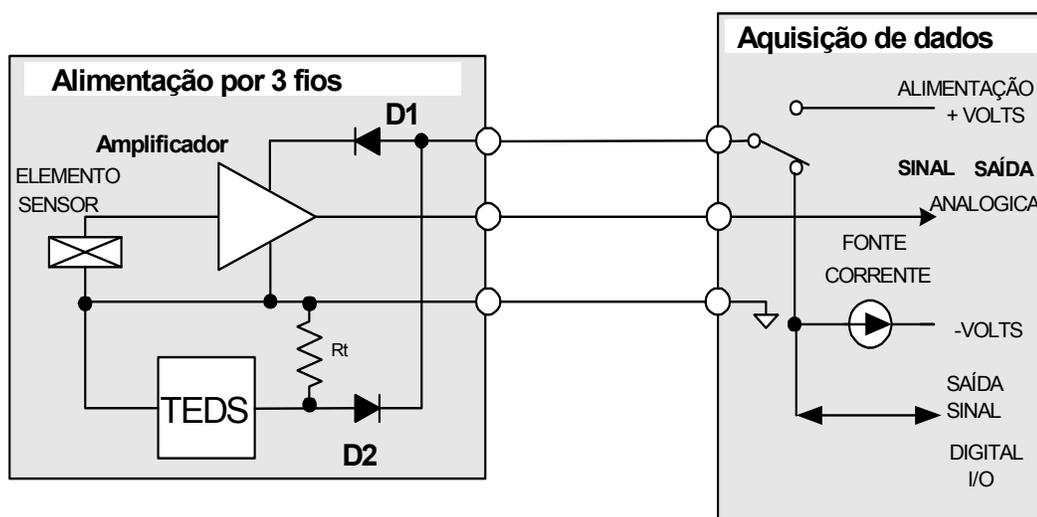


Figura 14: Exemplo de MMI Classe 1 com 3 fios

O exemplo da figura 15 mostra uma interface de modo misto classe 2 para um transdutor que funciona com malha fechada de corrente de 4 a 20 mA. Podemos observar que a memória TEDS está sempre operacional e o sinal analógico do sensor também.

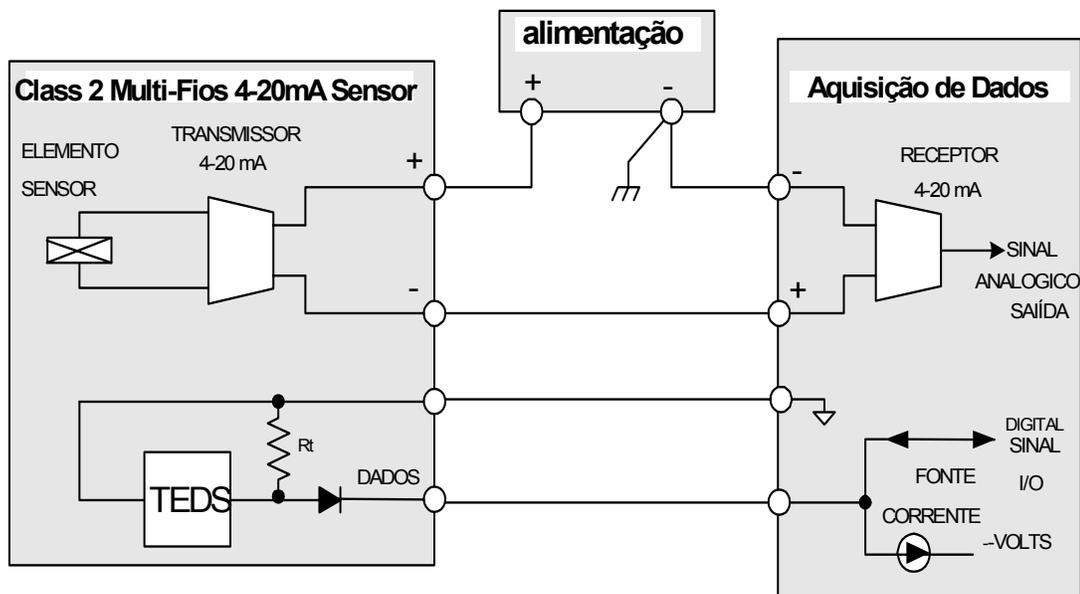


Figura 15: Exemplo de MMI classe 2 Multifios com transdutor 4 – 20mA

O exemplo da figura 16 mostra um sensor em ponte classe 2 com seis fios, tipo multifios (*multi wire*). Este circuito é muito utilizado em sensores tipo *Strain Gauges* para medida de força e pressão, [Chan 1999].

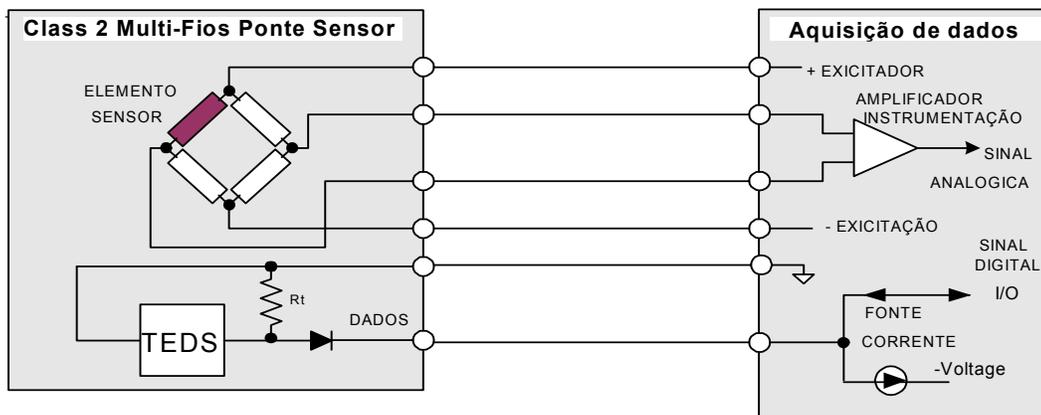


Figura 16: Exemplo de MMI classe 2 Multifios para sensor em ponte

1.2.5.2 A Estrutura TEDS Conforme IEEE 1451.4

A norma IEEE 1451.4 define as especificações do TEDS na qual consiste em múltiplas seções encadeadas conjuntamente formando um bloco TEDS, [Chan 1999].

A primeira seção básica de um TEDS é formada por uma identificação essencial ou uma informação típica que define uma importante propriedade do sensor em particular descrito pelo TEDS básico. Opcionalmente, ao modelo básico pode ser adicionado um modelo de calibração. Dois bits de seleção dentro do TEDS indicam uma seção seguinte

diferente da anterior. A norma prevê na última seção o TEDS do utilizador. Podemos observar estas seqüências descritas abaixo na Tabela 2 que mostra o TEDS básico e a Tabela 3 o TEDS com a seção de calibração; encontramos também o comprimento máximo de bits utilizados em cada seção.

TEDS Básico (64 bits)
Seletor de (2 bits)
Modelo ID (8 bits)
Modelo Padrão TEDS (ID= 25 até 39 bits)
Seletor de (2 bits)
Extensão final do seletor de 1bit
Dados do utilizador

Tabela 2: Transdutor com TEDS Básico Padrão

TEDS Básico (64 bits)
Seletor de (2 bits)
Modelo ID (8 bits)
Modelo Padrão TEDS (ID= 25 até 39 bits)
Seletor de (2 bits)
Modelo Padrão ID (8bits)
TEDS Modelo Padrão de Calibração (ID=40 até 42 Bits)
Seletor de (2 bits)
Seletor de extensão final (1bit)
Dados do utilizador

Tabela 3: Transdutor com TEDS Básico mais TEDS de Calibração

1.2.5.3 O TEDS Básico - Norma IEEE 1451.4

Os primeiros 64 bits do transdutor TEDS é o modelo básico. O modelo básico do TEDS identifica unicamente o transdutor e incluem o número de identificação do fabricante com 14 bits, número do modelo com 15 bits, versão escrita com 5 bits em código por caracteres, versão numérica de 6 bits e um número de série com 24 bits. Cada dado está organizado de acordo com o formato descrito na Tabela 4 em uma memória não volátil tipo serial EEPROM, [URL 2].

Tabela 4: Características do TEDS Básico

<u>Dados Característicos</u>	<u>Comprimento da informação Bits</u>	<u>Range de alocação Normalizado</u>
Código do fabricante	14	17 - 16381
Número do Modelo	15	0 – 32767
Versão Escrita	5	A-Z (dado em caractere chr5)
Versão Numérica	6	0 - 63
Número de Série	24	0 - 16777215

O código do fabricante é um número de identificação (ID) numerado pelo fabricante. Vários números de identificador dos fabricantes têm sido registrados adaptando-se ao futuro, sendo que estes números são gerenciados pelo IEEE. Estas assinaturas de identificação são

avaliadas em código ASCII, arquivo texto e por *software*. O uso do *software* provê a utilização do arquivo mostrado em *display* com o nome do fabricante. Os valores de zero até 16 e 16382 até 16383 são reservados para uso especial como lista de nós dentro de um *template*, [URL 2].

A tabela seguinte mostra alguns detalhes sobre o número de bits usados para cada propriedade no seu nível de acesso, por exemplo, calibração, usuário, identificação e os tipos de dados. Os tipos de dados são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: tipos de dados dentro de um modelo padrão

<u>Tipos de Dados</u>	<u>Descrição</u>
UNINT	Número inteiro
C	Caractere de 5 bits
ASCII	7 bits padronizado ASCII
Data	Número de dias
Single	Precisão simples
ConRelRes	Constante de Resolução Relativa. É um dado customizado por uma compressão de valor em ponto flutuante que prove uma curva logarítmica dentro de um intervalo definido.
Enumeração	Referência enumerada para um modelo de dado.

1.2.5.4 Modelo Padrão para Tipos de Transdutores

O padrão da norma IEEE 1451.4 define uma coleção de modelos de classe comum para transdutores listados na Tabela 6. Os modelos de 25 até 39 são modelos que contém propriedades necessárias para especificar os diversos tipos de transdutores. Os modelos 40, 41 e 42 são modelos padronizados de calibração e podem ser utilizados com qualquer outro tipo de transdutor, como descrito de 25 até 39. Podemos observar estes dados na Tabela 6 abaixo, [URL 2].

Tabela 6: Modelos Padronizados para Diversos

Tipo	Modelo de ID	Nome do transdutor
Modelos dos Transdutores	25	Acelerômetro & Força
	26	Amplificador de Carga (W/ conectado acelerômetro)
	43	Amplificador de Carga (W/ conectado ao transdutor de força)
	27	Microfone com pré-amplificador interno
	28	Microfone com pré-amplificador conectado externo
	29	Microfone capacitivo
	30	Sensores com saída de alta tensão
	31	Sensores de loop de corrente (malha fechada em corrente)
	32	Sensores resistivos
	33	Sensores em ponte
	34	Sensor com Transformador Diferencial Variável AC Linear/ Rotacional (LVDT/RVDT)
	35	Sensor de pressão ou força por tensão mecânica de um Metal <i>foil foil = Strain Gauge</i>
	36	Termopar
	37	Detector de Temperatura por Resistência (RTD)
	38	Termistor NTC ou PTC
39	Divisor de Voltagem Potenciométrico	
Modelo de Calibração	40	Tabela de Calibração
	41	Curva de Calibração Polinomial
	42	Tabela de frequência de Resposta

1.2.5.5 Interface Digital TEDS Conforme IEEE 1451.4

A interface digital descritiva TEDS funciona com o protocolo tipo 1 *Wire* que é marca registrada da *Dallas* e atualmente pertencente à *Maxim* semicondutores.

Atualmente existe uma grande gama de componentes eletrônicos que utilizam este protocolo, dos quais podemos citar memórias EEPROM, conversores A/D, sensores de temperatura, relógio de tempo real, dentre outros.

O protocolo 1 *Wire* funciona com apenas a linha de alimentação mais um fio terra. A estrutura do protocolo é baseada em arquitetura mestra e escrava em modo *half duplex*¹³, [URL 3].

Eletricamente o protocolo estabelece que todos os dispositivos de conexão possuem dreno aberto, ou seja, o dispositivo somente pode aterrar a linha forçando a nível zero. Portanto entendemos que deverá possuir um resistor de *pull-up*¹⁴ externo impondo o nível 1 na linha que também serve para alimentar o dispositivo no modo parasita.

¹³ Half Duplex – Divisão de tempo na Comunicação de Dados, 50% Transmite e 50% recebe

¹⁴ Pull-up – Conectado a nível lógico alto

Este protocolo tem taxa típica de comunicação de 16Kbps no modo normal e pode chegar até 143Kbps no modo *overdrive*¹⁵.

Podemos citar as principais características do protocolo:

- Alimentação flexível de 3 a 5,5 VDC (*Voltage Direct Current*).
- Possibilidade de alimentar o dispositivo a partir da própria linha de dados no modo parasita. O barramento é uma linha de dados e, portanto está pulsando os mesmos quando estiver em atividade, bastando para tal utilizar um diodo e um pequeno capacitor para estabilizar a tensão de alimentação do dispositivo.
- Número de identificação único de 64 bits para cada dispositivo, sendo o código formado por 8 bits para o CRC (*Cyclic Redundancy Check Code*), 48 bits para o número serial e 8 bits para identificar o tipo de dispositivo.

1.2.6 Interfaces IEEE 1451.5 e IEEE 1451.6

O presente trabalho não utiliza as norma IEEE 1451.5 e IEEE 1451.6, porém podemos afirmar que estas normas são novas e estão em fase de estudo para que sejam aprimoradas, [Lee 2003].

A norma IEEE 1451.5 tem como base normalizar uma interface sem fios tipo *Wireless* que possua compatibilidade com o sistema Bluetooth/802.15.1, ZigBee/802.15.4 e WiFi/802.11, que consta de uma rede sem fios de curto alcance trabalhando na faixa de 2,4 GHz, [Ferrari et al. 2004].

A norma IEEE 1451.6 tem como base normalizar uma interface com fios utilizando o protocolo desenvolvido pela *Bosch Automotive* chamado de CAN (*Computer Area Network*). Este protocolo permite a comunicação de até 1Mbps de forma confiável, tendo sido desenvolvido inicialmente para gerenciamento de dispositivos de ignição eletrônica e injeção eletrônica além de realizar outros tipos de sensoriamento eletrônico em automóveis, [URL 4].

A figura 17, retirada da referência [Perrussel 2005] mostra um diagrama de blocos das normas IEEE 1451. Os itens na cor laranja* correspondem as novas variações que ainda estão em estudo.

¹⁵ Overdrive – drive de comunicação de alta velocidade

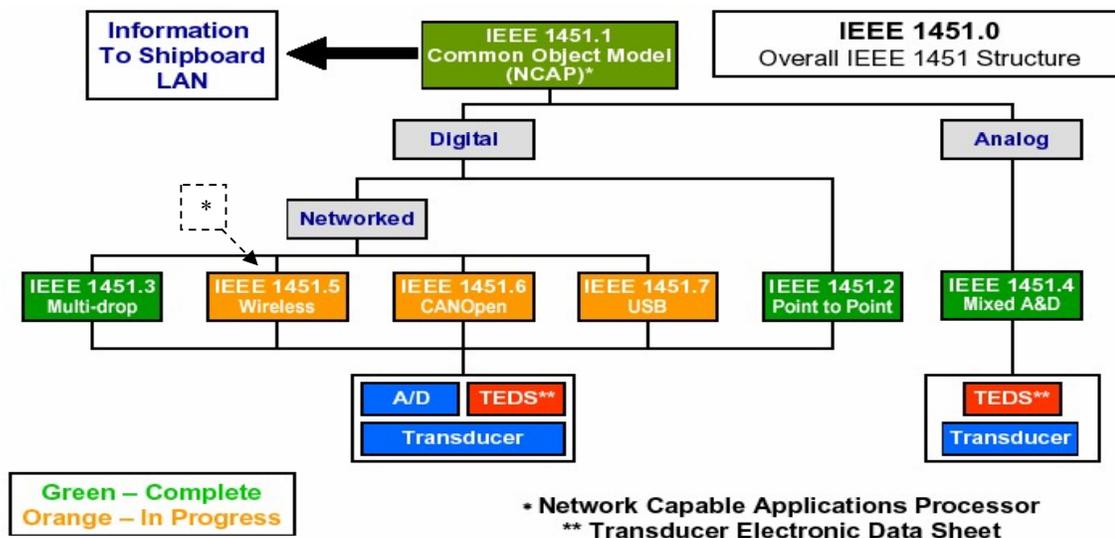


Figura 17: Quadro geral IEEE 1451 com as novas versões em estudo

1.3 Desenvolvimento do Protótipo de Aquisição de Sinais Biológicos

No capítulo 3 vamos detalhar como foi feita a implementação eletrônica do protótipo de interface de aquisição e condicionamento de sinais biológicos. A implementação foi baseada em duas normas, IEEE 1451.2 e a IEEE 1451.4 que são utilizadas para o desenvolvimento do Módulo STIM.

1.4 Diagrama Simplificado do Sistema de Aquisição de Sinais Biológicos

Na figura 18, podemos observar o diagrama de blocos de forma simplificada do sistema de aquisição de sinais biológicos. É possível observar que temos 5 canais para sensores biológicos analógicos de acordo com a norma IEEE 1451.4.

No bloco **A** temos um sistema MMI (modo misto de classe 2, tipo multifios), onde cada sensor possui uma memória EEPROM para guardar a estrutura obrigatória do TEDS e um amplificador condicionador de sinais.

O bloco **B** da figura 18 é formado por um microcontrolador PIC 16F877, duas memórias EEPROM e um *drive* de comunicação serial com o computador PC, [URL 5]. Este bloco é responsável pelo processamento, armazenamento e transferência de dados para o PC. O bloco **A** juntamente com o bloco **B** formam o módulo STIM.

O programa residente no computador foi implementado em linguagem Delphi 5, e tem a função de mostrar os dados coletados em forma de gráfico ou tabela de valores. O programa

permite também editar o TEDS de cada sensor conectado a um dos cinco canais analógicos. A edição do TEDS permite gravar seis parâmetros do TEDS obrigatório dentro da EEPROM de cada sensor.

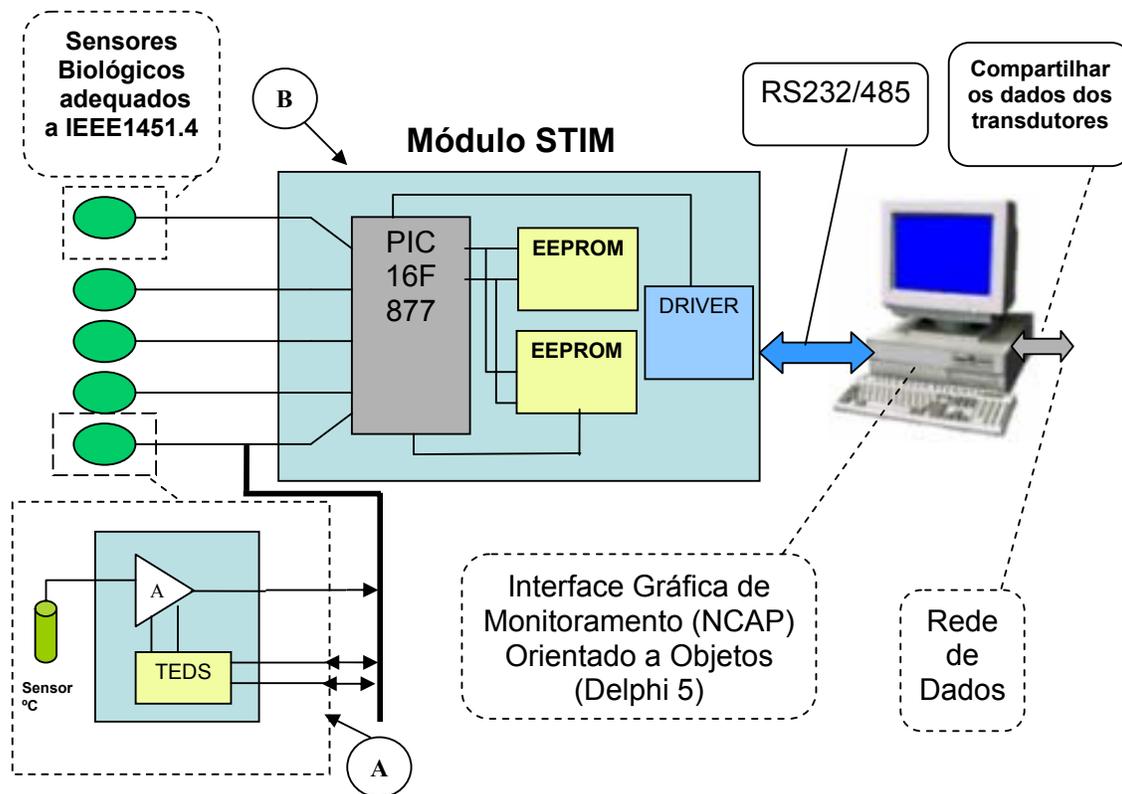


Figura 18: Sistema de Aquisição de Sinais Biológicos

A seguir, no capítulo 2 serão mostradas as interfaces eletrônicas dos sensores.

2 Capítulo 2

2.1 Interface Eletrônica dos Sensores

A interface eletrônica dos sensores foi projetada conforme a norma IEEE 1451.4, ou seja, foi construída no modo classe 2 tipo multifios (MMI). A interface utiliza 6 fios para conectar qualquer tipo de sensor em um canal do módulo STIM.

Uma característica importante é a necessidade de adequar qualquer tipo de sensor já existente à norma IEEE 1451.4. Na figura 19 mostramos um diagrama de blocos adequando os sinais de um sensor analógico simples.

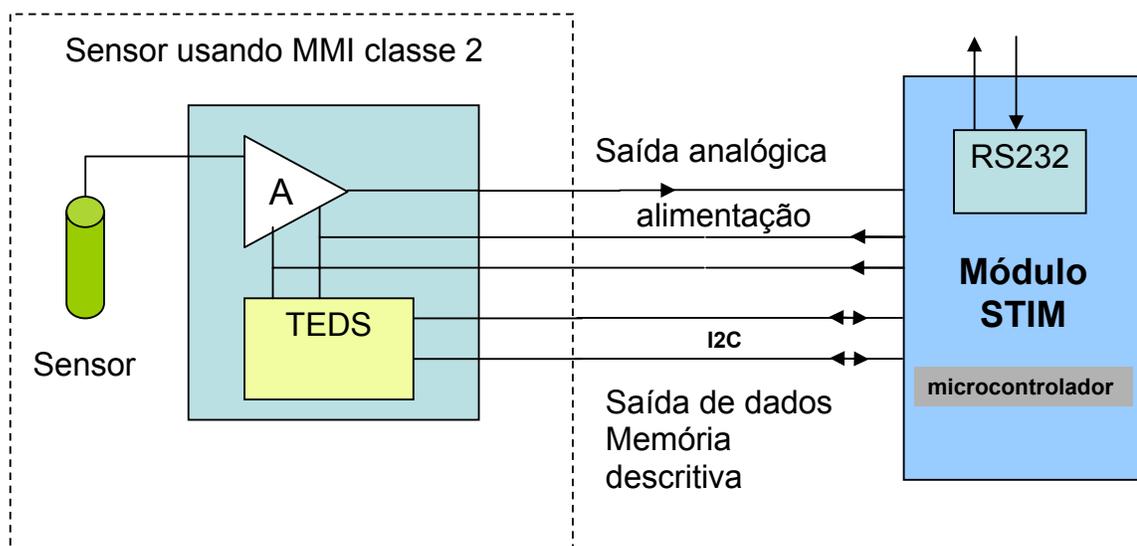


Figura 19: Adequando um Sensor comum à norma IEEE 1451.4

Podemos observar na figura 19 que o sensor está conectado a um amplificador condicionador de sinais e que sua saída analógica vai ligada à entrada do conversor A/D do módulo STIM. Este amplificador precisa ser alimentado, necessitando de dois fios, um positivo e um fio terra (alimentação). A memória TEDS também utiliza o mesmo ramo de alimentação, porém tem um par a mais de fios para transmitir e receber os dados no protocolo I2C, [URL 6]. Portanto, para um sensor qualquer se adequar à norma IEEE 1451.4 há necessidade de apenas 5 fios.

Os módulos de interface eletrônica que foram construídos neste trabalho têm ainda um sexto fio que serve para detectar se o sensor está conectado a um canal qualquer.

2.2 Memória Descritiva TEDS 1Wire ou I2C

A memória descritiva TEDS obedece à conformidade da norma IEEE 1451.2. A implementação dos principais dados do TEDS é feita em uma memória serial EEPROM de 2kBytes com comunicação I2C. A norma usa uma memória EEPROM do tipo *1wire*, que é um protocolo de comunicação proprietário da *Maxim-Dallas* Semicondutores, [URL 3].

Uma solução proposta neste trabalho é o uso de memórias seriais do tipo I2C, cujo protocolo está mais difundido e existem inúmeros fabricantes. Por este motivo a memória I2C é mais fácil de ser obtida no mercado nacional. Um outro fator que justifica o seu uso é que no mesmo barramento podemos adicionar diversos periféricos que utilizam o mesmo padrão de comunicação tais como:

- Potenciômetros digitais em forma de circuito integrado que podem executar ajustes automáticos de calibração gerenciados pelo módulo STIM.
- Relógio de tempo real que funciona com bateria de Lítio tipo botão que duram mais de 2 anos e registram hora, data e ano.
- Sintetizadores de frequência, sintonizadores de rádio e multiplexadores e conversores A/D e D/A.

Um barramento I2C pode suportar até 127 dispositivos em paralelo, tornando um elemento atrativo, pois forma uma rede de dispositivos, o que facilita a implementação de diversos equipamentos para a instrumentação, [URL 6].

Na figura 20 podemos observar a memória usada nos módulos dos sensores MMI.

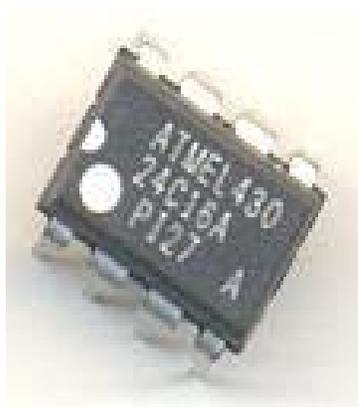


Figura 20: EEPROM Serial 2Kbytes

2.3 Interface MMI para Sensor de Temperatura

O módulo de interface para sensor de temperatura permite medir a temperatura na faixa de 0 até 100°C. Este módulo utiliza um sensor de temperatura a semiconductor muito conhecido - LM35 - manufaturado pela *National Semicondutores*, [URL 7].

Observe na figura 21 o sensor LM35 montado com um rabicho e um pequeno conector, formando assim uma pequena sonda para medida de temperatura.



Figura 21: LM35 com rabicho e conector

O sensor de temperatura LM35 fornece uma saída linear e proporcional com uma taxa de 10mV/°C. Neste projeto utilizamos o conversor A/D de 10 Bits do microcontrolador PIC. Assim sendo, podemos calcular a sua resolução “R” em (mV):

$$R = \frac{V_{ref}}{2^n - 1} \quad (1) \quad \text{onde temos que:}$$

n = número de bits do conversor A/D

V_{ref} = tensão de referência do conversor A/D (considerando 5vcc)

$$\text{Portanto } R = \frac{5}{2^{10} - 1} = \frac{5}{1024 - 1} = 4,88mV$$

Observe que este conversor A/D tem capacidade de medir uma tensão elétrica a partir de 5mV aproximadamente. Como este sensor gera 10mV podemos ligar direto na entrada do A/D. Por uma questão de confiabilidade, o sinal desse sensor foi re-escalado, amplificando por um ganho 5, com a finalidade de obter uma tensão maior no fundo de escala para 100°C. Podemos calcular a tensão de fundo de escala por:

$$Tfs = k \times G \times V_{\max} \quad (2), \text{ onde:}$$

Tfs = tensão de fundo de escala

k = taxa de variação linear do sensor (10mV)

Valor Máximo da Variável (temperatura = 100)

Portanto $Tfs = 10 \times 10^{-3} \times 5 \times 100 = 5Volts$

O diagrama de blocos simplificado do módulo MMI para a medida de temperatura é mostrado na figura 22.

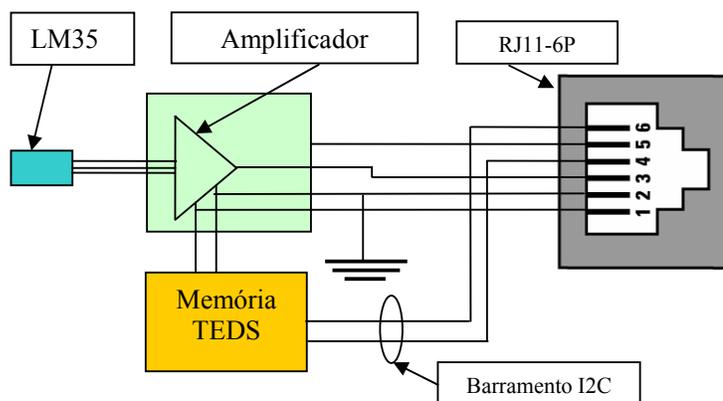


Figura 22: Diagrama simplificado do módulo MMI para temperatura

Maiores detalhes sobre o módulo MMI para temperatura pode ser visto no APÊNDICE-A (Módulo MMI com LM35) e suas características básicas estão no ANEXO-A. Na figura 23 podemos observar a placa de circuito do módulo MMI para temperatura.

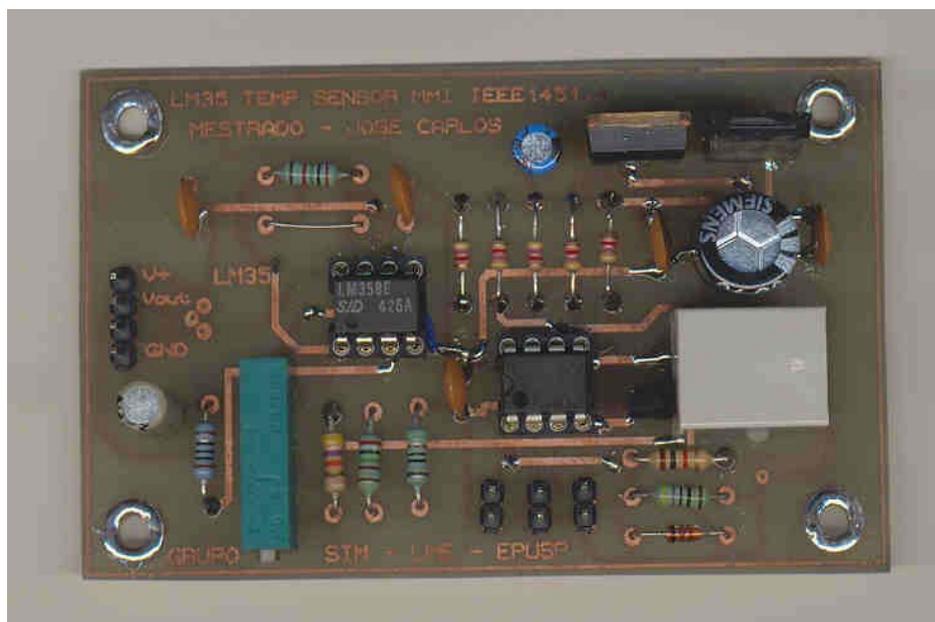


Figura 23: Placa de circuito do módulo MMI para Temperatura

2.4 Interface MMI para Sensor de Pressão

O sensor de pressão utilizado neste projeto é do tipo diferencial, ou seja, pode medir a diferença entre duas pressões. O sensor é manufaturado pela *Freescale Semicondutores*, [URL 8].

Este sensor tem sua saída proporcional à pressão colocada dentro de sua câmara de medida. Na figura 24 abaixo podemos observar este sensor.

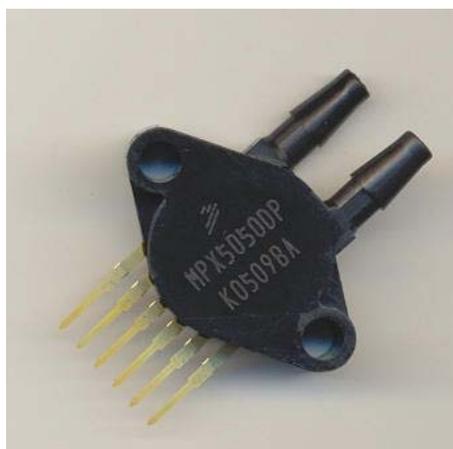


Figura 24: Sensor de Pressão MPX5050DP

O sensor tem a denominação de MPX5050DP como mostrado na figura 24 e mede pressão de 0 – 50KPa ou convertendo para PSI (0 – 7,25 psi) com uma saída de tensão de 0,2 – 4,7 volts. A utilização deste sensor para medida de pressão da corrente sanguínea pode ser expressa pela unidade de mmHg. Desta forma, a conversão de KPa para mmHg obtêm-se uma faixa de 0 – 380 mmHg.

A versatilidade do *software* de monitoramento permite mudar o fundo de escala e a unidade de pressão no arquivo texto *transdutores.txt*.

Podemos observar na figura 25, a placa de circuito impresso construída para medir a pressão.

Uma característica importante desta placa é possuir dupla função, ou seja, a placa além de poder medir a pressão, também pode ser utilizada para converter sinal proporcional de *loop* de corrente de 4 a 20mA. A conversão é feita através de um resistor de carga de 250 Ω 1%. Portanto quando a corrente mínima é de 4mA teremos 1 volt e quando a corrente máxima é 20mA teremos 5 volts.

A função de conversor de *loop* de corrente ou medida de pressão é selecionada por dois *jumpers*¹⁶ na placa.

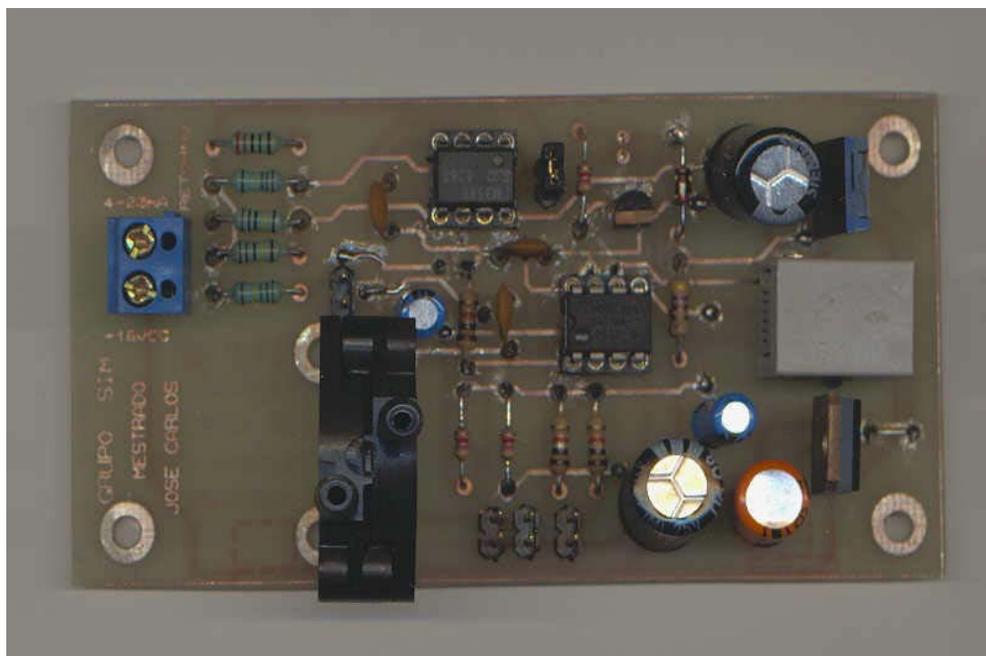


Figura 25: Placa de circuito do Módulo MMI para Pressão

Maiores detalhes sobre o módulo MMI para a medida de pressão pode ser visto no APÊNDICE-B (Módulo MMI - sensor de pressão) e as características do sensor MPX5050 pode se visto no ANEXO-B.

2.5 Interface MMI para Sensor de pH

A interface de medida com sensor de pH foi idealizada para sensor tipo ISE (*Ion Selective Electrode*) que possui uma alta impedância de saída. Esta placa pode amplificar um sinal de um eletrodo tipo Ag/AgCl (prata cloreto de prata), pois utiliza um amplificador operacional com entrada *Fet* (transistor de efeito de campo).

Na figura 26 podemos observar a placa amplificadora para sensor de pH, que utiliza dois amplificadores operacionais sendo que um amplifica o sinal do sensor com um ganho +G1 (positivo) e o segundo amplifica o sinal por um ganho -G2 (negativo), sendo que este último amplificador soma uma tensão de *offset* de 0,7 volts.

¹⁶ Jumpers = par de pinos pelo qual realiza uma ligação elétrica

Uma pequena placa de adendo foi construída para adequar o módulo amplificador do sensor à norma IEEE 1451.4. Esta placa adendo é mostrada na figura 27 onde podemos observar que a mesma foi montada sobre a placa amplificadora. Esta placa adendo possui uma memória EEPROM e um conector que torna todo o conjunto compatível com o módulo STIM.

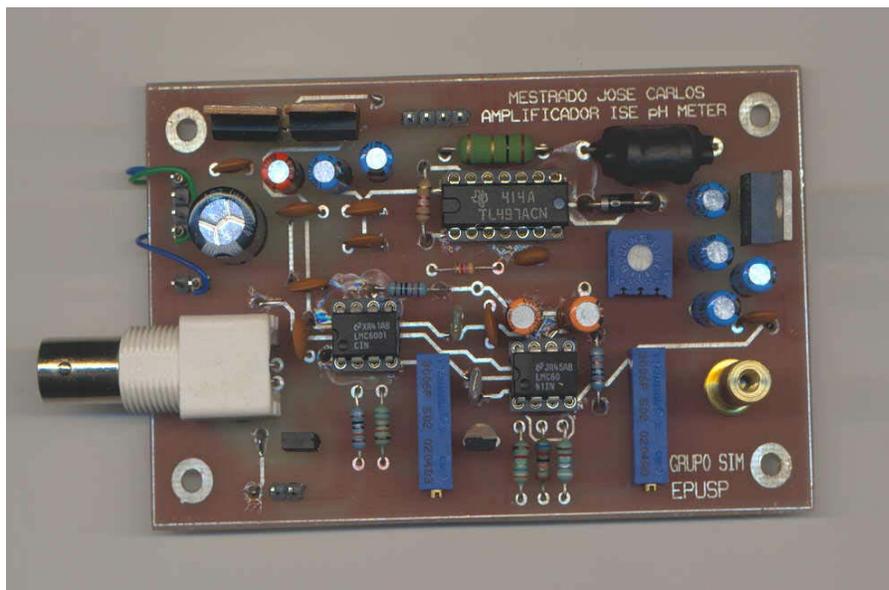


Figura 26: Placa amplificadora para sensor de pH

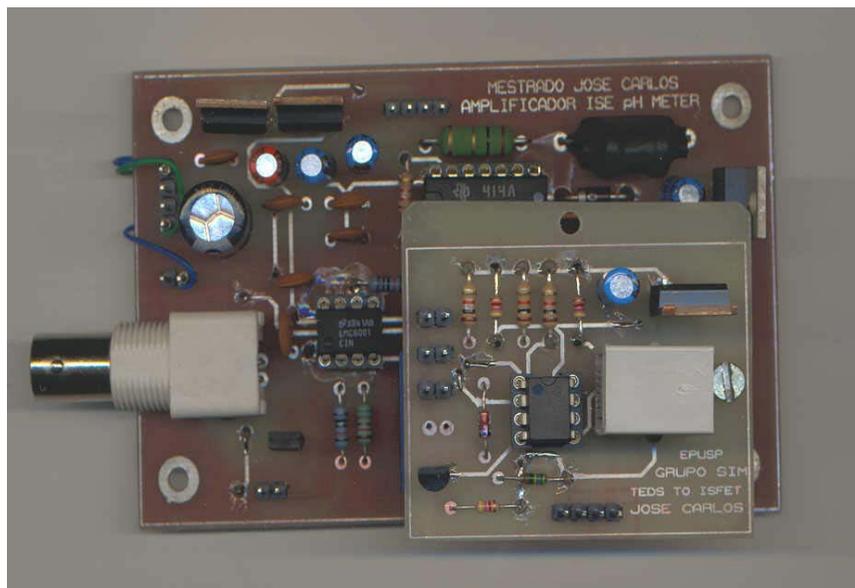


Figura 27: Conjunto amplificador de pH com adendo TEDS

Maiores detalhes sobre a interface MMI para sensor de pH pode ser visto no APÊNDICE-C (Módulo MMI para medida de pH).

2.6 Porque o pH é uma Medida Importante

O pH é uma medida importante para classificar a acidez ou a alcalinidade das soluções. A medida do pH está relacionada com a concentração do íon de hidrogênio (H^+) nas soluções químicas e biológicas. O valor do pH é dependente da concentração do hidrogênio, ou seja, uma alta concentração do Hidrogênio corresponde à característica ácida e uma baixa concentração corresponde a uma característica alcalina, [URL9].

A medida do pH é feita através de um eletrodo especial que possui uma membrana íon seletiva permeável aos íons de hidrogênio (H^+). A medição potenciométrica do pH requer um eletrodo indicador e um eletrodo de referência, sendo que cada eletrodo constitui uma meia-célula. A meia-célula que corresponde ao eletrodo de referência gera uma DDP¹⁷ constante que não depende do pH.

A meia-célula correspondente ao eletrodo indicador que é constituída por um eletrodo de vidro chamado de vidro-boro-silicato e um fio de prata com cloreto de prata, imerso em uma solução eletrolítica de referência constituída de KCL. A membrana é seletiva aos íons de Hidrogênio (H^+), portanto deixa passar somente esses íons gerando assim entre as duas meias-células uma DDP que é linear em função do pH. Podemos observar na figura 28 a construção da meia-célula indicadora com uma semi-esfera de vidro-boro-silicato e o fio de Ag/AgCl, [URL9].

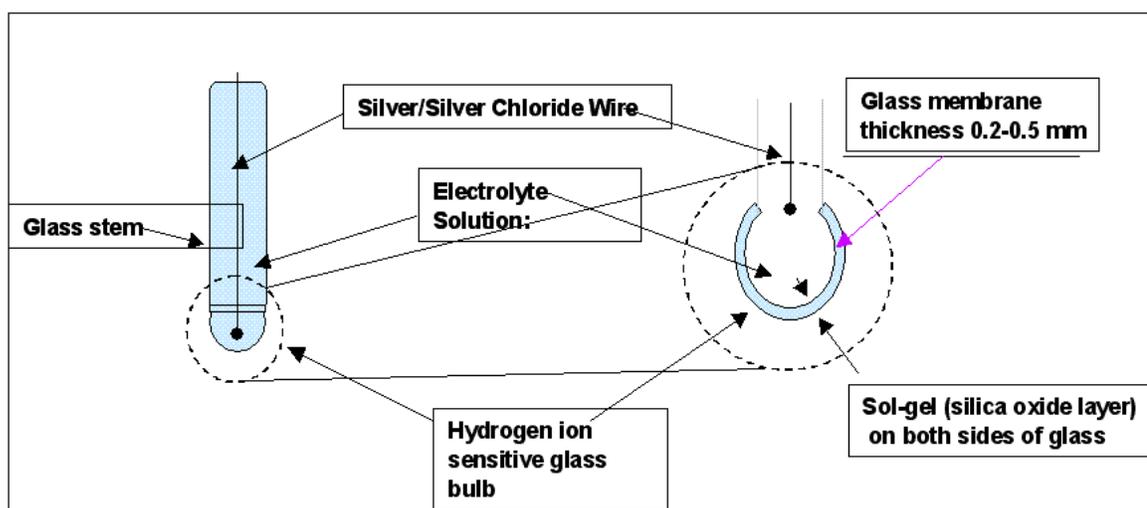


Figura 28: Meia-célula indicadora de pH

¹⁷ DDP = Diferença de Potencial Elétrico

2.7 Aplicações da Medida de pH

Dentre as principais aplicações da medida de pH podemos citar:

- Refino de açúcar;
- Indústria de bebidas - Processos de fermentação em geral (cerveja, vinho, álcool);
- Controle em estações de tratamento de água;
- Controle da coagulação do látex (borracha natural);
- Agricultura e agropecuária;
- Exames clínicos do sangue e da urina;
- Banhos de eletrodeposição para indústria em geral;
- Corrosão de microestruturas MEMS;
- Corrosão de circuito impresso e eletroformação de trilhas;
- Indústria de Cosméticos e Farmacêutica.

A escala de medida de pH varia de 0 até 14. Na figura 29 podemos observar algumas medidas de pH mais utilizadas com seus valores típicos , [URL9].

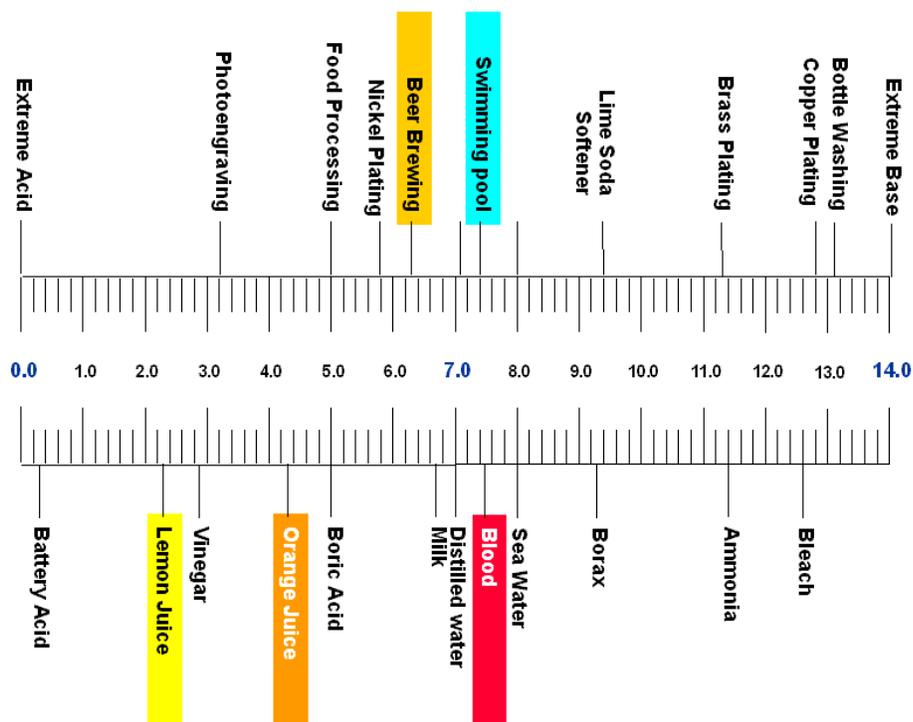


Figura 29: Medidas típicas de pH

2.8 Compensação da Temperatura na Medida do pH

O valor da medida do pH é afetado pela temperatura da solução que interfere no valor da DDP gerada pelo eletrodo de medida.

A DDP no eletrodo obedece à equação de Nernst, tendo uma variação de 0.03pH/10°C/unidade de pH, ou seja, para cada dez graus centígrados de variação da temperatura da solução ocorre uma variação de 0,03pH. Quando a temperatura ambiente estiver em 25°C não existe valor a ser corrigido, porém para uma temperatura de 35°C temos um pequeno fator de correção como podemos observar na Tabela 7.

Tabela 7: Erro do pH em função da temperatura

Erro do pH x Temperatura

	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12
5°	.30	.24	.18	.12	.06	0	.06	.12	.18	.24	.30
15°	.15	.12	.09	.06	.03	0	.03	.06	.09	.12	.15
25°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35°	.15	.12	.09	.06	.03	0	.03	.06	.09	.12	.15
45°	.30	.24	.18	.12	.06	0	.06	.12	.18	.24	.30
55°	.45	.36	.27	.18	.09	0	.09	.18	.27	.36	.45
65°	.60	.48	.36	.24	.12	0	.12	.24	.36	.48	.60
75°	.75	.60	.45	.30	.15	0	.15	.30	.45	.60	.75
85°	.90	.72	.54	.36	.18	0	.18	.36	.54	.72	.90

A maioria dos medidores de pH tem um potenciômetro para realizar a compensação térmica. O potenciômetro fica sobre uma escala graduada em temperatura, sendo que o ajuste é feito medindo a temperatura da solução com um termômetro e posteriormente ajusta-se esta temperatura na escala do potenciômetro. Este tipo de ajuste gera sempre uma imprecisão, pois nem sempre o valor ajustado corresponde exatamente à temperatura da solução. A temperatura também pode variar em certas situações de mistura de soluções químicas onde um determinado elemento da mistura gera uma reação química liberando calor aumentando

desta forma a temperatura da solução e modificando o valor do pH. Este efeito somente pode ser contornado utilizando a compensação automática em tempo real chamada de termo-compensação.

2.9 Compensação da Temperatura na Medida de pH por *Software*

O *software* implementado neste sistema de aquisição de dados permite realizar a compensação automática da medida de pH sem a necessidade de ajustes externos. O sistema detecta o código do sensor do pH previamente cadastrado e solicita ao usuário que coloque em qualquer outro canal do módulo STIM o sensor de temperatura LM35.

Desta forma a correção se processa de modo transparente, porém o usuário não pode deixar de mergulhar a sonda de temperatura dentro do mesmo recipiente que contém a solução a ser medida. A técnica de correção do pH em função da temperatura depende da tensão gerada pelo eletrodo e da medida da temperatura da solução.

O sensor de pH eletrodo íon seletivo (ISE) de Ag/AgCl tem uma variação de tensão linear em função da variação do pH. Os valores do pH em função da DDP gerada pelo eletrodo são apresentados na figura 30. A primeira linha da figura 30 indica o valor do pH e a segunda linha indica a DDP em milivolts. A figura mostra ainda que para pH ácido a tensão gerada é positiva e para pH básico é negativa.

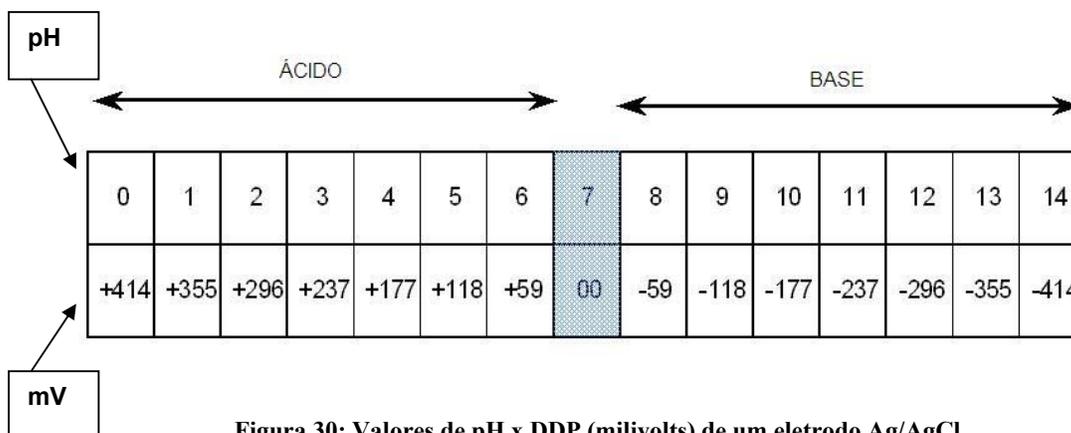


Figura 30: Valores de pH x DDP (milivolts) de um eletrodo Ag/AgCl

A correção do pH em função da temperatura é determinada pela seguinte equação, [URL 10]:

$$pH = 7,0 - \left[\frac{(V_{\text{eletrodo}})}{1,9842 \times 10^{-4} \times (273,16 \times t)} \right] \quad (3)$$

onde temos que:

$V_{eletrodo}$ = tensão em milivolts

t = temperatura em °C

A medida da tensão do eletrodo está sendo tratada pela seguinte função de transferência:

$$pH = [(V_{eletrodo} \times -G12) + 0,7] \quad (4)$$

O ganho G12 é definido em função da tensão de saída que é 100mV/pH. Como a faixa de pH é definida 0 até 7 e de 7 até 14 teremos na saída 0.00mV até 700mV e de 700mV até 1,400 Volts . Conclui-se desta forma que o ganho deve ser o máximo valor da tensão de saída do amplificador dividido pela máxima tensão do eletrodo colocada na entrada do amplificador, portanto temos que:

$$G1 = \frac{0,700}{0,4141} = 1,69041 \quad (5)$$

O ganho do amplificador G2 = -1 mais um *offset* de 0,700, portanto G12 = -1,69041.

A equação que reverte o pH em milivolts para tensão gerada pelo eletrodo é:

$$V_{eletrodo} = \left[\frac{(-0,700 + medida \text{ pH em Volts})}{-1,69041} \right] \quad (6)$$

A correção é obtida substituindo o valor da equação (6) e da medida da temperatura (t) na equação (3). A principal razão para reverter o valor da saída do amplificador do sensor de pH é que o sensor gera tensões negativas que não são lidas pelo conversor A/D do microcontrolador, pois ele somente interpreta tensões positivas na faixa de 0,000 até 5Volts.

Estes procedimentos de correção são realizados via *software* executados no programa de monitoramento do STIM.

Maiores detalhes da implementação do amplificador para medida de pH poderão ser observadas no APÊNDICE-C e do Sensor de pH no ANEXO-C.

As medidas de pH compensadas serão mostradas no capítulo 4.

3 Capítulo 3

3.1 Módulo de Transdução Inteligente (STIM)

Este capítulo tem como principal foco mostrar os principais tópicos da implementação do módulo de transdução inteligente STIM. O capítulo inicia a apresentação de detalhes importantes da norma IEEE 1451.2 e IEEE 1451.4 que são utilizadas para fazer a prototipagem do circuito elétrico do módulo STIM. A descrição envolve as funcionalidades do módulo STIM considerando a sua memória descritiva TEDS juntamente com a arquitetura de sinal misto (MMI) baseada na norma IEEE 1451.4.

A implementação do módulo STIM baseia-se na estrutura de um microcontrolador PIC. O microcontrolador escolhido foi o PIC16F877A de 40 pinos, tipo DIP¹⁸ com 8Kbytes de memória de programa. O microcontrolador PIC é fundamentado na arquitetura *Harvard* com modelo de instruções RISC (*Reduced Instruction Set Computer*), fator este que viabiliza o aprendizado e programação, pois possui apenas 35 instruções em Assembler. A arquitetura *Harvard* desse microcontrolador possui dois barramentos internos independentes, sendo um para memória de dados (data1) e outro para memória de programa (data2). A figura 31 mostra um diagrama de blocos da arquitetura *Harvard* utilizada no microcontrolador PIC.

O microcontrolador PIC16F877 é responsável pelo controle do módulo STIM. Este microcontrolador é manufaturado pela empresa norte americana *Arizona Microchip Inc.*.

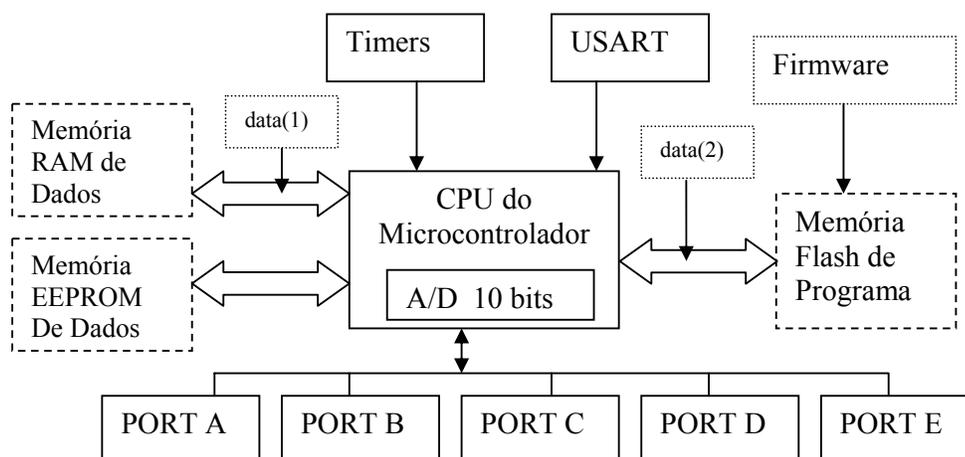


Figura 31: Diagrama do PIC mostrando arquitetura *Harvard*

¹⁸ DIP = *Dual in Line Package*

3.1.1 Conversor A/D Interno do PIC

Um dos principais periféricos do microcontrolador PIC com maior relevância para este trabalho é o conversor A/D interno como podemos observar na figura 31. O funcionamento e as principais características deste periférico serão esplanadas a seguir no próximo tópico.

3.1.2 Introdução ao Conversor A/D

O sistema de aquisição, armazenamento e processamento de sinais necessita de um conversor analógico para digital (A/D). A grande maioria das variáveis que necessitamos medir são analógicas, tais como: temperatura, pressão, luminosidade, pH entre outras.

O conversor A/D tem a propriedade de realizar a conversão de um sinal analógico (valor de uma medida de tensão elétrica) em uma palavra digital de “n” bits. Após a conversão é que o programa consegue processar e armazenar o sinal adquirido.

A conversão analógica para digital envolve diversas características elétricas que são:

- Resolução em bits - quanto maior melhor, porém é mais caro e complexo o conversor.
- Tempo mínimo para realizar uma conversão de um sinal, ou seja, quanto mais rápido melhor para medir sinais variáveis no tempo tais como; áudio e medidas de formas de onda.
- Impedância mínima e máxima de entrada - quanto mais alta melhor consequentemente carrega menos o circuito que está sendo medido.
- Possibilidade de utilizar diversos valores de tensão de referência, podendo re-escalar o valor obtido.

3.1.3 Recursos e Características do A/D do PIC

O conversor A/D do PIC possui diversos recursos para sua correta operação. O funcionamento do conversor A/D possui os seguintes recursos e características:

- Conversor A/D interno com 10 bits, tendo 1024 estágios;
- Resolução de 5mV aproximadamente;
- Possui oito canais multiplexados no tempo;
- Quatro tipos de referência: V_{DD} (interna), V_{SS} (interna), V_{REF+} (externa) e V_{REF-} (externa);

- Freqüência de *clock* baseada no *clock* da máquina ou em RC interno dedicado, possibilitando o funcionamento em modo *Sleep*¹⁹;
- Impedância de entrada mínima 50Ω e máxima 10kΩ;
- Tempo de conversão depende da impedância de entrada.

O conversor A/D do PIC é do tipo aproximação sucessiva e utiliza um processo chamado *Sample and Hold* que significa congelamento da amostra. O PIC possui um capacitor interno de 120pF que é ligado ao canal analógico em uso. Após iniciar a conversão o capacitor é desligado da entrada analógica, mas a tensão sobre o capacitor é mantida constante (*Hold*) com o valor da entrada do canal que ele estava ligado. A tensão do capacitor é ligada ao comparador que ao igualar-se com o valor do conversor D/A gera um sinal de disparo mandando o registrador de aproximação sucessiva parar a contagem e armazenar o valor obtido no registrador de saída A/D, como podemos observar na figura 32.

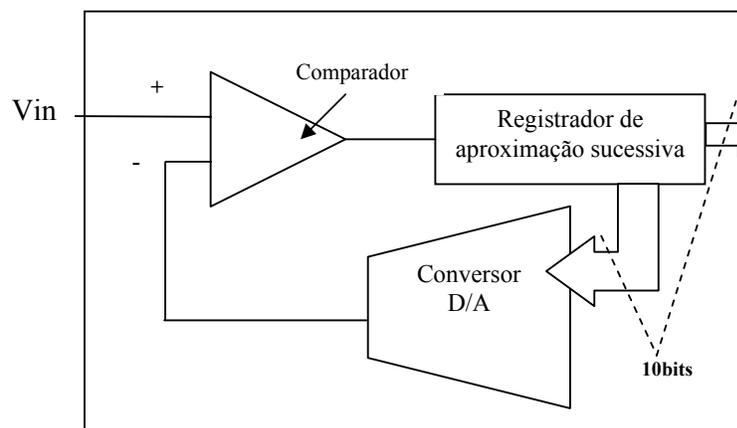


Figura 32: Diagrama de Blocos simplificado do A/D interno do PIC

O capacitor de *Sample Hold* interno do conversor A/D possui um tempo de resposta que é dependente da soma das resistências do circuito interno, mais a soma da resistência interna da fonte do sinal de entrada, mais um coeficiente de temperatura.

A equação que calcula o tempo de aquisição é:

$$TAQ = T_{amp} + TC + TC_{coef} \quad (7)$$

¹⁹ Sleep = trabalha com baixo consumo de energia

$$F_{amp} = \frac{\text{clock do Microcontrolador}}{8} \quad (8)$$

$$F_{amp} = \frac{\text{clock do Microcontrolador}}{8}$$

$$F_{amp} = \frac{4 \times 10^6}{8} = 5 \times 10^5 \text{ Hz}$$

$$T_{amp} = \frac{1}{F_{amp}} = \frac{1}{5 \times 10^5} = 2 \times 10^{-6} \text{ Segundos} = 2 \mu\text{S}$$

$$TC = C_{HOLD} \times (R_{IC} + R_{SS} + R_S) \ln\left(\frac{1}{2047}\right) \quad (9)$$

As variáveis da equação (9) podem ser melhor entendidas examinando o ANEXO-D (Características do conversor A/D do PIC 16F877).

$$TC = C_{HOLD} \times (R_{IC} + R_{SS} + R_S) \ln\left(\frac{1}{2047}\right)$$

$$TC = -120 \times 10^{-12} \times (1 \times 10^3 + 7 \times 10^3 + 10 \times 10^3) \times \ln\left(\frac{1}{2047}\right)$$

$$TC = 16,47 \mu\text{S}$$

$$TC_{coef} = \left[(\text{temperatura} - 25^\circ\text{C}) \times \left(0,05 \mu\text{S} / ^\circ\text{C} \right) \right] \quad (10)$$

$$TC_{coef} = \left[(\text{temperatura} - 25^\circ\text{C}) \times \left(0,05 \mu\text{S} / ^\circ\text{C} \right) \right]$$

considerando temperatura = 50°C temos que :

$$TAQ = T_{amp} + TC + TC_{coef}$$

$$TAQ = 2 \mu\text{S} + 16,47 \mu\text{S} + \left[(50 - 25) \times \left(0,05 \mu\text{S} / ^\circ\text{C} \right) \right]$$

$$TAQ = 19,47 \mu\text{S}$$

Conclui-se que o tempo mínimo para adquirir um sinal é de aproximadamente 20μS.

Um valor prático recomendado nas literaturas é 30μS. Neste trabalho o valor adotado está em torno de 40μS, que garante maior confiabilidade na conversão A/D.

3.1.4 Arquitetura do STIM

A arquitetura baseada na norma IEEE 1451.2 foi utilizada como referência somente no que se refere à comunicação entre o módulo STIM e o PC, sendo:

- Comunicação síncrona baseada no padrão SPI (*Serial Peripheral Interface*).
- Comunicação assíncrona baseada em RS232.

A comunicação baseada no padrão SPI e no padrão RS232 está em conformidade com a norma IEEE 1451.2. Estes dois tipos de comunicação foram escolhidos a fim de tornar o projeto mais robusto e compatível com sistemas existentes no mercado que utilizam principalmente RS232, [Wobschall 2005].

Uma descrição do módulo STIM está representada na figura 33, onde podemos observar os principais componentes. Tomamos como exemplo uma configuração mista que utiliza um sensor de temperatura tipo PT100.

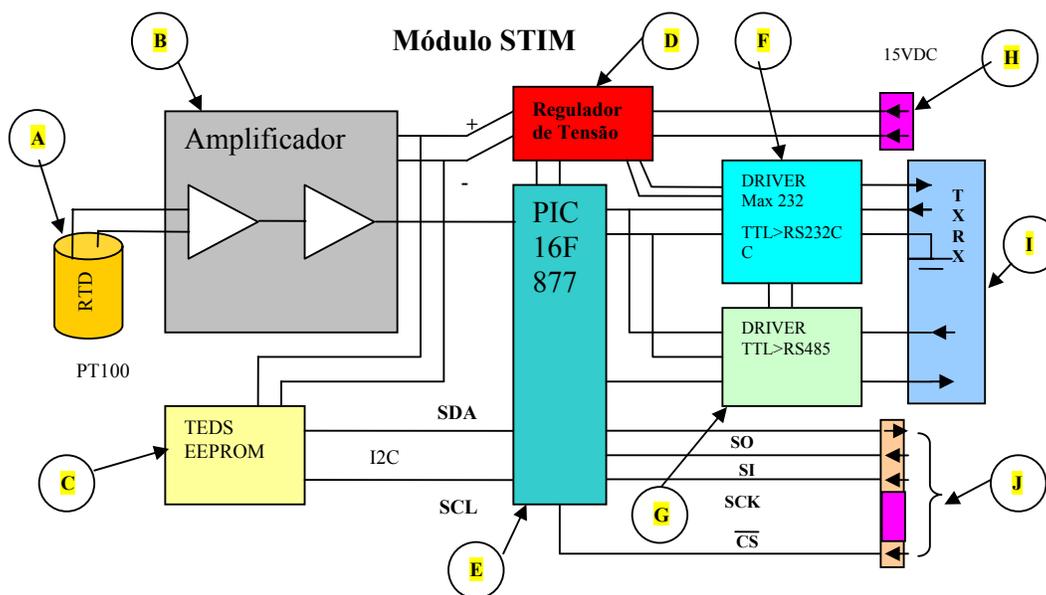


Figura 33: Módulo STIM com seus principais componentes

Os principais componentes do módulo STIM mostrado na figura 33 são:

1. **Bloco A:** É um sensor tipo RTD (resistores detectores de temperatura) muito utilizado na medida de temperatura, pois a sua deriva térmica é muito precisa. Geralmente estes sensores podem ser do tipo termistores, onde são divididos em dois grupos: os PTC's ou NTC's, com deriva térmica positiva e negativa respectivamente. A figura 33 mostra um

sensor de platina tipo PT100 Ω @0°C que é um tipo especial de RTD conhecido como termo-resistência. A principal diferença entre o PT100 e os termistores são: Os termistores são dispositivos não lineares e a termo-resistência PT100 é bastante linear.

2. **Bloco B:** Podemos ver o bloco amplificador condicionador de sinal do RTD. Neste bloco o amplificador é constituído por um circuito analógico implementado com amplificadores operacionais que transformam a variação da resistência elétrica detectada em tensão elétrica proporcional à temperatura. Podemos dizer que é um conversor resistência/tensão. A saída deste bloco está ligada na entrada do conversor A/D do microcontrolador PIC.
3. **Bloco C:** É um bloco constituído por uma memória do tipo EEPROM. Esta memória possui as seguintes características: possibilidade de leitura e escrita em qualquer tempo, não é volátil, utiliza interface I2C, comunicação entre circuitos integrados cujo protocolo foi desenvolvido pela *Philips*, [URL 6]. Este protocolo utiliza apenas dois fios para comunicação. É um protocolo síncrono, sendo que a linha de *clock* é chamada de SCL (*Serial Clock*) e a outra linha de dados é chamada de DAS (*Serial Data*). Esta memória armazena os sinais analógicos dos sensores que foram convertidos para sinal digital em 10bits por leitura.
4. **Bloco D:** Este bloco é constituído de um regulador de tensão que fornece tensão estabilizada com valor apropriado para o funcionamento do microcontrolador da memória EEPROM e do amplificador condicionador de sinal. Geralmente este circuito é formado por um circuito integrado linear podendo fornecer tensão simétrica a partir de uma fonte simples de 15VDC.
5. **Bloco E:** Este bloco é constituído pelo microcontrolador PIC16F877 que tem como função principal ler a memória TEDS do sensor, executar a conversão analógica para digital dos valores medidos da saída do amplificador e transmitir estes dados para o processador de rede NCAP. O microcontrolador também pode executar correção de valores medidos, armazenamento em memória e calibração do sensor. A transmissão de sinais para o módulo NCAP segue o padrão SPI tipo escravo utilizando apenas 4 fios. São eles: CS (*Chip Select*), SCK (*Serial Clock*) - utilizada para sincronização entre o dispositivo mestre (aquele que gera o sinal de *clock*) e o escravo (o que recebe sinal de *clock*), SI (*Serial Data Input*) – linha de recepção de dados, SO (*Serial Data Output*) - linha de saída de dados.

6. **Bloco F:** Este bloco é um *driver* modificador de sinal. O bloco é formado por um circuito integrado que tem como função transformar os pulsos seriais de nível TTL (+5V e 0V) em nível RS232 (-15VDC a +15VDC). O principal componente é um circuito integrado Max 232 ou ICL 232.
7. **Bloco G:** Este bloco é um *driver* de corrente, ou seja, ele transforma pulsos de tensão TTL (+5V e 0V) em pulsos de corrente elétrica de acordo com o padrão RS485.
8. **Bloco H:** Este bloco é um conector de alimentação.
9. **Bloco I:** Este bloco é um conector tipo DB9 que vai estar conectado à saída RS232 e RS485.
10. **Bloco J:** Este bloco representa um conector RJ11 de 6 pinos (contatos) onde 4 pinos são utilizados nos dados SPI e dois na alimentação 15 VDC.

3.2 Memória Descritiva TEDS

O módulo STIM possui 5 canais e para cada canal está associado um transdutor, sendo que cada transdutor tem o seu TEDS armazenado em uma memória EEPROM. Temos desta forma os comandos e intervalos de memória para ler o conteúdo dos dados dos transdutores armazenados no TEDS. A Tabela 8 mostra os comandos de leitura do TEDS de cada transdutor ligado a um canal e os seus respectivos endereços de memória associada.

Tabela 8: Comando de Leitura do TEDS feito pelo STIM

Canais do STIM	Comando de Leitura em Binário	Descrição da Leitura do TEDs	Endereço de Memória em HEX (intervalo)
Canal (0)	0000 0101	Não utilizado	Não utilizado
Canal (1)	0001 0101	Ler TEDs do Canal 1	0000-0400
Canal (2)	0010 0101	Ler TEDs do Canal 2	0000-0400
Canal (3)	0011 0101	Ler TEDs do Canal 3	0000-0400
Canal (4)	0100 0101	Ler TEDs do Canal 4	0000-0400
Canal (5)	0101 101	Ler TEDs do Canal 5	0000-0400

A Tabela 8 mostra também os endereços de memória do TEDS para os canais de 1 a 5. Podemos observar que os endereços de memória são os mesmos, iniciando em 0000 e terminando em 0400, ou seja, 0000 até 1024 = 1kbyte. Os endereços podem ser coincidentes, pois cada canal tem a sua memória EEPROM separada.

3.2.1 Parâmetros do TEDS e seus Respective Endereços

Podemos observar a Tabela 9 com os endereços de cada função do TEDS.

Tabela 9: Mapa de endereços dos parâmetros TEDS

Parâmetros	Intervalo de Memória em HEX	Posições de Memória Reservada
Tipo de Sensor nº	000 – 00A	11 posições de 8 bits
Nº de serie do Sensor	00B – 015	11 posições de 8 bits
Modelo	016 – 020	11 posições de 8 bits
Nome do Fabricante	021 – 02B	11 posições de 8 bits
Tensão de alimentação Frequência	02C – 036	11 posições de 8 bits
Resposta: Ω /Volts ou V/Hz	037 – 041	11 posições de 8 bits
Linearidade	042 – 04C	11 posições de 8 bits
Temperatura máxima	04D – 057	11 posições de 8 bits
Temperatura mínima	058 - 062	11 posições de 8 bits
Data de fabricação	063 – 06D	11 posições de 8 bits
Validade da calibração	06E – 078	11 posições de 8 bits
Data da ultima calibração	079 – 083	11 posições de 8 bits
Reservado (1)	084 – 098	21 posições de 8 bits
Reservado (2)	099 – 0B7	21 posições de 8 bits
Reservado (3)	0B8 – 0CC	21 posições de 8 bits
Tabela de calibração (1)	0DC – 2DC	513 posições de 8 bits
Tabela de calibração (2)	2DD – 4DD	513 posições de 8 bits
Tabela de calibração (3)	4DE – 800	513 posições de 8 bits

Vale lembrar que as 120 primeiras posições estão armazenando as principais características descritas na norma IEEE 1451.2 apresentadas no capítulo 1, com mudanças somente na quantidade de bits. A tabela mostra que padronizamos todos os dados principais com 10 posições de 8 bits totalizando 80 bits para cada parâmetro mais um byte de espaçamento. Por uma questão de futuras extensões deixamos três espaços reservados com 20 posições de 8 bits cada.

As posições para tabela de calibração se referem:

Tabela de Calibração (1) = Tabela de calibração (40)

Tabela de Calibração (2) = Tabela de calibração Polinomial (41)

Tabela de Calibração (3) = Tabela de calibração Resposta em frequência (42)

Na implementação da Tabela 9 já apresentada usaremos a serial EEPROM 24LC16.

3.3 Microcontrolador do Módulo STIM - PIC16F877

O microcontrolador PIC16F877 é responsável pelo controle do módulo STIM. Podemos observar seu aspecto físico na figura 34. Este microcontrolador é encapsulado em DIP 40 pinos com 600 milésimos de polegada de largura, [URL 5].



Figura 34: PIC 16F877A

Maiores informações sobre o microcontrolador PIC está no ANEXO-E (Resumo das Características e mapa de pinos do PIC 16F877).

3.4 Implementação do Módulo STIM Conforme a Norma IEEE 1451.4

A implementação do sistema de aquisição de dados é mostrada a partir do esquema elétrico do módulo STIM. O esquema elétrico e detalhes da implementação estão disponíveis no APÊNDICE-D (esquema elétrico e detalhes da implementação). O microcontrolador PIC pode ser programado utilizando linguagem Assembler ou C. Neste trabalho optou-se por desenvolver o programa que monitora o módulo STIM em linguagem C, utilizando o compilador C da CCS, [URL 11]. Algumas rotinas padrão em C foram utilizadas com base na referência [Pereira 2003]. A figura 35 mostra a interface principal do compilador PCW da CCS.

```

PCW C Compiler IDE
File Project Edit Options Compile View Tools Debug Help
Microchip 14 bit
Save All Files
Stim.c
/*
Projeto STIM mestrado Jose Carlos
Sensores para aplicações biológicas baseado na IEEE 1451.4
Versão 1.4-D
*/

#include "Stim.h"

// Prototipos de Funcao
void ler_adc(void);
void verificar_estado_sensor(void);
void descarregar_memoria(void);
void ler_info_sensor(int8 sensor);
void atualizar_info_sensor(int8 sensor);

// Memoria 24LC256
//int8 ler_mem_serial8(int8 bus_addr, int16 mem_addr);
//int16 ler_mem_serial16(int8 bus_addr, int16 mem_addr);
void ler_24lc256_seq(int8 bus_addr, int16 mem_addr, char *b, int8 len);

// Memoria 24LC16
int8 ler_24lc16_8(int8 bus_addr, int8 mem_addr);
int16 ler_24lc16_16(int8 bus_addr, int8 mem_addr);
void gravar_24lc16_8(int8 bus_addr, int8 mem_addr, int8 dado);
void gravar_24lc16_16(int8 bus_addr, int8 mem_addr, int16 dado);
  
```

Figura 35: Interface do compilador utilizado para geração do código no PIC

3.4.1 PCI - Vista Superior do Módulo STIM

Na figura 36 mostramos a placa de circuito do módulo STIM com suas entradas e saídas, conforme o esquema elétrico mostrado no APÊNDICE-D.

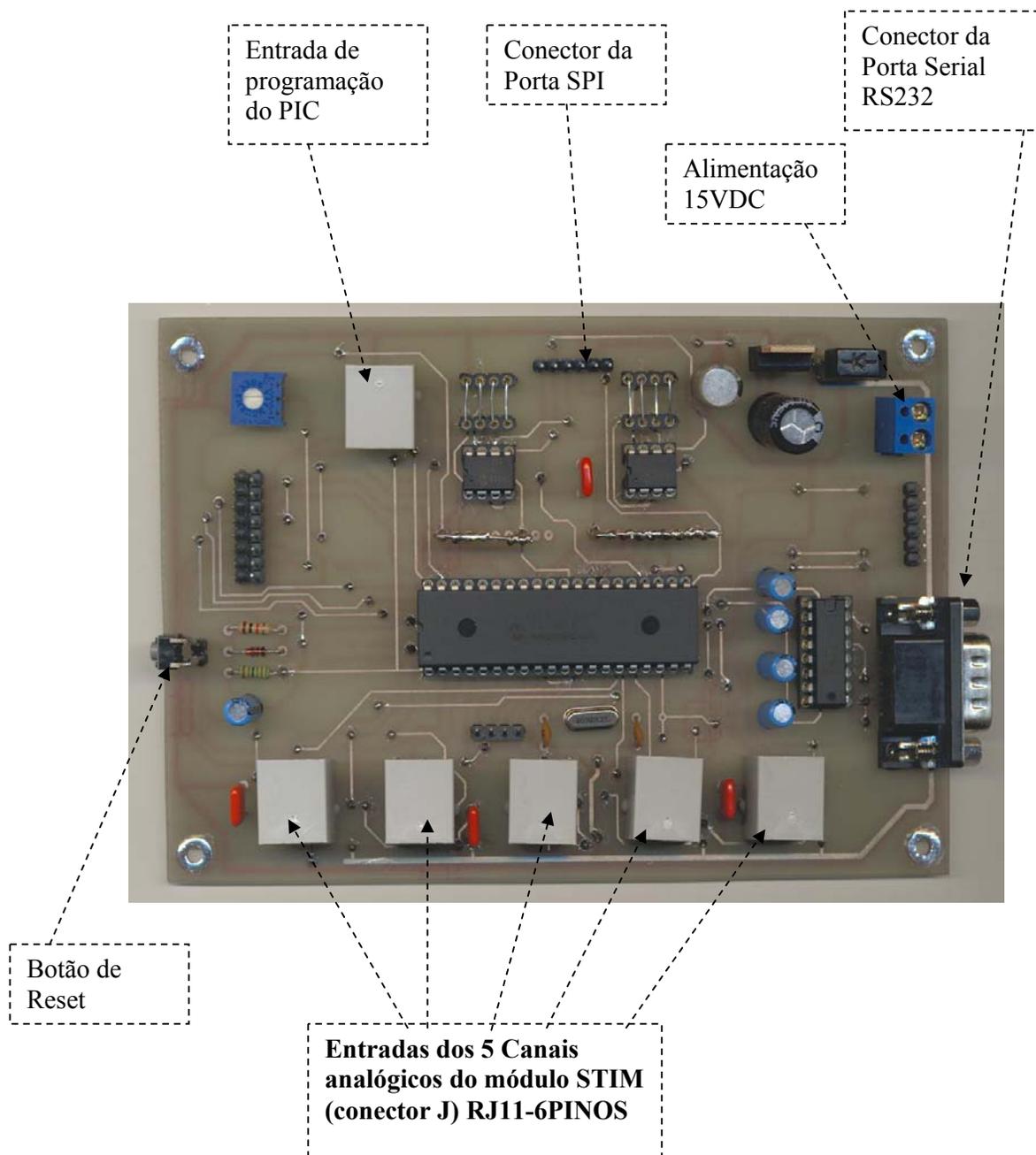


Figura 36: Placa do STIM vista Superior

3.5 A Implementação do Programa de Controle

O programa de controle no PIC fica executando uma varredura nos pinos RD3 a RD7 que estão sempre ligados a VCC (5 volts) pelos resistores de *pull up*. No momento que um sensor é conectado em qualquer um dos canais J3 até J7, ocorre o aterramento do pino 3 referente ao canal escolhido.

O aterramento é feito pelo conector que está na placa de circuito do amplificador de sinal do sensor. Desta forma o PIC identifica qual o canal está sendo usado e faz uma leitura na memória EEPROM do referido sensor “conectado” determinando o tipo de sensor. Logo após esta detecção, o PIC envia esses dados para a porta serial. O programa residente no PC interpreta qual o canal e qual o tipo de sensor está sendo usado. A partir deste momento, o PIC passa a coletar os dados do sensor e armazenar em duas memórias EEPROM (24C256), sendo que cada uma está dividida em 5 partições de 12KBytes. Cada canal tem um espaço de 12Kbytes para armazenar os dados adquiridos.

Quando a memória utilizada atinge o seu limite, o PIC descarrega automaticamente os dados pela interface serial conectada ao PC.

Uma característica fundamental deste sistema é o reconhecimento automático dos sensores previamente editados como explicado a seguir.

Suponhamos que um sensor conectado no canal 1 (J3) seja desconectado momentaneamente. Neste caso, podemos ver na tela do computador a mensagem “desconectado”. Posteriormente conectamos o sensor no canal 4 (J6). O PIC faz constantemente a varredura do pino 3 de todos os canais. Desta forma, ao conectar o mesmo sensor no canal 4, o PIC lê novamente a EEPROM e identifica o tipo de sensor enviando uma mensagem via serial ao PC. Através de uma interface gráfica do programa de monitoramento é possível observar o tipo do sensor e o canal que ele está conectado, permitindo assim o armazenamento dos dados em memória serial em um outro espaço de 12Kbytes, diferente do que estava sendo usado pelo canal 1. Neste ponto, o PIC exclui os dados dos respectivos endereços do canal desconectado, ficando limpos para serem reutilizados. Este processo caracteriza um sensor inteligente tipo *plug&play*.

Na Tabela 10 são mostrados os dados que precisam ser lidos pelo PIC quando este detecta um sensor em um determinado canal.

Neste trabalho foram implementados somente os seis primeiros parâmetros da tabela citada, que são obrigatórios pela Norma.

Tabela 10: Mapa de endereços dos parâmetros TEDS

Parâmetros	Intervalo de Memória em HEX	Posições de Memória Reservada
Tipo de Sensor nº	000 – 00A	10 posições de 8 bits
Nº de série do Sensor	00B – 015	10 posições de 8 bits
Modelo	016 – 020	10 posições de 8 bits
Nome do Fabricante	021 – 02B	10 posições de 8 bits
Data de fabricação	063 – 06D	10 posições de 8 bits
Validade da calibração	06E – 078	10 posições de 8 bits
Data da última calibração	079 – 083	10 posições de 8 bits
Número de Patrimônio	084 - 085	2 posições de 8 bits

* o que está destacado na cor azul foi implementado neste projeto

3.5.1 Protocolo Serial de Identificação

A comunicação foi implementada com base no padrão RS232, com uma sintaxe de controle apropriada para que o sistema funcione corretamente. Estas sintaxes são transmitidas tanto do módulo STIM para o PC, como, do PC para o módulo STIM (*Transmissão Half duplex RS232*).

As sintaxes formam palavras de comando. Dentre os comandos do PC para o módulo STIM podemos destacar:

- PC UP: Enviado quando o *software* é carregado. Também é enviado quando não há atividade para manter o PIC a continuar enviando dados. Byte: 10100000
- Request Lost Data (RLD): Enviado quando não é recebido na seqüência correta. Sintaxe: 110XXX00 ZZZZZZZZ, onde: XXX = número do canal utilizado ZZZZZZZZ = número do pacote.

Dentre os comandos do módulo STIM para o PC podemos destacar:

- PIC UP: enviado quando o PIC é ligado. Também é enviado como resposta a uma PIC UP. Não precisa ser enviado de tempos em tempos, somente necessário como resposta. Byte: 00100000
- Input Up: enviado quando um conector é ligado. Sintaxe: 010XXX00 YYYYYYYY YYYYYYYY YYYYYYYY YYYYYYYY YYYYYYYY YYYYYYYY, onde: XXX= número do canal e Y são dados armazenados na EEPROM do sensor com a ordem da Tabela 10.
- Input Down: enviado ao PC quando um conector é desligado. Byte: 011XXX000 onde: XXX é o número do canal.

- Input Data: enviado quando se têm dados. Sintaxe: 100XXXXYY YYYYYYYYY ZZZZZZZZ, onde: XXX é o número do canal, Y é o dado a ser enviado (valor da tensão do canal) e Z corresponde ao número do pacote.

O tipo de sensor, número de série do sensor, modelo, nome do fabricante, data de fabricação, validade da calibração, são parâmetros TEDS obrigatórios, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros TEDS obrigatórios

Parâmetros	Tamanho dos parâmetros em Bits
Tipo de sensor	8 bits = 1x8
Nº de Série	16 bits = 2x8
Modelo	8 bits = 1x8
Nome do fabricante	16 bits = 2x8
Data de fabricação	16 bits = 2x8
Validade de Calibração	16 bits = 2x8

Observe que o módulo STIM deve (ou pode) ficar em *Standy By*²⁰ até receber um comando PIC UP. Se após um tempo determinado, o módulo STIM não receber um RLD, ele pode apagar a memória para liberar espaço para novos dados.

3.5.2 Software de Monitoramento do STIM

O *software* de monitoramento do módulo STIM foi desenvolvido em linguagem orientada a objetos tipo Pascal (*Object Pascal*) dentro do editor e compilador Delphi 5²¹ manufaturado pela empresa BORLAND. Este *software* possibilitou a criação de uma interface gráfica simples, objetiva e funcional para aquisição dos dados. A aquisição dos dados pode ser feita conectando o sensor no canal desejado do módulo STIM. Após a conexão do sensor, o *software* mostra o canal conectado e a descrição do sensor TEDS.

A interface abaixo mostra que um sensor foi conectado no canal 2, conforme mostra a figura 37. Observe os dados principais da estrutura TEDS na parte superior. Para obter a visualização da variável adquirida, basta conectar o sensor em qualquer canal do módulo STIM.

²⁰ Stand By = modo em repouso

²¹ marca registrada da *Borland International Inc.*

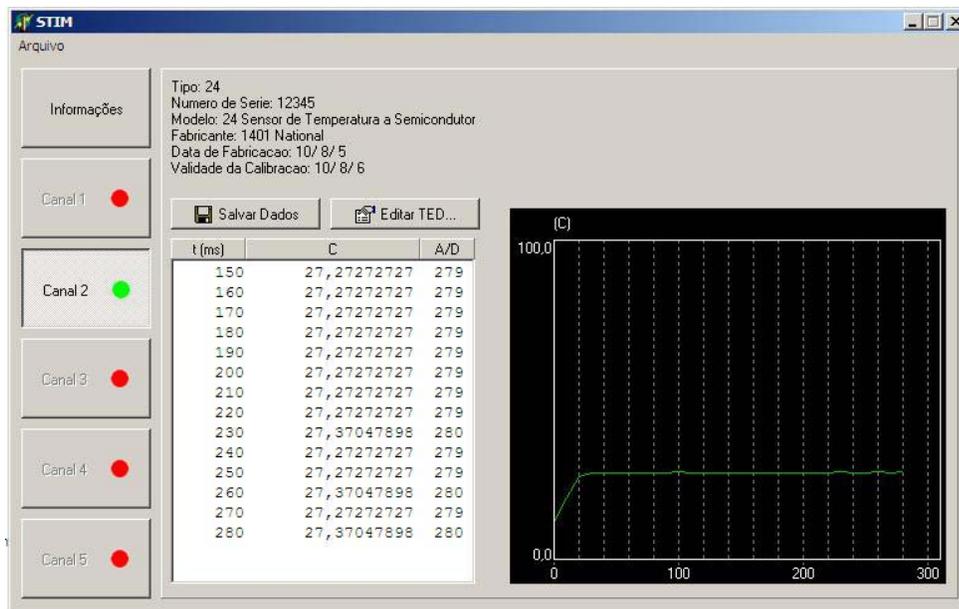


Figura 37: Interface Gráfica do Módulo STIM

Após conectar o sensor em um canal qualquer, é possível visualizar do lado direito da tela um gráfico com a variável que está sendo medida. A figura 38 mostra o sensor de pressão conectado no canal 4 do módulo STIM. Podemos visualizar o gráfico da pressão do lado direito da tela.

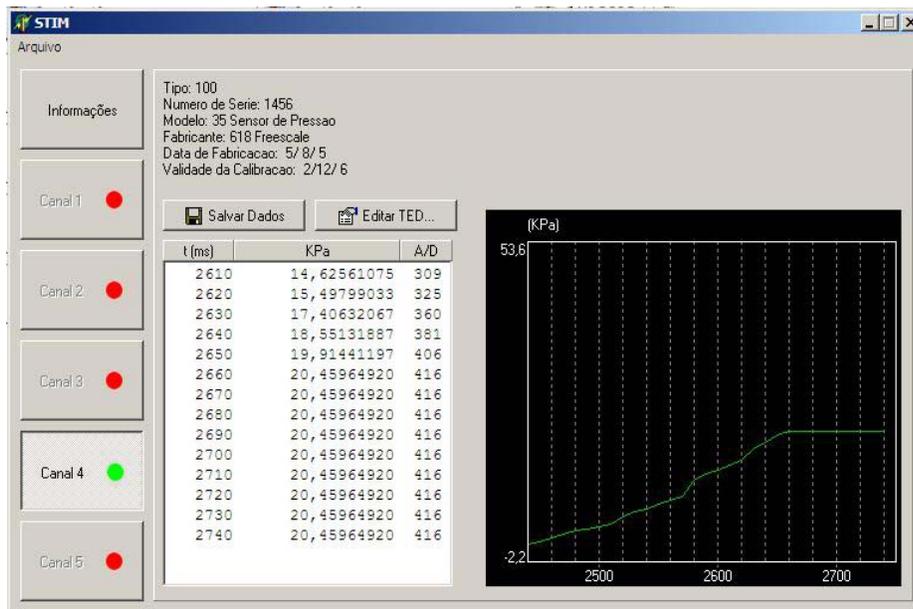


Figura 38: Tela depois de conectado sensor de pressão no canal 4 do módulo STIM

Podemos observar na figura 39 a edição dos seis parâmetros do TEDS básico. O botão “Gravar” permite enviar os dados para o módulo MMI e gravá-los na memória EEPROM.

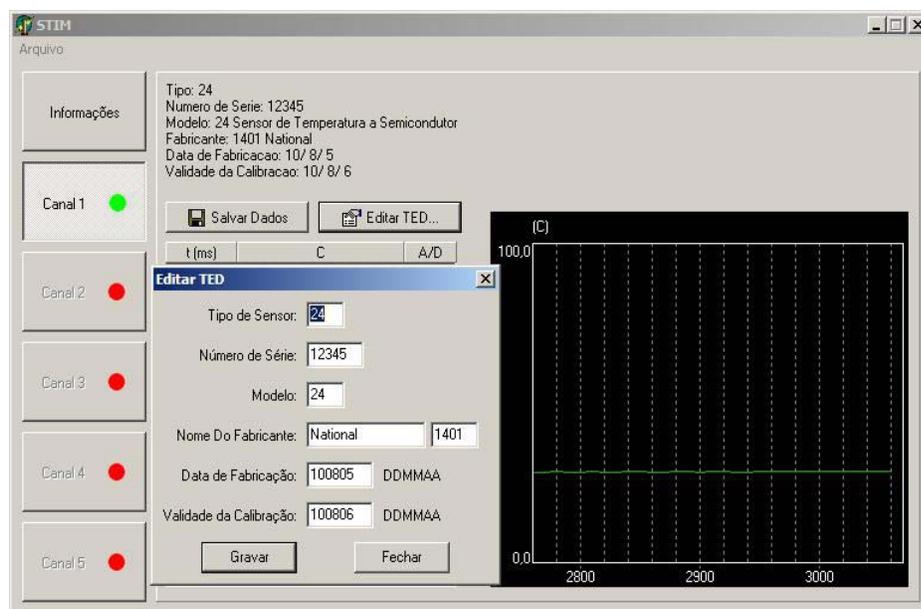
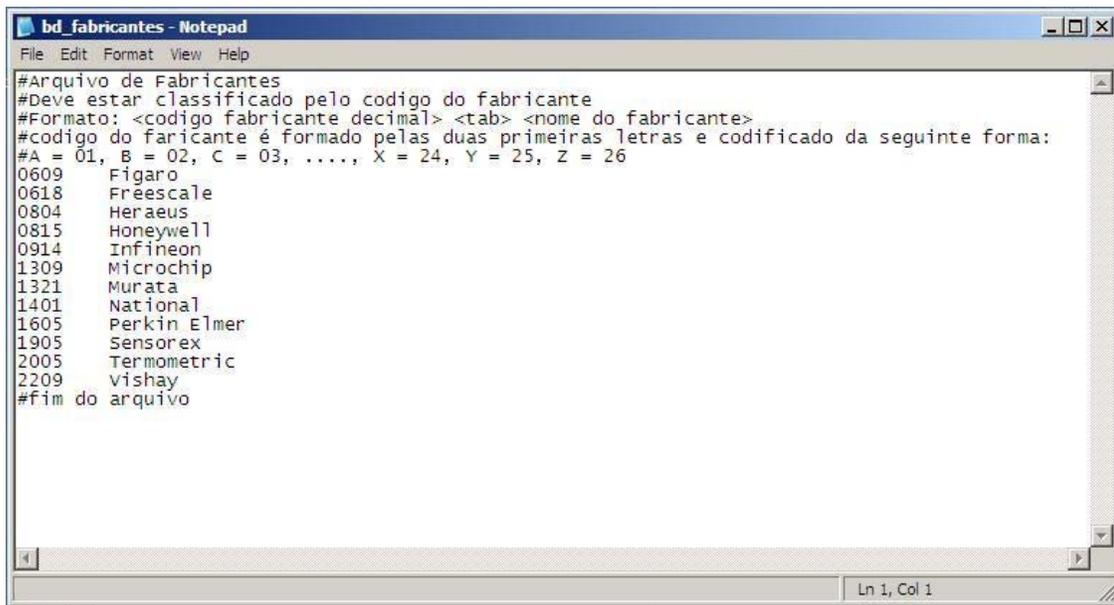


Figura 39: Tela do editor TEDS com sensor de temperatura conectado no canal 1

O editor TEDS permite gravar seis parâmetros na memória do sensor no canal que estiver selecionado. Um cadastro prévio é necessário, pois quando o sensor for colocado em qualquer canal o *software* reconhece o sensor somente se ele estiver cadastrado. O *software* lê a memória TEDS e posteriormente compara com dois cadastros. Os cadastros são armazenados em um arquivo com extensão texto (txt). Os arquivos destinados ao armazenamento dos cadastros dos transdutores são *fabricantes.txt* e *transdutores.txt*, sendo que eles armazenam respectivamente uma lista de fabricantes e os tipos de transdutores.

O arquivo *bd_fabricantes.txt* é mostrado na figura 40. O arquivo *bd_fabricantes.txt* armazena os nomes dos fabricantes em ordem alfabética. Uma característica importante é proposta para codificar os nomes dos fabricantes utilizando as duas primeiras letras. Observe na figura 40 que cada letra equivale a uma dezena, ou seja, A=01, B=02, C=03, D=04..... X=24, Y=25, Z=26. Quando as duas primeiras letras de um fabricante já cadastrado coincidir com um novo fabricante devem-se desprezar a primeira letra e considerar as duas seguintes. O problema persistindo despreza-se as duas primeiras e assim por diante até não ocorrer coincidência.

O armazenamento dos fabricantes em editor de texto simples facilita a inclusão e a exclusão do banco de dados.



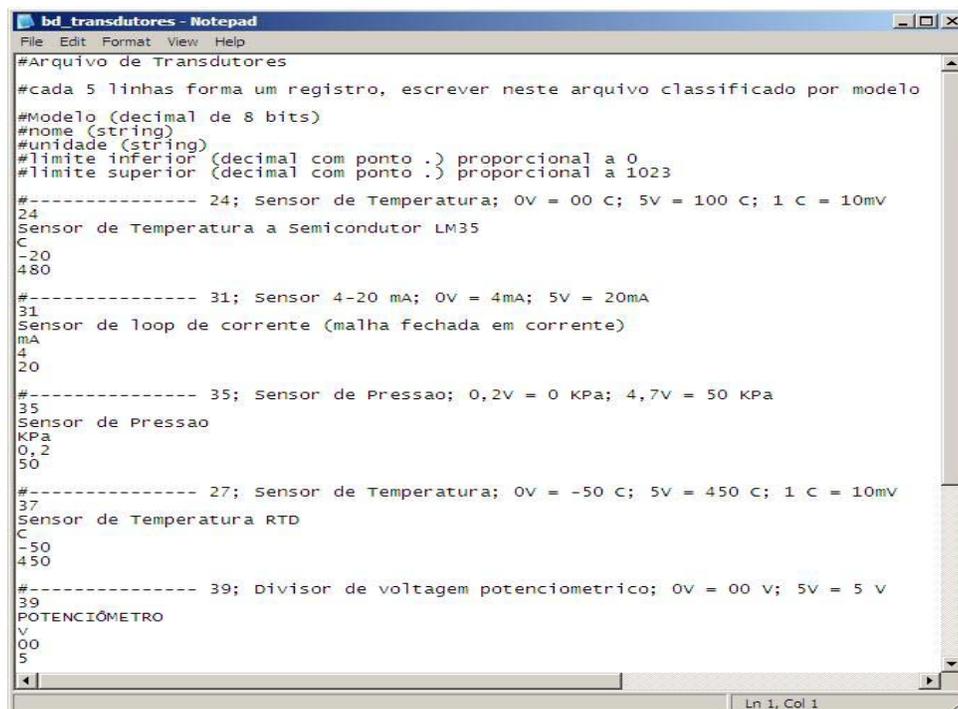
```

#Arquivo de Fabricantes
#Deve estar classificado pelo código do fabricante
#Formato: <código fabricante decimal> <tab> <nome do fabricante>
#código do fabricante é formado pelas duas primeiras letras e codificado da seguinte forma:
#A = 01, B = 02, C = 03, ..., X = 24, Y = 25, Z = 26
0609   Figaro
0618   Freescale
0804   Heraeus
0815   Honeywell
0914   Infineon
1309   Microchip
1321   Murata
1401   National
1605   Perkin Elmer
1905   Sensorex
2005   Thermometric
2209   Vishay
#fim do arquivo

```

Figura 40: arquivo *bd_fabricantes.txt* feito no notepad

O arquivo *bd_transdutores.txt* é um banco de dados onde é inserido o número de identificação dos transdutores conforme a norma IEEE 1451.2. Os transdutores são associados a suas faixas de operação linear com valores de mínimo e máximo, unidade física de medida e nome dos transdutores. A figura 41 mostra o arquivo de texto *bd_transdutores.txt*.



```

#Arquivo de Transdutores
#cada 5 linhas forma um registro, escrever neste arquivo classificado por modelo
#Modelo (decimal de 8 bits)
#nome (string)
#unidade (string)
#limite inferior (decimal com ponto .) proporcional a 0
#limite superior (decimal com ponto .) proporcional a 1023
#----- 24; Sensor de Temperatura; 0V = 00 C; 5V = 100 C; 1 C = 10mV
24
Sensor de Temperatura a Semicondutor LM35
C
-20
480
#----- 31; Sensor 4-20 mA; 0V = 4mA; 5V = 20mA
31
Sensor de loop de corrente (malha fechada em corrente)
mA
4
20
#----- 35; Sensor de Pressao; 0,2V = 0 KPa; 4,7V = 50 KPa
35
Sensor de Pressao
KPa
0,2
50
#----- 27; Sensor de Temperatura; 0V = -50 C; 5V = 450 C; 1 C = 10mV
27
Sensor de Temperatura RTD
C
-50
450
#----- 39; Divisor de voltagem potenciometrico; 0V = 00 V; 5V = 5 V
39
POTENCIOMETRO
V
00
5

```

Figura 41: arquivo de texto *bd_transdutores.txt*

Os diagramas de fluxos de dados apresentados a seguir abordam as principais funcionalidades implementadas no sistema de aquisição de dados. Podemos observar os diagramas de fluxo de dados da implementação residente no PC e da implementação do microcontrolador PIC referente ao módulo STIM, conforme figuras 42, 43, 44, 45 e 46.

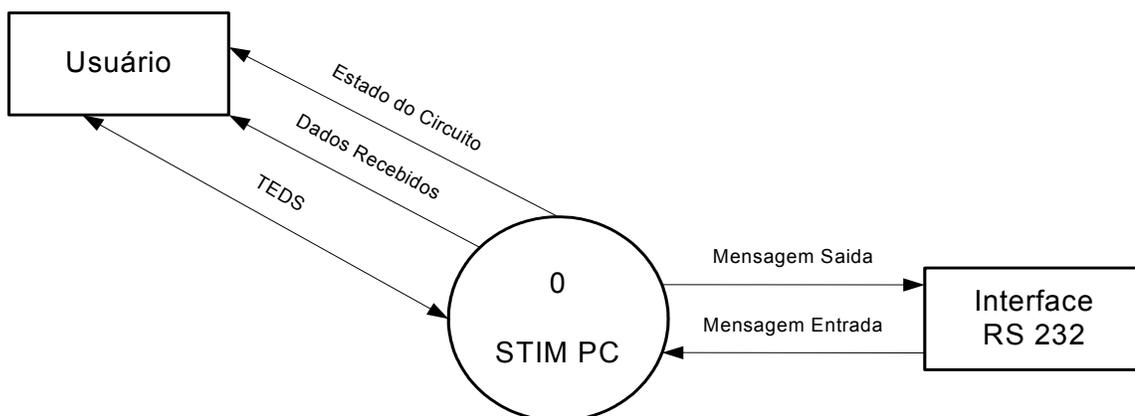


Figura 42: Diagrama de Contexto (DFD de nível 0) – implementação residente no PC

Conforme mostrado na figura 42 observa-se o DFD de nível 0 (diagrama de contexto) referente à implementação residente no PC. Este DFD representa a aplicação NCAP (STIM PC) como um todo, abrangendo a interface gráfica e controle de dados adquiridos. O usuário interage com a interface gráfica podendo criar novos transdutores conforme a necessidade da aplicação. Os dados adquiridos pelo STIM PIC são mostrados em formato gráfico no STIM PC. Os sinais elétricos adquiridos são plotados em função do tempo decorrido. O tempo decorrido é medido em milisegundos sendo este computado a partir da conexão de um sensor no Módulo STIM PIC.

O módulo STIM PC também monitora a porta serial RS232 por onde se estabelece a comunicação dos dados com o módulo STIM PIC.

Observe na figura 43 o DFD de nível 1 referente a implementação do controle dos dados para editar o TEDS possibilitando a escrita ou leitura. A escrita de um TEDS é organizada por meio de dois arquivos de texto, os *fabricantes.Txt* e os *transdutores.txt*. Os arquivos de texto *transdutores* e *fabricantes* são editados e armazenados no PC. Estes arquivos de texto são comparados com os dados que o STIM PIC manda para o STIM PC sendo possível assim realizar a identificação do sensor conectado.

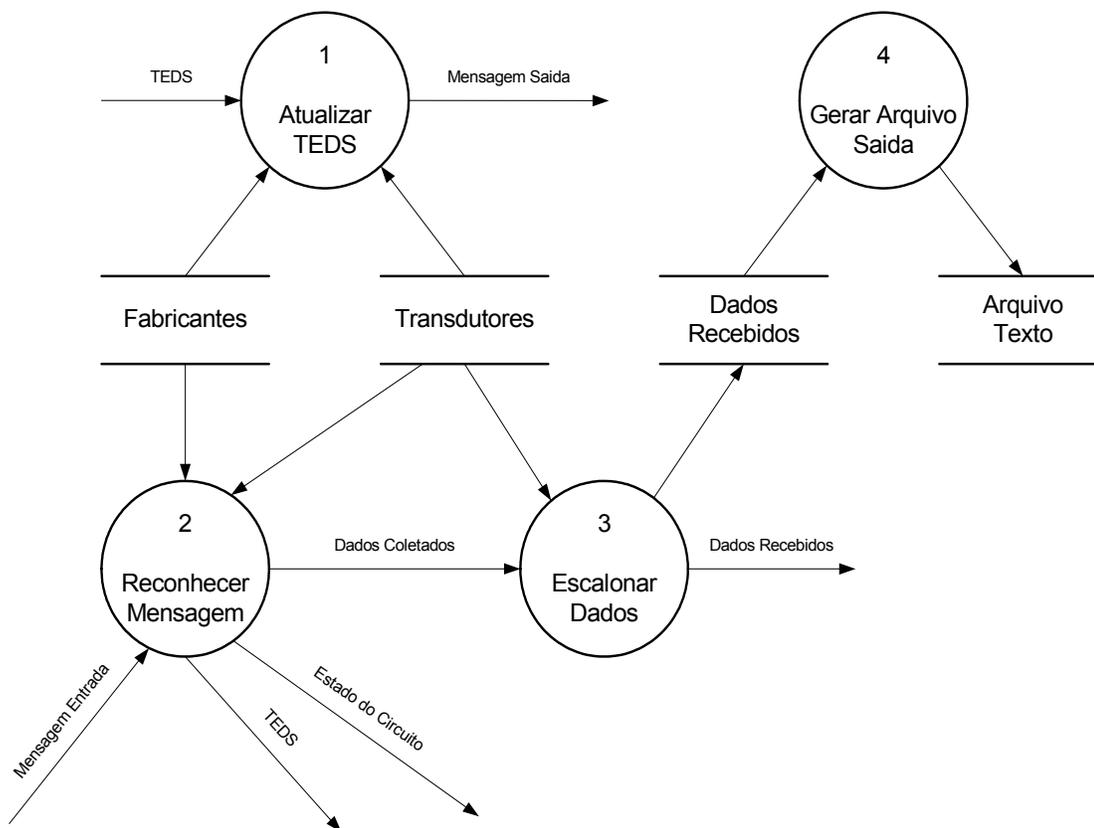


Figura 43: DFD Nível 1 - implementação residente no PC

Observe na figura 44 o Diagrama de Contexto (também chamado de DFD de nível 0) referente à implementação do microcontrolador PIC referente ao módulo STIM. Podemos observar cinco sensores ligados ao módulo STIM que é controlado pelo microcontrolador PIC.

Os módulos dos sensores (1, 2, 3, 4 e 5) são conectados no módulo STIM PIC através de uma interface MMI. Cada sensor possui as seguintes linhas de controle:

- Linha de dados bidirecional (TEDS n²²) (protocolo I2C);
- Linha corresponde a tensão analógica do sensor (Valor n);
- Linha on/off que permite ligar e desligar a memória de dados (TEDS) e identifica quando o sensor é conectado no sistema (sensor n).

A interface RS232 tem como função transferir os dados adquiridos pelo módulo STIM PIC para o STIM PC.

²² Onde n é o número do sensor utilizado de 1 a 5

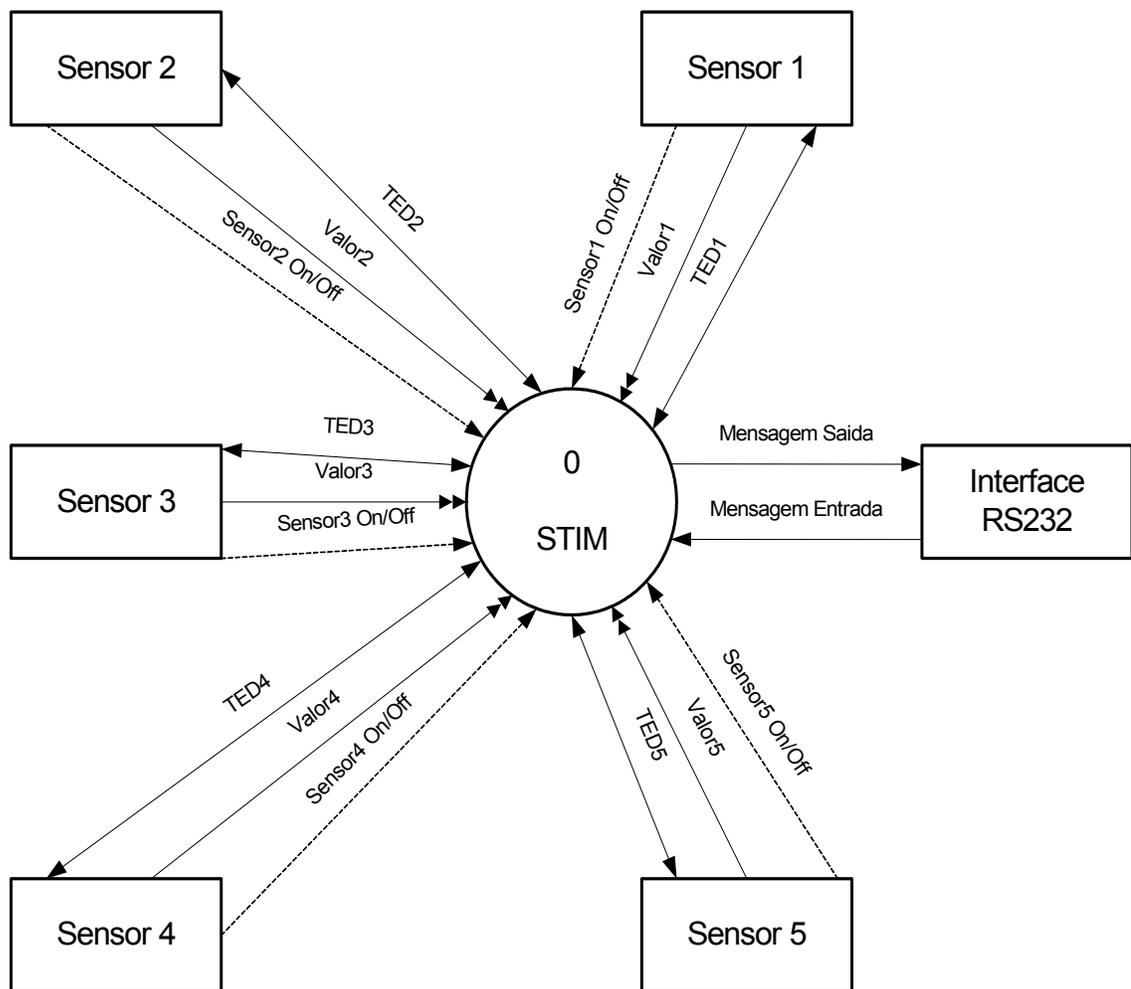


Figura 44: implementação do microcontrolador PIC referente ao módulo STIM

Observe na figura 45 a explosão do processo referente ao módulo STIM, onde são apresentadas as principais funcionalidades.

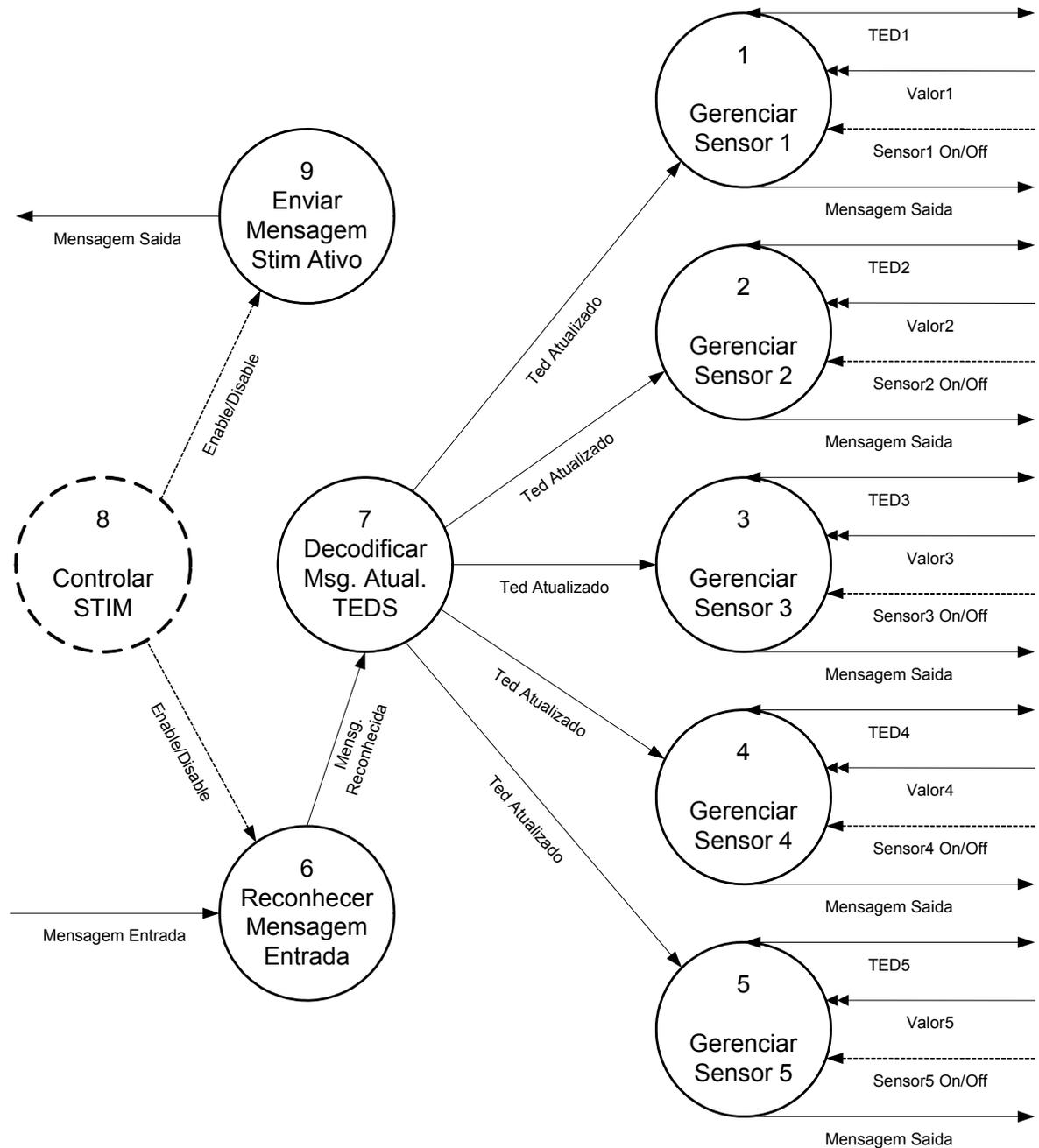


Figura 45: Explosão do módulo STIM

A figura 45 mostra o processo 7 que é constituído por um decodificador de mensagem e atualizador de TEDS propiciando o gerenciamento dos cinco canais do A/D (conversor

analógico para digital) do microcontrolador PIC. Este processo também é responsável pelo controle da varredura dos sensores representado pelo fluxo tracejado sensor n on/off. O sinal on/off liga e desliga a memória EEPROM e também sinaliza quando um sensor é conectado ou desconectado do sistema.

O processo 6 reconhece um pedido do STIM PC que solicita a atualização do TEDS de algum sensor. Uma rotina de controle representado pelo processo 8 habilita e desabilita o envio do TEDS para a memória do sensor a ser atualizado.

Na figura 46 é possível observar o gerenciamento do sensor 1 do módulo STIM. Para os sensores 2, 3, 4 e 5 os processos se repetem.

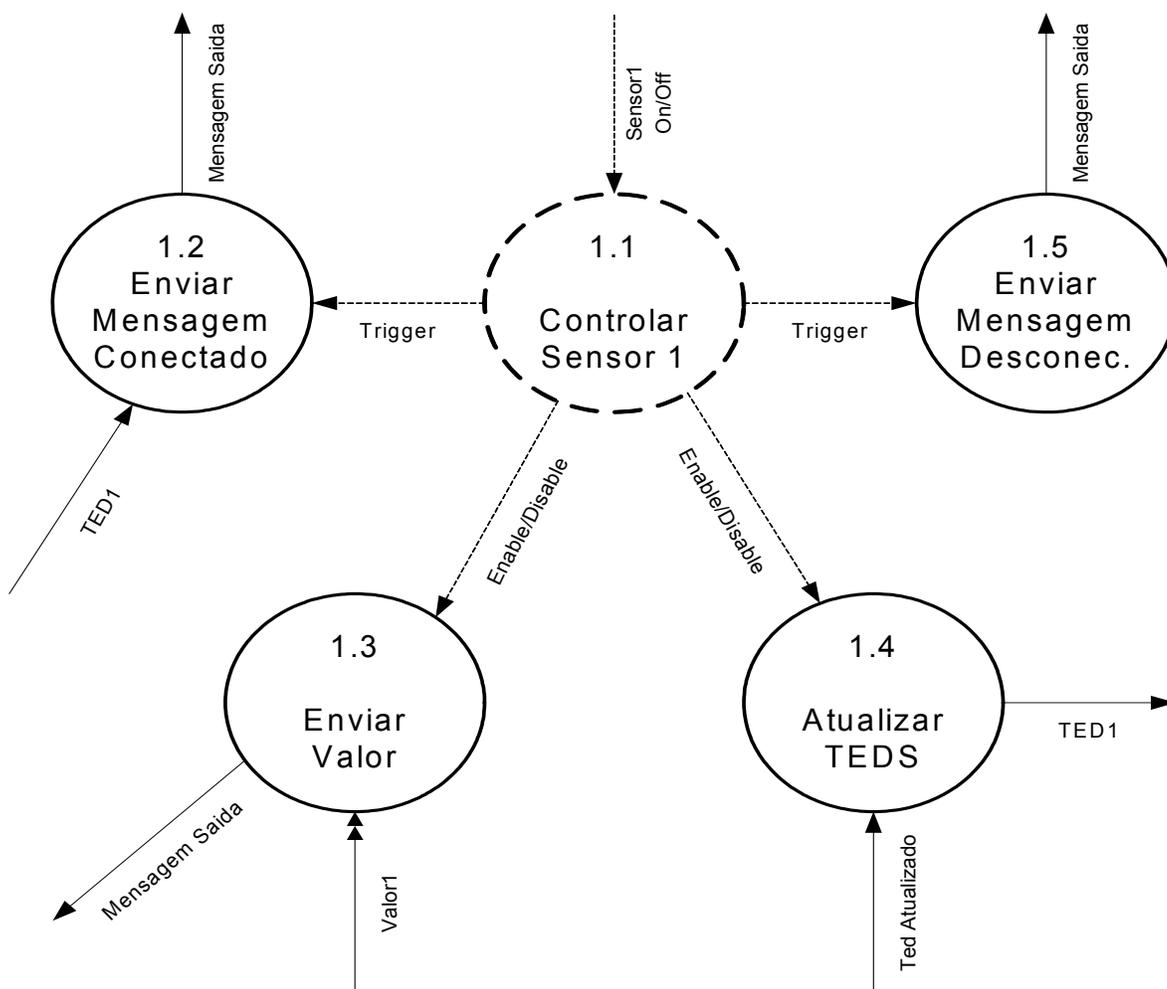


Figura 46: Gerenciamento do sensor 1 do módulo STIM

O diagrama da figura 46 mostra em detalhes os sub-processos dentro do decodificador de mensagens e atualizador do TEDS que foi mostrado anteriormente na figura 45, processo 7.

Dentro do decodificador (processo 1.1) existe uma rotina que controla a varredura do sensor 1. Quando um sensor é conectado o processo 1.2 envia para o STIM PC por meio do processo 1.4 uma mensagem de que o sensor do canal “n” está conectado. Após esta sinalização envia o TEDS do sensor e logo a seguir envia os dados (valor) lidos. Quando um sensor é conectado ao sistema e não existe dado algum dentro da memória TEDS, o sistema assume que está ligado um transdutor desconhecido.

O módulo STIM PC permite gravar os dados na memória TEDS do sensor utilizando os processos 1.1 e 1.4.

Os sensores dos canais de 1 a 5 podem ser desconectados a qualquer momento. Quando um sensor é desconectado o processo 1.5 é utilizado para enviar uma mensagem de desconexão ao STIM PC. O STIM PC salva os dados adquiridos em uma pasta padrão como um arquivo de texto.

4 Capítulo 4 – Resultados e Discussões

4.1 Introdução aos Ensaio

Diante da implementação deste projeto são mostrados alguns resultados obtidos, onde foram feitas comparações com parâmetros conhecidos para avaliar a fidelidade do sistema. Os ensaios foram realizados para avaliar o funcionamento do hardware e do software implementados neste trabalho.

Este capítulo tem como objetivo principal ensaiar o módulo STIM e os módulos MMI destinado ao condicionamento dos sinais dos sensores.

O ensaio preliminar foi feito no módulo STIM para constatar as suas funcionalidades em editar, gravar e reconhecer o TEDS pelo banco de dados cadastrado previamente e verificar a conversão do sinal com relação às faixas programadas no banco de dados *transdutores.txt*. A execução do ensaio do módulo STIM foi feita por um dispositivo especialmente desenvolvido para esta finalidade. O dispositivo de teste possui um potenciômetro que permite variar a tensão no canal inserido e uma memória EEPROM para armazenar o TEDS possibilitando assim simular um sensor genérico em qualquer canal do módulo STIM.

Os ensaios seguintes foram feitos para testar os módulos MMI e seus respectivos sensores. As execuções dos ensaios foram feitos na seguinte ordem:

- Ensaio de temperatura para 0°C usando o sensor LM35;
- Ensaio de temperatura para 100°C usando o sensor LM35;
- Medida de pressão usando o sensor MPX5050;
- Medida de pH termo-compensado usando um eletrodo combinado de Ag/AgCl.

4.2 Ensaio Preliminares dos Sensores

Inicialmente foram testados separadamente cada canal do módulo STIM. Para executar este teste foi montado um dispositivo que contém a memória TEDS juntamente com um potenciômetro a fim de variar a tensão de entrada em cada canal do módulo STIM, conforme figura 47.

O potenciômetro permite variar a tensão de entrada em cada canal na faixa de 0 a 5VCC. Foram feitas medidas comparativas ligando um voltímetro digital de 4^{1/2} dígitos em paralelo com a saída do potenciômetro a fim de visualizarmos a tensão medida no módulo

STIM através do PC em relação à medida adquirida no voltímetro digital. Observou-se inicialmente que a precisão do potenciômetro de carbono que possui uma tolerância de aproximadamente 20% serve somente para fazer um teste simples. A variação da resistência do potenciômetro em função do giro do cursor é muito grosseira, ou seja, é imprecisa para gerar um determinado valor de tensão para realizar uma medida.

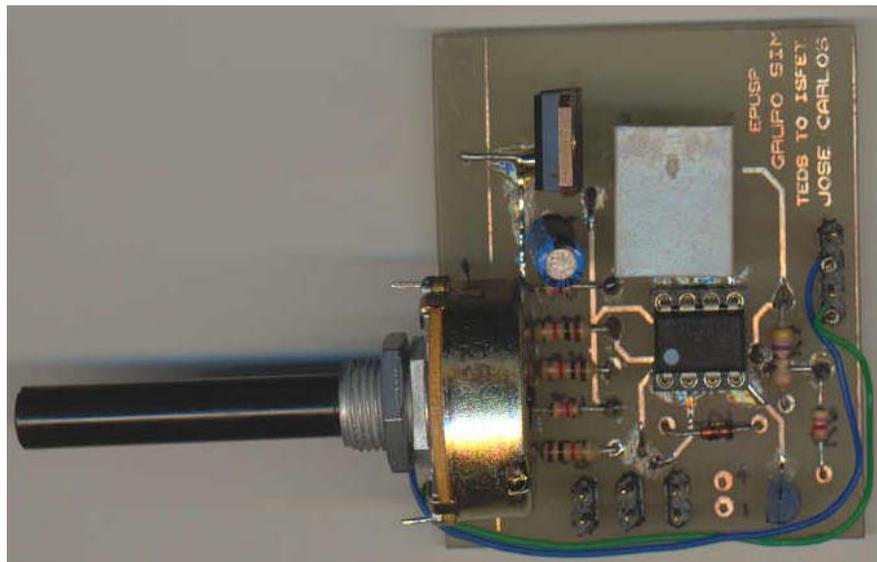


Figura 47: dispositivo de teste dos canais do módulo STIM

Como exemplo, tomamos um valor de tensão de 425mV. Não é possível obter este valor, pois por menor que seja o ângulo de giro do potenciômetro, estaremos muito acima ou muito abaixo da tensão desejada. Uma possível solução seria interligar dois potenciômetros em série, um com valor de 60% do total da resistência necessária mais um com o restante 40%, perfazendo 100% do valor do potenciômetro. Assim é possível ajustar no primeiro potenciômetro o valor mais grosso (60%) e no segundo potenciômetro o valor mais fino (40%). Esta solução é muito utilizada para ajustar a tensão da maioria das fontes de alimentação analógica de bancada, onde a variação de 50mV é desprezível. Entretanto não é possível utilizar esta técnica já que necessitamos de um ajuste em torno de 5mV, pois esta é a mínima sensibilidade do conversor A/D interno do microcontrolador PIC 16F877A.

A solução foi desenvolver um novo dispositivo de teste utilizando um potenciômetro de precisão tipo multivoltas. O potenciômetro escolhido tem as seguintes características técnicas:

- Potenciômetro marca Vishay de fio (*wirewound potentiometer*), modelo 534 com 22mm de diâmetro;

- Resistência possui uma tolerância de aproximadamente 5% para o valor nominal de $5k\Omega$;
- Linearidade 0,2% em toda a faixa;
- Ajuste contínuo por dez voltas, totalizando $3600^\circ + 10\%$;
- Dissipação de 2Watts.

A figura 48 mostra o aspecto físico do potenciômetro de precisão tipo *wirewound*, cujas características foram descritas acima.



Figura 48: Aspecto físico do potenciômetro de Precisão (multivoltas)

A implementação do novo dispositivo de teste pode ser observada na figura 49. O novo dispositivo de teste assegura um ajuste linear e bastante preciso quando comparado com o primeiro. O novo dispositivo ajusta tensões da ordem de 5mV com precisão satisfatória.

Uma inovação técnica foi feita utilizando um *dial* graduado de ajuste que permite contar quantas voltas de ajuste são necessárias para estabelecer uma tensão desejada. A vantagem do uso deste *dial* contador é que sabendo o número de voltas e a posição angular é possível voltar a um ajuste já conhecido.



Figura 49: Dispositivo de teste montado com potenciômetro multivoltas e dial graduado

Maiores detalhes sobre o esquema elétrico do módulo de teste com potenciômetro pode ser visto no APÊNDICE-E.

4.3 Ensaio dos Canais do Módulo STIM

O dispositivo de teste mostrado na figura 49 foi utilizado para realizar os ensaios dos cinco canais do conversor A/D do módulo STIM. A Tabela 12 mostra os resultados obtidos em um dos canais do módulo STIM. As medidas foram feitas variando passos de 100 milivolts até próximo do valor máximo que o conversor A/D lê, ou seja, em torno de 5Volts. As medidas obtidas foram comparadas com as medidas de um Multímetro de $4^{1/2}$ dígitos, marca CIE modelo 70005. É possível notar pequenas variações da tensão lida pelo A/D do módulo STIM a partir da 2ª casa decimal.

Tabela 12: Amostras de tensão lidas no canal 3 do módulo STIM

Amostras Tempo (ms)	Valor medido no módulo STIM Volts (V)	Medidas com Multímetro $4^{1/2}$ Dígitos Volts (V)
1000	0,0489	0,050
2000	0,0978	0,100
3000	0,2004	0,200
4000	0,0303	0,300
5000	0,4008	0,400
6000	0,5085	0,500
7000	0,6060	0,600
8000	0,7038	0,700
9000	0,8016	0,800
10000	0,9042	0,900
11000	1,0019	1,000
12000	1,104	1,100
13000	1,2023	1,200
14000	1,3049	1,300
15000	1,4027	1,400
16000	1,5053	1,500
17000	1,6031	1,600
18000	1,7057	1,700
19000	1,8035	1,800
20000	1,9061	1,900
21000	2,0039	2,000
22000	2,1066	2,100
23000	2,2044	2,200
24000	2,3070	2,300
25000	2,4046	2,400
26000	2,5073	2,500
27000	2,6051	2,600
28000	2,7028	2,700

29000	2,8054	2,800
30000	2,9032	2,900
31000	3,0058	3,000
32000	3,2551	3,250
33000	3,5043	3,500
34000	3,7586	3,750
35000	4,0127	4,000
36000	4,2619	4,250
37000	4,5112	4,500
38000	4,7605	4,750
39000	4,8940	4,900

O dispositivo de teste permite injetar uma tensão previamente conhecida através da medida realizada com um Multímetro de 4^{1/2} dígitos marca CIE modelo 70005, conforme mostra a figura 49. Nas figuras 50 e 51 são mostrados os valores medidos no canal 3 do módulo STIM.

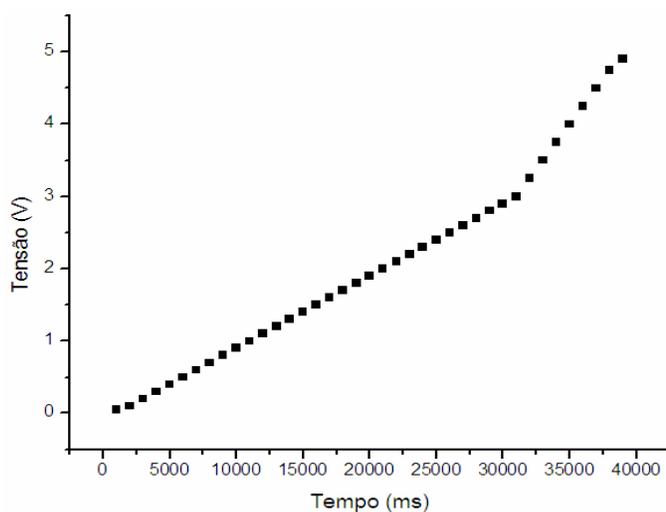


Figura 50: gráfico referente à tensão de teste obtida com o Multímetro

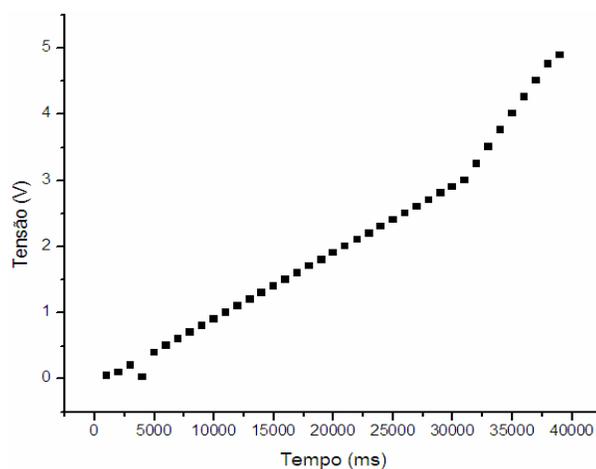


Figura 51: gráfico referente à tensão de teste obtida pelo módulo STIM

4.3.1 Medida de Temperatura

Inicialmente foi medida a variação de temperatura utilizando o sensor LM35 ligado com o módulo MMI. Para verificarmos a precisão do sensor foram realizados alguns ensaios. Primeiramente, utilizamos um termômetro de mercúrio marca Incoterm, modelo 18527 com faixa de medição de -10 a $+200^{\circ}\text{C}$, a fim de verificarmos a resposta do sensor LM35. Foi montado um arranjo experimental-1 com um calorímetro (copo de isopor) contendo 50% de gelo picado e 50% de água, conforme figura 52. Desta forma, imergindo o termômetro de mercúrio observou-se que a temperatura era de 0°C . Posteriormente, imergimos o sensor LM35 e obtivemos uma temperatura de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$.

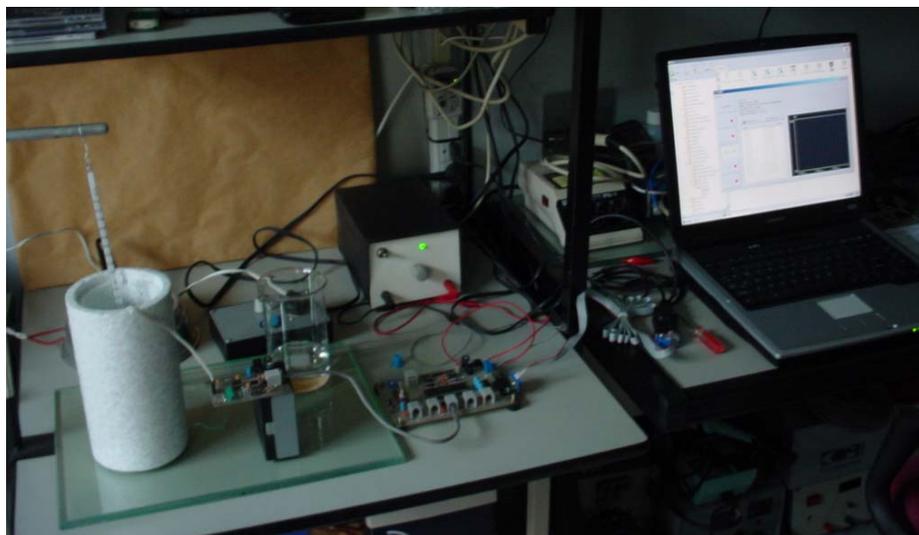


Figura 52: arranjo experimental-1 para medida de temperatura 0°C

Observe na Tabela 13 a variação de temperatura coletada no arranjo experimental-1.

Tabela 13: temperaturas coletadas no arranjo experimental-1

Tipo: 24		
Número de Série: 12345		
Modelo: 24 Sensor de Temperatura a Semicondutor		
Fabricante: 1401 National		
Data de Fabricação: 10/ 8/ 5		
Validade da Calibração: 10/ 8/ 6		
Tempo em milisegundos (ms)	LM35 Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Termômetro de mercúrio Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
1	18,3773216	18
100	11,4369501	13
200	5,4740958	7
300	3,7145650	4
400	2,3460411	3

500	1,7595308	2
600	1,3685239	1,5
700	1,1730205	1,5
800	1,0752688	1
900	0,7820137	1
1000	0,6842620	1
1100	0,6842620	1
1200	0,6842620	1
1300	0,6842620	1
1400	0,5865103	1
1500	0,5865103	1
1600	0,5865103	0,5
1700	0,5865103	0,5
1800	0,5865103	0,5
1900	0,5865103	0,5
2000	0,5865103	0,0
2500	0,5743013	0,0
3000	0,4887586	0,0
3500	0,4887338	0,0
4000	0,4887535	0,0
4500	0,4887438	0,0
5000	0,4887531	0,0

Observe os dados da Tabela 13 demonstrados graficamente, conforme figura 53 e 54.

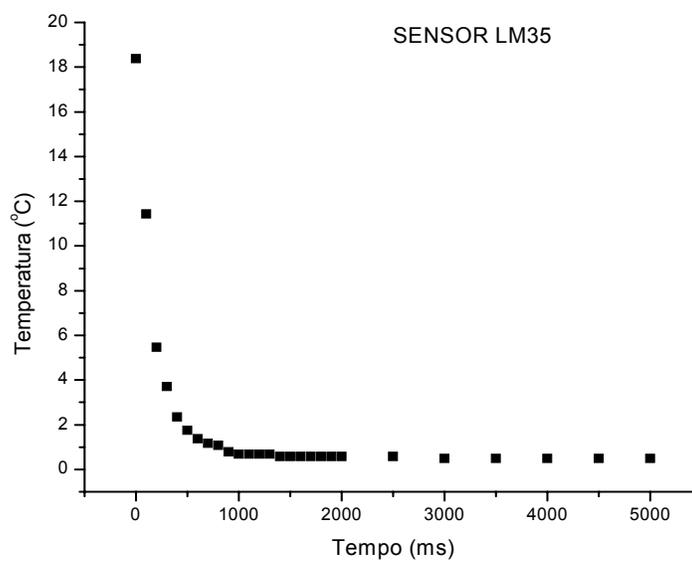


Figura 53: gráfico das medidas de temperatura 0°C – LM35

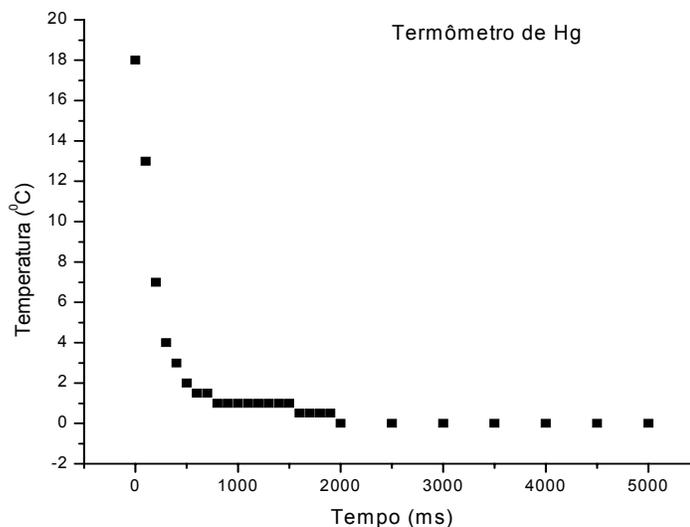


Figura 54: gráfico das medidas de temperatura 0oC – Termômetro de mercúrio

Podemos concluir desta forma que a diferença apresentada foi de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$ entre o termômetro de mercúrio e o sensor LM35, diferença esta que é relatada no *data sheet* do sensor LM35.

Posteriormente foi montado um arranjo experimental-2 contendo um aquecedor, um copo beker com 300ml de água e um termômetro, conforme figura 55. Desta forma, imergindo o termômetro de mercúrio e o sensor LM35, observou-se que a temperatura subiu progressivamente até atingir 100°C .

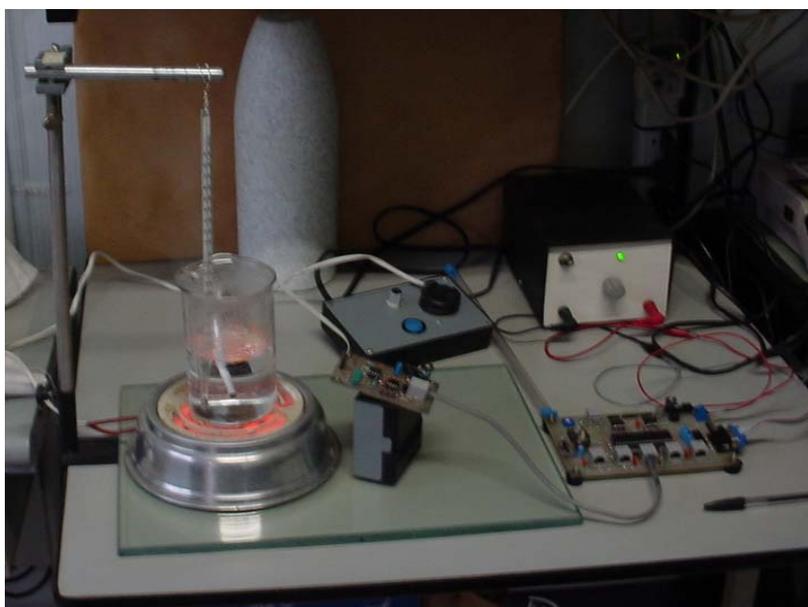


Figura 55: arranjo experimental-2 para medida de temperatura 100°C

Observe na Tabela 14 a variação de temperatura coletada no arranjo experimental-2.

Tabela 14: temperaturas coletadas no arranjo experimental-2

Tipo: 24		
Número de Série: 12345		
Modelo: 24 Sensor de Temperatura a Semicondutor		
Fabricante: 1401 National		
Data de Fabricação: 10/ 8/ 5		
Validade da Calibração: 10/ 8/ 6		
Tempo em milisegundos (ms)	LM35 Temperatura (°C)	Termômetro de mercúrio Temperatura (°C)
1	37,8299120	38
200	38,4164223	39
400	38,9051808	39
600	39,5894428	39
800	40,4692082	40
1000	41,2512219	41
1200	41,7399804	41
1400	42,4242424	42
1600	42,7174976	42
1800	43,3040078	43
2000	43,8905181	44
3000	45,7478006	45
4000	50,1466276	50
5000	52,1016618	52
6000	53,6656891	54
7000	57,1847507	57
8000	60,5083089	60
9000	62,5610948	62
10000	67,5464321	67
11000	72,3362659	72
12000	75,1710655	75
13000	77,5171065	77
14000	81,3294233	81
15000	85,6304985	86
16000	89,5405670	89
17000	91,3000978	91
18000	98,7292278	99
19000	100,0000000	100
20000	100,0000000	100
21000	100,0000000	100
22000	100,0000000	100
23000	100,0000000	100
24000	100,0000000	100
25000	100,0000000	100

Observe os dados da Tabela 14 demonstrados graficamente, conforme figura 56 e 57.

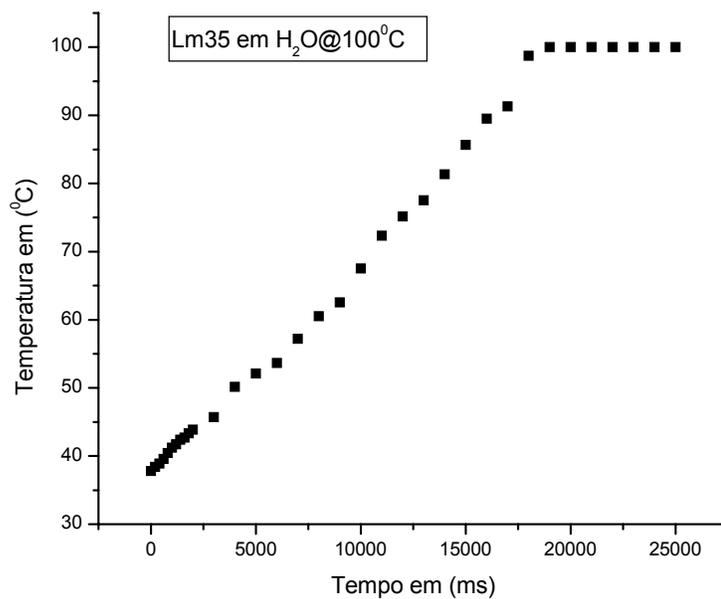


Figura 56: gráfico das medidas de temperatura até atingir 100°C – LM35

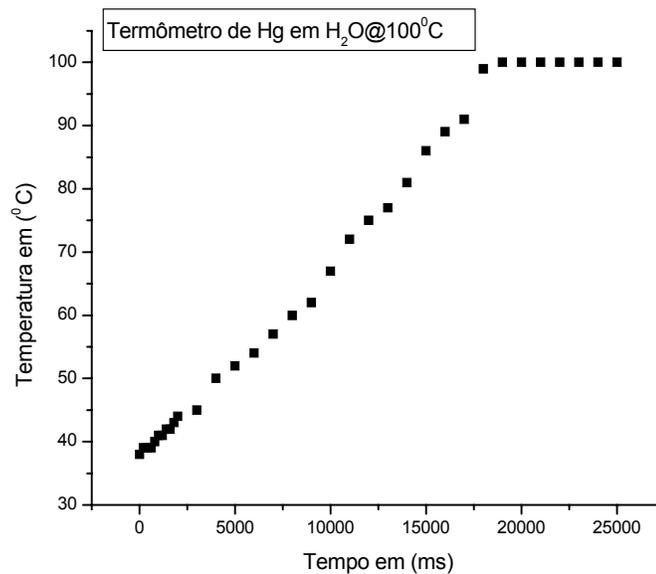


Figura 57: gráfico das medidas de temperatura até atingir 100°C – Termômetro de Mercúrio

A principal diferença entre as leituras ocorrem devido ao maior tempo de resposta do termômetro de mercúrio quando comparado ao sensor LM35. Podemos concluir desta forma que a diferença apresentada foi de aproximadamente 1°C entre o termômetro de mercúrio e o sensor LM35.

4.3.2 Medida de Pressão

O arranjo experimental-3 foi montado utilizando uma seringa de injeção de 5ml ligada em uma mangueira até a entrada do sensor de pressão. Pressionando o êmbulo da mesma obtivemos os valores de pressão mostrados na Tabela 15.

Tabela 15: valores de pressão coletados no arranjo experimental-3

Tipo: 35	
Número de Série: 1255	
Modelo: 35 Sensor de Pressão	
Fabricante: 618 Freescale	
Data de Fabricação: 2/11/ 5	
Validade da Calibração: 2/11/ 6	
Tempo (milisegundos)	Pressão (KPa)
1	1,9550342
10	1,9550342
100	5,9628543
150	13,7365014
200	23,0205279
250	28,0547410
300	33,9198436
350	39,3450635
400	39,3450635
450	39,3450635
500	39,1235632
550	28,0547410
600	24,3167476
650	20,0391007
700	11,1436950
750	8,2537840
800	5,6213461
850	2,3460411
900	1,8793651
1000	1,8765431

Observe os dados da Tabela 15 demonstrados graficamente, conforme figura 58.

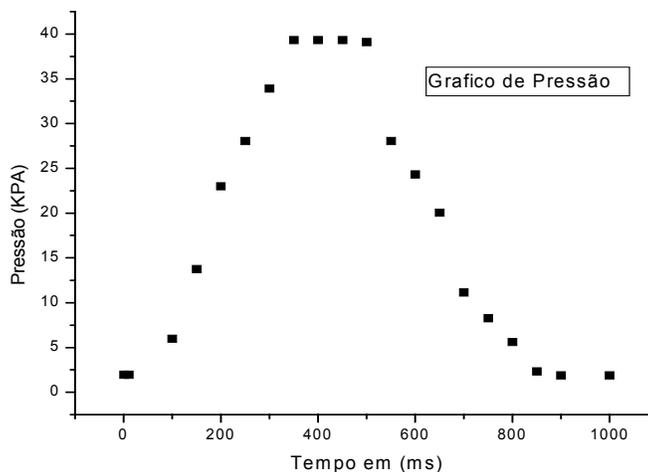


Figura 58: gráfico da medida de pressão

4.3.3 Medida de pH

O arranjo experimental-4 foi montado utilizando o módulo MMI do sensor de temperatura em conjunto com o amplificador ISE para pH, ambos conectados no módulo STIM, conforme figura 59.

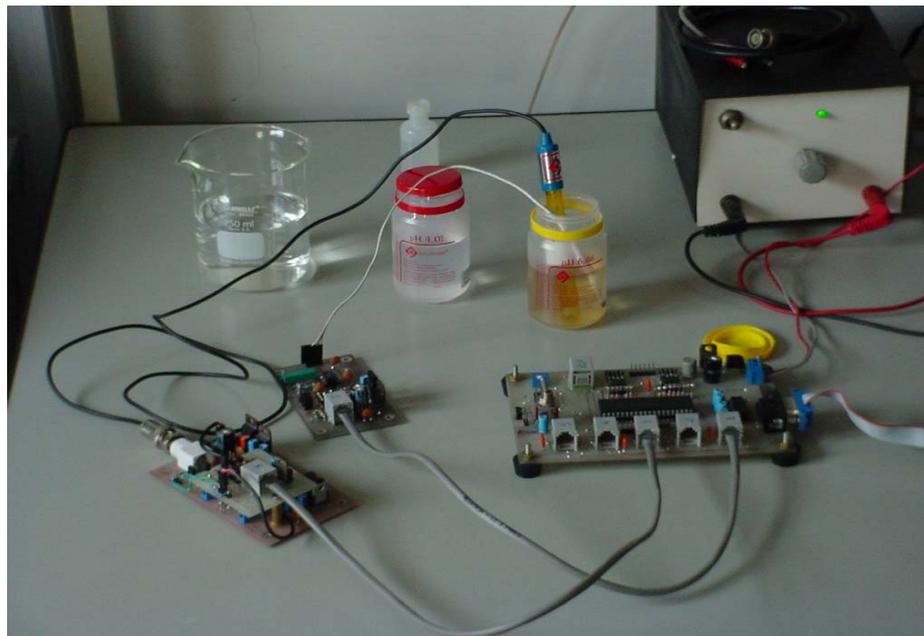


Figura 59: arranjo experimental-4 para medida do pH

4.3.3.1 Pré-calibração do Amplificador do pH

O sistema de medida de pH foi previamente calibrado com uma fonte padrão de tensão baseada em fonte de corrente constante. A fonte de corrente constante é injetada em um divisor de tensão constituído por vários resistores que determinam as faixas de tensão de saída e um potenciômetro tipo multivoltas que permite o ajuste de tensões a partir de 0,1mV.

Desta forma, sabendo que o eletrodo gera 59,16 mV/pH então é possível calibrar o amplificador injetando uma tensão na entrada e realizar o ajuste do ganho e do offset. As medidas de ajuste foram feitas primeiramente nos extremos da faixa da seguinte forma: para pH = 0 temos 414,2mV e ajustamos o trimpot RV2, obtendo na saída uma tensão de 0,00 Volt. Para a mesma tensão na entrada porém com a polaridade invertida, o que equivale ao pH = 14 obtivemos na saída 1,398 Volts. Em seguida ajustamos novamente RV2 para obter na saída 1,400 Volts. O ajuste do pH neutro = 7 é feito curto circuitando a entrada do amplificador obtendo na saída 0,792 Volts, sendo assim necessário ajustar RV3 até obter 0,700 Volts na saída.

4.3.3.2 Medida de pH Termo-Compensada

O arranjo experimental-4 foi montado para efetuar a medida de pH utilizando um sensor tipo Ag/AgCl interligado no amplificador ISE adaptado com o adendo TEDS conforme IEEE 1451.4. Como já foi demonstrado o sensor de pH necessita de compensação térmica realizada através do sensor de temperatura LM35 interligado no módulo MMI conforme IEEE 1451.4.

A medida de pH termo-compensada é efetuada conectando primeiramente o módulo MMI de temperatura em qualquer canal do módulo STIM. Na figura 59 apresentada anteriormente, podemos observar que o módulo do sensor LM35 está conectado no canal 1 e a sonda (LM35) foi mergulhada dentro da solução a ser medida. Ainda na figura 59 observamos que o módulo do sensor de pH está conectado no canal 3.

O software que monitora o módulo STIM detecta o sensor de pH e pede que associe-se o sensor de temperatura (termo-compensação automática) selecionando o canal. A figura 60 mostra claramente que o sensor de temperatura já está conectado. Posteriormente o módulo STIM detectou a conexão do sensor de pH no canal 3, fazendo com que o software de monitoramento pare imediatamente de coletar a temperatura.

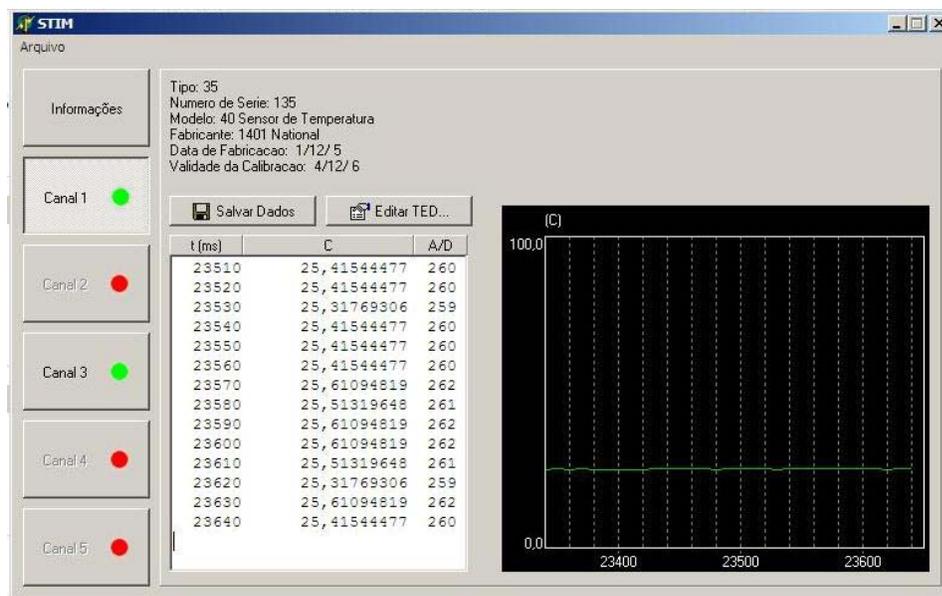


Figura 60: Tela da associação do canal de temperatura para termo-compensação do pH

A figura 61 mostra a interface que solicita a associação do canal onde encontra-se o sensor de temperatura previamente conectado. Observe na figura 61 que a parada ocorreu

exatamente em 1370 milissegundos. Quando o canal na caixa de diálogo associar transdutor é selecionado, o sistema começa a coletar temperatura e pH termo-compensado.

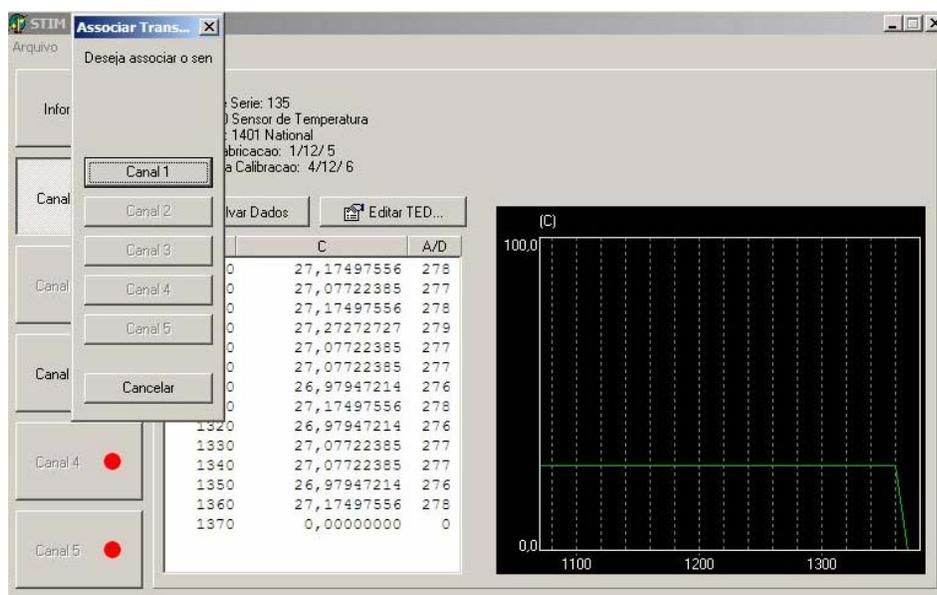


Figura 61: Caixa de diálogo para associar o canal do Transdutor

Observe na figura 61 a coleta dos dados de temperatura e na figura 62 a coleta dos dados de pH.

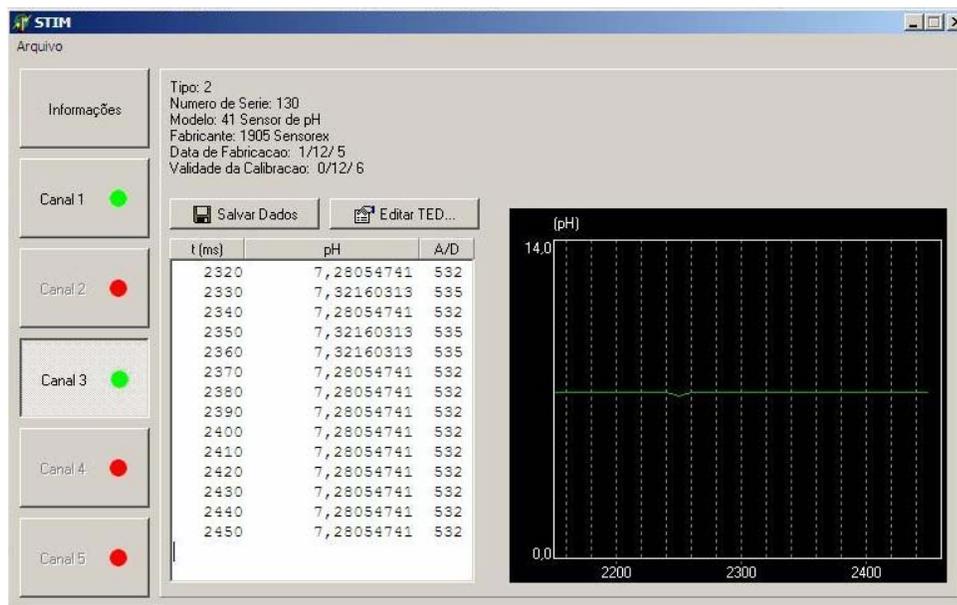


Figura 62: Tela que exibe os valores de pH termo-compensados

4.3.3.3 Medida de pH utilizando Solução Padrão

As medidas de pH com solução padrão servem para confirmar a pré-calibração e determinam que o eletrodo não está danificado ou que o bulbo do eletrodo está limpo, isento de resíduos que atrapalham o seu funcionamento.

Primeiramente foram coletadas medidas com pH básico utilizando uma solução padrão de pH = 6,86. A Tabela 16 mostra os resultados coletados.

Tabela 16: valores de pH com solução padrão 6,86

Tipo: 2	
Número de Série: 130	
Modelo: 41 Sensor de pH	
Fabricante: 1905 Sensorex	
Data de Fabricação: 1/12/ 5	
Validade da Calibração: 0/12/ 6	
Amostra X-PH	
Tempo (milisegundos)	pH
310	7,5552688
312	7,3847507
314	6,6920821
316	6,9794721
318	6,9794721
320	6,9384164
322	6,9384164
324	6,7920821
326	6,7373412
328	6,8541545
330	6,7415445
332	6,8678035
334	6,8910068
336	6,7987478
338	6,8710068
340	6,8520821
344	6,8761322
348	6,8752631
352	6,8763514

Observe os dados da Tabela 16 demonstrados graficamente, conforme figura 63.

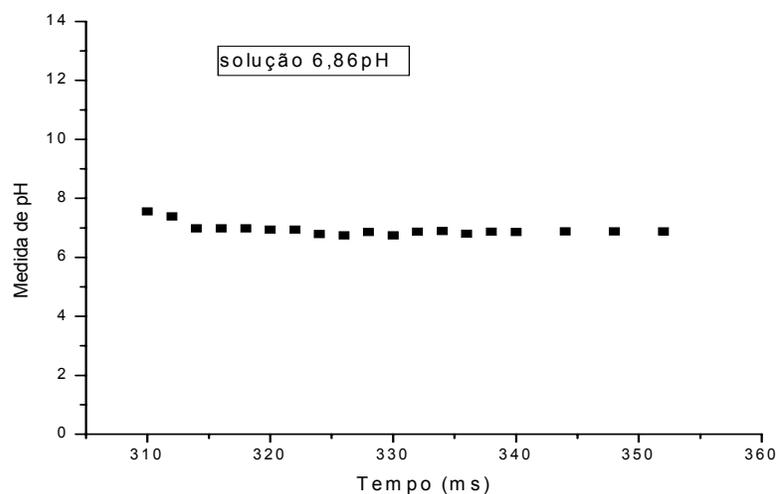


Figura 63: gráfico dos valores de pH com solução padrão 6,86

Uma segunda medida foi efetuada utilizando uma solução de pH = 4,01, ou seja, uma solução meio ácida.. A Tabela 17 mostra os resultados coletados.

Tabela 17: valores de pH com solução padrão 4,01

Tipo: 2	
Número de Série: 130	
Modelo: 41 Sensor de pH	
Fabricante: 1905 Sensorex	
Data de Fabricação: 1/12/ 5	
Validade da Calibração: 0/12/ 6	
Amostra X-PH	
Tempo (milissegundos)	pH
450	6,8289345
452	6,7878788
454	6,7878788
456	6,7878788
458	6,6373412
460	6,4868035
462	6,3499511
464	6,2952102
468	6,2952102
470	6,2541544
472	6,1446725
474	6,1036168
478	6,0078201
480	5,8572825
482	5,6656891
484	5,4604106
486	5,2277615
488	4,2971652
490	4,1532671
492	4,0412356
494	4,0385442
496	4,0123475
498	4,0214567
500	4,0145275
510	4,0213453

520	4,0363472
530	4,0215763
540	4,0145575
550	4,0165271
560	4,0145383

Observe os dados da Tabela 17 demonstrados graficamente, conforme figura 64.

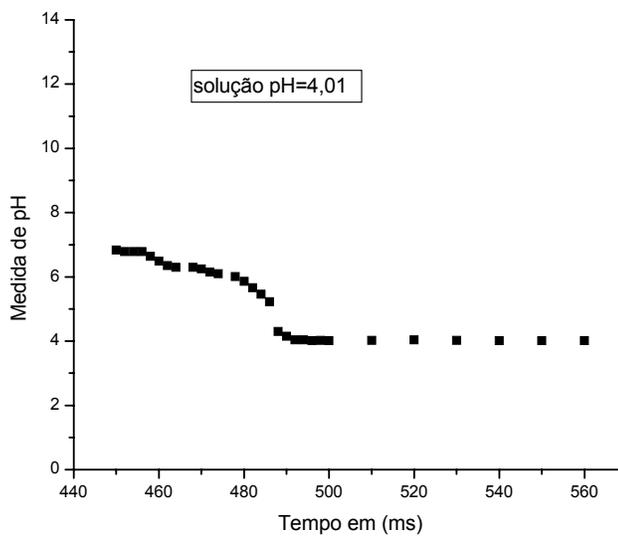


Figura 64: gráfico dos valores de pH com solução padrão 4,01

Podemos concluir que os valores de pH medidos em ambas soluções apresentaram pequenas diferenças devido ao fato de que o sensor de temperatura utilizado na compensação sofre uma variação na medida que pode alcançar 1°C. Desta forma, este parâmetro influencia na obtenção dos valores de pH termo-compensados.

4.3.4 Discussão dos Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nos ensaios foram satisfatórios no que tange a precisão, robustez e funcionalidade do editor TEDS. O editor TEDS mostrou-se funcional e eficiente no registro dos seis parâmetros básicos citados, ou seja, o tipo de sensor, n° de série, modelo, nome do fabricante, data da fabricação e validade da calibração.

Quando comparamos o editor TEDS implementado neste trabalho com um editor TEDS profissional como, por exemplo, o editor desenvolvido por Licht, Brüel & Kjaer [Licht et al. 2000] podemos observar que o editor TEDS aqui proposto precisa ser otimizado para armazenar um maior número possível de parâmetros funcionais dos sensores. O editor TEDS

referenciado armazena 16 parâmetros e confere o CRC. Podemos observar o Editor TEDS de Licht, Brüel & Kjaer na figura 65.

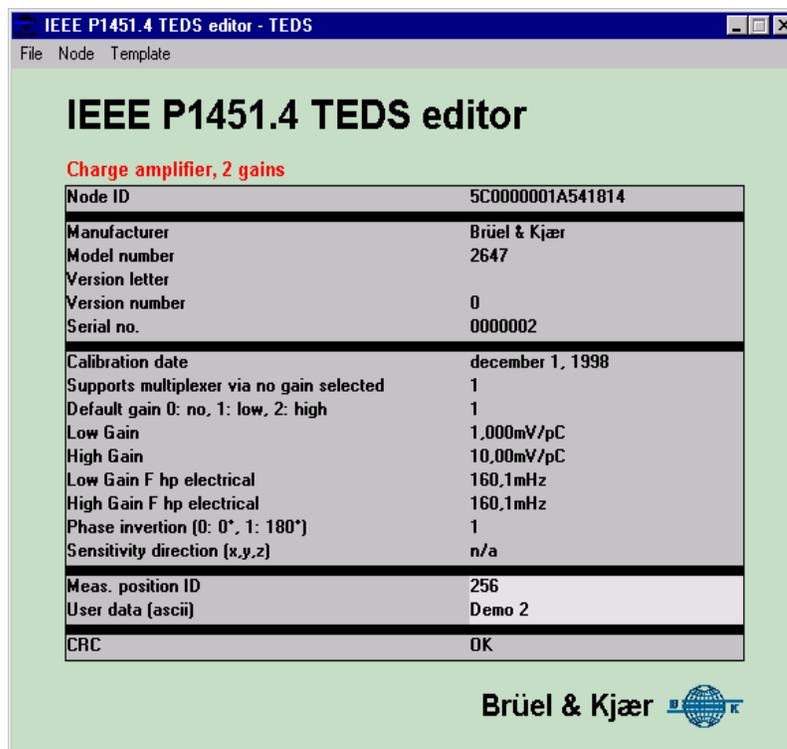


Figura 65: Interface grafica do editor Teds de Brüel & Kjaer

Neste trabalho, os ensaios preliminares mostraram a ocorrência de pequenas diferenças nas tensões medidas entre os canais do módulo STM. As diferenças são da ordem de 15 a 20mV entre os canais 2, 3 e canais 3, 4 tomando o canal 3 como referência. As diferenças ocorridas podem ser ocasionadas pela resistência de contato dos conectores tipo RJ11. A principal causa que propiciou um aumento da resistência de contato foi devido ao grande número de conexões e desconexões realizadas com os conectores. A resistência de contato ficou alterada devido à fadiga dos conectores gerando uma pequena resistência parasitária que se soma com a resistência interna do circuito que está sendo medido. Este fato gerou uma pequena diferença de tensão entre os canais.

O *hardware* e o *software* desenvolvido mostraram-se bastante eficiente e robusto como mostram os resultados coletados experimentalmente. Vale ressaltar que o sistema de *hardware* foi implementado com base nas normas estabelecidas pela IEEE 1451.4. Um ponto relevante da norma IEEE 1451.4 permite que mesmo utilizando sensores comuns, estes podem ser adequados a implementação de um módulo (MMI) de sensores *plug & play*. Com

relação ao *software* de monitoramento residente no PC, este se mostrou eficiente na coleta e demonstração dos dados adquiridos além de possuir uma interface amigável com o usuário.

Quanto aos resultados obtidos nos ensaios foi possível averiguar que para as medidas de temperatura com sensor LM35 obtivemos diferenças da ordem de $0,5^{\circ}\text{C}$ com relação ao termômetro de mercúrio tanto na medida fria (0°C) quanto na medida quente (100°C). Esta diferença não é significativa em algumas aplicações em ambientes industriais, bioquímico, automotivo dentre outros.

Com relação aos resultados para a medida de pressão pudemos observar que a sensibilidade do sensor utilizado oscilou conforme a pressão estabelecida pelo dispositivo de teste, ou seja, dentro da faixa nominal de 1 a $39,5\text{ KPa}$. Não foi possível realizar uma medida comparativa para certificar que o sensor estava totalmente aferido, pois não foi utilizado nenhum dispositivo comparador de pressão como, por exemplo, um manômetro metálico diferencial.

Quanto às medidas de pH foi observado que para a solução padrão de $6,86\text{ pH}@20^{\circ}\text{C}$ obtivemos resultados precisos quando comparamos com um medidor comercial marca Quimis. O mesmo ocorreu para a solução de $4,01\text{ pH}@20^{\circ}\text{C}$. Isto foi possível graças à utilização da medida termo-compensada, pois no dia que foi executada a medida, a temperatura ambiente (temperatura da solução) estava em torno de 28°C .

Desta forma podemos afirmar que este trabalho possui inúmeras aplicações práticas para fins de produção industriais e de pesquisa acadêmica.

Capítulo 5 - Conclusão e Perspectivas Futuras

O sistema de aquisição de dados apresentado foi desenvolvido com base na norma IEEE 1451.4. Neste trabalho foi utilizado o protocolo I2C no lugar do protocolo *1Wire* recomendado pela norma. Esta mudança permitiu a implementação dos módulos MMI (*Mixed-Mode Interfece*) dos sensores para condicionar os sinais analógicos e armazenar a estrutura TEDS. A utilização das memórias seriais I2C é justificada devido à facilidade do seu uso e grande variedade de componentes disponíveis com este padrão de comunicação, inclusive os microcontroladores PIC possuem pinos e periféricos internos específicos para esta função.

Os resultados obtidos neste trabalho com relação à medida de temperatura mostraram-se satisfatórios para a maioria das aplicações onde a variação de 0,5°C não é significativa. Quanto aos resultados da medida de pressão não foi possível compará-los com uma referência, pois não tínhamos à disposição um manômetro com sensibilidade suficiente para medir a pressão entre 0 e 50 KPa. Para os resultados das medidas de pH constatamos que a variação foi pequena comparando com os valores absolutos das soluções padrão. Sendo assim, pequenas diferenças ocorreram devido ao erro associado do sensor de temperatura.

A utilização de instrumentação inteligente baseada na norma IEEE 1451.4 oferece uma vasta gama de aplicações. Alguns pontos positivos podem ser destacados, dentre os quais, a facilidade de instalação e troca de sensores, pois os mesmos são reconhecidos pelo sistema automaticamente (*plug&play*); a implementação de sistemas robustos e confiáveis; a transmissão de sinais via protocolo RS232 com e sem fio, tendo esta última várias aplicações em campo, como controle ambiental, automação de sistemas de tratamento de água, monitoramento biológico, dentre outras.

Uma outra possibilidade que merece destaque é o uso de sistemas que convertem RS232 em protocolo TCP/IP, que permite gerenciar os dados coletados pela Internet.

Uma possível aplicação com grande relevância é o uso deste sistema em coleta de sinais ambientais tais como pressão atmosférica, temperatura ambiente, umidade relativa, velocidade dos ventos e nível de CO₂ no ar atmosférico. A literatura da área de Sensoriamento Remoto apresenta importantes trabalhos sobre os esforços de vários países em direção ao desenvolvimento da tecnologia de Monitoramento Ambiental em tempo real. Isto pode ser observado, por exemplo, no projeto BIRD (*Bi-spectral Infra-Red Detection-BIRD*) da DLR (*German Aerospace Research Establishment*) [Brieß et al. 2000], além do projeto FOCUS [Oertel et al. 1996] pela DLR/NASA, e, também, o programa FUEGO [Escorial et al. 2001]

pela ESA (*European Space Agency*) junto a um consórcio europeu liderado pela INSA (*Ingeniería y Servicios Aeroespaciales*). Neste sentido, o Processamento Inteligente de Sinais, aplicado aos Sensores Inteligentes, envolvendo a representação, detecção e análise de padrões em tempo real, tem mostrado ser de extrema importância em aplicações aeronáuticas e espaciais, [Haykin; Kosko; 2001]. Dentre os vários projetos e programas internacionais, no que concerne ao Sensoriamento Remoto próximo ao tempo real, constituídos pela adoção de tecnologia de Sensores Inteligentes, tem-se como referência o satélite BIRD. A denominação de sensores inteligentes tem sido atribuída a sistemas sensoriais com capacidade de ajustamento das suas características às condições de operação do processo a medir, de compensação de efeitos externos, de auto-diagnóstico e de cálculo automático de algumas funções dos parâmetros a medir. O seu desenvolvimento tem estado associado à evolução atual da indústria eletrônica e exemplos já comercializados incluem os sensores para pressão.

Uma outra possível aplicação para este sistema é na indústria química, onde podemos implementar um controle automático que dependendo do nível de pH de uma solução em um tanque ou reator pode-se adicionar um determinado produto até completar uma dada reação química que corresponda a um outro valor do pH. Este último exemplo é usado na indústria de bebidas, usinas de álcool e indústria de cosméticos.

Assim sendo, a implementação da aplicação proposta pode operar com pequenas adaptações em qualquer sistema que exija um monitoramento de sensores. A transferência do conhecimento aplicado neste trabalho permite que outros projetos multidisciplinares possam ser desenvolvidos tendo como base a aplicação implementada, pois possui um elevado grau de eficiência a baixo custo. Um fato que merece destaque é a utilização da norma IEEE 1451, pois esta permite que em futuras manutenções dos sensores, estes sejam trocados com facilidade devido à compatibilidade que a norma provê.

O módulo STIM apresentado tem sua implementação viabilizada devido à utilização de componentes de baixo custo facilmente encontrados no mercado nacional.

Futuramente é possível implementar um sensor inteligente *plug&play* utilizando o microcontrolador de pequeno porte (PIC12F675) que possui um conversor A/D e memória EEPROM para o TEDS. Este microcontrolador oferece uma grande vantagem, pois é extremamente pequeno podendo ser encapsulado conjuntamente com o elemento sensor e o amplificador condicionador de sinais.

A possibilidade de implementar uma rede de sensores baseado em protocolo RS485 ou rede CAN deve ser analisada. Na figura 66 mostramos um barramento CAN controlado por um dispositivo mestre.

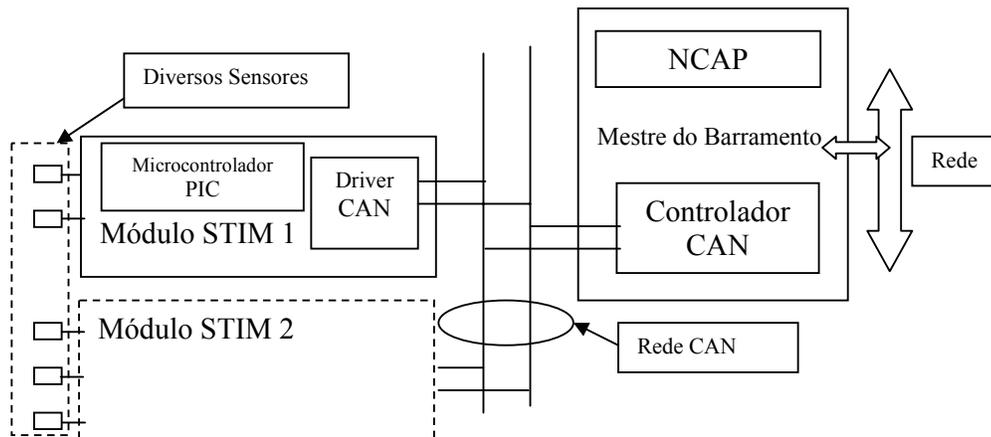


Figura 66: diagrama simplificado de uma rede de sensores utilizando CAN

Além disso, é possível utilizar o protocolo serial tipo USB (*Universal Serial Bus*) salientando que a norma IEEE 1451.7 para sensores inteligentes com saída USB se encontra em fase de estudo.

Futuras implementações com sensores inteligentes para aplicações mais complexas deverão ser projetadas utilizando a tecnologia de processadores de sinais digitais (DSP). Os processadores de sinais digitais possuem inúmeras vantagens em relação aos microcontroladores convencionais. Dentre as vantagens do DSP podemos citar um melhor desempenho, pois a unidade lógica aritmética pode processar palavras de dados com até 32 bits. Uma outra vantagem é que ele possui instruções que permitem manipular filtros digitais programáveis executando inúmeras funções, inclusive FFT. Dentre as aplicações com DSP podemos citar sistemas de sensores inteligentes usando *wireless*, *modems* e comunicação TCP/IP.

BIBLIOGRAFIA

[Axisa et al. 2003] Axisa, F.; Dittmar, A.; Delhomme, G. “*Smart Clothes for the Monitoring in Real Time and Conditions of Physiological, Emotional and Sensorial Reactions of Human*”. In Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE EMBS. Cancun, México, pp. 3744-3747. September, 17-21. 2003.

[Barmes 2002] Barmes, Edward; Waren, Steve. “*A wearable, Bluetooth-Enabled System for Home Health Care*”. Kansas State University, Electrical and Computer Engineering. Manhattan, KS 66506. Proceedings of the Second Joint EMBS/BMES Conference Houston, Texas, USA. October, 2002.

[Brieß et al. 2000] Brieß, K., Bärwald, W., Gerlich, T., Jahn, H., Lura, F., Studemund, H. “*The DLR Small Satellite Mission BIRD*”. In: Proceedings on International Academy of Astronautics Journal, Vol. 46, No. 2-6, pp. 111-120, 2000.

[Chaczko et al. 2005] Chaczko, Zenon; Ahmad, Fady; Mahadevan, Venkatesh. “*Wireless Sensors in Network Based Collaborative Environments*”. ITHET6th Annual International Conference F3A-7. Juan Dolio, Dominican Republic, July 7-9, 2005.

[Chan 1999] Chan, S. “Update on the IEEE 1451 Smart Transducer Interface Standard”. AEPTEC Microsystems /3E Technologies. 1999.

[Chen 1998] Chen, C.; Lee, Kang. “*A Mixed-Mode Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators*”. Sound and Vibration. April, 1998.

[Eidson 1995] Eidson, John C. Editor. “*IEEE p1451.2 Standard for Smart Transducer Interface, Object Model Specification*”. Draft 1.61, IEEE Standards Association 02/11/1995.

[Erinle 2005] Erinle, Benga. “*Wireless Technology for Military Force Protection and Homeland Security*”. 3e Technologies International (3eTi). June 7, 2005.

[Escorial et al. 2001] Escorial, D.; Tourne, I. F.; Reina, F. J. “*FUEGO: A dedicated constellation of small satellites to detect and monitor forest fires*”. 3rd IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Sec. B-601, Berlin, Germany, 2001. 4p.

[Ferrari et al. 2004] Ferrari, Paolo; Flammini, Alexandra; Marioli, Daniele; Sisinni, Emiliano; Taroni, Andrea. “*Reti di sensori wireless: applicazione e tecnologia*”. Dipartimento di Elettronica per l'Automazione. Università degli Studi di Brescia. 2004.

[Gregory 1984] Gregory, B. A.. “*Instrumentación eléctrica y sistemas de medida*”. Colección Electrónica/Informática, Editora Gustavo Pili S.A.. Barcelona, pp. 278-291. 1984.

[Hufnagel 2004] Hufnagel, Paul. “*The IEEE Standard 1451.4 manufacturer ID*”. IEEE 1451.4 Standard Working Group. 2004

[Johnson 2001] Johnson, Robert N.; Woods, Stan P.. “*Proposed Enhancement to the IEEE 1451.2 Standard for Smart Transducers*”. September 2001. Disponível em: <www.sensormag.com/articles/0901/pf_main.shtml>. Acesso em 28/03/2005.

[Kareh 1995] Kareh, E.I.; E.V. Editor. “*IEEE P1451.1 Standard for Smart Transducer Interface, Transducer Electronic Data Sheet and Transducer Interface Specification*”. Draft 1.40, IEEE Standards Association, 16/11/1995.

[Lee 2000] Lee, Kang. “*Proposed Wireless Sensor Standard IEEE 1451.5*”. Open Forum Working Group Meeting. Sensors Expo/Conference. June 2, 2003.

[Lee 2003] Lee, Kang. “*IEEE 1451: A Standard in Support of Smart Transducer Networking*”. National Institute of Standards and Technology, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Baltimore, MD USA, May 1-4, 2000.

[Lee 2004] Lee, Kang. “*Introduction to IEEE 1451 – Family of Standards*”. Wireless Sensor Standard Workshop/Meeting – Sensors Expo/Conference. NIST - National Institute of Standards and Technology. June 7, 2004.

[Lee 2005] Lee, Kang. “*Synopsis of IEEE 1451*”. IEEE 1451: Empowering the Smart Sensor Revolution. Sensors Conference/Expo 2005.Chicago, IL. June 7, 2005.

[Licht et al. 2000] Licht, Torben ; Bruel & Kjaer. The IEEE 1451.4 Proposed Standard and Emerging Compatible Smart Transducers and Systems. Sound and Vibration. April, 2000.

[Licht 2003] Licht, Torben, R. “*The IEEE 1451.4 Proposed Standard and Emerging Compatible Smart Transducers and Systems*”. Sound and Vibration, Denmark. 2003.

[Luharuka et al. 2003] Luharuka, Rajesh; Gao, Robert X; Kirshnamurty, Sundar. “*Design and Realization of a Portable Data Logger for Physiological Sensing*”. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.52, n°4. August, 2003.

[Mark 2004] Mark, John; Hufnagel, Paul. “*The IEEE 1451.4 Standard for Smart Transducers*”. IEEE 1451.4 Standard Working Group. 2004.

[Norton 1989] Norton Harry N. “*Handbook of Transducers*”. Prentice-Hall Inc., pp. 17-25. 1989.

[Oertel et al. 1996] Oertel, D.; Tank V.; Haschberger, P.; Zhukov, B.; Jahn, H.; Briess, K.; Knuth, R.; Lorenz, E.; V. Schoenermark, M. “*FOCUS: Environmental Disaster Recognition System*”. ESA Symposium Proceedings on Space Station Utilisation, ESOC, Darmstadt, Germany, pp. 593-598, 1996.

[Peng et al. 2000] Peng, C. H.; Saraiva, A. M.; Cugnasca, C. E. “*Gerenciamento de Ambientes Agrícolas aplicado a Estufa de Plantas*”. Departamento de Engenharia da Computação e Sistemas Digitais – EPUSP. 2000.

[Pereira 2003] Pereira, Fabio. “*Microcontroladores Pic Programação em C*”. 2ª Ed. São Paulo: Érica, 2003.

[Perrussel 2005] Perrussel, David. “*Open Sensor Interface Needs for the US Navy*”. Presented at Sensors Expo Chicago. June 8, 2005.

[Ulivieri 2005] Ulivieri, Nicola; Distanti, Cosimo; Luca, Tondi; Rocchi, Santina; Siciliano, Pietro. “*A way to standardize gas sensor*”. Sensors and Actuators, Elsevier, 2005-SNB-8650.

[Veigas 2003] Veigas, Vitor Manoel Rodrigues. “*Projecto e Implementação de um Sistema de Sensores Inteligentes Baseado na Norma IEEE 1451*”. Dissertação de mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Junho, 2003.

[Wobschall 2005] Wobschall, Darold. “Smart Sensor Integration with a Wired Network”. IEEE 1451: Empowering the Smart Sensor Revolution. Esensor, Inc. Buffalo, New York. 2005.

[Woods et al. 1996] Woods, Stan P.; Lee, Kang et al.. “*IEEE-P 1451.2 Smart Transducer Interface Module*”. August, 1996.

[Zywietz et al. 2000] Zywietz, C.; Joseph, G.; Fischer, R.. “*A System for Integrated ECG Analysis and Cardiac Emergency Care*”. IEEE Computers in Cardiology. Medical School Hannover. Hannover, Germany, 2000.

[____ 1998] IEEE STD 1451.2. “*IEEE Standard for Smart Transducer Interface for Sensor and Actuators – Transducer to Microprocessor Communication Protocols and transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats*”. IEEE Inc, New York, EUA 1998.

[URL 1] <URL:Http://www.motion.aptd.nist.gov> Acesso em 28/07/2005.

[URL 2] URL:Http://www.ni.com. “*An Overview of 1451.4 Transducer Electronic Data Sheets (TEDS)*”. Artigo anônimo da National Instruments. Acesso em 28/07/2005.

[URL 3] URL:Http://www.maxin-ic.com/1-wire.cfm. Acesso em 18/06/2005.

[URL 4] URL:Http://www.bosch.com/can. Acesso em 15/06/2005.

[URL 5] Data Sheet to PIC16F87X 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers by Microchip Technology Inc- 2001. Disponível em: <www.microchip.com>. Acesso em 12/05/2005.

[URL 6] HOW BUS I2C WORKING -“*The I2C –Bus Specification by PHILIPS Version 2.1*”. January, 2000. Disponível em: <www.semiconductors.philips.com/markets/mms/protocols/i2c/facts/index.html>. Acesso em 17/05/2005.

[URL 7] Data Sheet to LM35 by National Semiconductors. Disponível em: <www.national.com>. Acesso em 08/09/2005.

[URL 8] Data Sheet Sensor Pressure to MPX5050DP by Freescale. Disponível em: <www.freescale.com>. Acesso em 10/08/2005.

[URL 9] “*pH Electrode Technical Education*”. Disponível em: <www.Sensorex.com_Home/Support/Technical_Education >. Acesso em 25/10/2005.

[URL 10] “*pH and ORP Instrument and Sensor Catalog*”. Disponível em: <www.aicpl.com.au>. Acesso em 15/10/2005.

[URL 11] Compilador freeware PCW para PIC16F877 manufaturado pela CCS (*Custom Computer Service*). Disponível em: <www.ccs.info.com>. Acesso em 09/05/2005.

GLOSSÁRIO

ASCII –	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
A/D –	<i>Analogic to Digital</i>
BUS –	Barramento de dados
CAN –	<i>Computer Área Network</i>
CCP –	<i>Capture Compare Pulse</i>
CMOS –	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CRC –	<i>Cyclic Redundancy Check Code</i>
CS –	<i>Chip Select (ativo em nível lógico zero)</i>
D/A –	<i>Digital to Analogic</i>
DDP -	Diferença de Potencial Elétrico
DIP –	<i>Dual in Line Package</i>
DIP-SWITCH –	micro chave encapsulada no modo <i>Dual in Line Package</i>
Driver –	<i>Dispositivo para adequar sinais elétricos</i>
EEPROM –	<i>Electrical Erasable Programmable Ready Only Memory</i>
EPP -	<i>Enhanced Parallel Port</i>
FDM -	<i>Frequency Division Multiplex</i>
GSR -	<i>Galvanic Skin Response</i>
Half Duplex –	<i>Divisão de tempo na Comunicação de Dados, 50% Transmite e 50% recebe</i>
ICSP -	<i>In Circuit Serial Programmer</i>
IDE –	<i>Integrated Development Environment</i>
I2C -	<i>Inter Integrated Circuit</i>
IEEE -	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISFET -	<i>Íon Selective Field Efect Transistor</i>
Jumpers –	par de pinos pelo qual realiza uma ligação elétrica
LVDT –	<i>Linear Voltage Differential Transducer</i>
MMI –	<i>Mixed Mode Interface</i>
MOS -	<i>Metal Oxide Semiconductor</i>
Multi Wire –	vários fios
NIST -	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NCAP -	<i>Network-Capable Application Processor</i>
NTC –	<i>Negative Temperature Coeficient</i>
Overdrive –	<i>drive de comunicação de alta velocidade</i>

PC –	<i>Personal Computer</i>
PCI –	<i>Placa de Circuito Impresso</i>
pH –	parte de hidrogênio dissolvido em uma solução que indica se a solução é ácida ou básica
PIC -	<i>Peripheral Interface Controller</i>
PSP –	<i>Parallel Slave Port</i>
PTC –	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
<i>Pull-up</i> –	<i>Conectado a nível lógico alto</i>
PWM –	<i>Pulse Width Modulator</i>
RAM –	<i>Random Access Memory</i>
RISC -	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RPC –	<i>Remote Procedure Call</i>
RTD –	<i>Resistance Temperature Detectors</i>
RVDT -	<i>Rotational Voltage Differential Transducer</i>
SCK –	<i>Synchronize Clock = relógio de sincronização</i>
SCL –	<i>Serial Clock</i>
SDA –	<i>Serial Data</i>
SI –	<i>Serial Input</i>
SO -	<i>Serial Output</i>
SPI -	<i>Serial Peripheral Interface</i>
STIM -	<i>Smart Transducer Interface Module</i>
<i>Strain Gauges</i> –	<i>Transdutor de Medida de Tração Compressão</i>
TBIM -	<i>Transducer Bus Interface Module</i>
TEDS -	<i>Transducer Electronic Data Sheet</i>
<i>Template</i> –	<i>modelo, padrão</i>
T I I -	<i>Transducer Independent Interface</i>
TTL –	<i>Transistor Transistor Logic</i>
Txder –	<i>Transducer (sensor ou atuador)</i>
VDC –	<i>Voltage Direct Current</i>
XML –	<i>Extensible Markup Language</i>
1Wire -	<i>Protocolo de Comunicação por 1 fio desenvolvido pela Dallas/Maxim</i>
WIRELESS –	<i>Comunicação sem fio</i>

APÊNDICE-A (Módulo MMI com LM35)

Esquema elétrico do módulo LM35 MMI do sensor de temperatura conforme IEEE 1451.4, figura 67.

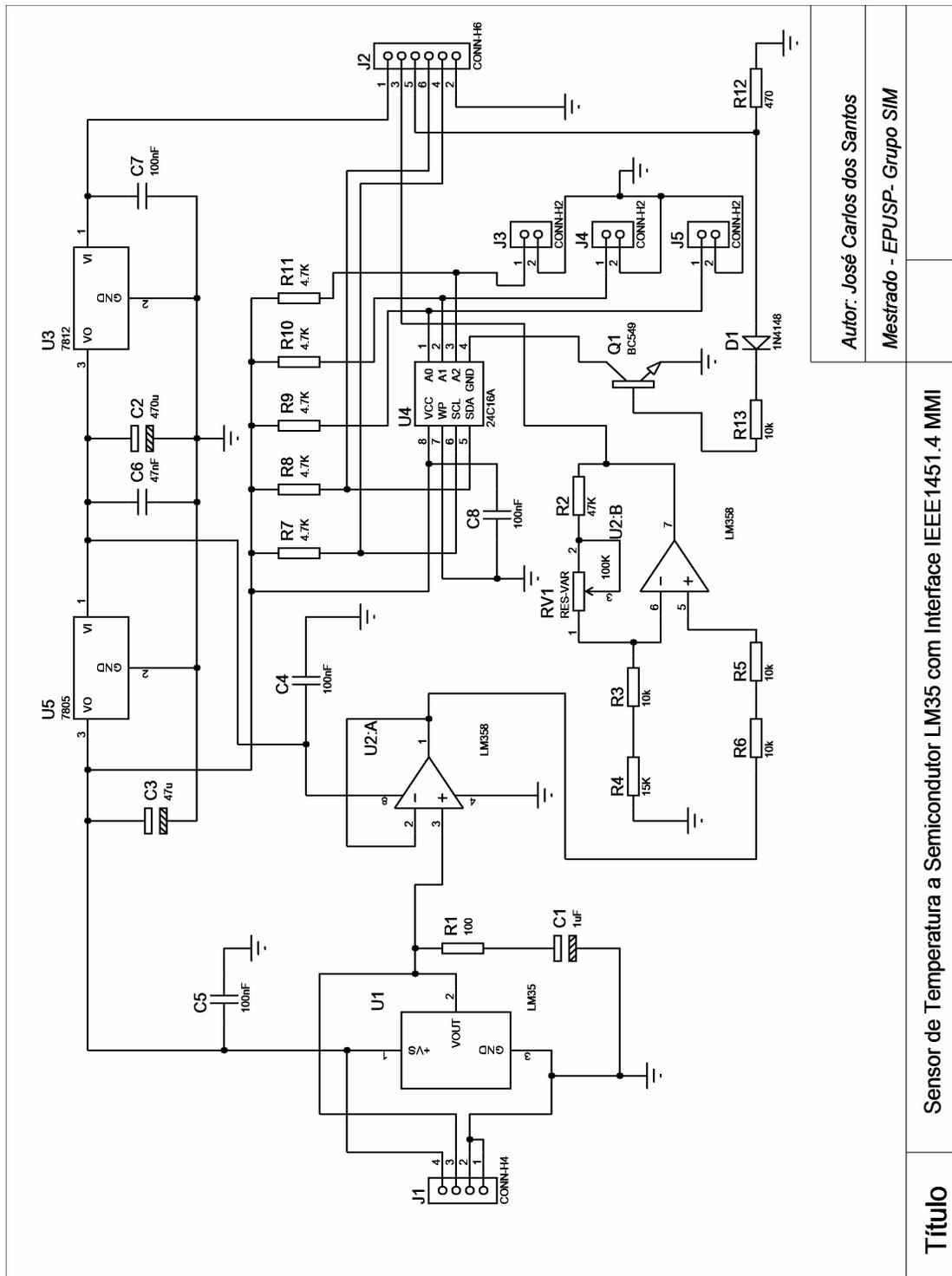


Figura 67: Esquema elétrico do módulo LM35 MMI

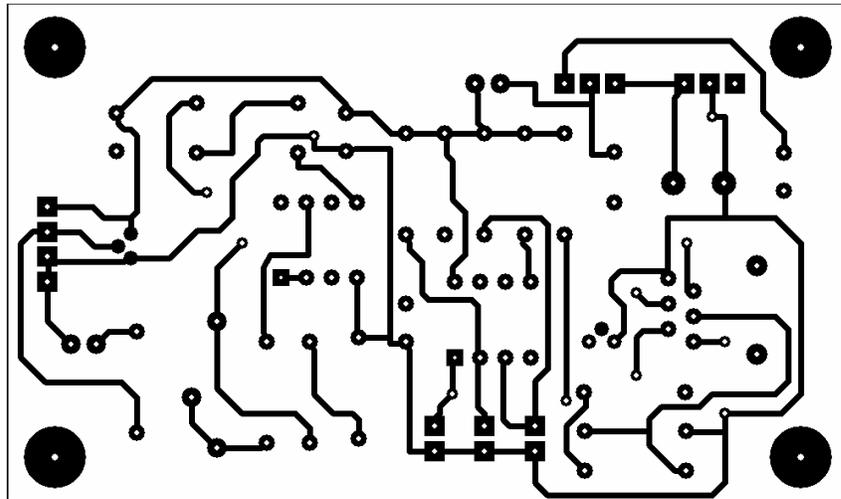


Figura 69: Layout PCI módulo LM35 Lado inferior

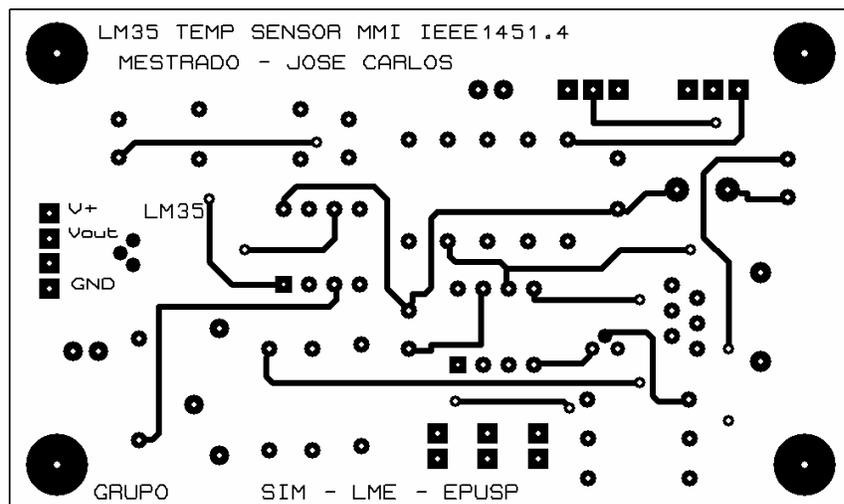


Figura 70: Layout PCI módulo LM35 lado superior

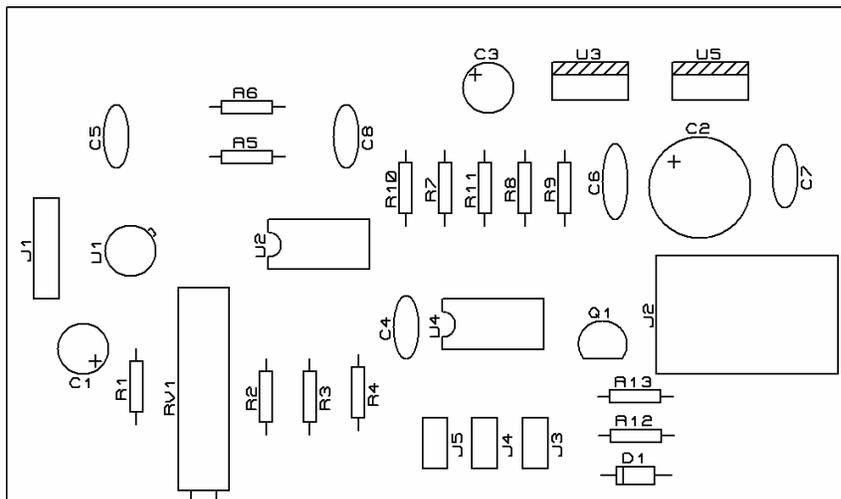


Figura 71: Layout PCI módulo LM35 lado superior da máscara de componentes

APÊNDICE-B (Módulo MMI sensor de pressão)

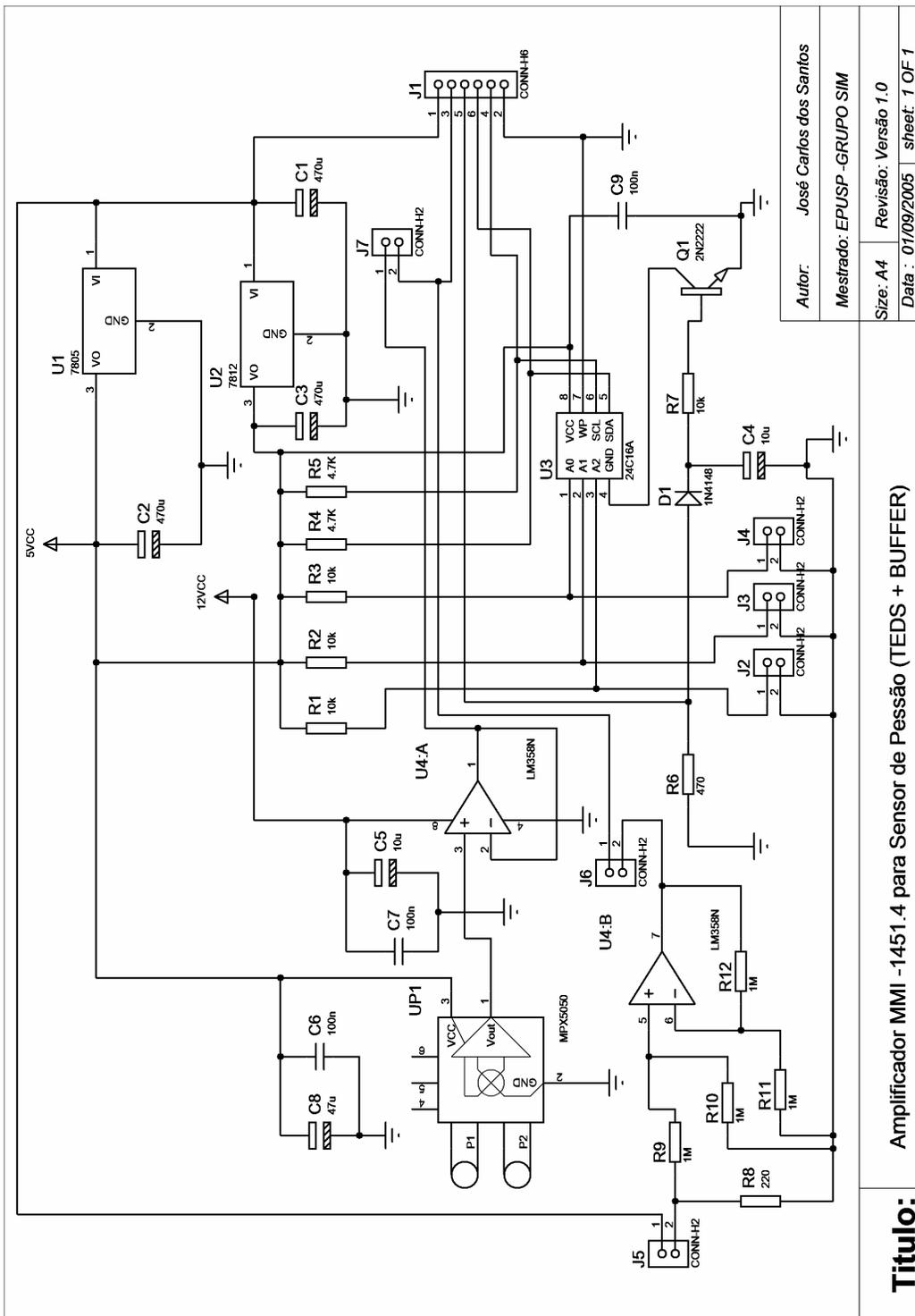


Figura 72: Esquema elétrico do módulo MMI - sensor de pressão

Layout da placa de circuito do Módulo MMI - sensor de Pressão, conforme figura 73.

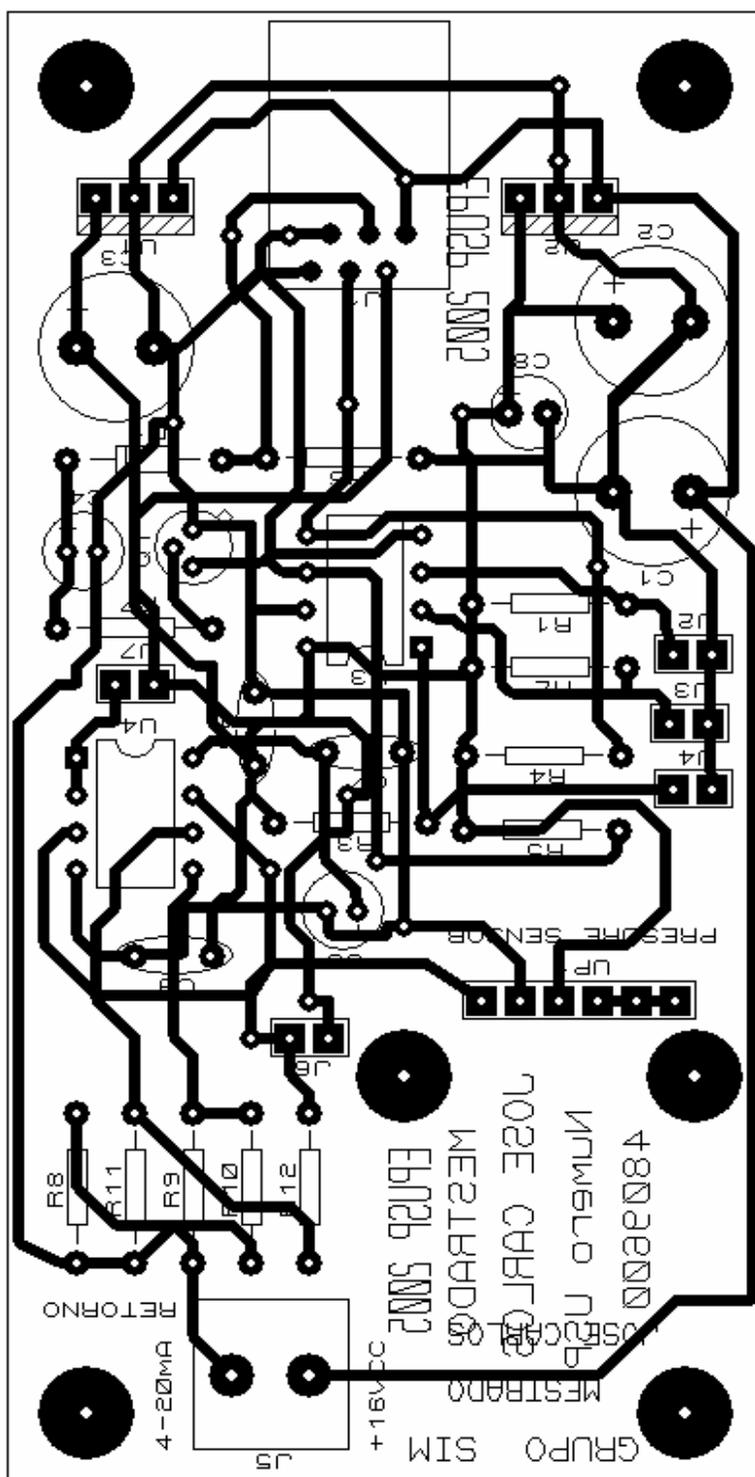


Figura 73: Layout da placa de circuito do Módulo MMI - sensor de Pressão

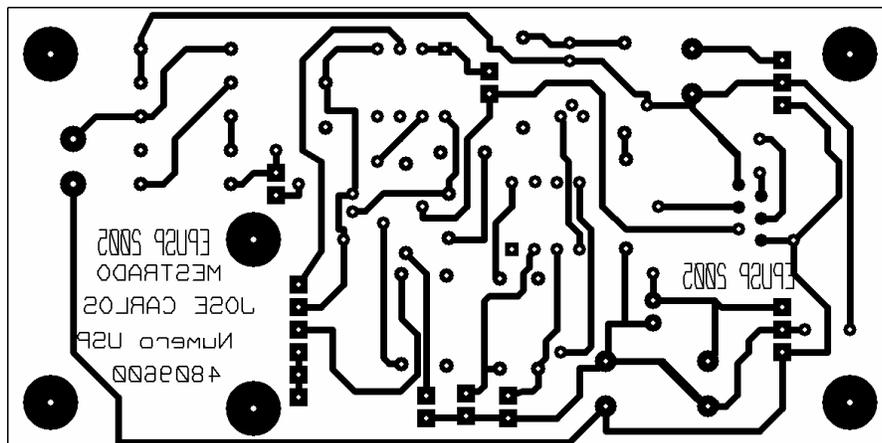


Figura 74: Layout da PCI do módulo sensor de pressão lado inferior

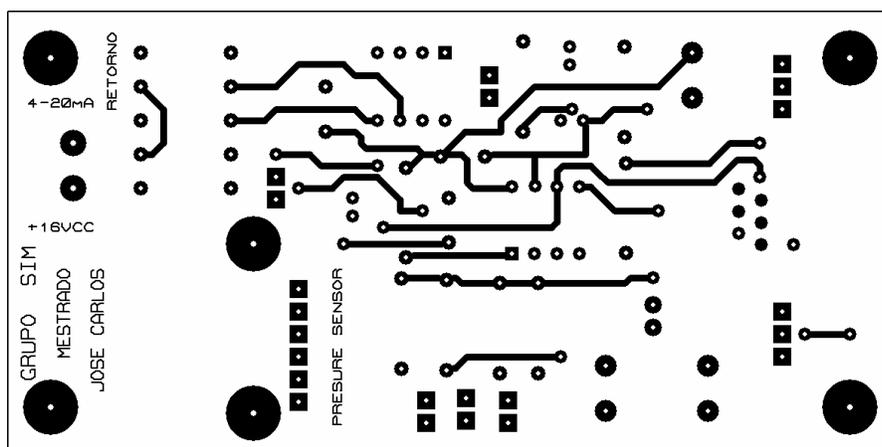


Figura 75: Layout PCI do módulo sensor de pressão lado superior

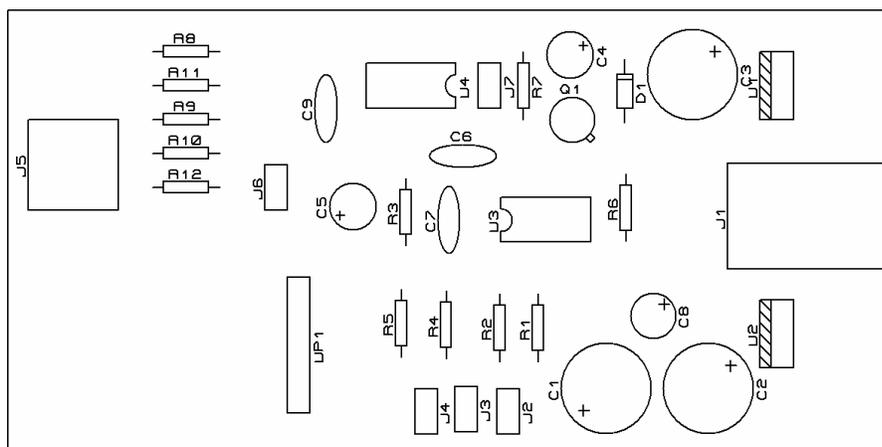


Figura 76: Layout PCI do módulo sensor de pressão lado superior máscara de componentes

APÊNDICE-C (Módulo MMI para medida de pH)

Esquema do adendo para compatibilizar amplificador de ISE/ISFET com a norma IEEE 1451.4, conforme figura 77.

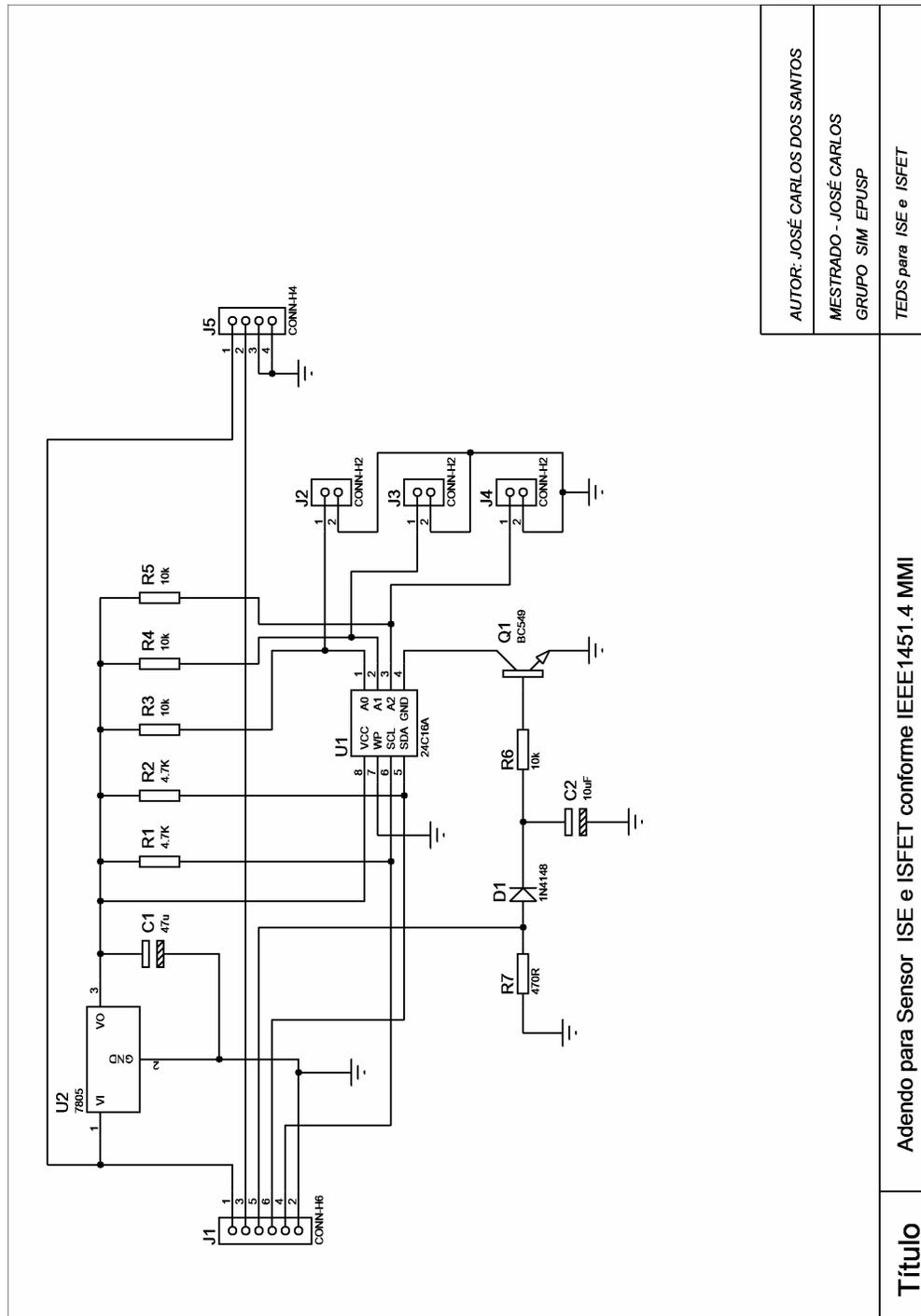


Figura 77: Esquema da placa adendo para sensor ISE/ISFET

Layout da placa de circuito impresso adendo para sensor ISE, conforme figura 78.

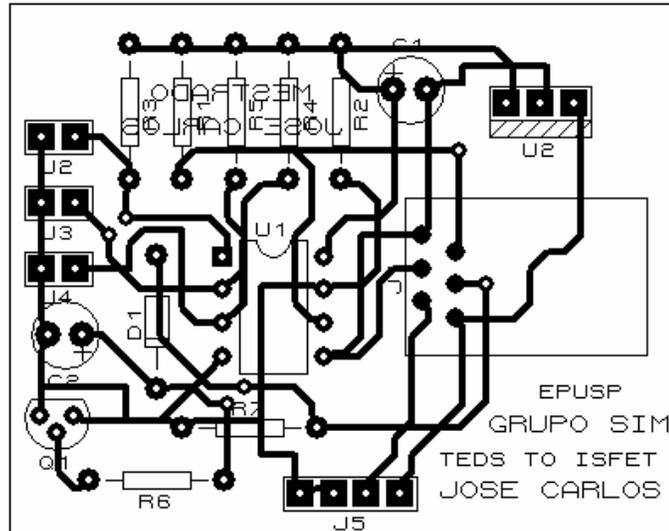


Figura 78: Layout da placa de circuito impresso adendo para sensor ISE/ISFET

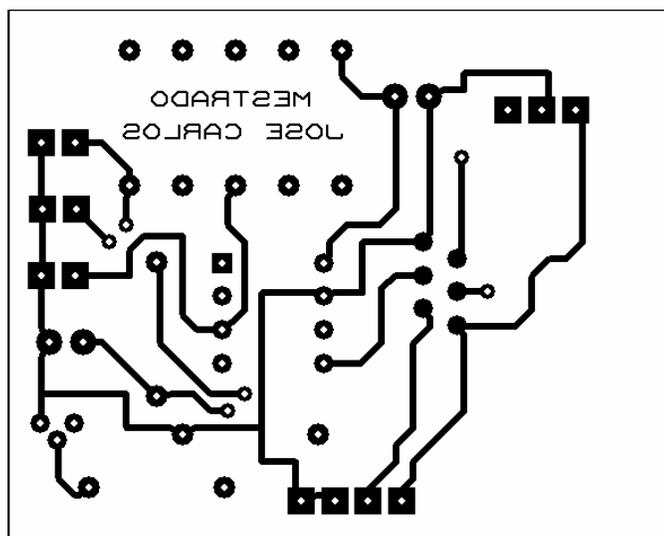


Figura 79: Layout da PCI adendo para sensor ISE/ISFET lado inferior

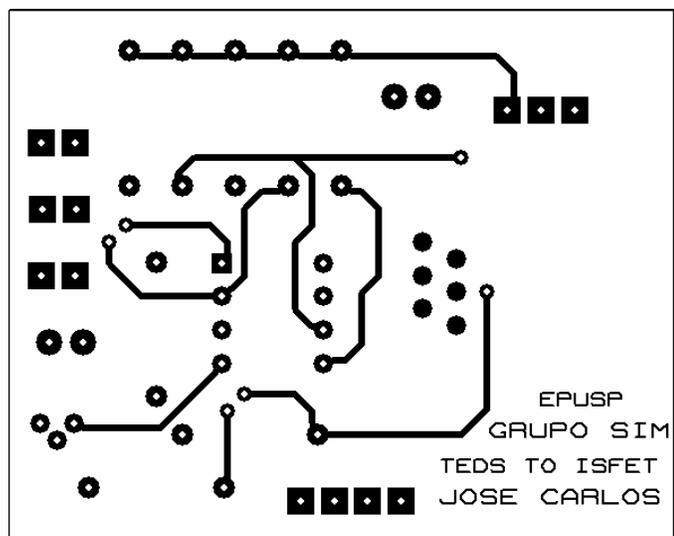


Figura 80: Layout da PCI adendo para sensor ISE/ISFET lado superior

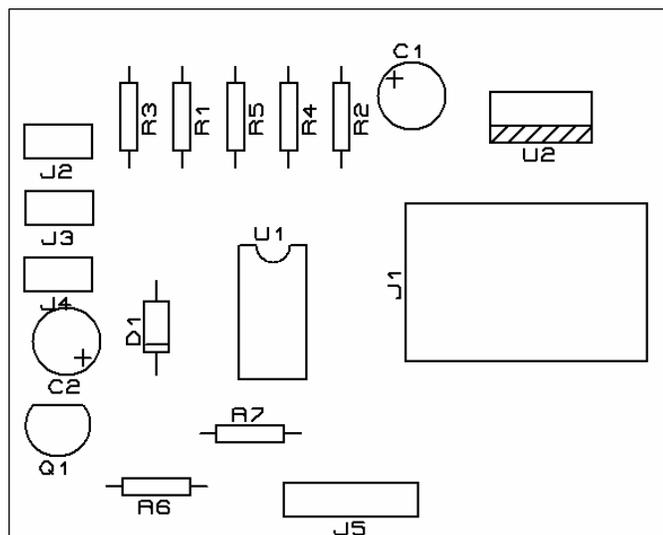


Figura 81: Layout da PCI ISE/ISFET lado superior da máscara de componentes

Esquema elétrico da placa amplificadora para ISE, conforme figura 82.

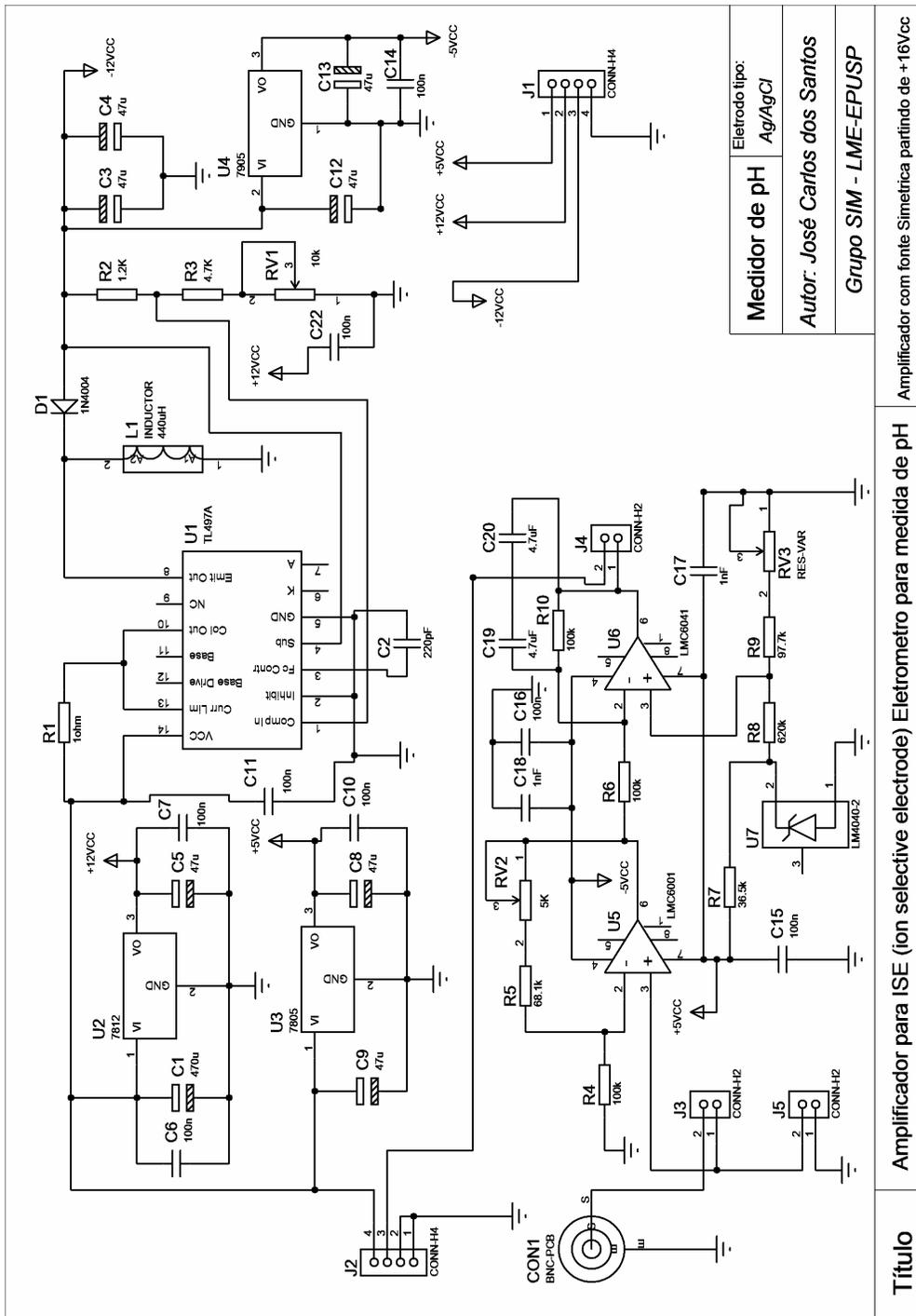


Figura 82: Esquema elétrico do amplificador ISE para sensor de pH

Layout da placa amplificadora para ISE, conforme esquema da figura 83.

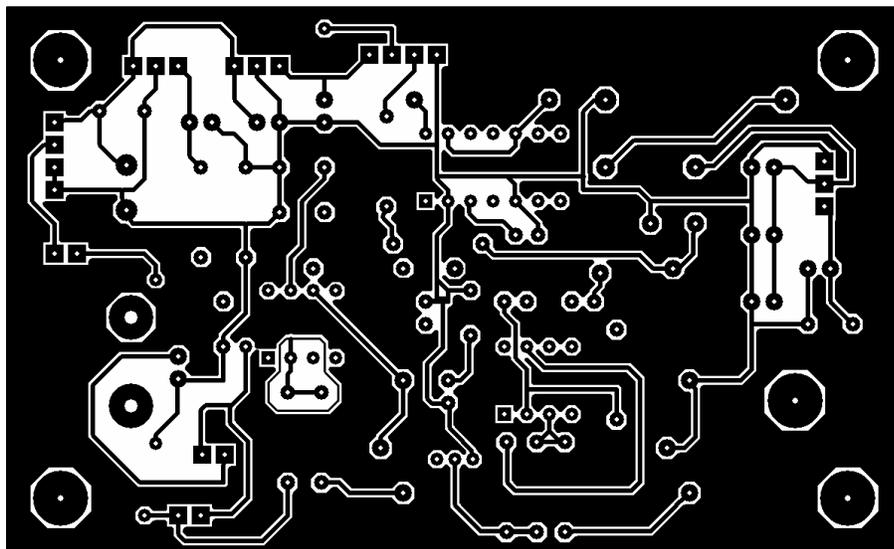


Figura 83: Layout da PCI amplificadora para ISE lado inferior

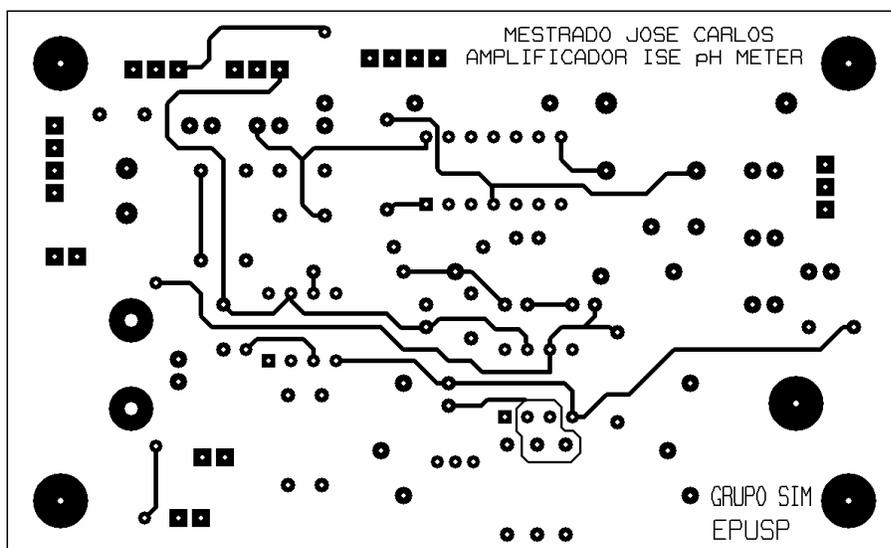


Figura 84: Layout da PCI amplificadora para ISE lado superior

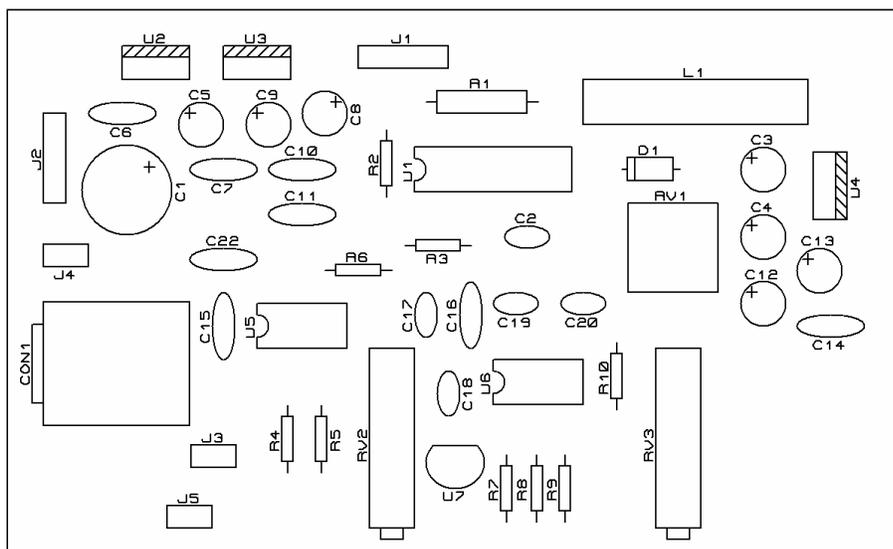


Figura 85: Layout da PCI amplificadora para ISE lado superior da máscara de componentes

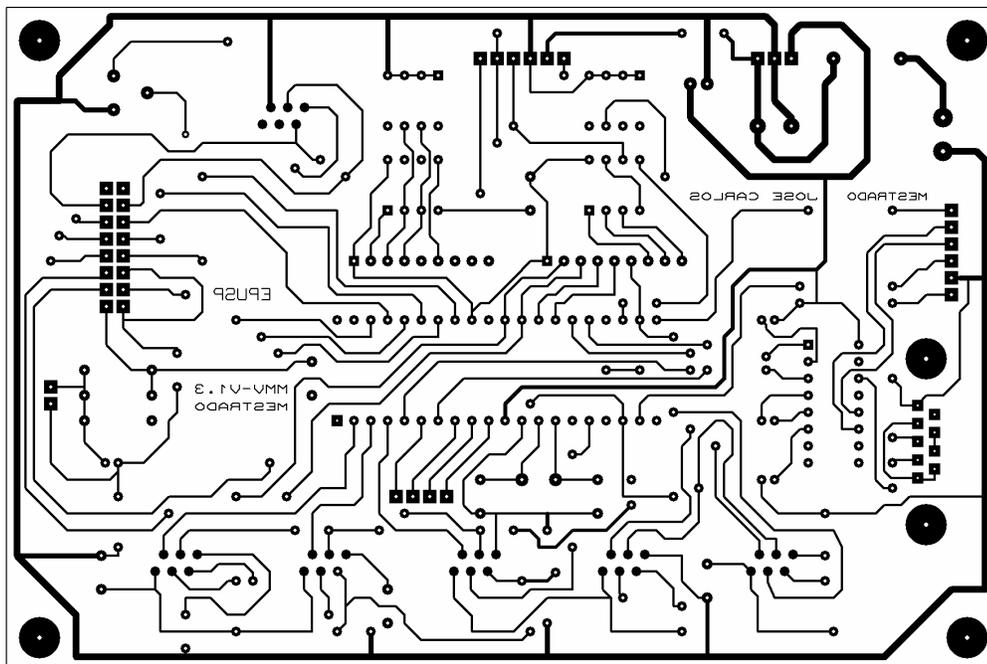


Figura 87: Layout da PCI do módulo STIM lado inferior

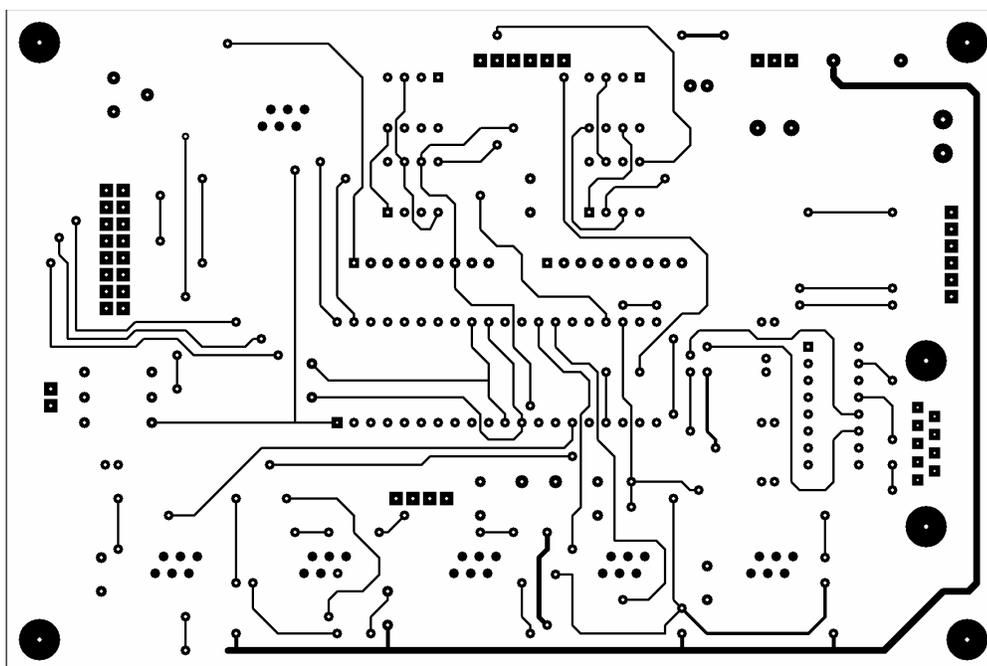


Figura 88: Layout da PCI do módulo STIM lado superior

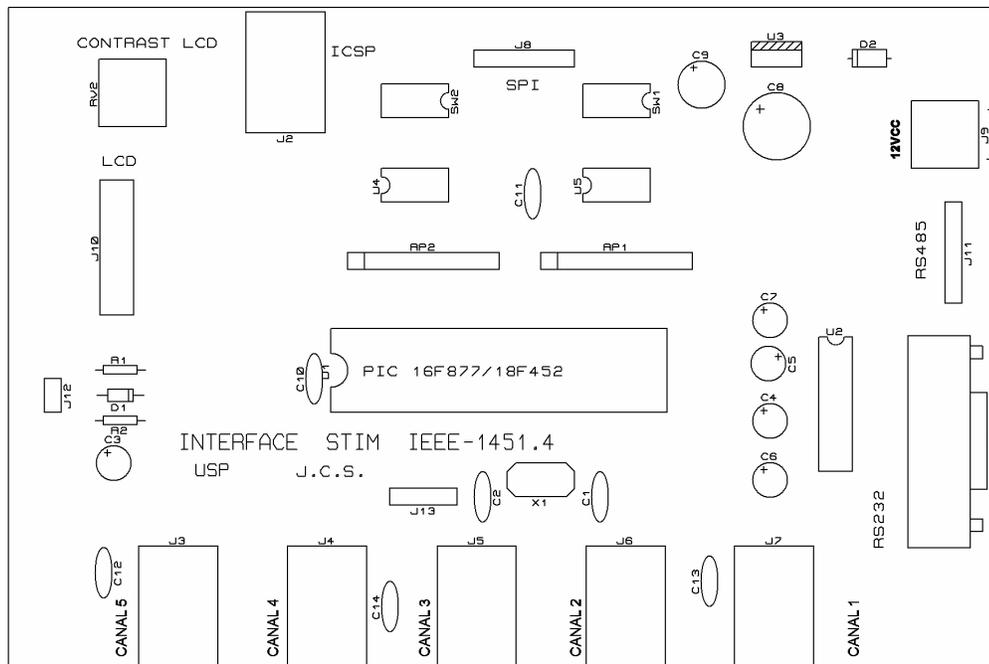


Figura 89: Layout da PCI do módulo STIM lado superior da máscara de componentes

Apêndice-E (Esquema elétrico do módulo de teste com potenciômetro)

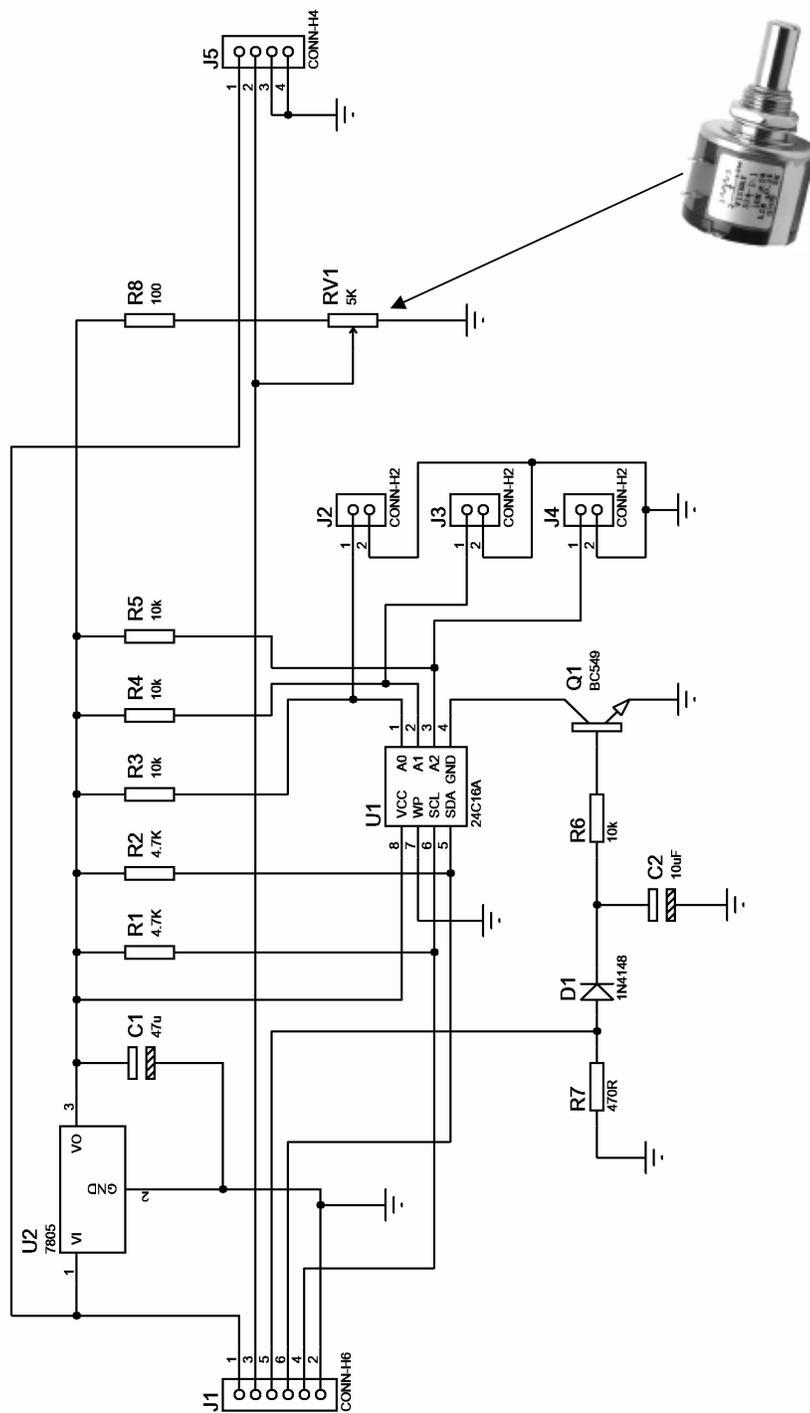


Figura 90: Esquema elétrico do módulo de teste com potenciômetro

AUTOR: JOSÉ CARLOS DOS SANTOS	MESTRADO - JOSÉ CARLOS GRUPO SIM EPUSP	TEDS POT DE PRECISÃO
Circuito de Teste de Tensão com potenciômetro de precisão IEEE1451.4 MMI		Título

Detalhes da implementação

O grande diferencial da aplicação da norma IEEE 1451.4 é que podemos ler um sensor e também os dados que o caracterizam. Estes dados característicos são chamados de TEDS (*Transducer Electronic Data Sheet*). Estes dados estarão armazenados em posições de memória pré-estabelecidas dentro de uma EEPROM 24LC16 que fica localizada na placa do amplificador analógico do sensor. Cada sensor tem sua memória EEPROM com seus respectivos dados que o caracterizam.

Este trabalho permite ler 5 sensores ligados no microcontrolador PIC 16F877A.

Os canais do conversor A/D sempre utilizarão a faixa de tensão de 0 ate 5VCC.

Os sensores estarão conectados nos conectores (J3 – J4 – J5 – J6 – J7).

Podemos observar no esquema elétrico que há um barramento I2C ligado em todos os conectores (J3 – J4 – J5 – J6 – J7), portanto cada sensor ligado nestes conectores estarão com suas respectivas memórias EEPROM ligadas no barramento do sistema.

Note também que no barramento I2C temos mais duas memórias com maior capacidade (24C256) podendo armazenar 12Kbytes de dados por canal. Como os dados são de 10 bits utilizaremos 2 palavras de 8 bits totalizando 16 bits, ou seja, podemos guardar 6144 dados de 16 bits.

Os conectores (J3 – J4 – J5 – J6 – J7) possuem 6 pinos como mostrado na figura 91 e tem as seguintes funções:

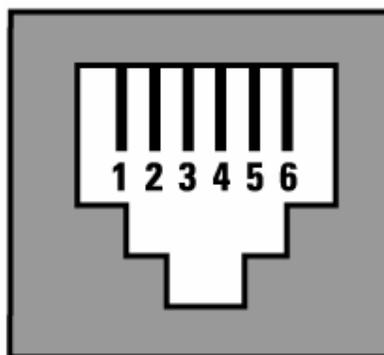


Figura 91: Conector RJ11 -6P

- O pino 1 tem uma tensão de alimentação + 12VCC.
- O pino 2 entrada analógica para conversão A/D.
- O pino 3 está ligado a um I/O do PIC Port D (D7 para pino 3 de J3; D6 para pino3 de J4; D5 para pino 3 de J5; D4 para pino 3 de J6; D3 para pino 3 de J7). NOTE que os pinos 3 de cada conector J estão em nível lógico 1 através de resistores de *pull up*.

- Os pinos 4 e 5 são o barramento I2C respectivamente SCL e SDA, que por sua vez estão ligadas a todas as memórias EEPROM do circuito.
- O pino 6 corresponde ao terra (Vss).
- Na prática os conectores (J3 – J4 – J5 – J6 – J7) são do tipo RJ11 com seis pinos devido ao seu baixo custo e facilidade de montagem, pois o mesmo é crimpado no cabo.

O conector J2 é utilizado para descarregar o programa via circuito de programador, que neste caso utiliza-se o EPIC da *Microengineering Labs*, (www.melabs.com). Porém pode ser utilizado outro somente observando a pinagem.

O conector J1 é um conector DB9 apropriado para comunicação RS232. Podemos observar o uso do *Driver Max 232* de TTL para RS232 que é alimentado por uma única tensão de 5VCC.

O J10 é a saída do *port B* sem o pino RB0 que está ligado no conector J8 para receber dados via SPI no modo escravo (que não vamos implementar nesta aplicação).

O J11 é uma saída TTL serial para implementar RS485 (que não será implementada nesta aplicação).

O J12 é um conector para colocar a chave de *Reset*.

Podemos observar logo abaixo o *layout* reduzido da PCI do Módulo STIM, conforme figura 92 abaixo.

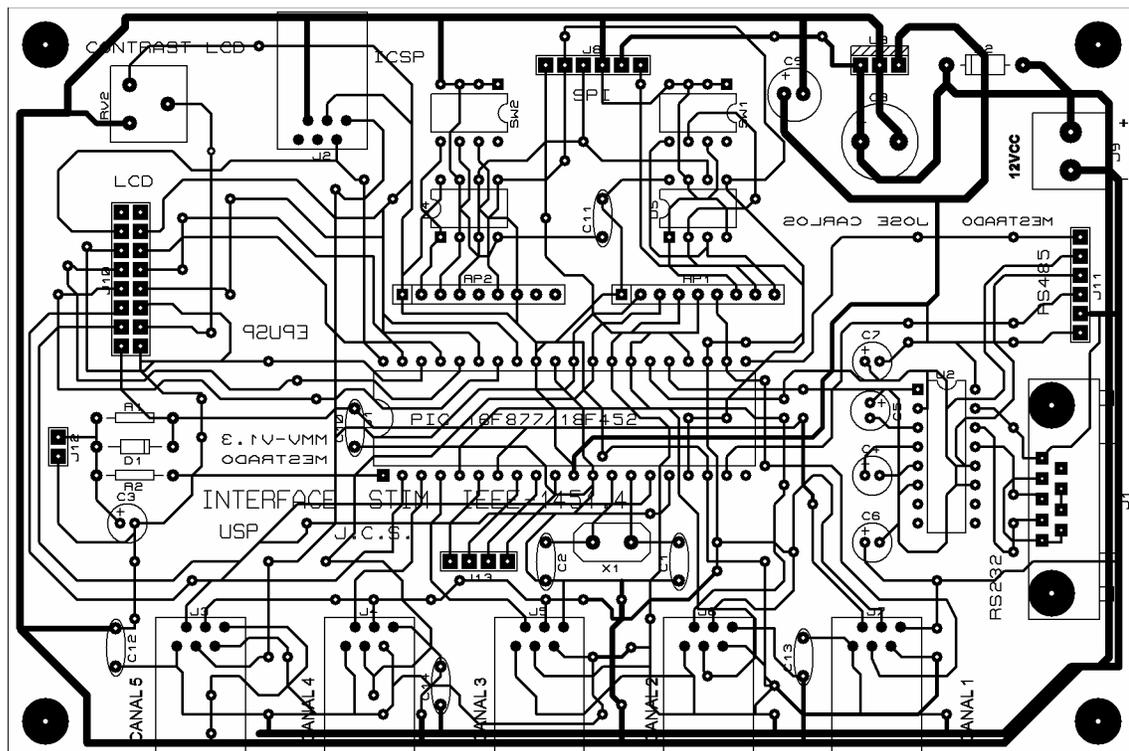


Figura 92: Layout da PCI do Módulo STIM

ANEXO-A (Resumo das Características do LM35)



November 2000

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^\circ\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^\circ\text{C}$ over a full -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $60\ \mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40 to $+110^\circ\text{C}$ range (-10° with improved accuracy). The LM35 series is available pack-

aged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

Features

- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/°C scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at +25°C)
- Rated for full -55 to $+150^\circ\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than $60\ \mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\ \Omega$ for 1 mA load

Typical Applications

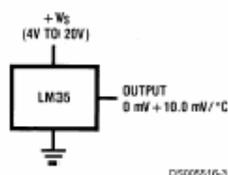
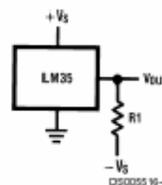


FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor
($+2^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$)



Choose $R_1 = -V_S/50\ \mu\text{A}$
 $V_{\text{OUT}} = +1,500\ \text{mV}$ at $+150^\circ\text{C}$
 $= +250\ \text{mV}$ at $+25^\circ\text{C}$
 $= -550\ \text{mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

TO-92
Plastic Package



BOTTOM VIEW
DS005516-2

Order Number LM35CZ,
LM35CAZ or LM35DZ
See NS Package Number Z03A

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

ANEXO-B (Resumo das Características do Sensor MPX5050)

Freescale Semiconductor
Technical Data

MPX5050
Rev. 7, 10/2004

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPX5050/MPXV5050G series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This patented, single element transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- 2.5% Maximum Error over 0° to 85°C
- Ideally suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Temperature Compensated Over - 40° to +125°C
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Durable Epoxy Unibody Element
- Easy-to-Use Chip Carrier Option

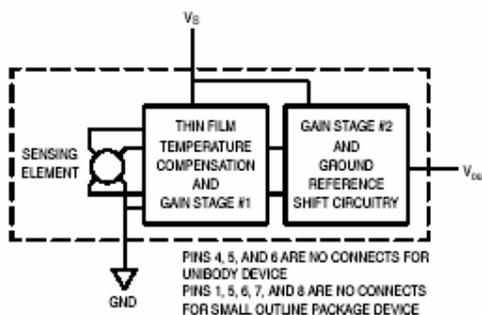
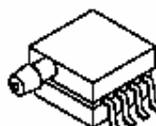


Figure 1. Fully Integrated Pressure Sensor Schematic

SMALL OUTLINE PACKAGE SURFACE MOUNT



MPXV5050GP
CASE 1369



MPXV5050DP
CASE 1351

PIN NUMBER

1	N/C	5	N/C
2	V _b	6	N/C
3	Gnd	7	N/C
4	V _{out}	8	N/C

NOTE: Pins 1, 5, 6, 7, and 8 are internal device connections. Do not connect to external circuitry or ground. Pin 1 is noted by the notch in the lead.

MPX5050 MPXV5050G SERIES

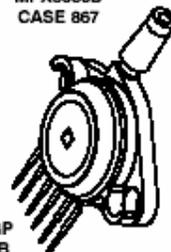
Freescale Semiconductor Preferred Device

INTEGRATED
PRESSURE SENSOR
0 to 50 kPa (0 to 7.25 psi)
0.2 to 4.7 Volts Output

UNIBODY PACKAGE



MPX5050D
CASE 867



MPX5050GP
CASE 867B



MPX5050DP
CASE 867C

PIN NUMBER

1	V _{out}	4	N/C
2	Gnd	5	N/C
3	V _b	6	N/C

NOTE: Pins 4, 5, and 6 are internal device connections. Do not connect to external circuitry or ground. Pin 1 is noted by the notch in the lead.

ANEXO-C (Sensor de pH tipo eletrodo combinado Ag/Ag Cl marca Sensorex²³)

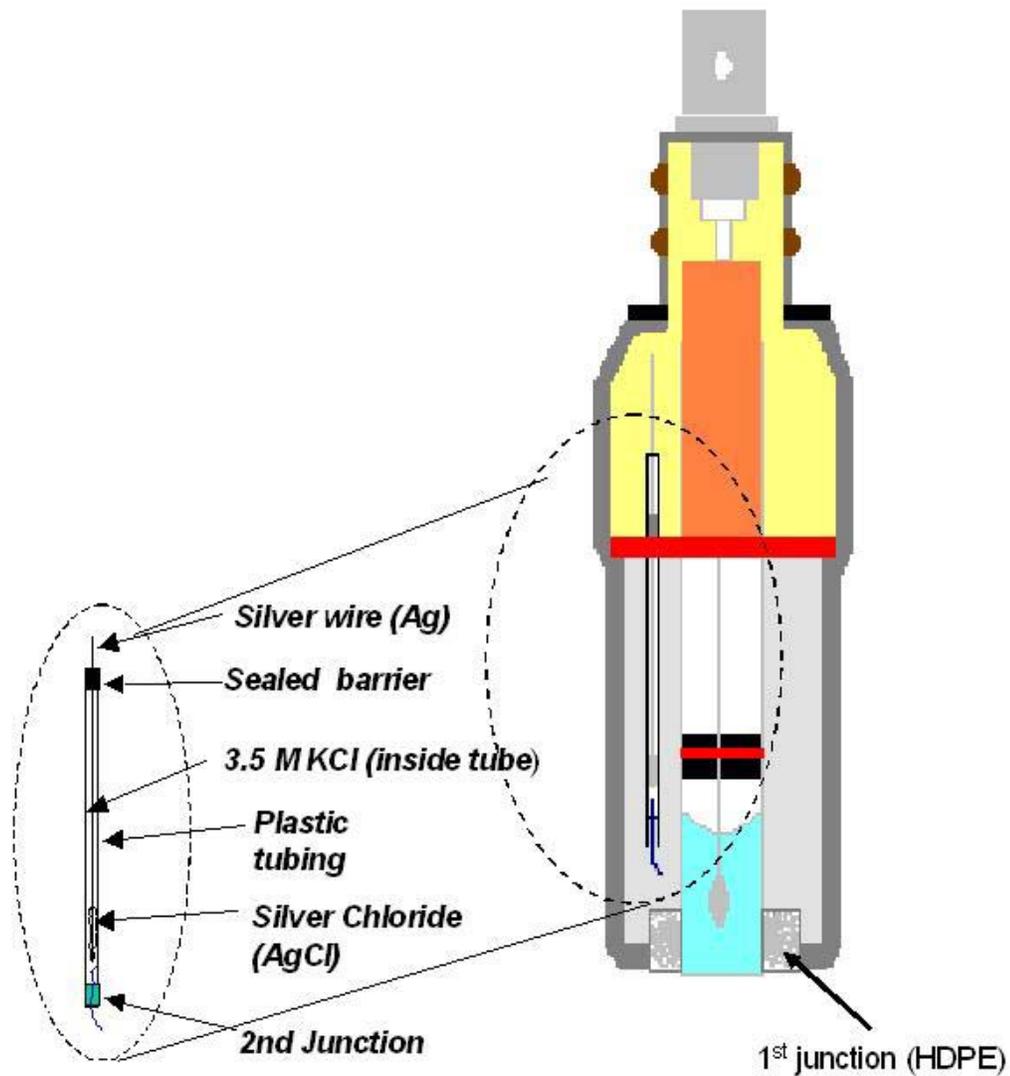


Figura 93: eletrodo combinado de Ag/AgCl

A primeira Junção é constituída de polietileno de alta densidade (HDPE) e a segunda junção é de vidro boro silicato.

²³ Sensorex Inc USA direitos autorais do desenho e marca registrada

ANEXO-D (Características do conversor A/D do PIC 16F877)

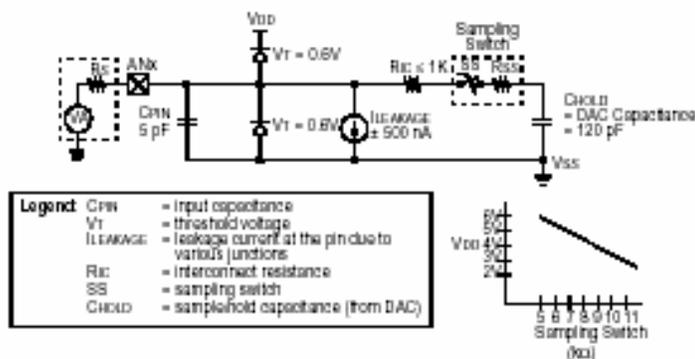


Figura 94: circuito de carga do capacitor *Sample Hold*

A figura 94 mostra um pino do Conversor A/D conectado ao capacitor *Sample Hold*.

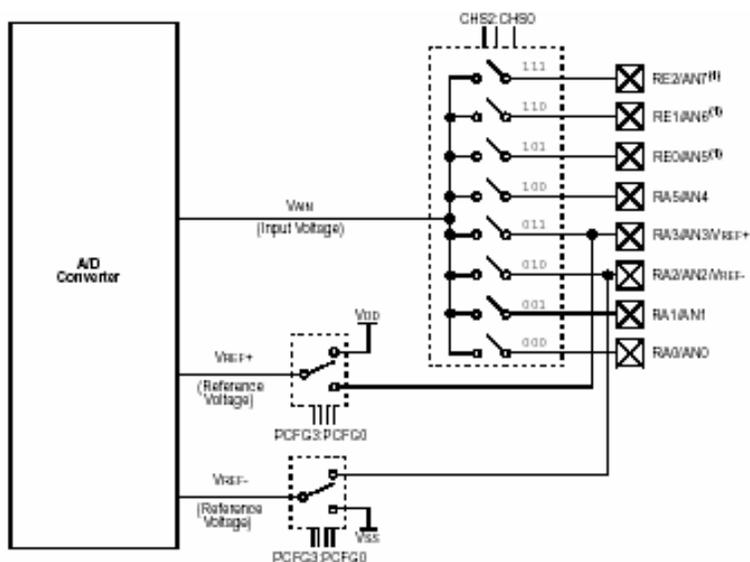


Figura 95: circuito multiplexador do A/D

A figura 95 mostra o conversor A/D ligado ao multiplexador e sistema de chaveamento das referências de tensão. Maiores informações podem ser obtidas na referência [URL 5] Data Sheet to PIC16F87X 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers by Microchip Technology Inc- 2001. Disponível em: <www.microchip.com>.

ANEXO-E (Resumo das Características e mapa de pinos PIC 16F877)

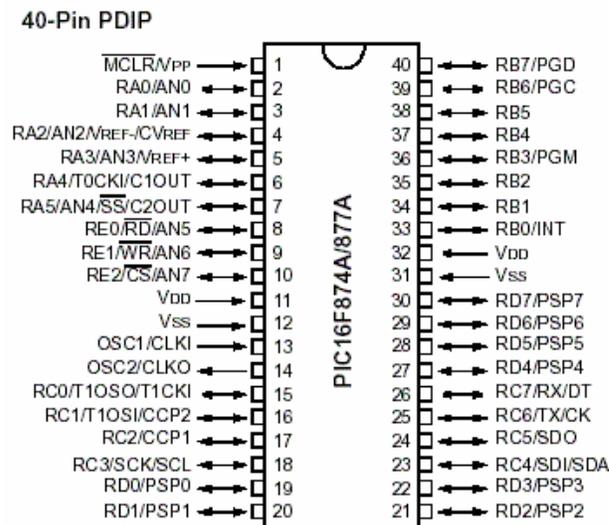


Figura 96: Mapa de pinos do PIC16F877A e suas Funções

O Microcontrolador PIC 16F877A possui as seguintes características:

1. Processador de 8 Bits baseado em arquitetura RISC (computador com ajuste de instruções reduzidas) com apenas 35 instruções. As instruções utilizam apenas um ciclo de máquina 1 μ S exceto a instrução (Goto) de salto que leva 2 μ S utilizando frequência de *clock* de 4MHz, frequência máxima de *clock* 20MHz. Memória flash não volátil de 8Kbytes paginada.
 2. Memória EEPROM interna com 256 Bytes.
 3. Memória RAM de dados 368 Bytes.
 4. 3 temporizadores 2 de 8 bits e 1 de 16 bits.
 5. 8 Canais multiplexados de conversor Analógico para Digital com resolução de 10 bits.
 6. Capacidade de atender diversos tipos de interrupção (14 fontes).
 7. Interface SPI e I2C integradas operando em modo mestre e escravo.
 8. Interface paralela PSP (*Parallel Slave Port*).
 9. Capacidade de ser programado sem a necessidade de remover o microcontrolador do circuito impresso ICSP (circuito programável serialmente na própria PCI).
- Baixo consumo de energia usa tecnologia CMOS.