FERNANDO KEISUKE TANI

**PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTORES
INTELIGENTES BASEADOS NA NORMA IEEE 1451
APLICADOS A REDES LONWORKS**

**São Paulo
2006**

FERNANDO KEISUKE TANI

**PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTORES
INTELIGENTES BASEADOS NA NORMA IEEE 1451
APLICADOS A REDES LONWORKS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

**São Paulo
2006**

FERNANDO KEISUKE TANI

**PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTORES
INTELIGENTES BASEADOS NA NORMA IEEE 1451
APLICADOS A REDES LONWORKS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Sistemas Digitais

Orientador: Prof. Livre-Docente
Carlos Eduardo Cugnasca

**São Paulo
2006**

FICHA CATALOGRÁFICA

Tani, Fernando Keisuke

Proposta de desenvolvimento de transdutores inteligentes baseados na norma IEEE 1451 aplicados a redes LonWorks / F.K. Tani. -- São Paulo, 2006.

151 p.

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

1.IEEE 1451 2.Transdutores inteligentes 3.Redes de controle 4.Automação industrial I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, meus maiores
motivadores, que valorizam e
acreditam nas minhas conquistas
mais do que eu mesmo poderia.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por propiciar um ambiente de estímulo ao meu desenvolvimento pessoal e profissional através do constante apoio, incentivo e amizade.

À Daniela Amano, pela paciência e preciosa companhia durante a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Carlos Eduardo Cugnasca, pela motivação, conselhos e oportunidade.

Ao Prof. Vítor Viegas da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal, por sua pesquisa usada como referência neste trabalho, e pela gentileza de fornecer o programa de testes nela desenvolvido.

Aos professores Antonio M. Saraiva e André Hirakawa, do Laboratório de Automação Agrícola pelo apoio e auxílio.

Aos colegas do LAA, que tornaram o desenvolvimento deste trabalho mais fácil e agradável através do compartilhamento de conhecimento, das conversas e dos momentos de descontração.

Às empresas TAC, Schneider Electric e Conceito Tecnologia pelo fornecimento dos módulos e componentes utilizados neste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Mestrado que possibilitou a realização desta pesquisa.

RESUMO

A busca constante por soluções mais eficientes, tanto no âmbito técnico como econômico, tem levado à crescente adoção de sistemas de automação baseados em redes de controle e transdutores inteligentes. A fragmentação desse mercado, no entanto, decorrente da proliferação de inúmeros protocolos e especificações para as redes de controle, impõe restrições e entraves ao desenvolvimento dos transdutores e dos sistemas de automação. A família de normas IEEE 1451 procura atenuar esse problema propondo interfaces padronizadas entre os transdutores e as redes, permitindo separar o projeto do transdutor da escolha da rede de controle. Neste trabalho foi desenvolvido um transdutor inteligente baseado na norma IEEE 1451.2 (STIM) e sua interface para a rede de controle LonWorks (NCAP). Através do desenvolvimento e avaliação dos protótipos foi verificada a aplicabilidade da norma e dos conceitos gerais da IEEE 1451, comprovando ainda seu uso em uma rede para a qual, no presente momento, não se tem conhecimento de solução similar. Constatou-se também que um transdutor inteligente baseado na IEEE 1451.2 pode ser desenvolvido com ferramentas e componentes comerciais de fácil acesso e baixo custo, e que é possível agregar os benefícios da IEEE 1451 às qualidades presentes nas redes LonWorks. Verificou-se ainda que a aceitação da IEEE 1451 no mercado é ainda incipiente, sendo imprescindível a publicação das demais normas que compõe a família para facilitar e incentivar sua adoção e disseminação.

Palavras-chave: IEEE 1451. Transdutores inteligentes. Redes de controle. LonWorks. Automação industrial.

ABSTRACT

The need for more efficient and cost-effective solutions in the control and automation market drives the increasing demand for systems based on control networks and smart transducers. However, the fragmented nature of the control network market hinders the development of solutions based on such technologies. The IEEE 1451 family of standards tries to solve this problem by specifying a common set of interfaces between the transducers and the control networks, isolating the transducer's project from the choice of networks. In this work, a smart transducer based on the IEEE 1451.2 standard (STIM) and its interface module to a LonWorks network (NCAP) were developed. Through the development and evaluation of the prototypes, the applicability of the standard and the concepts involved in the IEEE 1451 were verified. It was confirmed that a smart transducer based on the IEEE 1451.2 standard can be developed with low-cost, off-the-shelf components and software tools, and that it is possible to combine the benefits of the IEEE 1451 with the qualities of the LonWorks system. It was also perceived that the acceptance of the IEEE 1451 in the market is quite low, and that the release of the remaining standards that make up the IEEE 1451 family is essential for its success.

Keywords: IEEE 1451. Smart transducers. Control networks. LonWorks. Industrial automation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Transdutores independentes de rede. Baseado em Johnson et al. (2001)...	28
Figura 2. Representação da família IEEE 1451. Baseado em Lee (2004b)	30
Figura 3. Modelo de transdutor inteligente ligado à rede (VIEGAS, 2003).....	31
Figura 4. STIM e NCAP ligados a uma rede (VIEGAS, 2003).....	33
Figura 5. Interface IEEE 1451.3. Baseado em IEEE (2004a).....	35
Figura 6. Espectro utilizado pela IEEE 1451.3. Baseado em IEEE (2004a)	36
Figura 7. Transdutor analógico com interface mista. Baseado em NIST (2004).....	37
Figura 8. Relação entre 1451.5 e 1451.0. Baseado em Coleman (2004)	40
Figura 9. Representação da IEEE 1451.6. Baseado em IEEE (2005b).....	41
Figura 10. Estrutura de endereçamento. Baseado em IEEE (1998).....	48
Figura 11. Transmissão de dados e disparo. Baseado em IEEE (1998).....	49
Figura 12. Funcionamento das máscaras de interrupção. Baseado em IEEE (1998).	51
Figura 13. Execução do disparo. Baseado em IEEE (1998)	56
Figura 14. Leitura e escrita de um <i>frame</i> de dados. Baseado em IEEE (1998) e Viegas (2003).....	57
Figura 15. Foto dos Sensirion SHTxx (SENSIRION, 2005a)	60
Figura 16. Condições de funcionamento do Sensirion SHTxx. Baseado em Sensirion (2005a)	61
Figura 17. Representação da implementação de hardware	62
Figura 18. Módulo STIM desenvolvido.....	63
Figura 19. Fluxograma do programa do STIM	65
Figura 20. Módulo TP/XF-78	78
Figura 21. Circuito típico para pinos de serviço (~SERVICE) e <i>reset</i> (~RESET) (ECHELON, 1996)	79
Figura 22. Placa adaptadora com hardware auxiliar	80
Figura 23. Módulo TP/XF-78 acoplado à placa auxiliar	80
Figura 24. NCAP desenvolvido	82
Figura 25. Planejamento dos testes	92
Figura 26. Teste de integração entre SHT71 e STIM	93
Figura 27. Dados de temperatura do SHT71.....	95
Figura 28. Dados de umidade relativa do SHT71	96

Figura 29. Umidade relativa medida pelo SHT71 e calculada pelo STIM	97
Figura 30. Teste do STIM através do programa LabView	99
Figura 31. Conector da TII adaptado à porta paralela do PC.....	99
Figura 32. Interface do aplicativo LabView utilizado na avaliação do STIM.....	100
Figura 33. Visualização das medidas de umidade relativa do STIM.....	101
Figura 34. Dados das estruturas TEDS do STIM.....	102
Figura 35. Sistema de desenvolvimento e teste do nó Lonworks	103
Figura 36. Tela <i>Browser</i> do Nodebuilder.....	104
Figura 37. Interface para alteração do valor de variáveis de rede no NodeBuilder .	105
Figura 38. Visualização da memória TEDS no Neuron C Debugger	106
Figura 39. Visão do sistema completo	107
Figura 40. Gerenciamento do transdutor inteligente através do TAC Vista Explorer	108
Figura 41. Monitoração da variável de rede de umidade com dados gerados artificialmente pelo STIM	109
Figura 42. Monitoração da variável de rede de umidade durante posicionamento do sensor próximo a um recipiente com água.....	110
Figura 43. Monitoração remota dos dados coletados pelo STIM	112
Figura 44. Protocolo de comunicação do Sensirion SHT71. Baseado em Sensirion (2005a)	143
Figura 45. Máscara de interrupção padrão inibindo a geração do sinal de interrupção em função da ativação dos bits <i>operational</i> e <i>trigger acknowledge</i> do registrador de estado padrão.....	149
Figura 46. Registradores de estado após a execução do comando de <i>reset</i>	149
Figura 47. Máscara de interrupção padrão inibindo a geração do sinal de interrupção em função da ativação dos bits <i>operational</i> e <i>trigger acknowledge</i> do registrador de estado padrão.....	150
Figura 48. Registradores de estado após a execução do comando de <i>reset</i>	150
Figura 49. Circuito do STIM.....	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estado das normas da família IEEE 1451	29
Tabela 2 – Linhas da TII	55
Tabela 3 – Principais características do Sensirion SHT71.....	61
Tabela 4 – Pinagem da TII.....	63
Tabela 5 – Pinagem da interface com o SHT71.....	64
Tabela 6 – Conector P1 (ECHELON, 1996).....	78
Tabela 7 – Conector P2 (ECHELON, 1996).....	79
Tabela 8 – Linhas TII.....	81
Tabela 9 – Relação entre pinos de E/S do Neuron Chip e TII.....	82
Tabela 10 – Linhas Neurowire.....	85
Tabela 11 – SNVT_lev_percent (ECHELON, 2002)	88
Tabela 12 – Taxas de comunicação da TII.....	91
Tabela 13 – Comparação entre cálculo manual da umidade relativa e valor obtido no STIM	97
Tabela 14 – Variáveis de rede do NCAP	105
Tabela 15 – Relação dos endereços de função e suas descrições (IEEE, 1998)	140
Tabela 16 – Tabela de comandos (IEEE, 1998).....	141
Tabela 17 – Registrador de estado padrão (<i>standard status</i>) (IEEE, 1998).....	141
Tabela 18 – Registrador de estado auxiliar (<i>auxiliar status</i>) (IEEE, 1998).....	142
Tabela 19 – Estrutura de dados do Meta-TEDS (IEEE, 1998)	144
Tabela 20 – Estrutura de dados do Channel TEDS (IEEE, 1998)	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	Acknowledge
A/D	Analógico/Digital
ANSI	American National Standards Institute
API	Application Programming Interface
bps	bits por segundo
CAN	Controller Area Network
CLP	Controlador Lógico Programável
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CRC	Cyclic Redundancy Check
CPU	Central Processing Unit
D/A	Digital/Analógico
EIA	Electronic Industries Alliance
E/S	Entradas e Saídas
FTP	File Transfer Protocol
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
Hz	Hertz
ID	Identifier
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
kbps	1000 bits por segundo
LAN	Local Area Network
LCD	Liquid Crystal Display
LNS	LonWorks Network Services
LON	Local Operation Network
Mbps	1.000.000 bits por segundo
NV	Network Variable
OSI	Open System Interconnection

PC	Personal Computer
PCI	Peripheral Component Interconnect
PCLTA	PC LonTalk Adapter
SNVT	Standard Network Variable Type
SPI	Serial Peripheral Interface
TCP	Transmission Control Protocol
USB	Universal Serial Bus

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	OBJETIVO.....	22
1.3	CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO	23
2	NORMA IEEE 1451	25
2.1	INTRODUÇÃO	25
2.2	ARQUITETURA	27
2.3	IEEE 1451.1	31
2.4	IEEE 1451.2	32
2.5	IEEE 1451.3	34
2.6	IEEE 1451.4	37
2.7	IEEE P1451.0.....	38
2.8	IEEE P1451.5.....	39
2.9	IEEE P1451.6.....	40
2.10	CONSIDERAÇÕES E PERSPECTIVAS	42
3	DESENVOLVIMENTO DE UM STIM.....	45
3.1	DETALHAMENTO DA IEEE 1451.2	45
3.1.1	Especificação funcional	46
3.1.1.1	Tipos de canais.....	46
3.1.1.2	Endereçamento.....	47
3.1.1.3	Transmissão de dados e disparo.....	48
3.1.1.4	Estado e interrupção.....	49
3.1.1.5	Controle.....	51
3.1.1.6	Hot-swap	52
3.1.2	Descrição da TEDS	52
3.1.3	Especificação da TII.....	54
3.2	ESCOLHA DE COMPONENTES	58
3.2.1	Microcontrolador	58
3.2.2	Transdutor	60
3.3	O HARDWARE.....	62

3.4	O SOFTWARE	64
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
4	DESENVOLVIMENTO DE UM NCAP BASEADO NA TECNOLOGIA LONWORKS	69
4.1	A TECNOLOGIA LONWORKS	69
4.1.1	Neuron Chip.....	70
4.1.2	Protocolo LonTalk	72
4.1.3	Associação LonMark	74
4.1.4	Ferramentas	75
4.1.5	LonWorks e a IEEE 1451.1	76
4.2	DESENVOLVIMENTO DE UM NÓ LONWORKS.....	77
4.3	O HARDWARE DO NCAP	81
4.4	O SOFTWARE DO NCAP.....	83
4.4.1	Protocolos.....	83
4.4.1.1	Transferência de bits	84
4.4.1.2	Transferência de bytes.....	86
4.4.1.3	Transferência de <i>frame</i> de dados.....	86
4.4.2	Acesso aos dados do STIM.....	87
4.4.2.1	Dados do transdutor (medida de umidade)	87
4.4.2.2	Estado.....	89
4.4.2.3	Máscaras de interrupção.....	89
4.4.2.4	TEDS.....	89
4.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO NCAP.....	90
5	TESTES E AVALIAÇÃO DO SISTEMA	92
5.1	PLANEJAMENTO DOS TESTES.....	92
5.2	TESTE 1: INTEGRAÇÃO DO SHT71 NO STIM.....	93
5.3	TESTE 2: AVALIAÇÃO DO STIM	98
5.4	TESTE 3: AVALIAÇÃO DO NCAP	102
5.5	TESTE 4: SISTEMA COMPLETO.....	106
5.5.1	Integração.....	108
5.5.2	Interoperabilidade	110
5.5.3	Acesso remoto.....	111

5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
6	DISCUSSÕES.....	114
6.1	DESENVOLVIMENTO DO STIM.....	114
6.2	ROTEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM STIM.....	116
6.3	DESENVOLVIMENTO DO NCAP.....	117
6.4	INTEROPERABILIDADE.....	118
6.5	ACESSO REMOTO	119
6.6	ADOÇÃO DA IEEE 1451 EM REDES LONWORKS.....	119
6.7	A IEEE 1451	121
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
7.1	CONCLUSÕES	124
7.2	CONTRIBUIÇÕES.....	126
7.3	MELHORIAS	127
7.4	TRABALHOS FUTUROS	128
7.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129
	REFERÊNCIAS.....	130
	REFERÊNCIAS RECOMENDADAS	138
	APÊNDICE A – DETALHES DA NORMA IEEE 1451.2.....	140
	APÊNDICE B – PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO DO SENSOR SENSIRION SHT71	143
	APÊNDICE C – DETALHAMENTO DA TEDS.....	143
	APÊNDICE D – IMPLEMENTAÇÃO DA TEDS NO STIM.....	147
	APÊNDICE E – EXEMPLOS DE VERIFICAÇÃO DOS REGISTRADORES DE ESTADO NO LABVIEW	149
	APÊNDICE F – EXEMPLOS DE VERIFICAÇÃO DOS REGISTRADORES DE ESTADO NO NODEBUILDER.....	150
	APÊNDICE G – CIRCUITO DO STIM	151

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Os sensores e atuadores desempenham um papel cada vez mais importante no desenvolvimento humano. Impulsionada pela demanda crescente por sistemas automatizados, sua utilização já pode ser vista nos mais diversos campos de aplicação, e não somente no controle de processos industriais. Aeroespacial, automotiva, biomédica, automação predial, e agrícola são apenas alguns exemplos de áreas de aplicação (LEE, 2001).

O avanço da tecnologia de sensoriamento e atuação acompanha e incentiva a evolução dos sistemas de automação. Influenciados principalmente pelo constante aumento das exigências do mercado e pelo desenvolvimento da microeletrônica, os paradigmas dos sistemas de automação têm sofrido mudanças significativas nas últimas décadas (SHICKHUBER; MCCARTHY, 1997).

Com o início da utilização de computadores no controle de processos, os painéis de controle fixos, baseados em relés, foram gradativamente substituídos por sistemas digitais, mais flexíveis e escaláveis. Conforme estes controladores digitais ganharam maior confiabilidade e robustez e diminuíram em tamanho e custo, acabaram se tornando um padrão na indústria na forma dos conhecidos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) (BRYAN; BRYAN, 1997).

Apesar da grande popularidade dos CLPs, sua utilização em processos cada vez maiores e mais complexos tem se mostrando complicada e custosa. Sua arquitetura centralizada, que concentra todo o processamento e tratamento das entradas e saídas do processo em um único ponto, implica em grandes despesas com cabeamento, instalação e manutenção do sistema de controle (LEE, 2001; SHICKHUBER; MCCARTHY, 1997).

Uma forma encontrada para atenuar este problema foi o emprego de módulos de entrada e saída (E/S) mais próximos do processo, capazes de concentrar as informações de sensores e atuadores e realizar sua transmissão ao controlador central de forma digital através de um barramento de comunicação serial, também conhecido

como barramento de campo ou *fieldbus* (SHICKHUBER; MCCARTHY, 1997). A principal vantagem decorrente dessa nova abordagem foi a redução do cabeamento e conseqüente redução dos custos do sistema de controle.

A utilização da comunicação digital nos sistemas baseados em *fieldbus* e o desenvolvimento da microeletrônica abriram espaço para o desenvolvimento dos transdutores (sensores e atuadores) inteligentes. Com o barateamento da tecnologia de semicondutores, foi possível agregar aos transdutores a capacidade de comunicação digital através da inclusão de microprocessadores nos próprios dispositivos. A partir desta capacidade de processamento, os transdutores passaram a agregar as funções de comunicação, digitalização, tratamento dos sinais e até mesmo a execução de aplicações e lógicas de controle (LEE, 2001; TAN; TANG, 2003).

Surge a partir daí um novo paradigma de automação, baseado em sistemas distribuídos e redes de controle. Nestes sistemas a comunicação é feita de forma digital, através do barramento de campo (*fieldbus*), ou rede de controle, que interliga sensores e atuadores inteligentes sem a necessidade de um controlador central. A lógica de controle é realizada em cada sensor e atuador sendo a inteligência do sistema distribuída pelos dispositivos. Esta nova arquitetura provê maior flexibilidade, escalabilidade e reduz consideravelmente a necessidade de cabeamento, diminuindo os custos e simplificando o sistema de automação (ECHELON, 1999; LEE, 2001; MURUGESHAN, 2003; SHICKHUBER; MCCARTHY, 1997).

Nos últimos anos tem-se verificado uma tendência à adoção de soluções baseadas em sistemas distribuídos (MAHALIK; LEE, 2002; RAJI, 2003; SHICKHUBER; MCCARTHY, 1997) devido às suas vantagens e à crescente pressão do mercado por soluções economicamente mais viáveis e mais eficientes. Com o aumento da complexidade dos sistemas de controle, a estrutura dos sistemas centralizados vem sendo sobrecarregada devido ao aumento da quantidade e qualidade das informações de controle geradas e ao aumento do desempenho dos sensores e atuadores. Nos sistemas distribuídos, por outro lado, a distribuição do processamento pela rede elimina a necessidade de um processador central de grande

capacidade e melhora a robustez do sistema, pois remove o possível gargalo e ponto central de falha (MAHALIK; LEE, 2002).

O desenvolvimento de soluções baseadas em redes de controle não é, no entanto, trivial. O mercado de automação atual se encontra muito fragmentado. A demora na definição de um padrão aberto para os barramentos de campo e as redes de controle acabou resultando em diversas especificações de diferentes fabricantes, que atendem a diferentes nichos de aplicação (MAHALIK; LEE, 2002; SHICKHUBER; MCCARTHY, 1997). Algumas das especificações existentes atualmente são: Building Automation Control Network (BACnet), BITBUS, CEBus, ControlNet, Controller Area Network (CAN), Ethernet, Foundation Fieldbus, Interbus, LonWorks, Modbus, Profibus e WorldFIP (LEE, 2001; MURUGESHAN, 2003; SHICKHUBER; MCCARTHY, 1997).

Como não existe um padrão universal de comunicação ou de interfaces, os fabricantes de transdutores se vêem obrigados a tentar desenvolver soluções próprias para cada rede existente. No entanto, criar interfaces de comunicação entre os transdutores inteligentes e toda essa variedade de especificações requer grande esforço e representa custos elevados (IEEE, 1998). A falta de interoperabilidade e padronização entre as especificações acaba, muitas vezes, levando ao desenvolvimento de soluções fechadas, baseadas em redes proprietárias sobre as quais os fabricantes já possuem domínio, reduzindo os seus custos de desenvolvimento, mas em contrapartida limitando a abrangência de seus produtos. O mercado como um todo é prejudicado por uma menor disponibilidade de produtos, custos mais elevados e dificuldades no desenvolvimento e utilização dos transdutores inteligentes.

Uma possível solução para este problema seria a adoção de uma especificação padrão para os transdutores e a rede de controle. Isto facilitaria o desenvolvimento de sensores e atuadores inteligentes e incentivaria seu uso. No entanto, a dificuldade inerente a esta solução seria determinar uma tecnologia que atendesse às diferentes necessidades do mercado. É improvável que se encontre, ou desenvolva, uma única especificação adequada a todo tipo de aplicação.

Outra perspectiva seria a convergência natural do mercado para apenas uma das tecnologias já existentes. Este cenário também é improvável, ao menos no curto e médio prazo, pois cada qual apresenta vantagens e desvantagens em diferentes nichos de aplicação¹ (LEE, 2001).

Tendo em vista esse cenário, o Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) junto com o National Institute of Standards and Technology (NIST) e representantes da indústria promoveram um esforço conjunto, com o intuito de discutir e possivelmente encontrar uma solução para essa falta de padronização (VIEGAS, 2003). Desse esforço surgiu uma nova abordagem, formalizada na forma de uma família de normas denominada IEEE 1451.

A família de normas IEEE 1451 procura atenuar o problema propondo padrões para as interfaces entre os transdutores e as redes de controle (JOHNSON, 1997) sem alterar as tecnologias existentes ou impor uma nova especificação de rede de controle. O intuito é permitir a separação entre a escolha dos transdutores e a escolha da rede de controle por meio da implementação de um conjunto de interfaces comuns entre eles (IEEE, 1998). Através destas interfaces padronizadas, os transdutores podem ser conectados às diversas redes de controle já disponíveis, tornando-se intercambiáveis e interoperáveis.

Outra questão abordada pela norma é a padronização da *Transducer Electronic Data Sheet* (TEDS). Esta documentação eletrônica contém informações descritivas do transdutor inteligente e tem como finalidade proporcionar funcionalidades *plug-and-play* ao dispositivo. Aliando a TEDS às interfaces padronizadas pela IEEE 1451, têm-se transdutores inteligentes que podem ser conectados a qualquer rede de controle com toda a facilidade de auto-identificação (LEE, 2004a).

No âmbito dos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Automação Agrícola (LAA) da EPUSP a tecnologia de rede de controle LonWorks tem se

¹ Existe, no entanto, a expectativa por uma parte do mercado que as redes Ethernet venham a se tornar um padrão na área de automação. Uma discussão mais abrangente sobre a utilização da Ethernet pode ser vista na página *The Online Industrial Ethernet Book* disponível em: <<http://ethernet.industrial-networking.com/default.asp>>.

destacado dentre os diversos projetos desenvolvidos. Amplamente utilizada em diversos campos, mas principalmente na automação predial, esta tecnologia se apóia no padrão ANSI/EIA 709.1 (ECHELON, 1999) que define um protocolo aberto de comunicação projetado especificamente para suprir os requisitos de sistemas de controle distribuído. No mercado europeu, por exemplo, ela já faz parte do padrão para redes de automação predial, normalizada pela prEN 14908 (ECHELON, 2005b).

A afinidade entre o controle de ambientes prediais e o controle climático de estufas confere a esta tecnologia um apelo grande na área de automação agrícola. Pereira (2006) apresenta um estudo detalhado sobre a aplicação desta tecnologia em um sistema de controle distribuído para estufas, discutindo as vantagens desta abordagem sobre soluções centralizadas como as baseadas em CLPs. O fato de esta tecnologia suportar diversos meios físicos de comunicação, dentre eles o par trançado, sem fio e a rede elétrica, contribui para sua flexibilidade e aplicabilidade no campo agrícola.

Outro ponto positivo decorrente do uso desta tecnologia é a facilidade de desenvolvimento de novos projetos de sistemas de controle. O sistema LonWorks, que segue o modelo de referência *Open Systems Interconnect* (OSI) (TANENBAUM, 2003) da *International Organization for Standardization* (ISO), permite ao projetista se focar apenas na camada de aplicação da rede, sendo o restante da implementação tratado automaticamente pelo sistema.

A tecnologia LonWorks possibilita o desenvolvimento de dispositivos interoperáveis através da implementação do protocolo ANSI/EIA 709.1, também conhecido como LonTalk, e da atuação do órgão normalizador LonMark (ECHELON, 1999; LONMARK, 2005). No entanto, esta interoperabilidade se restringe às redes LonWorks, uma vez que estes dispositivos não são compatíveis com as especificações de outras redes de controle.

Aliar a IEEE 1451 à tecnologia LonWorks apresenta um apelo muito grande, pois pode, potencialmente, ampliar as vantagens já proporcionadas por esta tecnologia, eliminando a necessidade de se adquirir, ou desenvolver, dispositivos específicos para redes LonWorks, sem comprometer as funcionalidades que esta fornece. Alguns dos pontos positivos que podem decorrer desta abordagem são:

acesso a uma gama maior de dispositivos, redução de custos, ganhos em flexibilidade e qualidade da solução. Em último caso, a adoção de dispositivos baseados na IEEE 1451 representa uma proteção aos investimentos feitos em transdutores, pois permite que os mesmos sejam mantidos caso haja a necessidade de se migrar para outro padrão de rede de controle.

Estudos sobre a IEEE 1451 já abrangem as mais diversas áreas de aplicação. Lee et al. (2004) apresentam a utilização da IEEE 1451 no setor automobilístico através de dispositivos conectados à rede embarcada de automóveis. Brooks, Chen e Lee (2003) estudam a utilização de sensores sem fio baseados na IEEE 1451 nos sistemas de controle de navios. Em Wei et al. (2005) pode-se ver um levantamento sobre a utilização da IEEE 1451 com redes embarcadas em máquinas agrícolas baseadas na ISO 11783². São estudos recentes que enfatizam a aplicabilidade e importância da IEEE 1451.

Atualmente não se tem notícias de produtos baseados na IEEE 1451 voltados a redes LonWorks. Isto representa uma oportunidade de pesquisa em uma área ainda pouco explorada, mas com grande potencial. De fato, a perspectiva de agregar uma tecnologia de rede com alto potencial de aplicação na área agrícola e uma norma que representa uma evolução no âmbito da automação, foi um grande motivador para este trabalho.

1.2 OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um transdutor inteligente baseado na IEEE 1451³ e aplicá-lo à rede de controle LonWorks.

Para tanto, foram desenvolvidos protótipos que consistem em um módulo de interface de transdutor inteligente, denominado *Smart Transducer Interface Module* (STIM), em conformidade com a norma IEEE 1451.2, e um dispositivo LonWorks que realiza a interface entre o STIM e a rede de controle.

² A ISO 11783 vem recentemente sendo denominada de ISOBUS.

³ A família de normas IEEE 1451 é composta por sete sub-normas dentre as quais a IEEE 1451.2.

Este trabalho possibilitou avaliar o desenvolvimento de um transdutor inteligente compatível com a IEEE 1451 e validar a sua aplicação a um tipo de rede de controle cuja utilização já é bem difundida na área de automação predial e de controle de ambientes, mas para qual não se tem conhecimento de nenhuma solução similar disponível.

O conhecimento gerado por este trabalho possui grande sinergia com outros trabalhos desenvolvidos pelo LAA e deve servir de base para novas pesquisas e para o desenvolvimento de novas aplicações, como equipamentos embarcados em máquinas agrícolas, segundo o padrão ISO 11783.

1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO

Este primeiro capítulo foi dedicado à apresentação do objetivo desta pesquisa e dos principais fatores que a motivaram. Inclui-se nele a presente descrição sobre o conteúdo e a organização do texto.

O segundo capítulo apresenta as informações necessárias ao entendimento da IEEE 1451. Nele são apresentados os objetivos, os conceitos e a arquitetura proposta pela família de normas, bem como uma descrição de cada sub-norma que compõe a família IEEE 1451. O capítulo é finalizado com uma discussão sobre as perspectivas de aplicação e desenvolvimento da IEEE 1451.

O terceiro capítulo concentra-se na descrição do desenvolvimento do STIM. Ele é iniciado com uma análise mais detalhada da norma IEEE 1451.2, a fim de se construir a base teórica necessária à construção do protótipo. A partir desta análise é apresentado o desenvolvimento do hardware e software do STIM.

O quarto capítulo começa com uma introdução sobre a tecnologia LonWorks que representa a rede de controle na qual deseja-se aplicar o STIM desenvolvido. O foco do capítulo é a descrição do desenvolvimento do protótipo que realiza a interface entre a rede de controle e o STIM.

Os testes realizados para a validação do funcionamento dos protótipos e da integração do sistema como um todo, são apresentados no quinto capítulo. Os

mesmos foram agrupados neste único capítulo para fornecer uma melhor clareza do funcionamento entre os protótipos e possibilitar a análise da interação entre ambos. Já o sexto capítulo apresenta as discussões sobre os resultados dos testes e questões relevantes relacionadas à pesquisa.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões deste trabalho e também uma reflexão sobre suas contribuições e perspectivas de sua continuidade.

Em seguida são apresentadas as referências utilizadas neste trabalho e os apêndices contendo informações mais detalhadas sobre a norma IEEE 1451.2 e a implementação dos protótipos.

Ao longo do texto, por motivos de clareza e para evitar possíveis ambigüidades, muitos termos foram mantidos em sua designação original em inglês.

2 NORMA IEEE 1451

Neste capítulo é apresentada a família de normas IEEE 1451 para transdutores inteligentes. Primeiramente é feita uma introdução aos objetivos da IEEE 1451. Em seguida são apresentados a arquitetura proposta pela IEEE 1451 e seus conceitos mais gerais. Segue uma descrição de cada sub-norma que a compõe e a posterior discussão sobre as perspectivas de sua utilização e questões sobre seu futuro.

Salvo menção em contrário, as informações contidas neste capítulo são baseadas nas normas IEEE (1998, 2000, 2004a, 2004b, 2004c).

2.1 INTRODUÇÃO

O objetivo da família IEEE 1451 – *Standards for Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators* – é definir um conjunto comum de interfaces de comunicação para conectar transdutores a sistemas microprocessados, instrumentos, e redes de controle em um ambiente independente dessas redes (LEE, 2000).

A IEEE 1451 promove o desenvolvimento de transdutores inteligentes através da definição de interfaces independentes de rede ou fabricante, possibilitando a separação entre o projeto do transdutor e a escolha da rede de controle. Para tanto, ela define métodos de conexão de hardware e software padronizados entre os transdutores e as redes, mas sem impor restrições no projeto ou escolha dos mesmos. O uso de diferentes componentes, protocolos de rede e transceptores não é restringido de maneira alguma, facilitando o desenvolvimento e a migração dos transdutores para os diferentes tipos de rede (LEE, 2000).

É importante ressaltar que a IEEE 1451 não propõe uma nova rede de controle (IEEE, 1998). A idéia é fornecer um conjunto de interfaces padronizadas que permita utilizar as tecnologias de rede de controle existentes, promovendo a interoperabilidade entre transdutores e as mesmas (IEEE, 2000). Em última análise, a IEEE 1451 permite que os fabricantes de transdutores se concentrem no

desenvolvimento de seus produtos sem se preocupar com sua adequação a uma rede específica. Os usuários, por sua vez, podem escolher a rede de controle mais adequada à sua solução sem se preocupar com a disponibilidade de transdutores adequados a tal rede. Através das interfaces padrão definidas pela IEEE 1451, os transdutores podem ser conectados a diversas redes de controle de maneira transparente. Da mesma forma, é possível que transdutores de diferentes fabricantes sejam substituídos entre si sem impacto na solução existente.

Uma analogia simplificada pode ser feita com a interface USB utilizada em microcomputadores. Muitos dispositivos USB (transdutores) podem ser conectados ao computador independentemente do sistema operacional utilizado (rede de controle), pois a interface é padronizada. O fabricante do dispositivo não precisa se preocupar com o sistema operacional no qual seu produto será utilizado. Da mesma forma, o usuário do dispositivo pode substituí-lo por um de outro fabricante sem se preocupar com sua adequação ao seu sistema⁴.

Outra característica importante da IEEE 1451 é promover o desenvolvimento de dispositivos *plug-and-play*⁵. Isso é conseguido através da padronização da documentação eletrônica do transdutor denominada de *Transducer Electronic Data Sheet* (TEDS). A TEDS contém informações que permitem identificar e caracterizar os transdutores. Ela deve ser implementada em memória não volátil e sempre acompanhar o(s) transdutor(es) que descreve.

De acordo com Johnson et al. (2001), os principais objetivos para a IEEE 1451 podem ser sintetizados em:

- desenvolver interfaces de transdutores independentes de rede e fabricante;
- permitir que transdutores sejam substituídos ou movidos com o mínimo de trabalho;
- eliminar etapas de configuração manual sujeita a erros;

⁴ Existem, no entanto, dispositivos USB que não são inteiramente compatíveis com qualquer sistema por razões diversas, como a indisponibilidade *drivers* específicos.

⁵ *Plug-and-Play*: Capacidade de um dispositivo ser identificado automaticamente e configurado dinamicamente.

- promover modelos genéricos para dados, controle, temporização, configuração e calibração de transdutores;
- desenvolver documentação eletrônica dos transdutores (TEDS), que permanecem com o transdutor durante sua operação normal.

Segue uma lista de termos relacionados à IEEE 1451 utilizados através do texto.

TEDS (*Transducer Electronic Data Sheet*)

Conjunto de dados eletrônicos em formato padronizado que identifica e descreve o transdutor. Auxilia o processo de configuração, diagnóstico e manutenção do sistema. É usado como uma documentação eletrônica do transdutor.

STIM (*Smart Transducer Interface Module*)

Módulo independente da rede de controle que contém o transdutor, TEDS e o hardware associado ao condicionamento do sinal e a interface do transdutor.

NCAP (*Network Capable Application Processor*)

Denomina o processador e o hardware associado que faz a interface entre módulo do transdutor e a rede de controle. Executa funções de aplicação e conversão de dados além de alimentar o módulo STIM.

TII (*Transducer Independent Interface*)

Barramento digital de comunicação serial que realiza a ligação entre o NCAP e o STIM. Define métodos próprios de comunicação e sinalização entre NCAP e STIM.

2.2 ARQUITETURA

No contexto da IEEE 1451 e deste trabalho de pesquisa, um transdutor é considerado inteligente caso forneça funcionalidades além das necessárias para uma correta representação de uma grandeza medida ou controlada (IEEE, 1998). Em

termos práticos isso significa fornecer, por exemplo, capacidade de digitalização, comunicação, e auto-identificação através de documentação eletrônica.

Um transdutor inteligente tradicional agrega todos os componentes necessários à realização da medição (sensor), ou atuação no meio físico (atuador), e a comunicação com a rede em um único dispositivo. Isso significa que o desenvolvimento do transdutor está intrinsecamente relacionado à rede de controle na qual ele será utilizado.

Como já foi dito, a IEEE 1451 prevê a separação do projeto do transdutor inteligente da especificação da rede de controle. Para tanto, a arquitetura definida por ela estabelece a divisão do modelo tradicional do transdutor em dois módulos: o módulo independente de rede, que contém os sensores ou atuadores, o circuito de condicionamento de sinais e a TEDS; e módulo que depende da rede e realiza a interface entre a rede de controle e o módulo independente. Uma representação pode ser vista na Figura 1.

Figura 1. Transdutores independentes de rede. Baseado em Johnson et al. (2001)

Com esta arquitetura, através da implementação de processadores de rede, denominados *Network Capable Application Processor* (NCAP), específicos para cada rede de controle, os módulos independentes *Smart Transducer Interface Module* (STIM)⁶ podem ser conectados a qualquer rede de controle de maneira transparente.

⁶ O módulo independente de rede pode ter outras denominações dependendo da sub-norma IEEE 1451 utilizada.

Assim, um fabricante de transdutores pode desenvolver um único STIM que atenda a diversas redes, contanto que para elas existam NCAPs disponíveis. A comunicação entre o NCAP e o STIM pode ser feita por diversas interfaces, definidas conforme as diferentes necessidades da indústria.

A IEEE 1451 contempla cinco diferentes especificações ou propostas, sendo elas:

- interface digital ponto-a-ponto – definida pela norma IEEE 1451.2 (abordada e utilizada neste trabalho);
- interface em barramento – definida pela norma IEEE 1451.3;
- interface analógica – definida pela norma IEEE 1451.4;
- interface sem fio – proposta pelo projeto IEEE P1451.5;
- interface CANOpen – proposta pelo projeto IEEE P1451.6.

Atualmente a IEEE 1451 pode ser considerada uma família de normas composta de sete partes que definem o modelo de um transdutor inteligente e suas possíveis interfaces. A Tabela 1 apresenta o estado atual das especificações⁷.

Tabela 1 – Estado das normas da família IEEE 1451

Norma	Título	Estado
P1451.0	Common Functions, Communications Protocols and Transducer Electronic Data Sheets (TEDS) Formats	Proposta
1451.1	Network Capable Application Processor (NCAP) Information Model	Publicada (1999)
1451.2	Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats	Publicada (1997) Em revisão (2002)
1451.3	Digital Communication and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats for Distributed Multidrop Systems	Publicada (2003)
1451.4	Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats	Publicada (2004)
P1451.5	Wireless Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheets (TEDS) Formats	Proposta
P1451.6	A High-speed CANOpen Based Transducer Network Interface for Intrinsically Safe and non-Intrinsically safe Applications	Proposta

⁷ Atualizada até 14/09/2006 em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/standards.jsp>>.

A Figura 2 apresenta uma visão geral da família IEEE 1451 e a relação entre as suas normas.

Figura 2. Representação da família IEEE 1451. Baseado em Lee (2004b)

Vale notar que é a rede de controle, que se encontra à esquerda na figura, que proporciona a comunicação entre os transdutores inteligentes, e não as interfaces IEEE 1451.x. De fato, deve-se imaginar o transdutor inteligente ligado em rede como o conjunto formado pelo NCAP e o módulo transdutor. É fácil confundir este fato, pois as interfaces entre ambos se utilizam muitas vezes de tecnologias de rede, como é o caso da IEEE 1451.6 na qual a comunicação entre NCAP e transdutor é feita por uma rede CANOpen (CIA, 2005).

A seguir será apresentada uma explicação mais detalhada de cada norma.

2.3 IEEE 1451.1

A norma 1451.1 – *Network Capable Application Processor* (NCAP) *Information Model* (IEEE, 2000) – especifica um modelo geral orientado a objeto que representa um transdutor inteligente ligado em rede.

O modelo é constituído de um conjunto de classes, métodos e atributos que visa fornecer uma visão clara e concisa de um transdutor inteligente e da rede a qual ele pode se conectar. O modelo padroniza as interfaces e a interação entre as aplicações e os transdutores e entre as aplicações e a rede. Ele fornece um ambiente de desenvolvimento de software independente de rede e de hardware de transdutores que visa facilitar o desenvolvimento de aplicações e a portabilidade das mesmas.

O modelo proposto deve ser implementado em um processador de rede, o NCAP, que realiza a ponte entre o transdutor e a rede de controle. O NCAP consiste de um microprocessador e seu *hardware* auxiliar e das interfaces físicas com a rede de controle e com o transdutor (definida, por exemplo, pela norma IEEE 1451.2). Na Figura 3 pode-se ver a representação do modelo de um transdutor inteligente ligado à rede.

Figura 3. Modelo de transdutor inteligente ligado à rede (VIEGAS, 2003)

Um sistema projetado e construído em conformidade com esta norma visa fornecer benefícios como (IEEE, 2000):

- um modelo uniforme para implementação de sistemas;
- um conjunto uniforme de operações para configuração de sistemas;
- modelos de comunicação definidos independente de rede;
- interoperabilidade de comunicação;
- modelos independentes de rede para implementação de funcionalidades de aplicação;
- modelos de aplicação portáteis;
- uma camada de abstração que isola as aplicações dos detalhes de comunicação da rede;
- um modelo uniforme para representar e gerenciar dados.

É importante ressaltar que apesar de existirem diversas normas para representar as diversas interfaces dos módulos transdutores, a norma que define o NCAP é única, como pôde ser visto na Figura 2.

A norma estabelece uma abstração que permite que a conexão às redes de controle, de um lado, e ao transdutor, do outro, seja transparente para a aplicação, não importando qual especificação está sendo utilizada. Ela define também os métodos de comunicação entre os transdutores inteligentes, fornecendo-lhes as funcionalidades de controle distribuído e acesso remoto.

Essa norma foi aprovada em 1999.

2.4 IEEE 1451.2

A norma IEEE 1451.2 – *Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats* (IEEE 1998) – define a *Transducer Independent Interface* (TII), interface comunicação digital entre transdutores e os processadores de rede (NCAP). Ela inclui também a definição do *Smart Transducer Interface Module* (STIM), módulo inteligente que implementa a

interface, e a TEDS. Uma representação do STIM, TEDS e da TII pode ser vista na Figura 4.

Figura 4. STIM e NCAP ligados a uma rede (VIEGAS, 2003)

O STIM é responsável pela aquisição, condicionamento e digitalização do sinal. Ele consiste do transdutor, condicionador de sinal, conversores A/D ou D/A, TEDS, e o circuito lógico necessário para se implementar a interface digital TII de 10 fios. A norma inclui toda a especificação da TII e do conjunto de protocolos de comunicação necessários para acessar a informação da TEDS, ler dados de sensores e manipular atuadores. A transferência de dados é baseada na interface SPI, um protocolo de transferência serial de bits. Sob um ponto de vista funcional, o NCAP acessa o STIM como se tratasse de uma extensão de memória: todas as funções do STIM são invocadas através de um endereço de função e são encaminhadas a um sensor ou atuador através de um endereço de canal (VIEGAS, 2003). Conceitualmente um canal representa um transdutor do STIM (Figura 4). O canal zero contém a informação comum a todos os canais e representa o STIM como um todo.

A TEDS, uma forma de documentação eletrônica do transdutor, fica guardada em memória não volátil do STIM e deve sempre acompanhar o transdutor. Ela

contém campos que descrevem o tipo do transdutor, seus atributos, informações de operação e calibração. Um transdutor integrado com sua TEDS fornece a funcionalidade de auto-identificação ao sistema ou rede. Dessa forma, atualizar ou trocar transdutores para fins de manutenção pode ser feito de modo *plug-and-play*. Uma vez que os dados fornecidos pelo fabricante na TEDS sempre acompanham o transdutor, e estes dados são transferidos de maneira eletrônica para o NCAP, erros humanos devido à configuração manual dos parâmetros do transdutor são evitados. Considerando que boa parte do custo de instalação de sistemas de controle é composto pela integração e configuração do sistema (BOCKO, 2001), uma grande economia pode ser obtida através da utilização de TEDS, não só pela redução do número de erros, como também pela economia de tempo e facilidade de manter o sistema atualizado.

A norma IEEE 1451.2 divide a TEDS em oito estruturas, sendo as duas primeiras obrigatórias e as restantes opcionais. São elas:

- *Meta TEDS* (obrigatória);
- *Channel TEDS* (obrigatória);
- *Calibration TEDS* (opcional);
- *Meta-identification TEDS* (opcional);
- *Channel identification TEDS* (opcional);
- *Calibration Identification TEDS* (opcional);
- *End-Users' Application-Specific TEDS* (opcional);
- *Generic Extension TEDS* (opcional).

Uma descrição mais detalhada da TEDS é apresentada no Capítulo 3.

Essa norma foi aprovada em 1997.

2.5 IEEE 1451.3

Durante o desenvolvimento das normas IEEE 1451.1 e IEEE 1451.2, alguns fabricantes de sensores reconheceram a necessidade de uma interface padronizada para sistemas de sensores inteligentes distribuídos multi-ponto, ou *multidrop*. Em sistemas distribuídos de grande escala, há a necessidade de ler uma grande

quantidade de sensores de maneira sincronizada. Isso pode gerar um requisito de banda na ordem de centenas de kilohertz, com tempos de correlação na ordem de nanosegundos. A norma IEEE 1451.3 – *Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Digital Communication and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats for Distributed Multidrop Systems* (IEEE, 2004a) – foi criada para definir tal padrão (LEE, 2000).

A interface proposta, ilustrada na Figura 5, une em um barramento comum o processador de rede (NCAP) e vários módulos de transdutores inteligentes, nomeados *Transducer Bus Interface Module* (TBIM). O barramento é constituído por uma simples linha de transmissão (par de fios), usada para alimentar os transdutores e assegurar a comunicação entre estes e o NCAP. A linha é controlada por um mestre, *Transducer Bus Controller* (TBC), integrado no NCAP, podendo suportar vários módulos de transdutores inteligentes TBIM.

Figura 5. Interface IEEE 1451.3. Baseado em IEEE (2004a)

Cada TBIM pode suportar até cinco canais de comunicação multiplexados em frequência sobre a linha de transmissão. A multiplexagem em frequência permite que alimentação e comunicação coexistam na mesma linha (VIEGAS, 2003). Esses canais possuem funções distintas como sincronização, disparo, controle, transferência de dados e identificação. A comunicação é feita através do padrão HomePNA (HOME PNA, 2006) desenvolvido para implementação de redes através

de linhas telefônicas. Uma representação do espectro utilizado pela IEEE 1451.3 pode ser vista na Figura 6.

Figura 6. Espectro utilizado pela IEEE 1451.3. Baseado em IEEE (2004a)

A norma também define as TEDS associadas aos transdutores de maneira análoga ao padrão IEEE 1451.2, no entanto a estruturas das TEDS diferem em alguns pontos. Estão previstas duas estruturas de memória obrigatórias, em formato binário, denominadas meta TEDS de módulo (*Module Meta TEDS*) e TEDS específico do transdutor (*Transducer Specific TEDS*): a primeira contém as características gerais do TBIM e a segunda descreve as características particulares de um canal do TBIM. Cada TBIM contém uma meta TEDS de módulo e várias TEDS específicas do transdutor, um para cada canal de transdução (semelhante à meta TEDS e do TEDS de canal previstos na norma 1451.2) (VIEGAS, 2003).

As estruturas restantes de memória TEDS são opcionais e similares às da norma 1451.2, prevendo-se a introdução de duas novidades: uma TEDS de função de transferência (*Transfer Function TEDS*) que descreve a resposta em frequência do transdutor, e uma TEDS de filtragem (*Digital Filter TEDS*) contendo os coeficientes de um filtro digital para obter uma resposta em frequência desejada (VIEGAS, 2003).

Essa norma foi aprovada em 2003.

2.6 IEEE 1451.4

A norma IEEE 1451.4 – *Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats* (IEEE, 2004b) – compatibiliza o conceito de TEDS para os transdutores analógicos. Na prática ela fornece aos transdutores analógicos a capacidade de auto-identificação, trazendo os benefícios das TEDS para a vasta gama de dispositivos analógicos existentes no mercado. Com a padronização, os transdutores analógicos podem ser conectados a redes digitais (através de NCAPs), aumentando a disponibilidade de transdutores compatíveis com redes de controle. Os fabricantes passam a ter uma interface comum para múltiplas redes, eliminando a necessidade de alteração de projeto para fins de compatibilização.

Uma interface digital é sobreposta à interface analógica do transdutor, permitindo a comunicação da TEDS e transmissão dos sinais analógicos pelos mesmos fios, mas em tempos distintos. Essa interface mista é chamada de *Mixed-Mode Interface* (MMI) (Figura 7). Esta configuração conhecida como classe 1 ou *single wire*, também pode ser substituída por outra baseada em fiação independente, conhecida como classe 2 ou *multi-wire*, que permite a comunicação digital e analógica simultânea.

Figura 7. Transdutor analógico com interface mista. Baseado em NIST (2004)

A estrutura da TEDS definida pela IEEE 1451.4 difere das demais normas, implementando apenas um subconjunto das estruturas da IEEE 1451.2.

Espera-se que este padrão estimule a disseminação da norma IEEE 1451 e a implementação comercial de NCAPs devido a sua vasta gama de aplicabilidade. As principais vantagens por ela trazidas são (VIEGAS, 2003):

- compatibilidade com os transdutores analógicos que proliferam atualmente na indústria;
- facilidade de integração com transdutores já existentes (basta inserir a memória TEDS e a interface digital no cabo que liga ao transdutor);
- implementação baseada em eletrônica econômica e já disponível comercialmente.

Essa norma foi aprovada em 2004.

2.7 IEEE P1451.0

Essa norma, apesar de ser posterior às mencionados anteriormente, recebeu uma numeração retroativa. Isto se deve ao fato dele ser uma tentativa de padronização genérica e interna à IEEE 1451.

Apesar das normas IEEE 1451 apresentarem um objetivo comum, elas diferem em implementação. Todas possuem características semelhantes, mas não obedecem a um padrão comum de funções, endereçamento, comandos, protocolos de comunicação (internos) ou TEDS. A norma IEEE 1451.0 foi proposta como uma forma de estimular a compatibilidade entre a família IEEE 1451 e fornecer interfaces que facilitem o desenvolvimento de novos padrões IEEE 1451 baseados em meios físicos diferentes (IEEE, 2005a).

A proposta de adoção de um padrão para as TEDS inclui a criação de uma nova estrutura que descreve o meio físico utilizado denominada TEDS de camada física (*Physical Layer TEDS*).

A visão do projeto é criar uma interface entre NCAP e módulo transdutor que inclua um conjunto de comandos básicos e um protocolo de comunicação independente de meio físico. Tudo que será necessário para a criação de uma nova norma IEEE 1451 é a definição do meio físico bem como a TEDS de camada física e qualquer função especializada necessária para suportar este meio (JOHNSON, 2003).

Uma questão decorrente da aprovação desta norma é a necessidade de adequar as outras normas já publicadas à proposta da IEEE 1451.0. Tendo em vista a demora do processo de publicação, isto pode se tornar um entrave à disseminação da IEEE 1451.

Essa norma se encontra em fase de elaboração.

2.8 IEEE P1451.5

Sem dúvida, o uso da tecnologia sem fio já é uma grande tendência no mercado atual. A vasta gama de aplicações que esta tecnologia possibilita e as vantagens que ela proporciona a tornam muito atraente inclusive para o mercado de automação. A possibilidade de se eliminar a fiação do chão de fábrica, reduzindo os custos e o tempo de manutenção e instalação, de eliminar os sensores fixos às máquinas, aumentando sua mobilidade e flexibilidade, de utilizar sensores onde o cabeamento fixo é inviável, e a possibilidade de melhorar a confiabilidade dos sistemas com a instalação de mais sensores redundantes, são apenas alguns exemplos de vantagens que a tecnologia oferece (GILSINN; LEE, 2001).

Seguindo a tendência e necessidade do mercado, a IEEE P1451.5 propõe a utilização da tecnologia sem fio para a comunicação entre o transdutor e o NCAP, efetivamente definindo um padrão para transdutores inteligentes sem fio. Esta norma já será definida em conformidade com a norma IEEE 1451.0, prevendo a definição das TEDS de camada física para diversas tecnologias (IEEE 802.11, BlueTooth e ZigBee) (COLEMAN, 2004) escolhidas conforme a expectativa de sua utilização pelo mercado. Uma visão da relação entre os padrões pode ser vista na Figura 8.

Figura 8. Relação entre 1451.5 e 1451.0. Baseado em Coleman (2004)

O grande diferencial da abordagem da IEEE 1451.5 em relação às redes de sensores sem fio tradicionais é a presença do NCAP que permite uma interface transparente entre os transdutores e a rede de controle. Através dele é possível integrar os transdutores sem fio às redes de controle já existentes, agregando às mesmas as funcionalidades da tecnologia sem fio sem a necessidade de se redefinir o sistema instalado.

Essa norma se encontra em fase de elaboração.

2.9 IEEE P1451.6

Da mesma forma que a norma IEEE P1451.5 define a comunicação sem fio entre o NCAP e módulo transdutor, a norma P1451.6 (IEEE, 2004c) estabelece a comunicação entre os dois através de uma interface *Controller Area Network* (CAN) (ISO, 1993). Mais especificamente, foi escolhida a implementação CANOpen (Figura 9), como interface de comunicação. As vantagens da utilização desta tecnologia são a característica de comunicação segura que ela oferece, a disponibilidade de dispositivos comerciais já existente, e a demanda do mercado estabelecido.

Figura 9. Representação da IEEE 1451.6. Baseado em IEEE (2005b)

De fato, de acordo com o relato de um membro do comitê que desenvolve a norma (MENON, 2005), a IEEE P1451.6 foi inicialmente concebida para atender à um público alvo específico, que já se utiliza de redes CANOpen em sistemas de malhas de controle fechado aplicadas a sistemas críticos, como na indústria petrolífera (informação pessoal)⁸. Pode-se dizer que o foco principal da norma IEEE P1451.6 é compatibilizar as redes CANOpen com as funcionalidades da IEEE 1451.

⁸ MENON C. **Re: IEEE P1451.6 information**. Mensagem recebida por fernando.tani@poli.usp.br em 10 mar. 2005.

Para tanto, uma das medidas propostas é o mapeamento das entradas de dicionário CANOpen às estruturas TEDS.

Esta norma se encontra em fase de elaboração.

2.10 CONSIDERAÇÕES E PERSPECTIVAS

A IEEE 1451 surgiu como uma solução para a falta de padronização e grande variedade de tecnologias de rede de controle disponíveis no mercado. Ela promove a interoperabilidade entre os transdutores inteligentes e as redes de controle, endereçando as diferentes necessidades do mercado através de seu conjunto de normas. Ela traz vantagens significativas para os integradores de sistemas, fabricantes e usuários finais dos transdutores, proporcionando como principais benefícios (JOHNSON et al., 2001):

- criação de padrões para as interfaces físicas dos transdutores;
- maior facilidade de desenvolvimento de produtos;
- dispositivos com documentação incorporada;
- sistemas mais fáceis de instalar e manter;
- rápida reposição de transdutores;
- modelos padronizados para dados e controle de transdutores.

Fica claro que seu desenvolvimento foi motivado pela necessidade da indústria e que seu potencial de aplicação é muito grande. No entanto, verifica-se no mercado que sua utilização não é disseminada, podendo até ser considerada pouco significativa.

Em 2002 o grupo de trabalho responsável pelo desenvolvimento da IEEE 1451.2 se reuniu para dar início ao processo de re-avaliação da norma. É previsto que após cinco anos de sua aprovação cada norma seja revisada para que melhorias possam ser propostas. Considerando as necessidades da indústria e a opinião do mercado, foram sugeridas algumas alterações à IEEE 1451.2, sendo as mais importantes a simplificação da interface TII e a alteração de alguns campos da TEDS (JOHNSON; WOODS, 2001). De fato, a interface TII é considerada um dos grandes entraves à adoção mais ampla da norma. Sua interface de 10 fios é considerada

excessivamente complexa e conseqüentemente cara de se implementar (WOBSCHALL, 2002). A falta da especificação de um conector padrão agrava ainda mais o problema. Soluções mais simples e menos custosas já foram propostas, como as baseadas em interfaces seriais RS-232 ou RS-485 (JOHNSON; WOODS, 2001; WOBSCHALL, 2002) ou interface USB (DEPARI et al., 2004). Espera-se que na nova publicação da norma sejam inclusas novas interfaces baseadas em soluções comercialmente disponíveis.

Por outro lado, a especificação da TEDS foi bem recebida pelo mercado. Há tempos se buscava uma solução padronizada para a documentação eletrônica dos transdutores. A capacidade do transdutor inteligente se auto-identificar traz grandes benefícios para as soluções de automação. Os dados contidos nas TEDS não só facilitam e reduzem os erros de configuração e instalação (que por si só já representa um grande ganho) como também permitem o desenvolvimento de transdutores melhores e mais acurados⁹ (MONTAGUE, 2004). Existem no mercado alguns produtos que possuem TEDS como forma de documentação eletrônica apesar de não implementarem formalmente a norma IEEE 1451 (DUNBAR, 2001; HONEYWELL, 2005).

Não se pode perder de vista a demora para especificação e aprovação das normas. Este é um processo relativamente lento que pode durar anos. O consenso da indústria e do comitê deve ser alcançado, buscando sempre a melhor solução para o mercado como um todo. O longo período entre a especificação inicial e a aprovação dos padrões prejudica a adoção dos mesmos e cria um ambiente de insegurança na indústria. Como exemplo pode-se citar o ocorrido com o padrão para *fieldbus* que, devido à grande demora e falta de consenso, acabou em inúmeras sub-especificações, fragmentando o mercado com soluções fechadas e proprietárias (MAHALIK; LEE, 2002; MURUGESHAN, 2003).

A norma IEEE 1451.0, ainda em especificação, deve trazer mudanças às normas já aprovadas, uma vez que ela visa padronizar as TEDS e as interfaces internas da família IEEE 1451. Isso deve resultar em um trabalho de revisão e re-

⁹ Através do uso dos dados de calibração contidos na TEDS é possível obter medições mais próximas dos valores reais.

publicação destas normas. É provável que a especificação desta norma esteja retardando a revisão da norma IEEE 1451.2 (e a publicação das demais), o que se reflete na estagnação do mercado de transdutores baseados na mesma. O contraponto a esse lado negativo será a maior facilidade de se estender a família IEEE 1451 a novas camadas físicas, dando-lhe mais flexibilidade e longevidade, fator que pode se tornar importante para o futuro do padrão. De fato, uma das principais características da norma IEEE 1451 é a adoção de diversas interfaces para atender às diferentes necessidades da indústria. A norma IEEE 1451.0 vai facilitar a expansão destas interfaces conforme o surgimento de novas demandas.

Atualmente a disponibilidade de NCAPs comerciais é muito pequena, praticamente inexistente. Algumas empresas chegaram a investir no desenvolvimento de produtos, como a Hewlett-Packard (HP), por exemplo, que chegou a lançar um NCAP para redes Ethernet e sensores baseados na IEEE 1451.2 chamado BFOOT, mas acabou retirando-o de circulação devido à baixa procura pelo produto (SENSORS, 2001; SHEBLE, 2000). Espera-se que a recente aprovação da norma IEEE 1451.4 impulse o mercado devido à grande disponibilidade e disseminação dos sensores analógicos e o apoio de empresas de peso como a National Instruments (NATIONAL, 2005).

A IEEE 1451.5, por sua vez, abre novas perspectivas para IEEE 1451, uma vez que atende a um novo mercado com grande potencial de crescimento. As aplicações da tecnologia sem fio são vastas, variando desde a área médica até à militar. Uma das grandes vantagens oferecidas pela norma é a possibilidade de se usufruir das funcionalidades de transdutores sem fio em conjunto com redes de comunicação cabeadas. Infraestruturas já existentes podem se beneficiar da solução, bastando para tanto incluir nas mesmas NCAPs que implementem a interface com a rede de controle e a interface sem fio com os transdutores.

O sucesso de uma norma não depende apenas de sua adequação técnica, mas também do momento de sua publicação e de sua aceitação por parte do mercado. Espera-se que com a publicação da norma IEEE 1451.0 as outras normas da família possam ser completadas ou revistas sem demora excessiva, facilitando e incentivando sua adoção.

3 DESENVOLVIMENTO DE UM STIM

Como pôde ser visto no capítulo 2, a família IEEE 1451 engloba diversas normas que têm um objetivo comum: criar um padrão de interfaces entre transdutores inteligentes e redes de controle. Esta pesquisa buscou avaliar a solução proposta pela norma através do desenvolvimento de um transdutor inteligente em rede completo, composto por um STIM em conformidade com a IEEE 1451.2 e a sua interface para a rede de controle LonWorks (NCAP).

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento do STIM, iniciando-se com uma análise mais detalhada da norma IEEE 1451.2, a fim de se caracterizar seu funcionamento, seguido pela descrição dos principais componentes do STIM e da implementação do software e hardware do dispositivo.

As informações contidas neste capítulo são baseadas em IEEE (1998), salvo menção em contrário.

3.1 DETALHAMENTO DA IEEE 1451.2

A norma IEEE 1451.2 define as funcionalidades do STIM, as estruturas de memória TEDS, e sua interface de comunicação digital TII. Para que um dispositivo seja considerado compatível com a norma IEEE 1451.2 ele precisa obedecer aos seguintes requisitos (IEEE, 1998):

- implementar as funcionalidades descritas no capítulo 4 da norma;
- conter uma TEDS formatada conforme o capítulo 5 da norma;
- possuir uma interface física (TII) que implemente as linhas, protocolo e temporização definidas no capítulo 6 da norma.

Cada um destes requisitos será mais bem descrito nas seções que seguem.

3.1.1 Especificação funcional

A principal função de um STIM é possibilitar a medição ou controle de fenômenos físicos, através de seus sensores e atuadores. Cada fenômeno medido ou controlado é associado a um canal do STIM, que conceitualmente representa um sensor ou atuador. O capítulo 4 da norma IEEE 1451 especifica quais tipos de canais podem ser implementados em um STIM, e as funções necessárias ao STIM para permitir que estes canais funcionem.

Segue uma descrição dos tipos de canais existentes e, posteriormente, das principais funções definidas pela norma:

3.1.1.1 Tipos de canais

Existem sete tipos de canais definidos na norma sendo eles:

- Sensor (*Sensor*): Mede um parâmetro físico e retorna dados digitais representando esse parâmetro. A amostragem é feita a cada ocorrência do comando de disparo gerado pelo NCAP;
- Atuador (*Actuator*): Realiza uma ação de acordo com o dado recebido. O estado do atuador é atualizado após o comando de disparo;
- Sensor com memória (*Buffered sensor*): Difere de um Sensor simples por possuir uma memória que guarda o dado anterior ao amostrado mais recentemente. Cada disparo gera uma nova amostra. O dado disponível para leitura é o segundo mais recente;
- Sensor de dados sequenciais (*Data sequence sensor*): Realiza a coleta de dados continuamente. O dado retornado é o coletado imediatamente após o disparo;
- Sensor de dados sequenciais com memória (*Buffered data sequence sensor*): Difere de um Sensor de dados sequenciais por retornar o dado coletado imediatamente antes do disparo;
- Sensor de eventos (*Event sequence sensor*): Sensor que detecta uma mudança física de estado. Pode sinalizar uma transição de um sinal digital

ou a passagem de um sinal analógico por um limiar. Após um disparo o sensor fica em espera e só responde na ocorrência do evento em questão;

- Transdutor genérico (*General transducer*): Categoria criada para acomodar canais que não se enquadram nos outros tipos existentes. A norma não define o comportamento em relação a disparos ou dados lidos ou escritos a este tipo de canal.

O comando de disparo será descrito adiante, mas pode ser entendido como uma ordem proveniente do NCAP que indica quando o STIM deve realizar uma nova medida ou atuação no sistema.

As funções definidas pela norma são de endereçamento, estado, controle, transporte de dados e disparo e serão descritas nas seções que seguem.

3.1.1.2 Endereçamento

Cada função e cada canal do STIM é associado a um endereço lógico. Através de um par endereço de função e de canal, o NCAP é capaz de especificar se dados devem ser escritos ou lidos, para qual função, e para qual canal do STIM.

Um endereço completo é composto por dois bytes, sendo o byte mais significativo referente ao endereço de função e o byte menos significativo referente ao endereço de canal (Figura 10). Um STIM pode conter até 255 canais, numerados a partir do índice um, sendo o canal zero (CHANNEL_ZERO) usado para representar o STIM como um todo. Os endereços de função são numerados conforme a direção da comunicação dos dados através da interface, sendo que seu bit mais significativo assume valor zero para funções de escrita e valor um para funções de leitura do STIM. Deste modo, os endereços de 0 a 127 representam funções de escrita aos canais do STIM, enquanto os endereços entre 128 e 255 correspondem a leituras. Uma relação dos endereços de função e suas respectivas descrições podem ser vistas na Tabela 15 do APÊNDICE A. Como exemplo pode-se citar o endereço “0” de escrita a um atuador e o endereço “128” de leitura de um sensor.

Endereço de função Byte mais significativo								Endereço de canal Byte menos significativo							
L/E	Código de função							Número do canal							
BIT +SIG							BIT -SIG	BIT +SIG							BIT -SIG

L/E = Leitura ou Escrita

Figura 10. Estrutura de endereçamento. Baseado em IEEE (1998)

3.1.1.3 Transmissão de dados e disparo

A transmissão de dados entre o STIM e o NCAP deve ser realizada através da interface física descrita na seção 3.1.3 denominada *Transducer Independent Interface* (TII). Os dados devem ser compostos por um número inteiro de bytes, sendo os bytes mais significativos transmitidos primeiro. Cada byte é transmitido através da TII na forma serial, bit-a-bit, com o bit mais significativo primeiro.

Um *frame* de dados normal é composto pelo envio, por parte do NCAP, de um endereço completo (função e canal) e os bytes de dados subsequentes que dependem da função acessada. A quantidade de bytes a ser enviada varia conforme a função executada e assume valores conhecidos ou determinados por campos da TEDS. Como exemplo pode-se citar a função de comando, que após o envio do par endereço de função e canal deve ser seguido pelo envio de mais dois bytes de dados que indicam o comando a ser executado. No caso de uma leitura de sensor, o NCAP deve enviar o endereço de função de leitura de um sensor seguido pelo endereço do canal desejado, e o STIM deve responder enviando ao NCAP os dados da leitura em quantidade igual à especificada pelo campo *Channel Data Model Length* da TEDS. Mais detalhes sobre a comunicação podem ser vistos na Figura 14 da seção 3.1.3 que apresenta detalhes sobre a interface TII.

O comando de disparo é realizado através da ativação de uma linha específica da interface TII denominada NTRIG. Ele tem como função sinalizar ao STIM que uma nova amostra de dados deve ser coletada do sensor ou que o atuador deve ser atualizado com novos dados. Dessa forma, um disparo é geralmente executado antes

de uma leitura de um sensor ou depois do envio de novos dados a um atuador (Figura 11). Vale ressaltar que um comando de disparo em si não implica em uma atualização dos dados do sensor no NCAP. Os dados só são enviados para o NCAP após a execução da função de leitura do sensor. Da mesma maneira, apenas após um disparo o atuador será atualizado com os últimos dados enviados pelo NCAP através do endereço de função de escrita a um atuador.

Outras funções de leitura ou escrita de dados como atualização de máscaras de interrupção, envio de comandos, ou leitura de TEDS, não necessitam da execução do disparo. Na Figura 11 elas são diferenciadas pela denominação de “Leitura” e “Escrita” apenas.

A função de transmissão de dados não deve estar ativa antes ou durante um evento de disparo.

Figura 11. Transmissão de dados e disparo. Baseado em IEEE (1998)

3.1.1.4 Estado e interrupção

A função de Estado (*Status*) permite que o NCAP determine o estado de funcionamento do STIM como um todo ou de cada um de seus canais individualmente. As informações sobre o estado são armazenadas no STIM em dois registradores de estado, um padrão e outro auxiliar, para cada canal. Os registradores associados ao canal zero (CHANNEL_ZERO) representam o estado do STIM como um todo.

Cada registrador de estado possui dois bytes, nos quais cada bit corresponde à presença ou ausência de alguma condição, sendo a presença da condição representada pelo valor um no bit apropriado. Uma relação das posições dos bits e seus respectivos significados podem ser vistos na Tabela 17. do APÊNDICE A Os registradores de estado são acessados através dos endereços de função de leitura de estado ou de leitura de estado auxiliar (com valores iguais a 130 e 132 respectivamente, na Tabela 15), ao qual o STIM responde enviando os dois bytes correspondentes ao registrador do canal endereçado.

A função de interrupção possibilita que o STIM gere um sinal para a requisição de serviço do NCAP¹⁰ através do acionamento de uma linha específica da TII denominada NINT. O acionamento da NINT é condicionado à ativação do bit de requisição de serviço (valor 1 no bit 0 do registrador de estado padrão) de algum de seus canais.

A ativação do bit de requisição de serviço do canal é, por sua vez, resultado da interação entre os dados contidos nos registradores de estado do canal e o valor de suas máscaras de interrupção.

O papel das máscaras de interrupção é controlar a ativação do bit de requisição de serviço do canal. As máscaras são compostas por dois registradores, um padrão e o outro auxiliar, para cada canal do STIM. Cada registrador possui dois bytes, nos quais cada bit corresponde, posição a posição, a um bit dos registradores de estado do canal. Sempre que um dos bits de estado assumir o valor 1 e o bit correspondente na máscara for 1, o bit de requisição de serviço é ativado (operação “E” bit-a-bit). Dessa forma, pela atribuição de valores 0 ou 1 para os diferentes bits das máscaras de interrupção, ativa-se ou desativa-se o efeito do bit de estado correspondente sobre a requisição de serviço (Figura 12).

O NCAP pode, portanto, determinar as situações nas quais o STIM deve gerar um sinal de interrupção. Para tanto, basta alterar o valor das máscaras de interrupção através dos endereços de função de escrita 5 e 6 (Tabela 15 do APÊNDICE A), passando como parâmetro seus novos valores.

¹⁰ O NCAP não é obrigado a responder imediatamente a uma requisição de serviço.

Figura 12. Funcionamento das máscaras de interrupção. Baseado em IEEE (1998)

3.1.1.5 Controle

A função de controle permite o envio de comandos que afetam o estado ou a operação do STIM como um todo ou de cada canal individualmente. Ela é acessada através do endereço de função *write channel control command* para um canal específico ou *write global control comand*¹¹ para o canal zero (CHANNEL_ZERO).

Os comandos de controle são compostos por dois bytes, possibilitando uma gama de 65536 comandos diferentes. No entanto, apenas dez comandos estão atualmente definidos, sendo apenas dois deles obrigatórios (comandos *no operation* e *reset*), como pode ser visto na Tabela 16.do APÊNDICE A Os valores 11 a 255 são reservados, e os valores acima de 256 abertos para o uso do fabricante.

¹¹ Ambos os endereços possuem valor igual a 1.

3.1.1.6 Hot-swap

A funcionalidade de “troca-quente” (*hot-swap*) possibilita que a conexão física entre o NCAP e STIM seja feita ou desfeita com NCAP ligado, sem dano a ele ou ao STIM. A interface TII provê os meios para que os eventos de inserção ou extração sejam detectados pelo NCAP através de sua linha NSDET. Esta linha é ligada ao comum/terra do STIM, assumindo valor “0” sempre que este estiver ligado ao NCAP. Ao ser desconectado um resistor de *pull-up* no NCAP garante que seu valor retorne para “1”.

3.1.2 Descrição da TEDS

A TEDS (*Transducer Electronic Data Sheet*) é uma documentação eletrônica que descreve as características do STIM e de seus transdutores. Ela é composta por um conjunto de dados organizados e formatados de acordo com a norma IEEE 1451.2, e deve ser implementada em memória não volátil de forma a manter suas informações mesmo quando o STIM não estiver alimentado.

As especificações fornecidas pela norma se limitam ao formato lógico e ao conteúdo da TEDS. Nenhuma restrição é feita sobre sua construção física ou sobre sua interface com o STIM. A TEDS não pode, no entanto, ser desassociada fisicamente do(s) transdutor(es) que ela descreve.

A TEDS é dividida em oito blocos de dados, que representam características distintas do STIM ou de seu(s) transdutor(es). Cada bloco pode ser acessado pelo NCAP através do endereço de função correspondente (Tabela 15) sendo a transmissão dos dados feita sempre do byte mais significativo para o menos significativo. Cada bloco possuiu campos específicos para cada parâmetro descrito, e cada campo tem seu formato, tamanho e posição definidos pela norma. Segue uma descrição sucinta dos blocos:

Meta-TEDS

Contém as informações gerais do STIM e comuns a todos os canais. Campos somente para leitura. Exemplos: número de identificação universal, número de canais implementados, taxa máxima de comunicação.

Sua implementação é obrigatória. Todo STIM deve possuir um bloco Meta-TEDS em sua TEDS.

Channel TEDS

Contém as informações particulares de cada canal como tipo de canal e unidades físicas. Os campos apenas para leitura.

Sua implementação é obrigatória. Cada canal do STIM deve possuir um bloco Channel TEDS, com exceção do canal zero (CHANNEL_ZERO) que é representado pela Meta-TEDS.

Calibration TEDS

Contém as informações de calibração do canal endereçado, disponibilizando as informações necessárias para a aplicação da função de correção. A função de correção consiste de uma equação matemática que pode envolver os dados de um ou mais canais e cujos coeficientes ficam guardados na Calibration TEDS. Ela pode ser executada no NCAP ou no STIM e se aplica tanto a dados provenientes de sensores ou destinados a atuadores do STIM. Os campos podem ser lidos e escritos.

Sua implementação é opcional.

Meta-identification TEDS

Contém informações detalhadas para se identificar o STIM, mais quaisquer informações comuns a todos os seus canais. Campos somente para leitura. Exemplos: identificação do fabricante, número do modelo do STIM, descrição do produto.

Sua implementação é opcional.

Channel identification TEDS

Possui a mesma função do bloco anterior só que aplicado a apenas um canal.

Sua implementação é opcional.

Calibration Identification TEDS

Contém informações adicionais descrevendo a calibração do STIM. Campos podem ser escritos e lidos.

Sua implementação é opcional.

End-Users' Application-Specific TEDS

Guarda informações inseridas pelo usuário final. Campos podem ser escritos e lidos.

Sua implementação é opcional.

Generic Extension TEDS

Bloco reservado para futuras expansões da norma.

Mais detalhes sobre os campos dos blocos obrigatórios da TEDS podem ser encontrados no APÊNDICE C.

3.1.3 Especificação da TII

A *Transducer Independent Interface* (TII) é a interface de comunicação digital, ponto-a-ponto, entre o STIM e o NCAP. Sua função é permitir a transferência de dados entre ambos e prover os mecanismos necessários à execução das demais funcionalidades do STIM.

A TII é composta por dez linhas que podem ser divididas em quatro grupos. A Tabela 2 lista o nome completo, a função e a abreviação padrão para cada linha¹².

¹² A letra “N” no início do nome da linha indica que ela possui lógica negativa (ativa em 0).

Tabela 2 – Linhas da TII

Linha	Abreviação	Controlada por	Função	Grupo
DATA_OUT	DIN	NCAP	Transmissão de dados do NCAP para o STIM	Dados
DATA_IN	DOUT	STIM	Transmissão de dados do STIM para o NCAP	
DATA_CLOCK	DCLK	NCAP	Sinal de sincronismo para a transmissão de dados	
N_IO_ENABLE	NIOE	NCAP	Sinaliza que a transmissão de dados está ativa e delimita o <i>frame</i> de dados	
N_TRIGGER	NTRIG	NCAP	Realiza a função de disparo	Disparo
N_ACKNOWLEDGE	NACK	STIM	Possui duas funções: <ul style="list-style-type: none"> • reconhecimento do disparo; • reconhecimento da transmissão (de cada byte) de dados. 	Suporte
N_STIM_DETECT	NSDET	STIM	Usada pelo NCAP para detectar a presença do STIM	
POWER	POWER	NCAP	Alimentação 5V	
COMMON	COMMON	NCAP	Comum ou terra	
N_IO_INTERRUPT	NINT	STIM	Usada pelo STIM para requisitar serviço ao NCAP	Interrupção

A comunicação de dados na TII se baseia na interface SPI, cuja comunicação síncrona serial é do tipo mestre/escravo. O NCAP assume o papel de mestre e controla a iniciativa de comunicação, cabendo ao STIM acionar a linha NINT sempre que necessitar de um serviço do NCAP.

Os protocolos de alto nível da TII podem ser separados em três categorias, sendo elas: leitura de *frame* de dados; escrita de *frame* de dados; e disparo.

O disparo é normalmente usado antes de o NCAP requisitar uma leitura do sensor ou após ele enviar dados novos a um atuador. O processo pode ser visto na Figura 13 e se dá da seguinte maneira (IEEE, 1998):

Disparo:

- A) NCAP espera pelo tempo de preparação de escrita *Write Setup Time* gravado na Channel TEDS.
- B) NCAP ativa NTRIG.
- C) STIM ativa NACK.
- D) NCAP desativa NTRIG.
- E) STIM desativa NACK.
- F) NCAP espera pelo tempo de preparacao de leitura *Channel Read Setup Time* gravado na Channel TEDS.

Figura 13. Execução do disparo. Baseado em IEEE (1998)

A leitura e escrita de um *frame* de dados obedecem ao seguinte protocolo (IEEE, 1998):

Leitura:

- A) NCAP ativa NIOE.
- B) NCAP espera que o STIM ative NACK.
- C) NCAP escreve o endereço funcional.
- D) NCAP escreve o endereço de canal.
- E) NCAP lê zero ou mais bytes de dados do mais significativo ao menos significativo.
- F) NCAP desativa NIOE.
- G) STIM desativa NACK.

Escrita:

- A) NCAP ativa NIOE.

- B) NCAP espera que o STIM ative NACK.
- C) NCAP escreve o endereço funcional.
- D) NCAP escreve o endereço de canal.
- E) NCAP escreve zero ou mais bytes de dados do mais significativo ao menos significativo.
- F) NCAP desativa NIOE.
- G) STIM desativa NACK.

Uma representação dos protocolos de leitura e escrita pode ser vista na Figura 14.

Figura 14. Leitura e escrita de um *frame* de dados. Baseado em IEEE (1998) e Viegas (2003)

A norma ainda especifica algumas restrições de temporização das linhas da TII, com o intuito de garantir a correta operação dos protocolos acima descritos. Uma delas especifica a taxa de transferência comum de transmissão de 6 kbps que tanto o STIM quanto o NCAP devem suportar. O STIM deve ter como taxa máxima de comunicação pelo menos este valor. O NCAP, por sua vez, deve ter como limite inferior de comunicação pelo menos esta taxa. A norma não exige uma taxa constante de transferência de dados, porém a primeira comunicação entre o NCAP e STIM deve ser realizada a 6 kbps, a partir de então o NCAP pode mudar a taxa para qualquer valor menor que o máximo suportado pelo STIM. Este valor se encontra especificado em um campo da TEDS. Mais detalhes sobre as especificações de temporização podem ser encontrados em IEEE (1998).

3.2 ESCOLHA DE COMPONENTES

A norma IEEE 1451.2 define as funcionalidades, as TEDS, e a interface de comunicação de um STIM, mas não especifica seus componentes de hardware ou o processo de construção do módulo. Esta seção descreve as escolhas feitas para a montagem do STIM.

Analizando as especificações e funcionalidades do STIM, pode-se dividi-lo em blocos funcionais, compostos pela unidade microcontroladora, a TEDS, a TII e os transdutores. Pode-se afirmar que as principais decisões na montagem do STIM se restringem à escolha do microcontrolador e dos transdutores, uma vez que a implementação da TEDS e da TII está diretamente relacionada ao microcontrolador escolhido.

A escolha dos transdutores depende basicamente da aplicação final do STIM. É importante, no entanto, verificar se o microcontrolador escolhido é adequado ao tratamento dos dados gerados pelo transdutor. Ele deve ser capaz de executar o protocolo de comunicação de um transdutor digital, ou, no caso de transdutores analógicos, possuir ou ser capaz de controlar conversores A/D e D/A adequados à aplicação.

3.2.1 Microcontrolador

Para este trabalho buscou-se um microcontrolador comercial, de fácil acesso, que permitisse um desenvolvimento sem complexidade excessiva e possivelmente de baixo custo. Esses requisitos foram impostos tendo em vista a perspectiva da utilização de STIMs em maior escala em outras pesquisas.

Durante a pesquisa bibliográfica notou-se a utilização dos microcontroladores ADuC812 da empresa Analog Devices (ANALOG, 2005) e PIC da Microchip (MICROCHIP, 2005a) nas implementações do STIM, como poder ser verificado em Camara et al. (2004), Conway et al. (2000), Lee et al. (2004) e Viegas (2003). Ambos os dispositivos possuem artigos ou notas técnicas descrevendo sua adequação para o uso em STIMs em Analog (1999) e Fischer e Burch (2000), respectivamente, incluindo exemplos de código fonte.

A escolha final foi definida pela facilidade de acesso ao microcontrolador, seu custo e as ferramentas de desenvolvimento disponíveis para o mesmo. Dessa forma escolheu-se o PIC, pois este é facilmente encontrado no mercado nacional, tem um custo bem inferior ao ADuC812 e dispõe de um pacote de ferramentas de desenvolvimento gratuitas fornecidas pela própria fabricante Microchip.

A utilização das ferramentas gratuitas da Microchip, nomeadamente o ambiente de desenvolvimento MPLAB (MICROCHIP, 2005b) e do compilador em C C18 (MICROCHIP, 2002a, 2005c, 2005d), implicou, no entanto, em uma restrição dos modelos de PIC disponíveis para o uso no STIM. Isso se deve ao fato da família 16, mais popular dentre os PICs, não ser suportada pelo compilador C18. Apesar do MPLAB possibilitar a programação em linguagem Assembly, o emprego da linguagem C é muito mais vantajoso devido à facilidade de programação e conseqüente redução no tempo de desenvolvimento. Caso a otimização de código e de recursos do PIC fosse essencial ao projeto, a programação em linguagem Assembly se justificaria, no entanto este não é o caso. De fato, o emprego de um PIC da família 16 não apresenta vantagens significativas, a não ser pelo custo ligeiramente inferior e maior disponibilidade no mercado nacional. Em contraponto, a família 18 representa uma nova linha de produtos, mais moderna e com mais recursos.

Optou-se pelo modelo PIC18F252 (MICROCHIP, 2002b) que atende as necessidades do projeto, sendo as principais delas, suporte a SPI, pinos de E/S digitais para implementação da TII, comunicação com o sensor e LCD, e memória não-volátil para acomodar o programa do STIM e a TEDS.

A microchip já lançou uma versão mais nova deste microcontrolador, o 18F2520, e recomenda seu uso em projetos novos no lugar do 18F252, no entanto, sua disponibilidade no mercado nacional ainda é limitada, o que levou à adoção do 18F252.

3.2.2 Transdutor

Visando possibilitar que os resultados desta pesquisa possam ser aplicados a outros trabalhos realizados dentro do Laboratório de Automação Agrícola (LAA), a escolha do transdutor ficou condicionada à sua utilidade em aplicações na área agrícola.

O módulo digital SHT71 (Figura 15) fabricado pela empresa Sensirion contém sensores de umidade relativa e temperatura, conversor analógico-digital de 14 bits e circuito de interface serial integrados em um único chip. Isso lhe confere sinais de alta qualidade, tempos de resposta rápidos e imunidade a ruídos a um custo bem competitivo (SENSIRION, 2005a).

Figura 15. Foto dos Sensirion SHTxx (SENSIRION, 2005a)

Umidade e temperatura são algumas das principais variáveis climáticas envolvidas no processo de produção vegetal (CANSADO, 2003), o que confere a este sensor um apelo muito grande para sua aplicação na área agrícola. Suas principais características (Tabela 3), facilidade de uso e boa relação custo/benefício são seus principais atrativos.

Este transdutor já vem sendo usado em outros trabalhos de automação agrícola do LAA, como em Burdelis (2005) e Pereira (2006), o que foi determinante para sua escolha.

Tabela 3 – Principais características do Sensirion SHT71

Parâmetro	Condições	Min.	Típico	Max.	Unidade
Umidade Relativa					
Resolução		0,5	0,03	0,03	%UR
		8	12	12	bit
Precisão			±0,1		%UR
Acurácia	20~80			±3	%UR
Faixa		0		100	%UR
Temperatura					
Resolução		0,04	0,01	0,01	°C
		0,07	0,02	0,02	°F
		12	14	14	bit
Acurácia	-10~60			±1,5	°C
Precisão			±0,1		°C
			±0,2		°F
Faixa		-40		123,8	°C
		-40		245,9	°F

Na Figura 16 pode-se verificar a ampla faixa de operação deste transdutor que o torna adequado até mesmo às condições mais extremas esperadas em casas de vegetação. Para fins de ilustração pode-se mencionar o cultivo protegido de tomates, que exige temperaturas na faixa de 10 a 40 °C com umidade entre 60 e 80% (OREGON, 2002).

Figura 16. Condições de funcionamento do Sensirion SHTxx. Baseado em Sensirion (2005a)

Apesar de apresentar um comportamento robusto em relação às condições de operação, deve-se tomar cuidado com o módulo, pois se trata de um dispositivo baseado na tecnologia CMOS sendo sensível a descargas elétricas e eletrostáticas.

O SHT71 possui um protocolo de comunicação serial proprietário apresentado no APÊNDICE B.

3.3 O HARDWARE

O desenvolvimento do módulo STIM baseou-se em componentes comercialmente disponíveis, além do microcontrolador e sensor, já apresentados. O objetivo foi alcançar uma implementação simples que possa ser facilmente reproduzida no futuro em outras pesquisas.

Um diagrama em blocos básico da implementação do hardware do STIM pode ser visto na Figura 17. Na Figura 18 podemos ver uma foto da implementação final do módulo.

Figura 17. Representação da implementação de hardware

Figura 18. Módulo STIM desenvolvido

O módulo de LCD não é necessário ao STIM. Ele foi incluído apenas para facilitar a depuração do programa e a verificação de seu funcionamento.

A interface TII exige a utilização de 7 pinos de E/S do microcontrolador. A linha NSDET é ligada diretamente ao comum/terra do STIM e, junto com mais duas linhas de alimentação, completa as 10 linhas da TII. A Tabela 4 apresenta a distribuição dos pinos de E/S do PIC18F252.

Tabela 4 – Pinagem da TII

TII	Função	Cor	Pino (PIC)
1	DCLK	Marrom	RC3
2	DIN	Vermelho	RC4
3	DOUT	Laranja	RC5
4	NACK	Amarelo	RC7
5	GND	Verde	-
6	NIOE	Azul	RA5
7	NINT	Roxo	RC6
8	NTRIG	Cinza	RC2
9	POWER	Branco	-
10	NSDET	Preto	-

A utilização dos pinos RA5, e RC3~5 foi determinada pelo suporte em hardware do PIC18F252 à interface SPI. OS demais pinos foram escolhidos arbitrariamente.

A norma IEEE 1451.2 não especifica o conector e cabo a serem usados na TII. Porém, ela especifica um código de cores para as linhas que foi seguida na implementação.

A interface com o transdutor digital SHT71 exige dois pinos para a implementação da linha de *clock* e dados, mais dois fios para sua alimentação. A norma IEEE 1451.2 permite que uma fonte de alimentação externa, que não seja fornecida pelo NCAP através da TII, seja utilizada para alimentar os transdutores do STIM. Neste caso não foi necessária adotar tal solução, pois o SHT71 trabalha com tensões entre 2,4 e 5,5V e exibe um consumo muito baixo. A Tabela 5 apresenta os pinos usados para a interface do SHT71.

Tabela 5 – Pinagem da interface com o SHT71

SHT71	PIC	Cor
DATA	RA1	Laranja
CLK	RA0	Azul
Vcc	-	Verde
GND	-	Amarelo

Capacitores de desacoplamento de 100nF foram colocados nas entradas de alimentação dos componentes do STIM a fim de se eliminar possíveis ruídos na linha proveniente da TII.

O SHT71 exige um resistor de *pull-up* ligado à sua linha de dados (DATA) para o funcionamento correto de seu protocolo de comunicação. Um resistor de *pull-up* também foi colocado junto à linha de *clock* (DCLK) da TII para evitar que o STIM realize uma comunicação inexistente durante sua conexão com o NCAP.

3.4 O SOFTWARE

O desenvolvimento do software do STIM foi feito sob a plataforma Windows. Foram utilizados o ambiente de desenvolvimento MPLAB¹³ e o

¹³ MPLAB IDE versão 7.21

compilador C18¹⁴ para a programação do microcontrolador PIC18F252. Estas ferramentas são de uso gratuito e podem ser adquiridas através do site da Microchip¹⁵.

O código do programa do STIM que corresponde à implementação da norma IEEE 1451.2 foi baseado na nota técnica publicada pela empresa Microchip em Fischer e Burch (2000). Originalmente, o código foi escrito em C para o compilador PICC da empresa Hightec (HIGHTEC, 2005) e para um microcontrolador da família PIC16. Alterações foram feitas para que ele se adequasse ao compilador C18 bem como ao PIC 18F252. Um fluxograma do funcionamento geral do programa pode ser visto na Figura 19.

Figura 19. Fluxograma do programa do STIM

¹⁴ MPLAB C18 C Compiler Student Edition versão 2.40

¹⁵ www.microchip.com

As principais funcionalidades do STIM são implementadas via software. Pode-se dividir o programa em um conjunto básico de funções, necessárias ao funcionamento do STIM. São elas (SMITH, 2000):

- inicialização do hardware;
- comunicação com NCAP;
- leitura e escrita de sensores e atuadores;
- processamento de comandos;
- leitura e armazenamento de TEDS.

Na inicialização do hardware são configuradas as portas de E/S do microcontrolador e seus registradores internos. É nesta etapa que se configura os pinos correspondentes a TII para funcionamento no modo SPI.

A comunicação com o NCAP é feita através dos mecanismos de transmissão de dados e disparo descritos nas seções 3.1.1.3 e 3.1.3. Como pôde ser visto, o disparo não deve ocorrer durante a troca de dados entre NCAP e STIM.

Através dos endereços de função e canal, o programa do STIM é capaz de executar a função requisitada, seja ela uma execução de leitura/escrita em um canal, um comando de controle, de estado ou leitura de TEDS. Sempre que há uma mudança no estado do STIM, seus registradores de estado são atualizados e, dependendo das máscaras de interrupção, uma interrupção é gerada através do acionamento da linha NINT da TII (processo descrito na seção 3.1.1.4).

Somente os blocos obrigatórios da TEDS (Meta e Channel TEDS) foram incluídos neste protótipo. Eles foram implementados na memória de programa do PIC18F252, com a finalidade de simplificar o projeto do STIM. No entanto, esta solução só é adequada porque esses blocos contêm dados apenas para leitura (sem direito a escrita). Para os blocos com dados que podem ser modificados pelo NCAP, seria necessário utilizar uma memória não-volátil com possibilidade de escrita, do tipo EEPROM, por exemplo. O PIC18F252 possui 256 bytes de memória EEPROM para dados, suficiente para a implementação de alguns blocos. Caso mais canais ou outros blocos opcionais fossem implementados, um módulo de memória externo se tornaria necessário.

Não houve a preocupação em se inserir dados acurados nas TEDS, pois nesta pesquisa não se pretende aprofundar na análise da utilização ou interpretação de seus campos individualmente. No entanto, a estrutura da TEDS foi obedecida, e seus campos contêm valores válidos, mesmo que aproximados.

Rotinas adicionais foram implementadas para a comunicação com o transdutor digital SHT71 e com um módulo de LCD, cuja função principal foi auxiliar a depuração do programa do STIM.

Apesar de o SHT71 realizar a medida da umidade e da temperatura, o programa do STIM foi desenvolvido para apenas um canal. Escolheu-se a medida de umidade, pois esta se mostrou mais interessante e justifica a utilização de um sensor digital deste tipo. A posterior inclusão de mais um canal para representar a temperatura é simples e exige apenas algumas alterações no programa do STIM¹⁶.

As rotinas de comunicação com o SHT71 também foram implementadas em linguagem C, tendo como referência o trabalho desenvolvido por Burdelis (2005), as especificações técnicas do sensor (SENSIRION, 2005a) e o exemplo de código-fonte disponível em Sensirion (2005b).

Cabe aqui a uma observação em relação à programação do PIC. Espera-se que o STIM envie dados ao NCAP sempre do byte mais significativo ao menos significativo. No entanto, o PIC trabalha internamente com dados no formato *little-endian*, ou seja, com os bytes ordenados do menos significativo ao mais significativo. Deve-se tomar um cuidado especial quando se está enviando variáveis com mais de um byte do STIM para o NCAP, de forma a não se alterar o valor do dado enviado devido à incorreta ordenação dos bytes. O mesmo vale para a transmissão no sentido oposto de dados e comandos de mais de um byte.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escolha dos componentes e ferramentas utilizadas na construção do STIM se mostrou acertada, pois permitiu o desenvolvimento do protótipo com relativa

¹⁶ Incluindo a adição de mais uma Channel TEDS para este canal.

facilidade. Apesar da complexidade da montagem não ser alta, o conhecimento envolvido no processo é amplo, englobando diversos assuntos desde a arquitetura, funcionamento e utilização de um PIC até o conhecimento da norma IEEE 1451.2 em si. Todavia, a literatura e documentação existentes sobre o desenvolvimento de STIMs facilitam qualquer esforço neste sentido.

O PIC 18F252 se mostrou adequado para as necessidades deste projeto, possuindo recursos suficientes para implementar o código do STIM, a TEDS, a TII, o controle do display de LCD e as rotinas de comunicação com o transdutor digital. Pode-se afirmar também que no advento do emprego de transdutores analógicos a utilização do PIC continua sendo válida, pois este possui conversor A/D de 10 bits integrado e, caso seja necessário, pode ser facilmente usado para controlar um conversor A/D externo de maior resolução. A possibilidade de escolha da frequência do *clock* deste microcontrolador, que pode variar de 32 kHz a 40 MHz dependendo do cristal oscilador externo escolhido, também lhe confere grande flexibilidade e capacidade de processamento.

Embora não seja fundamental para um trabalho de pesquisa, pôde-se também confirmar que um STIM pode ser desenvolvido com componentes e ferramentas de fácil acesso e de baixo custo, incluindo algumas até mesmo gratuitas. Este é um fator potencialmente importante para sua adoção em aplicações agrícolas, já que o custo de um sistema se torna crucial em uma área onde a disposição para o investimento em tecnologia é relativamente baixa. Com era de se esperar, o componente mais caro deste projeto foi o transdutor SHT71 que no Brasil custa na ordem de U\$60,00. Este mesmo sensor pode ser encontrado no mercado internacional por menos de U\$30,00. O modelo de PIC escolhido também foi superestimado para um produto final, pois nesse caso pode-se otimizar os recursos e implementar o projeto em um modelo mais simples e barato. Em última análise, dependendo da aplicação e do transdutor utilizado, um STIM pode ser produzido a custos bem reduzidos.

A avaliação do funcionamento do STIM, em conjunto com o NCAP desenvolvido (apresentado no Capítulo 4), encontra-se no Capítulo 5.

4 DESENVOLVIMENTO DE UM NCAP BASEADO NA TECNOLOGIA LONWORKS

O objetivo desta pesquisa, além de produzir um STIM, foi conseguir integrá-lo a uma rede de controle, mais especificamente a uma rede LonWorks. Para tanto, foi necessário desenvolver um nó LonWorks capaz de realizar o papel do NCAP, servindo como interface entre o STIM e a rede.

Como é discutido neste capítulo, a tecnologia LonWorks e seu protocolo LonTalk provêm funcionalidades que tornam desnecessário o desenvolvimento de um NCAP em conformidade com norma IEEE 1451.1. No entanto, para servir de interface ao STIM, o nó LonWorks (NCAP) tem que se adequar à norma IEEE 1451.2. Um NCAP é considerado em conformidade com esta norma se: implementar as linhas, protocolos, e temporizações definidas pela padronização da TII na cláusula 6 da norma IEEE 1451.2 (IEEE, 1998).

Este capítulo descreve o desenvolvimento do NCAP em um nó LonWorks em conformidade com a norma IEEE 1451.2. Inicialmente é feita uma introdução à tecnologia LonWorks, seguida por uma descrição da implementação básica de um nó, e posteriormente pelo detalhamento do desenvolvimento do NCAP.

4.1 A TECNOLOGIA LONWORKS

A tecnologia LonWorks foi desenvolvida no início da década de 90 pela companhia americana Echelon (ECHELON, 2005) com o intuito de fornecer uma tecnologia capaz de promover um novo paradigma de redes de controle distribuído.

O termo LonWorks engloba um conjunto de especificações, dispositivos, ferramentas e tecnologias que em conjunto formam uma solução completa. Não se trata de apenas um protocolo de comunicação ou uma simples rede de controle. O sistema LonWorks, como pode ser chamado, é constituído de diversos componentes, que implementam todas as sete camadas do *Open System Interconnection Reference Model* (modelo OSI) (TANENBAUM, 2003).

Uma das grandes virtudes da tecnologia LonWorks é tratar automaticamente dos detalhes das camadas inferiores do modelo OSI da rede de comunicação dos dispositivos, permitindo aos desenvolvedores de soluções se preocupar apenas com a camada de aplicação. Todo restante, desde o acesso ao meio físico, até o roteamento de mensagens e endereçamento é tratado pelo sistema de maneira automática.

Em uma rede LonWorks a comunicação entre os dispositivos é orientada a dados e não a comandos como em sistemas tradicionais. As decisões de qual ação tomar ficam a cargo da aplicação de cada nó, e não a cargo de um controlador central. Isso elimina a necessidade de agrupar toda a informação sobre as funções e a topologia do sistema em um único ponto da rede, distribuindo a inteligência do sistema e reduzindo seus pontos críticos de falha. Um estudo sobre as vantagens e o uso de redes LonWorks em controle distribuído pode ser visto em Pereira (2006).

Para um melhor entendimento da tecnologia, os componentes mais importantes do sistema LonWorks são descritos a seguir:

4.1.1 Neuron Chip

No contexto de controle distribuído, cada nó, ou dispositivo da rede, possui uma inteligência própria, que permite que ele se comunique com o resto da rede. O Neuron Chip pode ser considerado a parte principal do nó LonWorks, executando todas as suas funções de comunicação e a aplicação do mesmo. Sua arquitetura interna é constituída de três processadores de oito bits, sendo dois deles responsáveis pela execução do protocolo de comunicação LonTalk (descrito adiante) e o terceiro responsável apenas pela aplicação do nó (ECHELON, 1999).

A utilização do Neuron Chip no desenvolvimento de nós LonWorks não é obrigatória, mas apresenta vantagens significativas. A principal delas decorre do fato do Neuron Chip possuir uma implementação completa do protocolo de comunicação LonTalk em *firmware*, dispensando o desenvolvedor de se preocupar com a implementação do protocolo e ainda garantindo uma implementação homogênea e correta. Conseqüentemente, ele permite ao desenvolvedor se concentrar no desenvolvimento do dispositivo e sua aplicação, que é o foco de seu trabalho.

Concebido para ser utilizado em dispositivos de baixo custo, com um preço unitário próximo de três dólares para algumas versões, seu custo não pode ser considerado empecilho à sua adoção (ECHELON, 1999).

As aplicações executadas no Neuron Chip são escritas em uma linguagem de programação denominada Neuron C (ECHELON, 1995a, 1995b). Ela se baseia na linguagem ANSI C com algumas importantes extensões (ECHELON, 1999):

- um novo tipo de declaração *when*, que introduz o conceito de eventos e define a ordem de execução de tarefas;
- 37 tipos de dados adicionais, 35 objetos de E/S e 2 objetos de temporização (*timer*), para simplificar e padronizar o controle dos dispositivos;
- mecanismos integrados de passagem de mensagens para variáveis de rede e outros tipos de mensagens (mais detalhes na seção 4.1.2).

Neste modelo de programação baseado em eventos as aplicações dos nós são desenvolvidas com base na ocorrência de determinados eventos em certos pontos da rede ou em outros dispositivos. Durante o funcionamento da rede, cada aplicação recebe a notificação destes eventos automaticamente, eliminando a necessidade de realização de *polling* nos dados. Isso reduz significativamente o tráfego de dados pela rede, melhorando o desempenho do sistema como um todo.

Apesar de o Neuron Chip apresentar grande versatilidade, seu processador de 8 bits é relativamente simples. Caso a capacidade de processamento ou a quantidade de memória do Neuron não seja suficiente para a aplicação desejada, é possível executar esta aplicação em um outro processador, através de uma interface paralela especial denominada *Microprocessor Interface Application* (MIP). Neste caso, o Neuron Chip fica responsável apenas pela interface com a rede, fazendo a ponte entre o processador que executa a aplicação e a rede LonWorks.

Durante sua fabricação, cada chip recebe um código de identificação permanente de 48 bits denominado Neuron ID, cuja função é lhe proporcionar uma identificação única em todo o mundo. Seu objetivo é facilitar a instalação, manutenção e depuração das redes LonWorks, uma vez que permite que cada dispositivo ou nó seja identificado univocamente.

4.1.2 Protocolo LonTalk

O protocolo LonTalk, também conhecido como protocolo LonWorks, é o ponto central da tecnologia LonWorks. Ele fornece o conjunto de serviços de comunicação que permite que os dispositivos troquem informações pela rede sem a necessidade de suas aplicações terem conhecimento de seus nomes, endereços, funções, ou mesmo da topologia da rede (ECHELON, 1999).

O protocolo se baseia na transmissão de pacotes em comunicação ponto-a-ponto (*peer-to-peer*) e segue o modelo OSI definida pela ISO, implementando suas sete camadas. Entretanto, difere de redes como TCP/IP, pois foi projetado para os requisitos específicos das redes de controle e não para redes de dados. Através do ajuste de cada camada do protocolo para fins de controle, obteve-se uma solução capaz de prover a confiabilidade, performance e comunicação robusta necessária às aplicações de controle (ECHELON, 1999).

Inicialmente suportado apenas por Neuron Chips, o protocolo atualmente pode ser implementado em outros processadores já que desde 1999 é definido pelo padrão aberto ANSI/EIA 709.1. Por outro lado, o Neuron Chip desempenha um papel importante no desenvolvimento de soluções baseadas em LonTalk pois já contém uma implementação do protocolo em *firmware*. Isso garante que todos os dispositivos LonWorks (que utilizem um Neuron Chip) possuam uma implementação correta e homogênea do protocolo, o que reduz erros e custos de desenvolvimento e depuração.

Pode-se dizer que um dos pontos fundamentais do protocolo LonTalk é a implementação do conceito inovador de variáveis de rede, que são responsáveis pela disseminação dos dados através da rede LonWorks. As variáveis de rede (*network variables* ou NVs) representam as informações que a aplicação de um dispositivo espera receber de outros nós (variáveis de entrada), a fim de executar suas funções, ou que ela deseja fornecer para os demais nós da rede (variáveis de saída) (ECHELON, 1999). Como exemplo pode-se citar um sensor de temperatura e um controlador de ar condicionado. O sensor provavelmente poderia dispor de apenas

uma variável de saída correspondente ao valor da temperatura por ele medido. Já um controlador de ar condicionado poderia ter uma variável de rede de entrada de temperatura (para que ele possa decidir se deve ou não ligar o ar) e uma variável de saída, indicando o estado do ar condicionado (ligado ou desligado).

Através da associação de variáveis de entrada de um nó com variáveis de saída de outro, as informações são trocadas entre os dispositivos. Esta associação é realizada através de um processo denominado *binding* (pode ser traduzido como “conexão”) entre as variáveis de rede, e da atuação do protocolo LonTalk presente no *firmware* de cada Neuron Chip. O processo de *binding* cria ligações lógicas entre uma variável de saída de um dispositivo e a variável de entrada de outro. Estas conexões podem ser imaginadas como “fios virtuais” entre os dispositivos (ECHELON, 1999). No exemplo anterior, a variável de rede de saída do sensor de temperatura poderia ser “conectada” à variável de entrada de temperatura do controlador de ar condicionado, permitindo que este realizasse o controle da temperatura ambiente em função do valor medido.

Neste processo de *binding*, executado durante a instalação e configuração da rede, o *firmware* de cada dispositivo é configurado para que conheça o endereço lógico dos outros dispositivos que desejam receber sua variável de rede de saída¹⁷. Sempre que o valor desta variável é atualizado, o *firmware* se encarrega de montar e enviar os pacotes de dados apropriados para estes outros dispositivos automaticamente, sem intermédio da aplicação do nó. Da mesma forma, quando o dispositivo recebe um valor atualizado de uma variável de entrada da qual ele necessita, o *firmware* se encarrega de passar automaticamente este valor para sua aplicação.

A abstração alcançada com as conexões lógicas entre as variáveis de rede proporciona uma visão de alto nível sobre o sistema, eliminando a necessidade de conhecer detalhes de seu funcionamento interno como endereçamentos, topologias de rede e roteamento. O sistema pode ainda ser facilmente alterado através da modificação destas conexões, sem a necessidade de alteração do programa dos dispositivos. Para tanto basta re-fazer os *bindings* entre suas variáveis de rede.

¹⁷ Um dispositivo pode ter mais de uma variável de saída.

É interessante notar também que cada variável de rede possui um tipo que define as unidades, a escala e a sua estrutura de dados. Variáveis de entrada só podem ser conectadas a variáveis de saída do mesmo tipo. Isso previne a ocorrência de erros de instalação comuns, como ligar variáveis que representam dados diferentes (uma saída de temperatura a uma entrada de pressão, por exemplo).

O protocolo LonTalk também possui mecanismos para a comunicação através de mensagens denominadas “*explicitas*”, sem o uso de variáveis de rede. Por este método a aplicação do dispositivo fica encarregada de montar os pacotes, especificar o endereçamento e o método de envio dos dados. Além disso, este tipo de mensagem não é interoperável por não ser padronizada. Por outro lado permite implementar funcionalidades que não são nativas ao protocolo LonTalk (como FTP, por exemplo) ou implementar funcionalidades proprietárias.

O protocolo LonTalk independe do meio de comunicação físico usado entre os dispositivos. O desenvolvedor da rede pode escolher entre os diversos tipos já existentes para redes de controle, bastando utilizar o transceptor (transceiver) adequado para tal meio. Um transceptor nada mais é que um conversor entre os sinais digitais e o meio físico de transmissão.

O meio físico de comunicação e seus transceptores caracterizam um canal de comunicação. Exemplos mais comuns de canais de comunicação utilizados em redes Lonworks são o TP/FT-10 (par trançado em topologia livre a 78 kbps), TP/XF-1250 (par trançado em barramento a 1,25 Mbps) e o PL-20 (rede elétrica a 5,4 kbps). Outros meios de comunicação como fibra óptica, infravermelho e sem fio também são suportados.

Canovas (2006) apresenta uma descrição detalhada do funcionamento do protocolo LonTalk e da tecnologia LonWorks como um todo.

4.1.3 Associação LonMark

A associação LonMark (LONMARK, 2005) foi criada em 1994 com o intuito de promover a interoperabilidade de dispositivos, através do desenvolvimento de padrões e certificação de produtos. A associação define regras que garantem a

interoperabilidade dos dispositivos em todas as camadas do modelo OSI, desde o acesso ao meio físico até a camada de aplicação. Uma vez certificado, o dispositivo pode carregar o logo da associação, e terá sua interoperabilidade garantida com qualquer rede LonWorks (ECHELON, 1999).

Existem dois pontos principais de atuação da associação LonMark. O primeiro é padronizar a estruturação e documentação dos programas de aplicação, cujo destaque é a especificação das variáveis de rede padrão LonWorks, denominadas *Standard Network Variable Types* (SNVTs). O segundo é padronizar os transceptores e os canais de comunicação físicos a eles associados.

As SNVTs promovem a interoperabilidade entre dispositivos de diversos fabricantes, pois fornecem um formato comum para as variáveis de rede do sistema LonWorks. Desta forma dados podem ser passados de um dispositivo ao outro sem ambigüidades em relação ao seu conteúdo, formatação ou tipo. Como exemplo pode-se citar a SNVT_temp que define uma variável de rede destinada a conter dado de temperatura, com resolução de 0,1, em graus Celsius representado em 2 bytes.

Apesar de a certificação não ser condição necessária para desenvolver produtos ou soluções baseadas na tecnologia LonWorks, ela é essencial para o desenvolvimento de dispositivos comerciais interoperáveis.

4.1.4 Ferramentas

Dentre as diversas ferramentas de software disponíveis para o sistema LonWorks, as seguintes podem ser destacadas:

- LonMaker: ferramenta de configuração e gerenciamento de redes LonWorks cuja principal função é realizar os *bindings*, ou ligações lógicas, entre os nós da rede (ECHELON, 2003a);
- NodeBuilder: compilador de Neuron C utilizado no desenvolvimento das aplicações dos nós (ECHELON, 2003b);
- LNS: sistema operacional de rede (*network operational system*) cuja finalidade é fornecer uma infraestrutura que permita a interoperabilidade entre as ferramentas e as aplicações de uma rede LonWorks. Este sistema

operacional é um grande facilitador durante a etapa de instalação e configuração do sistema, mas não é necessário para o funcionamento da rede (ECHELON, 2004a).

O compilador NodeBuilder versão 1.5 foi utilizado no desenvolvimento da aplicação do NCAP neste trabalho.

4.1.5 LonWorks e a IEEE 1451.1

A principal função da norma IEEE 1451.1 é estabelecer um modelo para os transdutores inteligentes que permita o desenvolvimento de aplicações interoperáveis de maneira padronizada e simplificada. A norma define as regras e os modelos para o desenvolvimento das aplicações bem como o formato das mensagens e dados trocados entre as diversas interfaces existentes entre a rede, a aplicação e o(s) transdutor(es).

Como pôde ser visto nas seções anteriores, o sistema LonWorks apresenta uma especificação completa de uma rede (de controle) desde o acesso ao meio físico (canais de comunicação e transceptores) até a camada de aplicação (variáveis de rede). Isso garante a interoperabilidade entre os dispositivos da rede e fornece um modelo padrão de desenvolvimento de aplicações.

Diante deste fato, a construção de um NCAP em conformidade com a IEEE 1451.1 para uma rede LonWorks torna-se à primeira vista desnecessária, uma vez que grande parte das funcionalidades almejadas pela norma já são implementadas pelo próprio sistema LonWorks. Para esta pesquisa, pode-se afirmar que não seria conveniente tentar desenvolver uma rede de transdutores em conformidade com a norma IEEE 1451.1 em uma rede LonWorks, uma vez que isto exigiria um grande trabalho de adaptação do sistema às definições da norma (caso isto seja possível¹⁸), o que foge do escopo deste trabalho. Vale lembrar que as normas da IEEE 1451 são complementares, mas independentes, podendo ser implementadas individualmente. E esta pesquisa focou-se na norma IEEE 1451.2.

¹⁸ Um estudo mais aprofundado sobre esta possibilidade é necessário, e não foi abordado neste trabalho.

A implementação da IEEE 1451.1 garante, no entanto, a portabilidade das aplicações para outras redes de controle, uma vez que abstrai o seu desenvolvimento da rede de controle utilizada. Esta pode ser considerada a principal desvantagem da não implementação da norma neste trabalho de pesquisa. Os demais benefícios da norma são potencializados em outros tipos de rede nos quais não existem especificações padronizadas para as camadas superiores do modelo OSI, como é o caso das redes CAN.

O desenvolvimento do NCAP apresentado neste capítulo se baseia na implementação de um processador de rede capaz de realizar a comunicação entre a rede LonWorks e o STIM, seguindo as especificações da interface de comunicação TII definida pela norma IEEE 1451.2. Não é o objetivo deste trabalho buscar uma implementação completa das especificações contidas na norma IEEE 1451.1.

4.2 DESENVOLVIMENTO DE UM NÓ LONWORKS

Primeiramente, antes de se criar um NCAP funcional, é necessário construir um nó básico que seja compatível com o sistema LonWorks. Para tanto, foi utilizado um módulo de controle TP/XF-78 (ECHELON, 1996), fabricado pela Echelon (Figura 20). Este módulo contém os principais elementos necessários para o desenvolvimento de um nó LonWorks. Ele inclui um Neuron 3150 Chip, um transceptor para par trançado, memória e interface para os pinos de E/S e para os sinais de serviço (SERVICE) e *reset* (RESET) do Neuron Chip.

O sinal de serviço tem a função de requisitar o código de identificação do Neuron Chip sempre que uma ferramenta de rede precise executar alguma tarefa de configuração ou administração no nó. Ao se acionar o pino de serviço, o nó envia à rede seu Neuron ID, que permite, por exemplo, que uma ferramenta de configuração o identifique e envie a ele seu programa de aplicação do dispositivo. O sinal de *reset* é um meio externo para se reiniciar a aplicação e o *firmware* do nó.

Figura 20. Módulo TP/XF-78

A interface elétrica para o módulo é feita através de dois conectores, P1 e P2. P1 fornece acesso aos pinos de E/S do neuron Chip, pinos de RESET e SERVICE e a conexão à alimentação do módulo. O conector P2 contém a interface para a rede em par trançado.

Na Tabela 6 e Tabela 7 são apresentadas as pinagens para os conectores P1 e P2 respectivamente.

Tabela 6 – Conector P1 (ECHELON, 1996)

Nome	Pino	Função
IO0	2	E/S
IO1	4	E/S
IO2	6	E/S
IO3	8	E/S
IO4	10	E/S
IO5	11	E/S
IO6	13	E/S
IO7	15	E/S
IO8	17	E/S
IO9	14	E/S
IO10	16	E/S
~RESET	9	Reset
~SERVIÇO	18	Serviço
+5V	12	Alimentação
GND	3,5,7	”
	1	Sem conexão

Tabela 7 – Conector P2 (ECHELON, 1996)

Nome	Pino	Função
CTB	1	<i>Center-tap</i> do transformador do transceptor
CTA	2	<i>Center-tap</i> do transformador do transceptor
Data B	3	Sinal de dados A da rede
Data A	4	Sinal de dados B da rede
	5	Sem conexão
	6	Sem conexão

Este módulo foi concebido como uma plataforma genérica de desenvolvimento e necessita de um hardware adicional para tornar-se um nó funcional. Este hardware consiste dos conectores para rede, alimentação e circuito para os botões de serviço e *reset*. Tal circuito pode ser implementado como mostrado na Figura 21.

Figura 21. Circuito típico para pinos de serviço (~SERVICE) e *reset* (~RESET) (ECHELON, 1996)

Com a adição destes componentes, o nó já pode ser inserido em uma rede de controle LonWorks, estando apto a ser configurado pelas ferramentas de desenvolvimento e sendo capaz de executar uma aplicação em rede.

Para facilitar o desenvolvimento do nó, uma placa adaptadora (Figura 22) foi construída de modo a permitir o acoplamento do módulo TP/XF-78 ao hardware auxiliar. Esta placa contém todos os componentes descritos anteriormente, mais os necessários à interface IEEE 1451.2 (que serão descritos adiante).

Figura 22. Placa adaptadora com hardware auxiliar

Esta modulariedade facilita o desenvolvimento de novos nós e a substituição de componentes defeituosos ou falhos.

A Figura 23 apresenta o módulo TP/XF-78 acoplado à placa auxiliar.

Figura 23. Módulo TP/XF-78 acoplado à placa auxiliar

4.3 O HARDWARE DO NCAP

Em relação ao hardware, para que um nó LonWorks possa fornecer as funcionalidades de um NCAP, basta que seja adicionado a ele os componentes necessários à implementação da TII, conforme definido pela norma IEEE 1451.2.

Como pôde ser visto na Tabela 6, o módulo TP/XF-78 possui 11 pinos de entrada e saída digitais (E/S) que podem ser utilizados para implementar as funcionalidades do nó. No desenvolvimento do NCAP esses pinos foram usados para a interface TII.

Conforme foi descrito na seção 3.1.3, a transmissão de dados na TII é baseada no protocolo SPI¹⁹ com algumas linhas a mais para sinalização e sincronização de dados. A relação destas linhas, e a direção de transmissão de dados em relação ao NCAP, podem ser vistas na Tabela 8.

Tabela 8 – Linhas TII

TII	Função	Cor	Sentido
1	DCLK	MARROM	NCAP → STIM
2	DIN	VERMELHO	NCAP → STIM
3	DOUT	LARANJA	STIM → NCAP
4	NACK	AMARELO	STIM → NCAP
5	GND	VERDE	POWER
6	NIOE	AZUL	NCAP → STIM
7	NINT	ROXO	STIM → NCAP
8	NTRIG	CINZA	NCAP → STIM
9	POWER	BRANCO	POWER
10	NSDET	PRETO	STIM → NCAP

O Neuron Chip já possui uma implementação do protocolo SPI em *firmware* (ECHELON, 2004). A biblioteca de funções SPI estipula os pinos 8, 9 e 10 do módulo TP/XF-78 como as linhas de sincronização dos dados (*clock*), entrada, e saída, que correspondem à DCLK, DIN e DOUT da TII, respectivamente. Os demais pinos ficam a critério do desenvolvedor, e foram designados conforme a Tabela 9.

¹⁹ Maiores detalhes sobre a utilização do SPI em Neuron Chips em Echelon (2004b).

Tabela 9 – Relação entre pinos de E/S do Neuron Chip e TII

TII	Função	Neuron E/S	Pino (P1)
1	DCLK	8	17
2	DIN	9	14
3	DOUT	10	16
4	NACK	2	6
5	GND	-	3,5,7
6	NIOE	7	15
7	NINT	6	13
8	NTRIG	5	11
9	POWER	-	12
10	NSDET	1	4

De acordo com a norma IEEE 1451.2, as linhas de entrada do NCAP, nomeadamente, DOUT, NACK NINT, e NSDET, devem ser ligados a resistores de *pull-up* de forma a evitar erros de comunicação na ausência de um STIM conectado ao NCAP ou durante uma operação de *hot-swap*.

As especificações elétricas da TII são compatíveis com as características dos pinos de E/S do Neuron Chip, portando nenhum condicionamento foi necessário.

A norma IEEE 1451.2 não define um conector padrão para a TII. Dessa forma utilizou-se o mesmo conector utilizado no STIM. O código de cores para as linhas da TII foi obedecido, conforme a norma. O resultado final da construção do NCAP pode ser visto na Figura 24.

Figura 24. NCAP desenvolvido

4.4 O SOFTWARE DO NCAP

O software desenvolvido para o NCAP complementa o hardware descrito na seção anterior na implementação da interface TII e conseqüente acesso aos dados do STIM.

O programa foi desenvolvido na linguagem Neuron C com a ferramenta NodeBuilder versão 1.5 da Echelon (ECHELON, 2003b). Algumas limitações desta linguagem e do Neuron Chip levantaram dúvidas sobre a possibilidade de se desenvolver um NCAP em um nó LonWorks sem a utilização de um outro microprocessador em paralelo ao Neuron Chip (através da interface MIP, por exemplo) para implementar a interface TII. No entanto, o desenvolvimento sem nenhum hardware adicional ao apresentado anteriormente foi bem sucedido, com algumas ressalvas descritas na seção 4.5.

O programa basicamente disponibiliza para uma rede LonWorks o acesso aos dados do transdutor através de variáveis de redes, permitindo que o valor da umidade medida pelo STIM seja monitorada ou utilizada em outro ponto da rede.

A norma IEEE 1451.2 determina que um STIM deve implementar também os comandos de estado, controle e interrupção, além da leitura e/ou escrita dos dados do transdutor. Deste modo, variáveis de rede que permitem o acesso a estes dados também foram inclusas.

Segue uma apresentação dos principais pontos considerados durante o desenvolvimento do programa do NCAP.

4.4.1 Protocolos

A norma IEEE 1451.2 define os protocolos de comunicação usados na transferência de dados entre o NCAP e o STIM. Esses protocolos foram implementados em Neuron C para que o nó LonWorks pudesse acessar e disponibilizar as informações do STIM. Mais detalhes sobre os protocolos pode ser encontrado na seção 3.1.3. Segue uma descrição da implementação no nó LonWorks.

4.4.1.1 Transferência de bits

Conforme visto na seção 4.3, a transferência de dados bit-a-bit serial especificada pela norma é compatível com o protocolo SPI. Na comunicação mestre-escravo entre NCAP e STIM, o NCAP realiza o papel de mestre controlando o fluxo de bits através da linha DCLK.

Dentre os objetos de E/S disponíveis no Neuron Chip há o Neurowire, uma implementação em software da interface SPI, que suporta tanto a configuração de mestre como escravo com taxas de transferência até 20 kbps. Sendo implementado em software (como uma biblioteca de funções), o Neurowire exige todo o tempo de processamento do Neuron Chip durante a ocorrência das transferências de dados. O suporte em hardware do protocolo SPI pode ser encontrado em alguns modelos de Neuron Chips fabricados pela empresa Cypress, ou em certos modelos de transceptores inteligentes da própria Echelon (ECHELON, 2004). No entanto sua utilização não é necessária, uma vez que para este trabalho não há a necessidade de processamento de dados durante a comunicação. A biblioteca de funções Neurowire foi, portanto, usada na implementação da comunicação da TII.

A biblioteca restringe os pinos de E/S passíveis de serem utilizados para a interface SPI, sendo apenas a escolha do sinal de seleção de escravo (*slave select*) livre, como pode ser visto na Tabela 10. Apesar de o sinal *Slave Select* (SS) ter sido usado no PIC como a linha de entrada NIOE da TII (ver seção 3.3), não é possível utilizá-lo como o sinal de NIOE no NCAP devido ao funcionamento do objeto Neurowire. A linha NIOE deve obedecer ao protocolo definido pela norma IEEE 1451.2, sendo ativada no início da transmissão e desativada apenas quando todos os *bytes* de dados foram transmitidos (como visto na Figura 14 da seção 3.1.3). O sinal de SS no Neuron Chip, por sua vez, é automaticamente comutado toda vez que um *byte* é transmitido com sucesso. Isso impossibilitou que o sinal de SS disponibilizado pela biblioteca Neurowire fosse utilizado como o sinal NIOE da TII. Este acabou sendo implementado em um pino de E/S independente.

Tabela 10 – Linhas Neurowire

Sinal SPI	Descrição	Pino (P1)	TH
SCK	Serial Clock	8	DCLK
MOSI	Master Out – Slave In	9	DIN
SS	Slave Select	-	-
MISO	Master In – Slave Out	10	DOUT

Para utilizar os pinos de E/S como interface SPI é necessário configurá-los como tal. Isto é feito através da seguinte declaração do pino de E/S como um objeto Neurowire:

```
IO_8 neurowire master select(IO_4) kbaud(10) clockedge(-) spiPIC;
```

Segue uma descrição dos parâmetros:

- `IO_8`: indica que o pino de E/S 8 será usado como clock e implica que os pinos 9 e 10 serão a saída e entrada de dados conforme a Tabela 10.
- Conforme foi discutido anteriormente esse parâmetro é fixo para o objeto Neurowire.
- `master`: indica que o Neuron Chip será o mestre na comunicação.
- `select(IO_4)`: estipula o pino de E/S para ser usado como sinal de SS. Neste trabalho foi designado um pino em desuso.
- `kbaud`: taxa de transmissão. Pode assumir os valores 1, 10 ou 20, que correspondem ao valor em kbps para Neurons com *clock* interno de 10 MHz. Nota-se que os valores possíveis não condizem com a taxa mínima estipulada pela norma IEEE 1451.2. Este é um ponto que apesar de não representar problemas práticos de implementação pode ser considerado incompatível com a norma.
- `clockedge`: indica a polaridade (nível do sinal quando ocioso) do sinal de *clock* (*Clock Polarity* – CPOL) e pode assumir os valores positivo (+) para nível lógico zero e negativo (-) para nível lógico um. A norma IEEE 1451.2 estipula o nível lógico um para o sinal ocioso.
- `spiPIC`: nome escolhido para o objeto Neurowire criado.

Outro parâmetro importante na interface SPI é a fase do sinal de *clock*, ou *Clock Phase* (CPHA). Ele indica quando o dado deve ser apresentado e quando deve ser amostrado. Um CPHA com valor zero indica que o dado deve ser amostrado na

primeira borda do sinal de clock e deve ser apresentado na segunda borda. O valor um para CPHA determina que a primeira borda do sinal de clock é usada para apresentar o dado e a segunda para amostrá-lo. O objeto Neurowire só suporta CPHA = 1, que coincide com o valor estipulado pela norma IEEE 1451.2.

A transferência de dados é trivial. Basta chamar a função `io_in()` ou `io_out()` passando como parâmetro o número de bits a serem transmitidos, o objeto SPI e o endereço do *buffer* contendo os dados a serem transmitidos ou, no caso de uma recepção, onde os dados devem ser guardados. É interessante notar que as funções `io_in` e `io_out` podem ser usadas indistintamente, pois a comunicação SPI ocorre nos dois sentidos simultaneamente.

4.4.1.2 Transferência de bytes

Todos os dados transferidos entre o NCAP e o STIM são feitos em grupos de oito bits (um byte). O NCAP só inicia o processo de leitura ou escrita de um byte após observar uma transição no estado da linha NACK da TII.

A transmissão é feita através da função `io_out()` ou `io_in()` descrita na seção anterior, passando o valor “8” como o parâmetro que indica a quantidade de bits a serem lidos ou enviados.

4.4.1.3 Transferência de *frame* de dados

O processo de leitura e escrita de um *frame* de dados pôde ser vista na Figura 14 e ocorre como descrito na seção 3.1.3.

A comutação e leitura das linhas de sinalização NTRIG, NACK e NIOE necessárias à realização do disparo e comunicação dos dados é feita através das funções em Neuron C `io_out()` e `io_in()`, passando-se para elas o pino de E/S correspondente ao sinal (Tabela 9) e valor desejado no caso de uma mudança de valor.

4.4.2 Acesso aos dados do STIM

Uma vez conhecido o mecanismo de troca de dados entre o STIM e o NCAP, resta apresentar como os dados obtidos ou enviados ao STIM são representados no programa do NCAP e na rede LonWorks.

4.4.2.1 Dados do transdutor (medida de umidade)

A linguagem Neuron C não possui suporte ao tipo de dado *float*. No entanto, é possível realizar o cálculo em ponto flutuante através do uso de uma biblioteca de funções específica em conjunto com uma estrutura de dados do tipo `float_type` que representa um número em ponto flutuante de maneira análoga à especificada pela norma IEEE 754.

Como os dados de leitura do transdutor são transmitidos como variáveis de ponto flutuante de quatro bytes, é necessário convertê-los ao formato `float_type` após sua recepção no NCAP.

Isto foi feito através da criação de uma estrutura do tipo união (*union*) contendo uma variável de quatro bytes do tipo `char` (um byte sem sinal) para receber o valor transmitido e uma variável do tipo `float_type` pela qual são realizadas as contas em ponto flutuante. Um exemplo de declaração da estrutura pode ser vista abaixo:

```
union data
{
    char buffer[4];
    float_type f_data;
} f_buffer;
```

Cada byte recebido pela TII (em um total de 4) é colocado sequencialmente em cada posição da variável `buffer`. Como a norma especifica que os dados são transmitidos do byte mais significativo ao menos significativo, não há a necessidade de reordenar os dados, uma vez que o Neuron Chip trabalha com ordenação *big-endian* (bytes ordenados do mais significativo ao menos significativo).

O tipo de variável de rede escolhida para representar o valor de umidade relativa proveniente do STIM foi a `SNVT_lev_percent`. Esta variável pode ser usada para representar valores de porcentagem numa rede LonWorks.

A `SNVT_lev_percent` possui a seguinte especificação:

Tabela 11 – SNVT_lev_percent (ECHELON, 2002)

SNVT Index	Measurement	Type Category	Type Size
81	Percentage Level	Signed Long	2 bytes
Valid Type Range	Type Resolution	Units	Invalid Value
-163.840 .. 163.830	0.005	Percent of Full Scale, or Parts-per-Million (ppm)	32,767 (0x7FFF)
Raw Range	Scale Factors	File Name	Default Value
-32,768 .. 32,766 (0x8000 .. 0x7FFE)	5, -3, 0 $S = a \cdot 10^b \cdot (R+c)$	N/A	N/A

Como se pode verificar, seu dado interno é do tipo `signed long` de dois bytes, e a resolução do seu tipo de dado é de 0,005. Isso significa que cada unidade do valor contido na variável de rede representa 0,005% do valor real. Portanto, para converter os dados recebidos do transdutor para o formato da variável de rede é necessário primeiramente multiplicar o valor contido na variável `float_type` por 200 e posteriormente realizar a conversão para `signed long`.

Para tanto foram utilizadas funções da biblioteca para Neuron C de aritmética estendida, que suporta operações com o tipo `float_type`. As duas operações podem ser vistas no exemplo de código abaixo:

```
f1_mul(&f_buffer.f_data, &f_200, &f_hum);
Humidity = f1_to_slong(&f_hum);
```

Onde `f1_mul()` é a função de multiplicação na qual o parâmetro `&f_buffer.f` representa o endereço da variável `float_type` que contém o valor recebido, `&f_200` é uma constante com valor duzentos e `&f_hum` o endereço da variável `float_type` que receberá o resultado da multiplicação. A função `f1_to_slong()` realize a conversão entre o tipo `float_type` e `signed long` colocando o resultado da conversão na variável de rede de saída `Humidity`.

O programa do NCAP envia um comando de disparo ao STIM e lê o valor da umidade a cada 4 segundos. Esse período de amostragem foi escolhido arbitrariamente e pode ser alterado conforme necessário.

4.4.2.2 Estado

As informações sobre o estado do STIM, tanto global como de cada canal, são acessadas através de variáveis de rede de saída do tipo `snvt_state`. Este tipo de variável representa uma estrutura de 16 bits onde cada bit é acessado individualmente.

Como o STIM desenvolvido possui apenas um canal, e cada registrador de estado possui dois bytes, apenas duas variáveis de rede foram necessárias, uma para o estado global e outra para o estado do canal de umidade.

Um evento é gerado sempre que o sinal de requisição de serviço (NINT) da TII é ativado pelo STIM. O programa do NCAP então lê os valores dos registradores de estado do STIM e atualiza o valor das variáveis de rede.

4.4.2.3 Máscaras de interrupção

As máscaras de interrupção são representadas através de variáveis de rede do tipo `snvt_state`, a mesma utilizada para o estado do STIM. No entanto, neste caso a variável de rede é de entrada, pois seu valor pode ser alterado. Toda vez que a configuração das máscaras de interrupção é modificada através da rede, um evento é gerado no programa do nó e os dados atualizados são enviados ao STIM.

4.4.2.4 TEDS

A META TEDS e CHANNEL TEDS são acessadas sempre que um STIM é conectado ao NCAP ou durante a fase de inicialização do NCAP, caso já haja um STIM a ele conectado. As TEDS são armazenadas em variáveis internas do programa, no entanto, não foram criadas variáveis de rede para representar seus

campos de dados. A verificação do conteúdo das TEDS foi feita através da ferramenta NodeBuilder que permite depurar o software do nó LonWorks e verificar o conteúdo de sua memória. Futuramente pretende-se criar variáveis de redes para representar os dados mais relevantes das TEDS, mas isto não foi abordado neste trabalho.

4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO NCAP

Os recursos disponíveis no Neuron Chip são suficientes para uma implementação da interface TII, mas vale ressaltar que quase todos os pinos de E/S do Neuron são necessários. Isto não é um problema para o nó desenvolvido, pois sua única função é servir como interface com a rede LonWorks. Caso haja uma simplificação da TII decorrente da revisão da norma IEEE 1451.2, mais recursos do Neuron Chip serão liberados, abrindo espaço para outras aplicações do nó.

O software desenvolvido para o nó LonWorks foi capaz de implementar os protocolos da TII contidas na norma IEEE 1451.2. As funções definidas pela norma (disparo, controle, estado, interrupção, etc) também foram implementadas com êxito, comprovando a possibilidade de se construir um nó LonWorks compatível com um STIM.

A norma IEEE 1451.2 define as taxas de transferência de dados entre o STIM e o NCAP. O STIM deve suportar uma taxa de pelo menos 6 kbps, não havendo limite inferior. O NCAP, por sua vez, tem 6 kbps como taxa mínima (Tabela 12). Conforme a norma, a comunicação inicial entre STIM e NCAP deve sempre ocorrer à taxa de 6 kbps. Entretanto, a biblioteca de funções utilizada para implementar o protocolo de comunicação no nó LonWorks limita as taxas de transmissão para valores fixos, que não coincidem o valor de 6 kbps. A solução encontrada foi adotar no protótipo uma taxa menor que o valor mínimo especificado para os NCAPs, já que uma vez que todo STIM deve suportar taxas inferiores à esse valor, evita-se problemas de incompatibilidade.

Tabela 12 – Limites das taxas de comunicação da TII conforme a IEEE 1451.2

Módulo	Taxa mínima	Taxa máxima
STIM	Não há	A partir de 6 kbps
NCAP	6 kbps	Não há

Isso significa, no entanto, que apesar do NCAP desenvolvido não apresentar nenhuma deficiência funcional, ele não se encontra formalmente dentro da norma, uma vez que não é capaz de se comunicar à taxa inicial de 6 kbps. Para que o NCAP se enquadre na norma seria necessária a utilização de um outro microprocessador em paralelo ao Neuron Chip para a implementação da TII, ou a disponibilização por parte da empresa Echelon de funções de comunicação SPI em Neuron C com taxas mais flexíveis.

Outra pendência existente na implementação desse NCAP é a utilização das informações da TEDS no programa do nó, pois este atualmente atribui valores fixos para algumas variáveis que estão contidas na TEDS.

Devido a algumas limitações da linguagem Neuron C, alguns problemas com a temporização da comunicação na TII não foram resolvidos, e exigirão um estudo mais aprofundado sobre o problema. Isto não afeta o desempenho do STIM ou do NCAP, pois se refere apenas às situações de *timeout* quando há a ocorrência de erros na comunicação.

A avaliação do funcionamento do NCAP, em conjunto com o STIM, encontra-se no Capítulo 5.

5 TESTES E AVALIAÇÃO DO SISTEMA

Neste capítulo são descritos os testes de funcionamento dos protótipos do STIM e do nó LonWorks desenvolvidos. Optou-se por apresentar a avaliação do funcionamento de ambos em um único capítulo devido à estruturação adotada para os testes e por razões de clareza.

5.1 PLANEJAMENTO DOS TESTES

Os testes apresentados neste capítulo foram concebidos com o intuito de permitir a avaliação do funcionamento individual de cada protótipo e do sistema como um todo. Foi adotada uma estrutura de testes *bottom up* na qual eles foram divididos em quatro módulos (Figura 25).

Figura 25. Planejamento dos testes

O primeiro módulo de testes envolve a avaliação da comunicação entre o módulo SHT71 (sensor de umidade) e o microcontrolador do STIM. O segundo

módulo visa avaliar a implementação da TII no STIM e o seu funcionamento geral. O terceiro engloba os teste do NCAP, desde sua implementação da TII até seu comportamento como um nó LonWorks. Por último, o quarto módulo busca possibilitar a avaliação do sistema como um todo, abordando questões como a integração e interoperabilidade dos dispositivos.

5.2 TESTE 1: INTEGRAÇÃO DO SHT71 NO STIM

Para a verificação da correta recepção e interpretação dos dados gerados pelo SHT71 no STIM, utilizou-se um osciloscópio digital Tektronics modelo TDS 360 de dois canais para monitorar as linhas de comunicação de *clock* e de dados (*data*) entre ambos (Figura 26). Os dados digitais gerados pelo SHT71 não representam diretamente o valor da umidade relativa medida. É necessária a realização de alguns cálculos para a conversão destes dados para o valor correspondente à umidade relativa.

Através dos sinais obtidos com o osciloscópio, foi possível calcular manualmente os valores de umidade relativa medidos pelo SHT71 e compará-los com os valores calculados pelo microcontrolador do STIM. Através dessa comparação foi possível a verificação da coerência entre os dados enviados pelo SHT71 e sua correta recepção e conversão no STIM.

Figura 26. Teste de integração entre SHT71 e STIM

Durante o funcionamento normal do STIM cada comando de disparo resulta em duas requisições de medição no SHT71, uma de umidade relativa e outra de temperatura. Foram coletadas amostras da resposta gerada pelo SHT71 à requisição de uma medida de temperatura com resolução de 14 bits e uma requisição de medida de umidade relativa com resolução de 12 bits (resoluções máximas permitidas para cada sinal). Um programa de testes foi desenvolvido no STIM para permitir que as amostras dos sinais pudessem ser coletadas entre a requisição de cada medição.

A Figura 27 e Figura 28 ilustram os sinais obtidos com o osciloscópio. Para se obter o valor da umidade relativa é preciso realizar alguns cálculos descritos no manual do SHT71 (SENSIRION, 2005a). Estes cálculos são realizados internamente pelo programa do STIM e foram feitos também manualmente para possibilitar sua validação. A medição da temperatura é realizada para que esta possa mais tarde ser usada na compensação do sinal de umidade relativa.

A conversão do valor digital para temperatura é feita pelo seguinte cálculo:

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T \quad (1)$$

Onde²⁰:

SO_T = valor digital lido;

$d_1 = -40$;

$d_2 = 0,01$.

Para os dados obtidos através da medição ilustrada na Figura 27 temos:

$SO_T = 00011001\ 11110010\ B = 6642\ D$

$\therefore T = 26,42\ ^\circ C$

²⁰ Para T em graus Celsius, tensão de alimentação do SHT71 em 5V e resolução de 14bits.

Figura 27. Dados de temperatura do SHT71

Para se obter o valor da umidade relativa também é necessário converter o sinal gerado pelo SHT71. O valor da umidade relativa compensada de não-linearidades é calculado através da seguinte fórmula:

$$RH_{linear} = c_1 + c_2 \cdot SO_{RH} + c_3 \cdot SO_{RH}^2 \quad (2)$$

Onde²¹:

SO_{RH} = valor digital lido;

$c_1 = -4$;

$c_2 = 0,0405$;

$c_3 = -2,8 \cdot 10^{-6}$.

Para os dados obtidos através da medição ilustrada na Figura 28 temos:

$$SO_{RH} = 00000101\ 01100110\ B = 1382\ D$$

$$\therefore RH_{linear} = 46,62\ \%$$

²¹ Para resolução de 12bits.

Figura 28. Dados de umidade relativa do SHT71

O valor real da umidade relativa, corrigida em função da variação da temperatura, deve ser calculado da seguinte maneira:

$$RH_{true} = (T - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{RH}) + RH_{linear} \quad (3)$$

Onde:

$$t_1 = 0,01;$$

$$t_2 = 0,00008.$$

Utilizando o valor de $T = 26,42 \text{ } ^\circ\text{C}$ obtido anteriormente temos:

$$RH_{true} = 46,79 \%$$

Que corresponde ao valor calculado no STIM mostrado na Figura 29.

Figura 29. Umidade relativa medida pelo SHT71 e calculada pelo STIM

A Tabela 13 apresenta um resumo dos testes realizados e a coincidência entre os valores calculados manualmente²² e os calculados pelo STIM, demonstrando que os dados gerados pelo SHT71 foram corretamente recebidos e processados no STIM.

Tabela 13 – Comparação entre cálculo manual da umidade relativa e valor obtido no STIM

Temperatura (Binário)	Umidade relativa (Binário)	Umidade relativa calculada manualmente (%)	Umidade relativa calculada no PIC (%)
00011000 10010110	00000101 00010111	43,7823	43,78
00011000 01111000	00000101 00101010	44,374291	44,37
00010111 11111100	00000101 01000010	45,016547	45,01
00011001 11110010	00000101 01100110	46,794408	46,79
00010111 01000110	00000110 00011101	51,791886	51,79
00010110 11100010	00000110 01101010	54,04421	54,04
00010110 01011100	00000110 11000000	56,472902	56,47
00010110 00100110	00000111 01011011	61,000259	61,00
00010110 11110000	00000111 10110100	63,923872	63,92
00010110 00001011	00001001 00011000	73,427388	73,42
00010110 00110001	00001001 10100101	77,22622	77,22
00010110 00110100	00001010 00011101	80,314622	80,31
00010110 11101000	00001010 10101000	84,194838	84,19

Os valores correspondentes ao cálculo no STIM encontram-se truncados.

²² Foi criada uma planilha em Excel para realizar os cálculos de conversão a partir dos dados binários obtidos com o osciloscópio.

5.3 TESTE 2: AVALIAÇÃO DO STIM

Como parte de sua dissertação de mestrado, Viegas (2003) desenvolveu uma biblioteca de funções capaz de implementar a interface de comunicação TII através da porta paralela de um PC. Esta biblioteca, cuja função principal foi possibilitar o teste do STIM por ele desenvolvido, representa uma implementação consistente das especificações obrigatórias da norma IEEE 1451.2 e está devidamente documentada em seu trabalho (VIEGAS, 2003). Representando uma implementação correta e independente da norma, ela foi utilizada neste trabalho para validar a implementação do protótipo de STIM.

Escrita na linguagem C e utilizada na forma de uma *dynamic link library (dll)*, a biblioteca de funções é acessada através de um programa (ou instrumento virtual) desenvolvido em LabView²³ (NATIONAL, 2006). Este programa permite acessar os dados do STIM (através de comandos como de disparo, leitura, contidos na *dll*) e interpretá-los e representá-los em uma interface gráfica. Para facilitar o desenvolvimento de aplicações de alto nível em LabView, Viegas criou para este uma biblioteca denominada STIM driver, cuja função é encapsular os acessos a essa *dll* (VIEGAS, 2003).

Para o teste do STIM desenvolvido neste trabalho, foi necessário realizar algumas alterações no programa NCAP.VI, disponibilizado por Viegas, para adequá-lo aos dados gerados por este STIM. Uma representação do ambiente de teste pode ser vista na Figura 30.

²³ LabView versão 6.1 para Windows 9x. Não foi utilizada uma versão mais recente do programa devido ao seu suporte ao sistema operacional Windows 98 empregado nos testes. Esta versão do Windows foi utilizada pois a *dll* desenvolvida não é compatível com o sistema operacional Windows XP.

Figura 30. Teste do STIM através do programa LabView

Outra modificação necessária foi a adaptação do conector da TII para a porta paralela do PC, cujo acesso é feito através de um conector DB25. Esta implementação pode ser vista na Figura 31.

Figura 31. Conector da TII adaptado à porta paralela do PC

O programa desenvolvido em Viegas (2003) permite o acesso às funcionalidades do STIM, desde a visualização dos dados do sensor e de seus

registradores de estado, à execução de comandos e alteração das máscaras de interrupção. Na Figura 32 é possível verificar sua interface gráfica.

Figura 32. Interface do aplicativo LabView utilizado na avaliação do STIM

O programa foi configurado para realizar o envio do comando de disparo e a leitura do sensor a cada dois segundos, sendo os valores dos registradores de estado também atualizados a cada ciclo. Através dos botões de *Reset* e da alteração das máscaras de interrupção, foi possível verificar o correto funcionamento dos registradores de estado do STIM e da correta ativação do sinal de requisição de serviço. Alguns exemplos da condição dos registradores de estado e da requisição de serviço em função das máscaras de interrupção e da ativação do comando de *Reset* podem ser vistos no APÊNDICE E.

Uma alteração no programa do STIM foi feita para que este gerasse dados conhecidos, possibilitando a verificação da correta recepção dos dados através da TII. O STIM foi programado para incrementar o valor de umidade enviado

anteriormente em 5 %, variando de 0 a 100, a cada novo comando de disparo. O resultado pode ser visto na Figura 32 já apresentada, que condiz com o resultado esperado.

A execução normal do programa do STIM pode ser vista na Figura 33.

Figura 33. Visualização das medidas de umidade relativa do STIM

Outra função importante implementada no programa é a possibilidade da apresentação gráfica dos dados da TEDS contida no STIM, que pode ser vista na Figura 34.

Globals.gbl

File Edit Operate Tools Browse Window Help

Meta TEDS

TEDS version constant related data sub-block

IEEE 1451 standards family working group number: 2

TEDS version number: 1

Identification related data sub-block

Globally Unique Identifier [msb...lsb] [Hex]: 0102 0304 0506 0708 0900

Data structure related data sub-block

CHANNEL_ZERO industry calibration TEDS extension key: 0

CHANNEL_ZERO industry nonvolatile data fields extension key: 0

CHANNEL_ZERO industry TEDS extension key: 0

CHANNEL_ZERO end user's application specific TEDS key: 0

Number of implemented channels: 1

Worst case channel data model length: 4

Worst case channel data repetitions: 0

CHANNEL_ZERO writable TEDS length: 0

Timing related data sub-block

Worst case channel update time (T_{wu}) [s]: 1.000E+0

Global write setup time (T_{gws}) [s]: 0.000E+0

Global read setup time (T_{grs}) [s]: 2.824E-1

Worst case channel sampling period (T_{wsp}) [s]: 5.000E-1

Worst case channel warm up time [s]: 4.000E+0

Command response time [s]: 5.000E-1

STIM handshake time (T_{hs}) [s]: 5.000E-1

End of frame detection latency (T_{lat}) [s]: 5.000E-1

TEDS hold off time (T_{th}) [s]: 1.000E+0

Operational hold off time (T_{oh}) [s]: 1.000E+0

Maximum data rate [bit/s]: 100K

Channel grouping related data sub-block

Channel groupings data sub-block length: 0

Number of channel groupings: 0

Channel group: 0

Group type: 0

Number of group members: 0

Member channel numbers list: 0

Channel TEDS Array

Data structure related data sub-block

Calibration key: 0: CAL_NONE

Channel industry calibration TEDS extension key: 0

Channel industry nonvolatile data fields extension key: 0

Channel industry TEDS extension key: 0

Channel end user's application specific TEDS key: 0: User TEDS not implemented

Channel writable TEDS length: 0

Transducer related data sub-block

Channel type key: 0: Sensor

Physical units [msb...lsb] [Hex]: 0480 8080 8080 8080 8080

Lower range limit: 0.000E+0

Upper range limit: 1.000E+2

Worst case uncertainty: 3.000E+0

Self test key: 0: No self-test needed or provided

Data converter related data sub-block

Channel data model: 1: Single-precision real

Channel data model length: 4

Channel model significant bits: 14

Channel data repetitions: 0

Series origin: 0.000E+0

Series increment: 0.000E+0

Series units [msb...lsb] [Hex]: 0480 8080 8080 8080 8080

Timing related data sub-block

Channel update time (T_u) [s]: 1.000E+0

Channel write setup time (T_{ws}) [s]: 0.000E+0

Channel read setup time (T_{rs}) [s]: 2.824E-1

Channel sampling period (T_{sp}) [s]: 5.000E-1

Channel warm up time [s]: 4.000E+0

Channel aggregated hold off time (T_{ch}) [s]: 1.500E+0

Timing correction: 0.000E+0

Trigger accuracy: 0.000E+0

Figura 34. Dados das estruturas TEDS do STIM

Através desta interface foi possível verificar a implementação correta das estruturas TEDS definidas na norma IEEE 1451.2 e a consistência dos valores apresentados com os programados no STIM (APÊNDICE D). Vale ressaltar que não houve nesta pesquisa uma preocupação com a acurácia dos dados inseridos na TEDS, mas apenas com a consistência de sua implementação.

5.4 TESTE 3: AVALIAÇÃO DO NCAP

O teste da implementação da TII no NCAP se limitou à verificação da correta comunicação entre NCAP e STIM, uma vez que a implementação no último já havia sido validada. Para tanto, foi utilizada a ferramenta de desenvolvimento NodeBuilder²⁴ (ECHELON, 2003b) que, além de ser a plataforma de programação e

²⁴ NodeBuilder versão 1.5 com o sistema operacional Windows 98.

depuração dos aplicativos dos nós, permite também a visualização das variáveis de rede destes dispositivos durante seu funcionamento. Toda interação entre o programa NodeBuilder e o nó é realizada através da própria rede LonWorks, sendo uma placa *Personal Computer LonTalk Adapter* (PCLTA)²⁵ responsável pela interface entre o PC e a rede (Figura 35).

Figura 35. Sistema de desenvolvimento e teste do nó Lonworks

A visualização das variáveis de rede no nó foi feita através da função *Browser* do NodeBuilder, ilustrada na Figura 36.

²⁵ A PCLTA usada nos testes é uma placa interna acoplada ao barramento ISA do PC. Ela possibilita que os dados da rede LonWorks sejam disponibilizados para os programas executados no computador, tal como o NodeBuilder.

Figura 36. Tela *Browser* do Nodebuilder

O evento disparo gerado a cada 4 segundos²⁶ no nó NCAP resultava na atualização do valor de umidade relativa na variável de rede monitorada pelo *Browser*, comprovando a correta implementação do protocolo de comunicação da TII. Através da comparação do valor apresentado com o valor exibido no display LCD do STIM, foi possível verificar a consistência dos dados recebidos e processados pelo NCAP. Parte desse teste também foi realizado com a versão modificada do código do STIM que gera valores conhecidos para a umidade (utilizada na seção 5.3 para teste do STIM).

As demais variáveis de rede, criadas para representar os dados de estado, o canal selecionado e as máscaras de interrupção, também puderam ser testadas pela ferramenta *Browser*, uma vez que ela permite que os valores de variáveis de rede de entrada do programa sejam modificados através de sua interface (Figura 37).

²⁶ Período escolhido arbitrariamente.

Figura 37. Interface para alteração do valor de variáveis de rede no NodeBuilder

A Tabela 14 apresenta uma lista das variáveis de rede e suas respectivas descrições.

Tabela 14 – Variáveis de rede do NCAP

Variável de rede ²⁷	Descrição
Humidity	Umidade relativa medida pelo sensor
nvo_global_stat	Registrador de estado padrão global (CHANNEL_ZERO)
nvo_ch_1_stat	Registrador de estado padrão do canal 1
nvi_glob_int_msk	Máscara de interrupção padrão global CHANNEL_ZERO)
nvi_ch_1_int_msk	Máscara de interrupção padrão do canal 1
nvi_new_trig_ch	Variável usada para alterar o canal selecionado
nvo_curr_trig_ch	Valor atual do canal selecionado
nvo_old_trig_ch	Valor anterior do canal selecionado

Alguns exemplos da condição dos registradores de estado em função das máscaras de interrupção e da ativação do comando de *Reset* podem ser vistos no APÊNDICE F.

As informações da TEDS foram observadas através da leitura da memória interna do nó. A ferramenta NodeBuilder possibilita a verificação, em modo *debug*, das variáveis internas do programa durante a execução do mesmo, como pode ser

²⁷ A sigla “nvo” indica uma variável de saída (output) e “nvi” uma variável de entrada (input) do nó.

visto na Figura 38. Os valores coincidiram com os apresentados na seção 5.3 e no APÊNDICE D, comprovando a consistência da implementação.

Figura 38. Visualização da memória TEDS no Neuron C Debugger

5.5 TESTE 4: SISTEMA COMPLETO

Alguns testes foram realizados para avaliar o funcionamento do STIM e do NCAP (nó LonWorks) em um sistema que pudesse simular um aplicação prática. O objetivo deste teste foi verificar a adequação do uso do STIM e do nó desenvolvido em uma rede com outros dispositivos, considerando-se a interação e integração entre os mesmos. Para tanto, adotou-se a montagem experimental apresentada na Figura 39.

Figura 39. Visão do sistema completo

O conjunto STIM-NCAP, já testado, foi inserido em uma rede com um módulo LonWorks fabricado pela empresa TAC (TAC, 2005) e denominado Xenta 511 (TAC, 2003a). Este módulo implementa as funções de um servidor *web* (*web server*), disponibilizando páginas eletrônicas que permitem o controle e a monitoração da rede LonWorks através de uma rede TCP/IP. O módulo Xenta 511 também possui a função de *LonTalk Adapter* (LTA)²⁸ entre a rede LonWorks e as ferramentas de gerenciamento Vista (TAC, 2001) da TAC, possibilitando que as mesmas tenham acesso à rede LonWorks através de sua interface TCP/IP. As ferramentas são compostas por diversos módulos de software com funções variadas, dentre elas pode-se destacar o Vista Explorer (TAC, 2001), Trend Viewer (TAC, 2001) e XBuilder (TAC, 2003b) utilizados nessa pesquisa²⁹. O emprego dessas ferramentas é apresentado adiante e um detalhamento da utilização das mesmas pode ser visto em Pereira (2006).

Essa configuração permitiu avaliar diversas questões pertinentes ao funcionamento do transdutor inteligente composto pelo STIM e o NCAP em uma

²⁸ Função análoga à placa PCLTA descrita anteriormente, porém restrita aos produtos desenvolvidos pela TAC.

²⁹ Explorer versão 4.10, XBuilder versão 1.3.0 e Trend Viewer versão 4.10.

rede LonWorks. Os principais aspectos testados e analisados são descritos nas seções que seguem.

5.5.1 Integração

Os testes descritos até agora validaram o funcionamento do STIM, do NCAP, e da interação entre ambos, comprovando o correto desenvolvimento de um transdutor inteligente completo, apto a ser usado em uma rede de controle. Restou, ainda, avaliar seu comportamento integrado na rede, onde se espera que ele desempenhe as funções de um nó LonWorks sem nenhuma limitação em decorrência de seu projeto ser baseado na IEEE 1451.

O software Vista Explorer (TAC, 2001) possibilita a visualização e o gerenciamento de redes LonWorks, contendo dispositivos fabricados pela própria TAC ou por outros fabricantes. Através dessa ferramenta, foi possível verificar a atuação do transdutor inteligente composto pelo STIM e o NCAP na rede experimental LonWorks. Como pode ser visto na Figura 40, o NCAP é reconhecido pela ferramenta como um nó LonWorks funcional, sendo possível visualizar seu estado de operação e suas variáveis de rede em tempo real. Isso é possível graças à difusão das informações do NCAP pela rede e à atuação do módulo Xenta 511 na coleta e divulgação dessas informações para o software.

Figura 40. Gerenciamento do transdutor inteligente através do TAC Vista Explorer

O programa Trend Viewer foi utilizado para monitorar a variação da umidade relativa medida pelo sensor do STIM. A Figura 41 ilustra o teste referente à geração de dados conhecidos pelo programa do STIM, já descrito nas seções anteriores (variação de 5% a cada evento de disparo do NCAP realizado a cada quatro segundos).

Figura 41. Monitoração da variável de rede de umidade com dados gerados artificialmente pelo STIM

A Figura 42 representa uma medição real da umidade relativa ambiente. A variação do valor medido é decorrente do posicionamento de um recipiente com água próximo ao sensor e de sua posterior retirada.

Figura 42. Monitoração da variável de rede de umidade durante posicionamento do sensor próximo a um recipiente com água

Através desses testes verificou-se que o conjunto STIM-NCAP se comporta como um nó LonWorks funcional, capaz de interagir com a rede e ser gerenciado e monitorado por ferramentas de software comerciais.

5.5.2 Interoperabilidade

A tecnologia LonWorks fornece meios para que os dispositivos desenvolvidos para a rede possuam interoperabilidade entre si, mas não impede a criação de soluções não-interoperáveis. A implementação correta do protocolo LonTalk, assegurada pelo uso de um Neuron Chip no protótipo, não é condição suficiente para garantir a interoperabilidade do NCAP com os demais dispositivos de uma rede LonWorks. Torna-se necessária também a utilização de variáveis de rede padrão (SNVTs) que garantem uma interpretação homogênea e correta dos dados gerados pelo dispositivo. O uso das SNVTs no programa do nó NCAP foi descrita no Capítulo 4, e garante que qualquer dispositivo da rede tenha acesso aos dados por ele disponibilizados.

Um exemplo desta interoperabilidade foi a possibilidade de monitoração da umidade relativa através dos programas Vista Explorer e Trend Viewer descrita na seção anterior. O NCAP e módulo Xenta 511 puderam se comunicar sem a necessidade de uma configuração ou programação específica, baseando-se apenas na implementação do protocolo LonTalk e o uso de SNVTs. Isso demonstra não somente a interoperabilidade entre dispositivos de desenvolvedores distintos como também a interoperabilidade com as ferramentas de software da rede.

Nota-se também que o uso de SNVTs garantiu que o valor contido na variável de rede de umidade relativa fosse corretamente interpretado pelos programas da TAC. Vale ressaltar que não houve necessidade de informar aos programas o tipo ou formato dos dados em momento algum. A padronização das variáveis de rede garante a interoperabilidade das aplicações independente do desenvolvedor. A variável de umidade relativa poderia, por exemplo, ser facilmente utilizada por um outro dispositivo conectado à rede no controle de um umidificador de ar ou sistema de ar condicionado.

5.5.3 Acesso remoto

O módulo Xenta 511 possui a função de *web server*, disponibilizando páginas HTML que permitem o controle e a monitoração da rede LonWorks à qual ele está conectado. Sua interface Ethernet possibilita sua conexão a qualquer rede TCP/IP, possibilitando que o acesso seja feito até mesmo através da Internet.

As páginas são criadas e enviadas ao módulo através do programa XBuilder (TAC, 2003b), que já possui componentes prontos para a confecção de tabelas, gráficos e interfaces gráficas para as informações e o controle da rede LonWorks. As páginas são programadas no módulo Xenta 511 através da própria rede TCP/IP, permitindo sua atualização e manutenção remota.

Uma página foi criada para a monitoração da variável de umidade relativa do NCAP e pode ser vista na Figura 43. Repetiu-se nesse exemplo a medição da umidade durante a colocação e retirada de um recipiente com água próxima ao sensor do STIM.

Figura 43. Monitoração remota dos dados coletados pelo STIM

Para esta montagem experimental utilizou-se uma rede local, no entanto experimentos já foram realizados com o módulo Xenta 511 e a monitoração através da Internet. Um exemplo é disso a sua utilização nos laboratórios virtuais (*weblabs*) do projeto Tecnologia de Informação para o Desenvolvimento da Internet Avançada –TIDIA (TIDIA, 2005) que prevê a disponibilização do acesso aos *weblabs* a outros centros de pesquisa do Estado de São Paulo através de uma rede de alta velocidade. Esse trabalho pode ser visto em (PEREIRA et al, 2005).

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de um transdutor inteligente completo, segundo a IEEE 1451, e apto a ser utilizado em uma rede de controle, se resumiu à construção de dois protótipos, o STIM e o NCAP. Através dos testes realizados pode-se afirmar que o comportamento dos protótipos e o funcionamento de transdutor inteligente na rede ficaram dentro das expectativas.

O uso do NCAP em conjunto com o STIM não representou limitações em relação a seu desempenho como um nó LonWorks. De fato, a presença do STIM conectado ao NCAP é transparente para a rede, sendo o conjunto visto como um dispositivo único, como era esperado. Isso se traduz em ganhos significativos, pois indica que transdutores baseados na IEEE 1451 podem ser utilizados em redes LonWorks, agregando as facilidades e funcionalidades da rede à flexibilidade da IEEE 1451.

6 DISCUSSÕES

A constatação do funcionamento do transdutor inteligente não é o único objetivo desta pesquisa. Diversas questões podem ser abordadas em decorrência do desenvolvimento apresentado neste trabalho. Segue uma discussão dos pontos mais relevantes.

6.1 DESENVOLVIMENTO DO STIM

O programa do protótipo de STIM baseou-se no código-fonte da empresa Microchip (FISCHER; BURCH, 2000), escrito especificamente como exemplo de implementação de um STIM em microcontroladores PIC. Isso facilitou consideravelmente o trabalho necessário para a conclusão do STIM, uma vez que o desenvolvimento e a depuração de um código próprio consumiria muito tempo, possivelmente comprometendo outros pontos desta pesquisa. Durante o processo de levantamento de fabricantes que disponibilizam tais programas verificou-se ainda que a Analog Devices também possui um documento descrevendo o uso de seu produto AduC812 (ANALOG, 1999).

É interessante ressaltar a importância de se poder utilizar bibliotecas de função ou códigos prontos, quando o desenvolvimento de uma nova implementação da norma IEEE 1451.2 não é o foco da pesquisa. Isso reduz o custo e tempo de desenvolvimento e estimula a adoção da norma.

A norma IEEE 1451.2 não impõe nenhum tipo de restrição aos componentes de hardware utilizados no desenvolvimento do STIM. Deste modo, buscou-se nessa pesquisa o emprego de componentes comerciais de fácil acesso e custos reduzidos, levando-se em consideração também as ferramentas de desenvolvimento disponíveis.

O microprocessador PIC18F252 constitui grande parte do custo adicional associado ao STIM, sendo seu valor próximo a R\$25,00. O custo total do STIM se encontra por volta de R\$40,00 (excluindo o sensor). De um ponto de vista econômico, os custos que não existiriam em um transdutor inteligente “tradicional”

são compensados pelas vantagens proporcionadas pela norma, principalmente em relação à flexibilidade decorrente da eliminação da necessidade de desenvolvimento específico para diferentes redes de controle. Para produtos comerciais isso representa uma abertura de mercado e possivelmente um aumento nas vendas.

A utilização de componentes comerciais e de fácil acesso foi motivada pelo interesse em se utilizar os STIMs em outras pesquisas. Através dessa abordagem, facilita-se a reprodução e a manutenção dos dispositivos. Devido ao seu custo reduzido, é possível também adotá-los em pesquisas que exijam o uso de sensores em maior escala. Vale lembrar que o hardware do protótipo pode ainda ser otimizado, reduzindo ainda mais seu custo. Uma alteração simples, mas eficaz, seria a substituição do modelo de PIC escolhido, uma vez que este se encontra subutilizado.

O programa em LabView e a biblioteca de funções utilizados nos testes do STIM, criados por Viegas (2003) em seu trabalho de mestrado, forneceram uma grande contribuição para esta pesquisa. Através de testes com uma implementação independente da norma foi possível verificar a consistência da implementação da IEEE 1451.2 no STIM. A facilidade de se alterar a interface gráfica e o programa de testes para a sua adequação ao STIM foi muito vantajosa. Nesses testes também foi possível comprovar o revés que a complexidade da TII representa para a norma IEEE 1451.2. Para realizar a interface entre o programa em LabView e o STIM, Viegas desenvolveu uma biblioteca de funções específica para controlar a porta paralela em PCs com sistema operacional Windows 95 ou 98. Caso a TII fosse baseada em uma interface comercial padronizada, como a RS232 proposta na revisão da norma, a integração entre STIM e PC seria muito mais simples e a utilização de ferramentas, como LabView, mais fácil. Isso também facilitaria o próprio desenvolvimento dos STIMs e incentivaria sua utilização em outros sistemas.

O STIM desenvolvido não representa de maneira alguma um produto final, mas apenas um protótipo com funcionalidades suficientes para a avaliação da implementação de módulo baseado na norma IEEE 1451.2. Como exemplo de melhoria imediata do STIM pode-se citar inclusão de dados mais acurados na TEDS e a adição de um canal para a medição de temperatura.

A inclusão da medição da temperatura no STIM possibilita também a adoção da TEDS de calibração e permite que os cálculos de umidade sejam realizados no NCAP. Desse modo, fica ao encargo do NCAP decidir se é necessária a realização da correção do valor da umidade em função da temperatura, e fica sob sua responsabilidade requisitar uma medição de temperatura quando esta for necessária. No entanto, para o caso específico das redes LonWorks, a TEDS de calibração pode não ser desejável, uma vez que o processador do NCAP é o Neuron Chip, com capacidade de processamento limitada e inferior ao PIC. Além disso, há a dificuldade de manipulação de variáveis em ponto flutuante da linguagem Neuron C.

A inclusão de um canal para a medição de luminosidade no protótipo, além da umidade relativa e temperatura, torna o uso do STIM muito interessante em aplicações agrícolas, principalmente em casas de vegetação (estufas). Porém, para tanto, faz-se necessário um projeto de adequação do módulo para as condições hostis de operação desse ambiente.

6.2 ROTEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM STIM

Com base na experiência adquirida nesta pesquisa alguns pontos podem ser levantados para facilitar o desenvolvimento de novos STIMs:

- escolha de um microcontrolador que já possua bibliotecas de função prontas ou documentos descrevendo seu uso na implementação da IEEE 1451.2. Isso facilita e reduz o tempo de desenvolvimento e se torna fundamental caso uma nova implementação na norma não seja o foco do trabalho;
- uso de componentes comerciais e de ferramentas de desenvolvimento de fácil acesso para facilitar a reprodução e manutenção dos módulos;
- escolha do conector da TII conforme expectativa de uso. Como não há um padrão para o conector, sugere-se escolher o que melhor atender as necessidades ou requisitos do projeto;
- utilização do software LabView e das bibliotecas desenvolvidas por Viegas (2003) na avaliação do funcionamento do protótipo.

6.3 DESENVOLVIMENTO DO NCAP

Os recursos disponíveis no Neuron Chip se mostraram suficientes para a implementação da interface de comunicação TII especificada pela norma IEEE 1451.2. Apesar de algumas limitações da linguagem de programação Neuron C, foi possível desenvolver nesta linguagem os protocolos definidos pela norma, bem como as rotinas de tratamento dos dados gerados pelo STIM.

A utilização de um módulo de desenvolvimento TP/XF-78 (ECHELON, 1996) da Echelon facilitou de maneira significativa a construção do NCAP. Como o módulo já contém os componentes básicos necessários a um nó LonWorks, como Neuron Chip, transceptor e conectores de acesso aos mesmos, foi necessário apenas adaptar um hardware auxiliar para adequá-lo ao papel de NCAP. Módulos similares a estes já são fabricados pela empresa nacional Conceito (CONCEITO, 2006), facilitando e barateando o desenvolvimento de novos nós e o acesso à tecnologia LonWorks.

A possível alteração da TII decorrente da revisão da norma IEEE 1451.2 não deve prejudicar o desempenho do módulo TP/XF-78, ou do Neuron Chip, no seu papel de NCAP, uma vez que este já possui suporte a interface RS232 esperada para a nova versão da norma.

Apesar do nó NCAP realizar a leitura dos dados da TEDS contida no STIM, as possibilidades de utilização destes dados não foram exploradas. Deste modo, algumas facilidades *plug-and-play* características da norma, como auto-identificação, não estão disponíveis. O programa do nó também foi desenvolvido para tratar especificamente as informações geradas pelo STIM deste trabalho, sendo apto a apresentar para a rede LonWorks apenas os dados de um sensor de umidade. Todavia, soluções para outros tipos de STIMs podem ser desenvolvidas, e as funcionalidades do NCAP incrementadas.

As características da tecnologia LonWorks, que permitem ao desenvolvedor se concentrar apenas na aplicação do nó sem se preocupar com a implementação da comunicação com a rede, e a interoperabilidade inerente aos dispositivos e

ferramentas, representam um dos principais atrativos desta rede de controle. Pode-se afirmar que estes fatores não só facilitaram o desenvolvimento do NCAP como possibilitaram uma rápida verificação de seu funcionamento na rede.

O êxito na implementação da comunicação com um STIM em um nó LonWorks condiz com um dos principais objetivos da norma IEEE 1451: permitir que as interfaces por ela padronizadas sejam implementadas em redes de controle já existentes.

6.4 INTEROPERABILIDADE

A interoperabilidade é um requisito de muito valor para as soluções de automação, pois decorre em vantagens como:

- possibilidade de uso de dispositivos de diferentes fabricantes na mesma solução;
- eliminação da dependência à fabricantes. Aumenta a flexibilidade das soluções de automação, facilita a sua manutenção e reduz custos. Os dispositivos passam a ser escolhidos ou trocados com base em seu preço, qualidade, ou desempenho;
- melhor aproveitamento de ferramentas. Dispositivos de diferentes fabricantes podem ser gerenciados, configurados ou monitorados através das mesmas ferramentas;
- melhora na qualidade dos produtos e redução de seus preços devido ao aumento da competitividade.

Nesta pesquisa foi possível verificar a interoperabilidade inerente à tecnologia LonWorks, cujos dispositivos foram capazes de operar e interagir em uma rede experimental e cujas ferramentas de gerenciamento e monitoração de dispositivos puderam ser usadas em dispositivos independente do desenvolvedor.

A interoperabilidade decorrente da adoção da IEEE 1451.2 também pôde ser verificada, uma vez que um dos principais objetivos da norma é estimular a interoperabilidade de dispositivos, permitindo que STIMs sejam usados nas diversas redes de controle existentes. Neste trabalho verificou-se que um STIM pôde ser

conectado a uma rede LonWorks através de sua interface padronizada implementada em um nó LonWorks.

6.5 ACESSO REMOTO

A possibilidade de acesso remoto representa um ganho significativo a qualquer sistema de controle ou automação. Com ele ganha-se eficiência principalmente no controle, monitoração e administração de sistemas geograficamente distantes.

Na montagem experimental desta pesquisa o acesso remoto foi disponibilizado pelo módulo TAC Xenta 511 que possui funções de *web server* e dispõe de ferramentas para o desenvolvimento de páginas próprias para o controle e monitoração de redes de controle LonWorks. No entanto, a IEEE 1451 também possibilita o acesso remoto direto a NCAPs através do uso de redes Ethernet como a rede de controle. Um estudo sobre seu emprego em sistemas de controle distribuído através de redes Ethernet com acesso remoto através da Internet pode ser visto em Lee e Schneeman (2000b).

O acesso remoto ao STIM pode também ser feito diretamente através do programa LabView que permite que um programa ou VI nele desenvolvido seja acessado através da conexão de rede do próprio PC. Isso reforça a importância e a versatilidade desta ferramenta.

6.6 ADOÇÃO DA IEEE 1451 EM REDES LONWORKS

A tecnologia LonWorks se destaca pela facilidade de desenvolvimento de soluções, principalmente devido à utilização do protocolo de comunicação LonTalk e sua implementação inerente das sete camadas do modelo OSI. Os mecanismos de troca de dados baseados em variáveis de rede encapsulam os detalhes de comunicação da rede e possibilitam uma visão de mais alto nível do sistema. O emprego do protocolo e a utilização de variáveis de rede padronizadas (SNVTs) promovem a interoperabilidade entre os dispositivos e as ferramentas da rede

LonWorks. Em contrapartida, o ponto fraco desta abordagem é o fato dessa interoperabilidade não se estender às outras redes de controle, não sendo trivial a integração entre dispositivos e ferramentas desenvolvidas para essas redes e para as redes LonWorks.

Para os desenvolvedores de soluções de automação isso representa uma redução da disponibilidade de transdutores inteligentes e dispositivos para a rede, pois apenas os desenvolvidos especificamente para a rede LonWorks podem ser utilizados. Isso pode levar a uma menor flexibilidade e possivelmente maiores custos para o sistema. Como foi apresentado nesta pesquisa, a utilização de transdutores inteligentes baseados na IEEE 1451 em redes LonWorks é factível e representa uma nova alternativa para os sistemas de automação. Devido à integração transparente à rede entre um NCAP desenvolvido em um nó LonWorks e um STIM, potencialmente aumenta-se a quantidade e a qualidade de transdutores inteligentes disponíveis sem se perder as funcionalidades existentes na rede LonWorks.

Um aspecto interessante a se considerar é o papel do NCAP no funcionamento do transdutor inteligente. Como se sabe, é nele que se concentra a inteligência, ou aplicação, do nó. Qualquer STIM pode ser conectado a um NCAP genérico, mas, no caso das redes LonWorks, para que as informações dos sensores sejam disponibilizadas na forma de SNVTs, é necessário que haja no NCAP uma aplicação específica ao STIM. Isso é decorrente da existência de SNVTs específicas para cada tipo de dado e do fato das SNVTs utilizadas na aplicação do nó serem determinadas no seu código-fonte. Desse modo, não é possível conectar um STIM que forneça dados de pressão a um NCAP programado para receber dados de temperatura, pois a representação dos dados na SNVT não seria correta.

Algumas possibilidades para a alteração dinâmica do tipo de SNVT de uma aplicação em função do STIM conectado ao NCAP, ou de métodos para a determinação e programação de aplicações no nó em função do STIM, já foram consideradas em Tani (2004). No entanto, um estudo mais aprofundado sobre o assunto é necessário e representa uma área interessante de pesquisa.

6.7 A IEEE 1451

O desenvolvimento da família de normas IEEE 1451 foi motivado pela atual tendência à utilização de redes de controle e de transdutores inteligentes no campo da automação. Sua finalidade é atender à necessidade de padronização desse mercado que sofre com um estado de fragmentação decorrente da proliferação de inúmeros protocolos e especificações, muitas vezes incompatíveis, atualmente em uso.

Alguns dos principais benefícios proporcionados pela IEEE 1451 são:

- através de sua adoção os fabricantes de transdutores inteligentes podem se concentrar no desenvolvimento de seus produtos sem se preocupar em adequá-los às diversas redes de controle e soluções proprietárias existentes. Isso facilita o desenvolvimento dos transdutores, reduz os gastos e pode resultar em uma melhora na qualidade dos dispositivos;
- as redes de controle existentes ganham uma maior variedade de dispositivos disponíveis, já que qualquer transdutor inteligente baseado na IEEE 1451 pode ser conectado à rede mediante a presença de um NCAP;
- a escolha do transdutor passa a ser feita com base na sua adequação técnica, preço ou qualidade, e não apenas na marca ou fabricante. Diminui-se a dependência e aumenta-se o acesso a transdutores de outros fabricantes mesmo em soluções proprietárias;
- os transdutores passam a disponibilizar de TEDS: informações eletrônicas do transdutor em formato padronizado que provêm a ele funcionalidades *plug-and-play*. Isso facilita a instalação e manutenção dos sistemas, reduzindo erros e custos.

Apesar de representar uma alternativa efetiva para a solução do problema de pulverização do mercado, a norma não foi capaz de se difundir e atualmente apresenta uma aceitação modesta.

A norma IEEE 1451.2 tratada neste trabalho está atualmente aguardando revisão. Algumas mudanças significativas são esperadas para esta norma, em especial a mudança da TII, que provavelmente facilitará sua implementação, estimulando sua aceitação e assimilação por parte do mercado. A norma IEEE 1451.4 em contrapartida representa a porção mais bem aceita da IEEE 1451. Sua

simplicidade, facilidade de implementação e eficiência, aliadas a um grande apoio por parte de empresas importantes como a National Instruments (NATIONAL, 2006) podem ser creditadas a este fato.

Apesar das normas que compõe a IEEE 1451 possuírem grande sinergia, funcionalidades semelhantes e um objetivo comum não há uma padronização entre suas implementações. A norma IEEE 1451.0, ainda não finalizada, procura resolver este problema propondo uma padronização para as funções, TEDS e a comunicação entre NCAP e os módulos dos transdutores (STIM, TBIM, etc.). Com isto, espera-se estimular a compatibilidade entre as normas e facilitar o desenvolvimento de novos padrões baseados em diferentes interfaces físicas.

A falta de revisão das normas já publicadas e a demora na publicação das demais podem ser atribuídas, em parte, à espera pela especificação da norma IEEE 1451.0. Considerando que as mudanças propostas por essa norma abrangem toda família IEEE 1451, não seria, provavelmente, conveniente publicar outra norma antes de sua definição. De fato, pode-se até mesmo esperar que com a publicação da IEEE 1451.0 as demais normas sejam rapidamente revisadas ou publicadas e a IEEE 1451 receba o impulso necessário para sua consolidação no mercado.

A IEEE 1451 procura ser flexível o suficiente para que novas normas possam ser agregadas à família conforme o surgimento de novas demandas no mercado por diferentes interfaces e tecnologias. Atendendo a essa tendência, a norma IEEE 1451.5 foi criada, e já representa um dos campos mais promissores de uso de transdutores inteligentes devido à aplicabilidade e popularidade da tecnologia sem-fio. O potencial de utilização de transdutores inteligentes sem-fio nas mais diversas áreas e as vantagens da existência de um padrão para os mesmos torna essa norma altamente desejável e até mesmo necessária. Pode-se afirmar que, no mínimo, a utilização de transdutores sem fio leva ao extremo um dos principais objetivos iniciais das redes de controle: a redução do cabeamento e conseqüente diminuição dos custos de instalação e manutenção dos sistemas de automação. Aliar a isso a padronização de protocolos e TEDS, representa um apelo muito grande para a adoção da norma e dessa tecnologia.

Apesar de incipiente a adoção da IEEE 1451 pelo mercado, pelas razões já comentadas, ela propicia muitas vantagens e possui um enorme apelo comercial, principalmente para os médios e pequenos desenvolvedores de transdutores. É possível que a IEEE 1451 passe pelo mesmo processo da ISO 11783 (CUGNASCA et al., 2003), adormecida por um período superior a dez anos até o mercado perceber seu real potencial e começar a ser adotada como padrão para instrumentação em máquinas agrícolas. Todavia, no caso da IEEE 1451, fica clara a necessidade de uma publicação efetiva das normas. Para tanto, é necessário ressaltar a importância da cooperação entre as diversas empresas, muitas vezes concorrentes, e as instituições envolvidas na especificação das normas, de forma a viabilizar um desenvolvimento mais rápido e eficiente, mas que garanta que os interesses comuns sejam atendidos.

Trabalhos nesta linha de pesquisa agregam força à IEEE 1451 e geram conhecimento para auxiliar sua disseminação e adoção.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta uma discussão sobre os pontos mais relevantes desta dissertação e avalia as suas contribuições. Nele também são apresentadas sugestões de melhoria e idéias para trabalhos futuros em continuidade a esta pesquisa.

7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um transdutor inteligente (STIM) baseado na norma IEEE 1451.2 e seu respectivo processador de rede (NCAP) para redes de controle LonWorks. O conjunto STIM e NCAP representa um transdutor inteligente ligado em rede (*networked smart transducer*), como definido pela família de normas IEEE 1451. Através da verificação de seu funcionamento, pôde-se comprovar a aplicabilidade dos conceitos propostos pela IEEE 1451, nos quais a separação entre o projeto do transdutor e escolha da rede de controle é possibilitada através da divisão do transdutor inteligente em dois módulos: um independente da rede de controle (STIM); e o outro dependente da rede (NCAP).

O desenvolvimento dos protótipos de STIM e NCAP permitiu uma avaliação das possíveis dificuldades e facilidades de se adotar a norma IEEE 1451.2 no projeto de um transdutor inteligente e contribuiu para o aprofundamento do conhecimento sobre a norma. O estudo inicial realizado sobre as normas da família IEEE 1451 como um todo auxiliou no entendimento dos seus conceitos fundamentais e fornecendo uma visão mais ampla e crítica de seu direcionamento e de sua atuação no mercado.

O hardware e software do STIM, implementados em um microcontrolador PIC18F252 de baixo custo e razoável simplicidade, demonstraram que a norma IEEE 1451.2 pode ser implementada de maneira simples e econômica, através de ferramentas de software e componentes de hardware comerciais de fácil acesso. A disponibilidade de documentação técnica descrevendo o uso de microcontroladores específicos no desenvolvimento de STIMs facilitou significativamente o projeto do

transdutor inteligente e recomenda-se que, sempre que possível, seja considerada no desenvolvimento de novos dispositivos baseados na norma.

A utilização da ferramenta de testes criada por Viegas (2003) em LabView, possibilitou a verificação e validação do protótipo de STIM desenvolvido. Ao mesmo tempo, caracterizou uma implementação independente da norma IEEE 1451.2 que agregou confiabilidade e qualidade aos testes. Através do uso da ferramenta, verificou-se também a inconveniência da interface TII definida pela norma e considerada um dos grandes entraves à sua adoção mais ampla. Isso respalda o esforço do comitê de normatização para a definição de uma interface mais simples e econômica. De fato, Johnson e Woods (2001), membros do comitê da IEEE 1451.2, já aventavam em 2001 a adoção dos padrões RS 232 e RS 485 como possíveis alternativas para a TII.

O projeto do NCAP, por sua vez, baseou-se em um módulo TP/XF-78 da Echelon que integra os componentes essenciais ao desenvolvimento de um nó LonWorks. A adoção do módulo facilitou de maneira significativa o desenvolvimento do NCAP devido à sua adequação às necessidades do projeto, praticidade e facilidade de utilização. Do mesmo modo, possibilitou a verificação do uso dos recursos de um Neuron Chip na implementação da interface TII, comprovando a aplicabilidade de um transdutor inteligente baseado na IEEE 1451 em uma rede LonWorks. Módulos nacionais similares ao TP/XF-78 já podem ser encontrados no mercado nacional, facilitando o acesso à tecnologia e o desenvolvimento de soluções baseadas em LonWorks.

Destaca-se na tecnologia LonWorks a facilidade de desenvolvimento de soluções e a interoperabilidade entre dispositivos e ferramentas. A implementação em *firmware* do protocolo LonTalk no Neuron Chip e o conceito de variáveis de rede simplificam a criação de aplicações e dispensam o programador da preocupação com os detalhes de comunicação da rede. A interoperabilidade é potencializada pelo uso de variáveis de rede padronizadas (SNVTs) em conjunto com o protocolo LonTalk. Com a adoção de transdutores inteligentes baseados na IEEE 1451 em redes LonWorks, agrega-se à essas vantagens os benefícios trazidos pela IEEE 1451,

dentre eles, o potencial aumento da disponibilidade de transdutores inteligentes aptos a serem usado na rede.

A aceitação da norma IEEE 1451.2 no mercado, e da IEEE 1451 como um todo, é ainda muito pequena considerando as vantagens que ela potencializa. Isso pode ser creditado em parte às questões técnicas levantadas pela comunidade, mas que devem ser sanadas na publicação da norma revisada. De um ponto de vista mais amplo, no entanto, pode-se atribuir esse fato à espera do mercado por uma definição efetiva das normas que compõe a IEEE 1451, devido à expectativa pela publicação da norma IEEE 1451.0 que deve impor mudanças às demais normas. Desse modo, não há como esperar que os fabricantes invistam no desenvolvimento de produtos baseados na(s) norma(s) tendo em vista a possibilidade iminente de alteração das mesmas.

Esse fato não impede que pesquisas sobre a IEEE 1451 sejam realizadas no meio acadêmico, e não deve ser considerado um desestímulo à aquisição de conhecimento a seu respeito. Existem estudos recentes que associam o uso da IEEE 1451 a diversas áreas de aplicação, dentre elas a automação agrícola. Wei et al. (2005) estuda seu uso em conjunto com o padrão ISO 11783 na agricultura de precisão e Wang, Zhang e Wang (2005) estudam a aplicação da tecnologia sem fio no meio agrícola e na indústria de alimentos, abordando a IEEE 1451.5.

A IEEE 1451.5 merece destaque devido à popularidade e ao potencial de aplicação da tecnologia sem fio nos mais diversos campos. O autor acredita que essa talvez seja a norma de maior impacto da família IEEE 1451 no mercado, uma vez publicada.

7.2 CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições deste trabalho podem ser resumidas a:

- Levantamento e consolidação de informações sobre a IEEE 1451, servindo de referência para trabalhos futuros e introduzindo uma nova oportunidade de pesquisa no Laboratório de Automação Agrícola da USP. Espera-se que as informações contidas nesse trabalho facilitem o

entendimento e estimulem a adoção da IEEE 1451 em novas pesquisas e aplicações.

- Pesquisa sobre uma família de normas que aborda um problema atual da indústria, e cuja importância e potencial de crescimento são altos, mas sobre a qual não existem muitos trabalhos no país. A IEEE 1451 representa um conhecimento estratégico, principalmente para países em desenvolvimento, pois pode influenciar em questões como competitividade produtiva e atualização tecnológica.
- Desenvolvimento de dispositivos baseados na IEEE 1451 e aplicados a uma rede de controle para qual não são conhecidas implementações comerciais. A rede LonWorks já possui alta importância na área de automação predial com potencial de crescimento em outras áreas como a automação agrícola.
- Apresentação de um roteiro para o projeto e implementação de transdutores inteligentes baseados na IEEE 1451.2, podendo ser adotado como referência para os desenvolvedores de soluções.

7.3 MELHORIAS

As melhorias propostas para este trabalho são:

- Inclusão de mais canais no STIM como a temperatura, que já é medida pelo sensor, e a luminosidade para criação de um transdutor inteligente a ser usado no controle de ambientes;
- Criação de um editor de TEDS para facilitar desenvolvimento do STIM como feito por Cámara, Ruiz e Samitier (2000);
- Levantamento de informações mais acuradas do STIM para inclusão na TEDS. Avaliação do desempenho do STIM e possível comparação com um transdutor inteligente tradicional;
- Tratamento dos dados da TEDS no NCAP, disponibilizando suas informações para a rede LonWorks;

- Melhorias no software do NCAP para tratar corretamente situações de *timeout* decorrentes de erros de operação;
- Encapsulamento e otimização do hardware do STIM e NCAP para uso em ambientes de teste mais hostis como os de casas de vegetação.

7.4 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, os seguintes tópicos podem ser de interesse:

- Estudo sobre a IEEE 1451.5, abordando o uso da interface ZigBee considerada a mais promissora para as redes de sensores sem fio (WANG; ZHANG; WANG, 2005);
- Desenvolvimento de NCAPs para outras rede de controle, como a ISO 11783 para máquinas agrícolas. Wei et al. (2005) apresentam uma análise da interação entre a IEEE 1451 e a ISO 11783 e descrevem a implementação de um STIM para sensoriamento de pragas;
- Utilização da IEEE 1451.4 e redes LonWorks. Consideravelmente mais simples, mas com maior apelo prático e comercial devido à maior popularidade da IEEE 1451.4;
- Utilização de STIMs em experimentos envolvendo o estudo de sistemas de controle distribuído, como o desenvolvido por Pereira (2006) em casas de vegetação;
- Desenvolver um nó LonWorks capaz de processar os dados de qualquer STIM considerando os dados lidos da TEDS. Criar uma metodologia para o tratamento e a utilização destas informações no sistema. Pode ser aplicada à configuração de NCAPs pela rede como sugerido em Tani (2004);
- Criação de laboratórios virtuais (*WebLabs*) para acesso aos dados de STIMs através da rede LonWorks ou da ferramenta LabView. Estes

WebLabs podem ser acessados remotamente e podem ser integrados ao projeto TIDIA (2005);

- Estudo sobre o uso da rede acadêmica de alta velocidade do projeto TIDIA e também da Internet como rede de controle de instrumentos inteligentes.

7.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A IEEE 1451 apresenta uma importante proposta e uma abordagem diferenciada para a solução dos problemas decorrentes da fragmentação do mercado de transdutores inteligentes e redes de controle. Idealmente, a evolução dos sistemas de automação permitirá a livre escolha entre transdutores, redes de controle e ferramentas de software, independente de marca, fabricante ou desenvolvedor. Atualmente isso é impossível devido à dificuldade de integração entre os inúmeros produtos e especificações existentes, mas a IEEE 1451 representa um grande passo nessa direção.

Apesar disso, a atuação da IEEE 1451 no mercado é ainda incipiente e comprometida pela demora na publicação e revisão das normas. Esse cenário não deve servir de entrave à realização de pesquisas sobre a IEEE 1451, pois é fundamental a geração de conhecimento que possa influir da disseminação e desenvolvimento das normas. Atualmente, devido à rápida dinâmica do meio tecnológico, é importante se antecipar às necessidades e às tendências do mercado. As oportunidades só são aproveitadas quando se tem o conhecimento necessário no momento certo. Cabe aos centros de pesquisa nacionais acompanhar o estado da arte mundial para que o país mantenha-se competitivo e possa se tornar um pólo de desenvolvimento tecnológico.

As possibilidades de pesquisa sobre a IEEE 1451 são vastas, bem como seu potencial. Este trabalho buscou apresentar uma abordagem inicial ao tema, e espera-se que sirva como base para novas pesquisas na área.

REFERÊNCIAS

ANALOG. Analog Devices, Inc. Site. Disponível em: <<http://www.analog.com/>>. Acesso em: 26 out. 2006.

ANALOG. The ADuC812 MicroConverter as an IEEE 1451.2 compatible smart transducer interface. ANALOG DEVICES, 1999. (MicroConverter Technical Note - uC003).

BOCKO, M.F. Development of wireless sensor technology for machine monitoring. In: WORKSHOP ON WIRELESS SENSING, SENSORS EXPO & CONFERENCE, 2., Chicago, 2001. **Proceedings...** Gaithersburg: NIST, 2001. p. 96-104. Disponível em: <http://ieee1451.nist.gov/Workshop_04June01/index.html>. Acesso em: 26 out. 2006.

BROOKS, T.; CHEN, S.C.; LEE, K.B. IEEE 1451 smart wireless machinery monitoring and control for naval vessels. In: INTERNATIONAL SHIP CONTROL SYSTEMS SYMPOSIUM, 2003, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ISCSS, 2003.

BRYAN, L.A.; BRYAN, E.A. Introduction to programmable controllers. In: _____. **Programmable Controllers: Theory and Implementation**. 2 ed. Atlanta: Industrial Text Company, 1997. p. 4-32.

BURDELIS, M.J.P. Desenvolvimento de sistema de instrumentação inteligente aplicado a estufas utilizando rede LonWorks®. São Paulo: Laboratório de Automação Agrícola da EPUSP, 2005. (Documento interno).

CÁMARA, L.; RUIZ, O.; HERMS, A.; SAMITIER J.; BOSCH, J. Automatic generation of intelligent instruments for IEEE 1451. **Measurement**, v.35, n. 1, p. 3-9, jan. 2004.

CÁMARA, L.; RUIZ, O.; SAMITIER, J. Complete IEEE-1451 node, STIM and NCAP, implemented for a CAN network. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 17., 2000, Baltimore. **Proceedings...** New York: IEEE, 2000. v.2, p. 541-545.

CANOVAS, S.R.M. **Integração entre redes LonWorks® e redes IP: aplicações, requisitos e soluções**. 2006. 196 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

CANSADO, J.C.A. **Agrilogic sistema para experimentação de controle de casas de vegetação**. 2003. 118 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

CIA – CAN IN AUTOMATION. **CANopen, an overview**. Disponível em: <<http://www.can-cia.org/canopen/>>. Acesso em: 26 out. 2006.

COLEMAN, R. Outline of P1451.5 draft specification. In: WORKSHOP ON WIRELESS SENSING, SENSOR EXPO & CONFERENCE, 6., Detroit, 2004. **Presentation**. Disponível em: <<http://grouper.ieee.org/groups/1451/5/WirelessSensingWkspVIFiles/P1451.5Draft.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2006.

CONCEITO Tecnologia. Site. Disponível em: <<http://www.conceitotecnologia.com.br/>>. Acesso em: 26 out. 2006.

CONWAY, P.; HEFFERNAN, D.; O'MARA, B.; BURTON, P.; MIAO, T. IEEE 1451.2: An interpretation and example implementation. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 17., 2000, Baltimore. **Proceedings...** New York: IEEE, 2000. v.2, p. 535-540.

CUGNASCA, C.E.; SARAIVA, A.M.; HIRAKAWA, A.R.; STRAUSS, C. Communication protocols for application in agricultural vehicles. In: MAHALIK, N.P. (Ed.) **Fieldbus Technology: Industrial Network Standards for Real-Time Distributed Control**. Berlin: Springer, 2003. p. 435-450.

DEPARI, A.; FERRARI, P.; FLAMMINI, A.; MARIOLI, D.; SISINNI, E.; TARONI, A. IEEE1451 smart sensors supporting USB connectivity. In: ISA/IEEE SENSORS FOR INDUSTRY CONFERENCE, 2004, New Orleans. **Proceedings...** New York: IEEE, 2004, p. 177-182.

DUNBAR, M. Plug-and-play sensors in wireless networks. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, v.4, n.1, p. 19-23, Mar. 2001.

ECHELON. Echelon Corporation Site. (a) Disponível em: <<http://www.echelon.com/>>. Acesso em: 16 mar. 2005.

_____. **Echelon technology adopted as european building control standard**. (b) Disponível em: <<http://www.echelon.com/company/press/2005/ahr2005.htm>>. Acesso em: 26 out. 2006. /Matéria sobre a adoção de LonWorks como padrão europeu./

_____. **Introduction to the LonWorks system.** Palo Alto: Echelon, 1999. (Relatório 078- 0183-01A).

_____. **LNS programmer's guide.** Palo Alto, Echelon, 2004 (a). (Relatório 078-0177-01F).

_____. **LonMaker user's guide.** Palo Alto, Echelon, 2003 (a). (Relatório 078-0168-02G).

_____. **LonMark® SNVT master list.** Palo Alto: Echelon, 2002. Disponível em: <<http://www.echelon.com/support/documentation/manuals/general/>>. Acesso em: 16 mar. 2005.

_____. **LonWorks twisted pair control module user's guide.** Palo Alto: Echelon, 1996. (Relatório 078-0015-01E).

_____. **Neuron C programmer's guide.** Palo Alto: Echelon, 1995 (a). (Relatório 078-0002-02G).

_____. **Neuron C reference guide.** Palo Alto: Echelon, 1995 (b). (Relatório 078-0140-02E).

_____. **NodeBuilder user's guide.** Palo Alto, Echelon, 2003 (b). (Relatório 078-0141-01E).

_____. Using the serial peripheral interface (SPI) and neurowire I/O object models to interface with peripherals and microcontrollers. Palo Alto: Echelon, 2004 (b). (Relatório 005-0165-01A).

FISCHER, R.L.; BURCH, J. The PICmicro® MCU as an IEEE 1451.2 compatible smart transducer interface module (STIM). Microchip Technology Inc., 2000. (AN214).

GILSINN, J.D.; LEE, K. Wireless interfaces for IEEE 1451 sensor networks. In: ISA/IEEE CONFERENCE, 1., 2001, Illinois. **Proceedings...** New York: IEEE, 2001, p. 45-50.

HI-TECH. **PICC Lite.** Disponível em: <<http://www.htsoft.com/products/PICClite.php>>. Acesso em: 16 mar. 2005. /Compilador C gratuito para microcontroladores da família PIC16./

HOME PNA. Home Phoneline Networking Alliance (HomePNA) Site. Disponível em: <<http://www.homepna.org/>>. Acesso em: 19 set. 2006.

HONEYWELL. **TEDS - plug and play sensor configuration**. Disponível em: <<http://www.sensotec.com/pnptermis.shtml>>. Acesso em: 26 out. 2006.

IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE draft standard for a smart transducer interface for sensors and actuators – a high-speed canopen based transducer network interface for intrinsically safe and nonintrinsically safe applications. New York: IEEE, 2004 (c). (IEEE P1451.6/D2.03).

_____. IEEE standard for a smart transducer interface for sensors and actuators-transducer to microprocessor communication protocols and transducer electronic data sheet (TEDS) formats. New York: IEEE, 1998. (IEEE Std 1451.2-1997).

_____. IEEE standard for a smart transducer interface for sensors and actuators-network capable application processor (NCAP) information model. New York: IEEE, 2000. (IEEE Std 1451.1-1999).

_____. IEEE standard for a smart transducer interface for sensors and actuators-digital communication and transducer electronic data sheet (TEDS) formats for distributed multidrop systems. New York: IEEE, 2004 (a). (IEEE Std 1451.3-2003).

_____. IEEE standard for a smart transducer interface for sensors and actuators-mixed mode communication protocols and transducer electronic data sheet (TEDS) formats. New York: IEEE, 2004 (b). (IEEE Std 1451.4-2004).

_____. IEEE P1451.0 site. (a) Disponível em: <<http://grouper.ieee.org/groups/1451/0/>>. Acesso em: 26 out. 2006.

_____. IEEE P1451.6 site. (b) Disponível em: <<http://grouper.ieee.org/groups/1451/6/>>. Acesso em: 26 out. 2006.

ISO - International Organization for Standardization. Road vehicles - Interchange of digital information - Controller area network (CAN) for high-speed communication. ISO, 1993. (Norma ISO 11898).

JOHNSON, R.; LEE, K.; WICZER, J.; WOODS, S. A standard smart transducer interface - IEEE 1451. In: SENSOR EXPO & CONFERENCE, Philadelphia, 2001. **Presentation**. Disponível em:

<http://ieee1451.nist.gov/Workshop_04Oct01/1451_overview.pdf>. Acesso em: 26 out. 2006.

JOHNSON, R.N. Building plug-and-play networked smart transducers. **Sensors**, Oct. 1997. Disponível em: <<http://archives.sensormag.com/articles/1097/ieee1097/index.htm>>. Acesso em: 26 out. 2006.

_____. IEEE Standard P1451.0. Defining the core features of smart sensors to facilitate broader adoption. In: SENSORS EXPO & CONFERENCE, Chicago, 2003. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.telemonitor.com/doc/dot0prop.PDF>>. Acesso em: 26 out. 2006.

JOHNSON, R.N.; WOODS, S. P. Proposed enhancements to the IEEE 1451.2 standard for smart transducers. **Sensors**, set. 2001. Disponível em: <<http://archives.sensormag.com/articles/0901/74/index.htm>>. Acesso em: 26 out. 2006.

LEE, K. IEEE 1451: A standard in support of smart transducer networking. In: IEEE INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 17., 2000, Baltimore. **Proceedings...** New York: IEEE, 2000. v. 2, p. 525-528.

_____. **A synopsis of the IEEE P1451 – standards for smart transducer communication.** (a) Disponível em: <<http://ieee1451.nist.gov/1451synosis-599F.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2004.

_____. Introduction to IEEE 1451-family of standards. In: WORKSHOP ON WIRELESS SENSING, SENSOR EXPO & CONFERENCE, 6., Detroit, 2004. **Presentation.** (b) Disponível em: <http://grouper.ieee.org/groups/1451/5/WirelessSensing_Wksp_VI_Files/Introduction_1451_Family_Standards_060704.pdf>. Acesso em: 26 out. 2006.

_____. Sensor networking and interface standardization. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 18., 2001, Budapest. **Proceddings...** New York: IEEE, 2001. p. 147-152.

LEE, K.B.; SCHNEEMAN, R.D. Distributed measurement and control based on the IEEE 1451 smart transducer interface standards. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 49, n. 3, p. 621–627, jun. 2000.

LEE, K.C.; KIM, M.H.; LEE S.; LEE, H.H. IEEE 1451 based smart module for in-vehicle networking systems of intelligent vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 51, n. 6, p. 1150-1158, dez. 2004.

LONMARK. Site. Disponível em: <<http://www.lonmark.org/>>. Acesso em: 16 mar. 2005

MAHALIK, N.G.P.C.; LEE, S.K. A study on production line automation with LonWorks™ control networks. **Computer Standards & Interfaces**, n.24, p.21-27, mar. 2002.

MENON C. **Re: IEEE P1451.6 information** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <fernando.tani@poli.usp.br> em 10 mar. 2005.

MICROCHIP. Microchip Technology site. (a) Disponível em: <<http://www.microchip.com/>>. Acesso em: 16 mar. 2005.

_____. **MPLAB® C18 C compiler getting started**. Chandler: Microchip Technology Inc., 2005 (d). (DS51295B).

_____. **MPLAB® C18 C compiler libraries**. Chandler: Microchip Technology Inc., 2002 (a). (DS51297B).

_____. **MPLAB® C18 C compiler user's guide**. Chandler: Microchip Technology Inc., 2005 (c). (DS51288H).

_____. **MPLAB® IDE user's guide**. Chandler: Microchip Technology Inc., 2005 (b). (DS51519A).

_____. PIC18FXX2 data sheet. High performance, enhanced FLASH microcontrollers with 10-Bit A/D. Chandler: Microchip Technology Inc., 2002 (b). (DS39564B).

MONTAGUE, J. IEEE 1451 revived. Sensor interface standard rides again. **Control Engineering**, Nov. 2004. Disponível em: <<http://www.manufacturing.net/ctl/article/CA478481.html?industry=System+Integration&industryid=22070&spacedesc=communityFeatures>>. Acesso em: 26 out. 2006.

MURUGESHAN, R. Fieldbus and contemporary standards. In: MAHALIK, N.P. (Ed.) **Fieldbus technology: industrial network standards for real-time distributed control**. Berlin: Springer, 2003. p. 1-37.

NATIONAL. LabVIEW - The software that powers virtual instrumentation. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/>>. Acesso em: 26 out. 2006.

_____. National Instruments site. Disponível em: <<http://www.ni.com/>>. Acesso em: 26 out. 2006.

NIST. National Institute of Standards and Technology, IEEE 1451 site. Disponível em: <<http://ieee1451.nist.gov/>>. Acesso em: 25 out. 2004.

OREGON STATE UNIVERSITY. **Greenhouse tomato**. 2002. Disponível em: <<http://oregonstate.edu/Dept/NWREC/tomatogh.html>>. Acesso em: 21 fev. 2006.

PEREIRA, G.A. et al. Greenhouse weblab. In: WORKSHOP TIDIA, 2. São Paulo, 2005. **Anais**. São Paulo: FAPESP, 2005.

PEREIRA, G.A. Sistema experimental de monitoramento e controle para casas de vegetação baseado em redes de controle distribuído LonWorks®. 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006. 125p.

RAJI, R.S. Control networks and the Internet. In: MAHALIK, N.P. (Ed.) **Fieldbus technology: industrial network standards for real-time distributed control**. Berlin: Springer, 2003. p. 171-182.

SENSIRION. **Sample code humidity sensor SHTxx**. Disponível em: <http://www.sensirion.com/en/02_sensors/00_products.htm?cat=3&art=5>. Acesso em: 01 nov. 2005 (b).

_____. **SHT1x/SHT7x humidity & temperature sensor**. Staefa: Sensirion AG, 2005. Disponível em: <<http://www.sensirion.com/images/getFile?id=25>>. Acesso em: 01 nov. 2005 (a).

SENSORS. Sensor business digest. Sensor industry developments and trends. Smart sensor networks can be achieved using different approaches. **Sensors**, May 2001. Disponível em: <<http://archives.sensorsmag.com/resources/businessdigest/sbd0501.shtml>>. Acesso em: 26 out. 2006.

SHEBLE, N. IEEE 1451 standards loses ground. **InTech**, Aug. 2000. Disponível em: <http://www.findarticles.com/p/articles/mi_qa3739/is_200008/ai_n8909862>. Acesso em: 26 out. 2006.

SHICKHUBER, G.; MCCARTHY, O. Distributed fieldbus and control network systems. **Computing & Control Engineering Journal**, v. 1, p. 21-32, Feb. 1997.

SMITH, R.D. Building IEEE 1451.2 smart transducer interface module (STIMs). In: SENSORS EXPO & CONFERENCE, Anaheim, 2000. **Technical Paper**. Disponível em: <<http://www.telemonitor.com/doc/stim.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2006.

TAC. Site. Disponível em: <<http://www.tac.com/>>. Acesso em: 16 mar. 2005

_____. **TAC Vista**. North Andover: TAC, 2001. (0-006-1161-3).

_____. **TAC XBuilder® programming tool for TAC Xenta 511**. North Andover: TAC, 2003 (b). (0-003-2308-2).

_____. **Xenta 511 – operating dataSheet**. North Andover: TAC, 2003 (a). (0-003-1956-4).

TAN, K.K.; TANG, K.Z. Control of Fieldbus-based systems via the Internet. In: MAHALIK, N.P. (Ed.) **Fieldbus technology: industrial network standards for real-time distributed control**. Berlin: Springer, 2003. p. 215-244.

TANENBAUM, A.S. The OSI reference model. In: _____. **Computer networks**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003. p. 37-41.

TANI, F. **Estudo de utilização de dispositivos IEEE 1451 com redes LonWorks em automação de estufas**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004. /Monografia apresentada na disciplina de pós-graduação PCS 5713./

TIDIA – Tecnologia da Informação no Desenvolvimento da Internet Avançada. Disponível em: <<http://www.tidia.fapesp.br/>>. Acesso em: 25 de out. 2005.

VIEGAS, V.M.R. **Projecto e Implementação de um sistema de sensores inteligentes baseado na norma IEEE 1451**. 2003. 223 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2003.

WANG, N.; ZHANG, N.; WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry – Recent development and future perspective. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 50, n. 1, p. 1-14, Jan. 2005.

WEI, J.; ZHANG, N.; WANG, N.; LENHART, D.; NEILSEN, M.; MIZUNO, M. Use of the “smart transducer” concept and IEEE 1451 standards in system integration for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 48, n. 3, p. 245-255, Set. 2005.

WOBSCHALL, D. An implementation of IEEE 1451 NCAP for Internet access of serial port-based sensors. In: ISA/IEEE SENSORS FOR INDUSTRY CONFERENCE, 2., 2002, Houston. **Proceedings...** New York: IEEE, 2002. p. 157-160.

REFERÊNCIAS RECOMENDADAS

GRAHAM CONTROLS CONSULTING. A short history and a technology overview. Disponível em: <<http://www.grahamcontrols.com/lwoverview.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2004.

IEEE. IEEE P1451.2 Site. Disponível em: <<http://grouper.ieee.org/groups/1451/2/>>. Acesso em: 26 out. 2006.

_____. IEEE P1451.4 Site. Disponível em: <<http://grouper.ieee.org/groups/1451/4/>>. Acesso em: 26 out. 2006.

_____. IEEE P1451.5 Site. Disponível em: <<http://grouper.ieee.org/groups/1451/5/>>. Acesso em: 26 out. 2006.

NESS, R. V. **The Importance of IEEE 1451**. The Online Industrial Ethernet Book. Disponível em: <http://ethernet.industrial-networking.com/articles/i01_ieee1451rvness.asp>. Acesso em: 25 out. 2004.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC Programação em C**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica, 2005. 358 p.

RAMOS, H.M.G.; PEREIRA, J.M.D.; VIEGAS, V.; POSTOLACHE, O.; GIRÃO, P.M.B.S. A virtual instrument to test smart transducer interface modules (STIMs). **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 53, n. 4, p. 1232-1239, ago. 2004.

SOUZA, D.J. **Desbravando o PIC**. 5. ed. São Paulo: Editora Érica, 2005. 198 p.

TANI, F.; CUGNASCA, C.E. Agriculture and the IEEE 1451 smart transducer interface standard. In: EFITA/WCCA 2005 JOINT CONFERENCE, 2005, Vila Real, Portugal. **Proceedings...** Vila Real: EFITA, 2005. p. 1341-1348.

APÊNDICE A – DETALHES DA NORMA IEEE 1451.2

Tabela 15 – Relação dos endereços de função e suas descrições (IEEE, 1998)

Write address	CHANNEL_ZERO function	Channel 1–255 function	Read address	CHANNEL_ZERO function	Channel 1–255 function
Operational addresses					
0	Write global transducer data	Write channel transducer data	128	Read global transducer data	Read channel transducer data
1	Write global control command	Write channel control command	129	Reserved	
2	Reserved		130	Read global standard status	Read channel standard status
3	Write triggered channel address	Reserved	131	Read triggered channel address	Reserved
4	Reserved		132	Read global auxiliary status	Read channel auxiliary status
5	Write global standard interrupt mask	Write channel standard interrupt mask	133	Read global standard interrupt mask	Read channel standard interrupt mask
6	Write global auxiliary interrupt mask	Write channel auxiliary interrupt mask	134	Read global auxiliary interrupt mask	Read channel auxiliary interrupt mask
7	Reserved		135	Read STIM version	Reserved
8–15	Reserved for future write extensions		136–143	Reserved for future read extensions	
16–31	Open for industry write extensions		144–159	Open for industry read extensions	
TEDS addresses					
32	For manufacturer's use only	For manufacturer's use only	160	Read Meta-TEDS	Read Channel TEDS
33	For manufacturer's use only	For manufacturer's use only	161	Read Meta-Identification TEDS	Read Channel Identification TEDS
34–47	Reserved for writing future TEDS extensions		162–175	Reserved for reading future TEDS extensions	
48–63	For manufacturer's use only		176–191	Open for reading industry TEDS extensions	
Calibration TEDS addresses					
64	Reserved	Write Calibration TEDS	192	Reserved	Read Calibration TEDS
65	Reserved	Write Calibration Identification TEDS	193	Reserved	Read Calibration Identification TEDS
66–79	Reserved for writing future Calibration TEDS extensions		194–207	Reserved for reading future Calibration TEDS extensions	
80–95	Open for writing industry Calibration TEDS extensions		208–223	Open for reading industry Calibration TEDS extensions	
General writable storage addresses					
96	Write global End-Users' Application-Specific TEDS	Write channel End-Users' Application-Specific TEDS	224	Read global End-Users' Application-Specific TEDS	Read channel End-Users' Application-Specific TEDS
97–111	Reserved for writing future writable nonvolatile data		225–239	Reserved for reading future writable nonvolatile data	
112–127	Open for writing industry writable nonvolatile data		240–255	Open for reading industry writable nonvolatile data	

Tabela 16 – Tabela de comandos (IEEE, 1998)

Value	CHANNEL_ZERO definition	Individual channel definition
0	No operation	No operation
1	Reset STIM	Reset channel
2	Initiate STIM self-test	Initiate channel self-test
3	Calibrate all channels	Calibrate channel
4	Zero all channels	Zero channel
5	Enable all event sequence sensors	Enable event sequence sensor
6	Disable all event sequence sensors	Disable event sequence sensor
7	Set all event sequence sensors to the configuration mode	Set event sequence sensor to the configuration mode
8	Reserved	Reserved
9	Enable all data sequence or buffered data sequence sensors	Enable data sequence or buffered data sequence sensors
10	Disable all data sequence or buffered data sequence sensors	Disable data sequence or buffered data sequence sensors
11–255	Reserved	Reserved
256–65 535	Open to industry	Open to industry

Tabela 17 – Registrador de estado padrão (*standard status*) (IEEE, 1998)

Bit	CHANNEL_ZERO definition	Individual channel definition
msb	Open to industry	Open to industry
—	Open to industry	Open to industry
—	Open to industry	Open to industry
—	Open to industry	Open to industry
—	Reserved	Reserved
—	Reserved	Reserved
—	Reserved	Reserved
—	STIM operational bit	Channel operational bit
—	STIM <i>OR</i> of channel hardware error bits	Channel hardware error bit
—	STIM <i>OR</i> of all channel data/event bits	Channel data /event bit
—	STIM <i>OR</i> of all channel missed data or event bits	Channel missed data or event bit
—	STIM <i>OR</i> of all channel auxiliary status available bits	Channel auxiliary status available bit
—	STIM invalid command bit	Reserved
—	STIM has been reset bit	Channel has been reset bit
—	STIM trigger acknowledged bit	Channel trigger acknowledged bit
lsb	Global service request bit	Channel service request bit

Tabela 18 – Registrador de estado auxiliar (*auxiliar status*) (IEEE, 1998)

Bit	Channel zero definition	Individual channel definition
msb	Open to industry	Open to industry
—	Open to industry	Open to industry
—	Open to industry	Open to industry
—	Open to industry	Open to industry
—	Open to industry	Open to industry
—	Open to industry	Open to industry
—	Reserved	Reserved
—	Reserved	Reserved
—	Reserved	Reserved
—	Reserved	Reserved
—	Reserved	Reserved
—	OR of all channel data over range or under range bits	Channel data over range or under range bit
—	OR of all channel consumables exhausted bits	Channel consumables exhausted bit
—	STIM failed self-test bit	Channel failed self-test bit
—	OR of channel failed calibration bits	Channel failed calibration bit
lsb	OR of channel busy bits	Channel busy bit

APÊNDICE B – PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO DO SENSOR SENSIRION SHT71

Figura 44. Protocolo de comunicação do Sensirion SHT71. Baseado em Sensirion (2005a)

APÊNDICE C – DETALHAMENTO DA TEDS

Tabela 19 – Estrutura de dados do Meta-TEDS (IEEE, 1998)

Field no.	Description	Type	No. of bytes
TEDS version constant related data sub-block			
1	Meta-TEDS Length	U32L	4
2	IEEE 1451 Standards Family Working Group Number	U8E	1
3	TEDS Version Number	U8E	1
Identification related data sub-block			
4	Globally Unique Identifier	UUID	10
Data structure related data sub-block			
5	CHANNEL_ZERO Industry Calibration TEDS Extension Key	U8E	1
6	CHANNEL_ZERO Industry Nonvolatile Data Fields Extension Key	U8E	1
7	CHANNEL_ZERO industry TEDS extension key	U8E	1
8	CHANNEL_ZERO End-Users' Application-Specific TEDS key	U8E	1
9	Number of Implemented Channels	U8C	1
10	Worst-Case Channel Data Model Length	U8C	1
11	Worst-Case Channel Data Repetitions	U16C	2
12	CHANNEL_ZERO writable TEDS length	U32C	4
Timing related data sub-block			
13	Worst-Case Channel Update Time (t_{wu})	F32	4
14	Global Write Setup Time (t_{gws})	F32	4
15	Global Read Setup Time (t_{grs})	F32	4
16	Worst-Case Channel Sampling Period (t_{wsp})	F32	4
17	Worst-Case Channel Warm-Up Time	F32	4
18	Command Response Time	F32	4
19	STIM Handshake Timing (t_{hs})	F32	4
20	End-Of-Frame Detection Latency (t_{lat})	F32	4
21	TEDS Hold-Off Time (t_{th})	F32	4
22	Operational Hold-Off Time (t_{oh})	F32	4
23	Maximum Data Rate	U32C	4
Channel grouping related data sub-block			
24	Channel Groupings Data Sub-block Length	U16L	2
25	Number of Channel Groupings = G	U8C	1

continua

conclusão

Field no.	Description	Type	No. of bytes
Fields 26–28 are repeated G times, once for each group			
26	Group Type	U8E	1
27	Number of Group Members = N	U8C	1
28	Member Channel Numbers List = M(N)	Array of U8E	N
Data integrity data sub-block			
29	Checksum for Meta-TEDS	U16C	2

Tabela 20 – Estrutura de dados do Channel TEDS (IEEE, 1998)

Field No.	Description	Type	No. of bytes
Data structure related data sub-block			
1	Channel TEDS Length	U32L	4
2	Calibration Key	U8E	1
3	Channel Industry Calibration TEDS Extension Key	U8E	1
4	Channel Industry Nonvolatile Data Fields Extension Key	U8E	1
5	Channel Industry TEDS Extension Key	U8E	1
6	Channel End-Users' Application-Specific TEDS Key	U8E	1
7	Channel Writable TEDS Length	U32C	4
Transducer related data sub-block			
8	Channel Type Key	U8E	1
9	Physical Units	UNITS	10
10	Lower Range Limit	F32	4
11	Upper Range Limit	F32	4
12	Worst-Case Uncertainty	F32	4
13	Self-Test Key	U8E	1
Data converter related data sub-block			
14	Channel Data Model	U8E	1
15	Channel Data Model Length	U8C	1
16	Channel Model Significant Bits	U16C	2
17	Channel Data Repetitions	U16C	2
18	Series Origin	F32	4
19	Series Increment	F32	4
20	Series Units	UNITS	10

continua

conclusão

Field No.	Description	Type	No. of bytes
Timing related data sub-block			
21	Channel Update Time (t_u)	F32	4
22	Channel Write Setup Time (t_{ws})	F32	4
23	Channel Read Setup Time (t_{rs})	F32	4
24	Channel Sampling Period (t_{sp})	F32	4
25	Channel Warm-Up Time	F32	4
26	Channel Aggregated Hold-Off Time (t_{ch})	F32	4
27	Timing Correction	F32	4
28	Trigger Accuracy	F32	4
Event sequence options field			
29	Event Sequence Options	U8E	1
Data integrity data sub-block			
30	Checksum for Channel TEDS	U16C	2

APÊNDICE D – IMPLEMENTAÇÃO DA TEDS NO STIM

Como foi apresentada nesta dissertação, a TEDS foi implementada em memória de programa do STIM, sendo apenas os blocos obrigatórios (Meta e Channel TEDS) inclusos no protótipo.

As estruturas da TEDS foram alocadas em memória de programa através das seguintes declarações e com os campos contendo os seguintes valores:

Meta_TEDS:

```
static const unsigned char META_TEDS[76]=
{
    0x0, 0x0, 0x0, 0x48,    //Meta TEDS length
    0x2,                    //IEEE 1451 standarts family working group number
    0x1,                    //TEDS version number

    0x01, 0x02, 0x03, 0x04, 0x05, 0x06, 0x07, 0x08, 0x09, 0x0, //Globally unique
    identifier

    0x0,                    //CHANNEL_ZERO industry calibration TEDS extension key
    0x0,                    //CHANNEL_ZERO industry nonvolatile data fields extension
    key
    0x0,                    //CHANNEL_ZERO industry TEDS extension key
    0x0,                    //CHANNEL_ZERO end user's application specific TEDS key
    0x1,                    //Number of implemented channels
    0x4,                    //Worst case channel data model length
    0x0, 0x0,              //Worst case channel data repetitions
    0x0, 0x0, 0x0, 0x0,    //CHANNEL_ZERO writable TEDS length

    0x3F, 0x80, 0x0, 0x0,  //Worst case channel update time (Twu) [s]           :1.0
    0x0, 0x0, 0x0, 0x0,    //Global write setup time (Tgws) [s]           :0
    0x3E, 0x990, 0x99, 0x9A, //Global read setup time (Tgrs) [s]           :0.2824219
    0x3F, 0x00, 0x0, 0x0,  //Worst case channel sampling period (Twsp) [s]           :0.5
    0x40, 0x80, 0x0, 0x0,  //Worst case channel warm up time [s]           :4.0
    0x3F, 0x0, 0x0, 0x0,   //Command response time [s]           :0.5
    0x3F, 0x0, 0x0, 0x0,   //STIM handshake time (Ths) [s]         :0.5
    0x3F, 0x0, 0x0, 0x0,   //End of frame detection latency (Tlat) [s] :0.5
    0x3F, 0x80, 0x0, 0x0,  //TEDS hold off time (Tth) [s]          :1.0
    0x3F, 0x80, 0x0, 0x0,  //Operational hold off time (Toh) [s]   :1.0
    0x0, 0x1, 0x86, 0xA0,  //Maximum data rate [bit/s]
    :100k

    0x0, 0x0,              //Channel groupings data sub-block length
    0xAC, 0x1A            //Checksum
};
```

Channel TEDS:

```

static const unsigned char CHANNEL1_TEDS[96]=
{
    0x0, 0x0, 0x0, 0x5C,    //Channel TEDS length
    0x0,                    //Calibration key
    0x0,                    //Channel industry calibration TEDS extension key
    0x0,                    //Channel industry nonvolatile data fields extension key
    0x0,                    //Channel industry TEDS extension key
    0x0,                    //Channel end user's application specific TEDS key
    0x0, 0x0, 0x0, 0x0,    //Channel writable TEDS length
    0x0,                    //Channel type key
    0x4, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, //Physical units
    0x0, 0x0, 0x0, 0x0,    //Lower range limit
    0x42, 0xC8, 0x0, 0x0,  //Upper range limit
    0x40, 0x40, 0x0, 0x0,  //Worst case uncertainty
    0x0,                    //Self test key
    0x1,                    //Channel data model
    0x4,                    //Channel data model length
    0x0, 0x0E,             //Channel model significant bits
    0x0, 0x0,              //Channel data repetitions
    0x0, 0x0, 0x0, 0x0,    //Series origin
    0x0, 0x0, 0x0, 0x0,    //Series increment
    0x4, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, 0x80, //Series units
    0x3F, 0x80, 0x0, 0x0,  //Channel update time (Tu) [s]
    0x0, 0x0, 0x0, 0x0,    //Channel write setup time (Tws) [s]
    0x3E, 0x990, 0x99, 0x9A, //Channel read setup time (Trs) [s]
    0x3F, 0x00, 0x0, 0x0,  //Channel sampling period (Tsp) [s]
    0x40, 0x80, 0x0, 0x0,  //Channel warm up time [s]
    0x3F, 0xC0, 0x0, 0x0,  //Channel aggregated hold off time (Tch) [s]
    0x0, 0x0, 0x0, 0x0,    //Timing correction
    0x0, 0x0, 0x0, 0x0,    //Trigger accuracy
    0x0,                    //Event sequence options
    0xEB, 0x68             //Checksum
};

```

APÊNDICE E – EXEMPLOS DE VERIFICAÇÃO DOS REGISTRADORES DE ESTADO NO LABVIEW

Figura 45. Máscara de interrupção padrão inibindo a geração do sinal de interrupção em função da ativação dos bits *operational* e *trigger acknowledge* do registrador de estado padrão

Figura 46. Registradores de estado após a execução do comando de *reset*

APÊNDICE F – EXEMPLOS DE VERIFICAÇÃO DOS REGISTRADORES DE ESTADO NO NODEBUILDER

Apesar de ativos, não geram interrupção

Sem requisição de serviço

Name	Format	Poll	Dir	Interval	Len	Value
Humidity	SNVT_lev_percent	On	Out	2.0	2	53.250
nvo_global_stat	SNVT_state	On	Out	2.0	2	0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0
nvo_ch_1_stat	SNVT_state	On	Out	2.0	2	0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0
nvi_glob_int_msk	SNVT_state	On	In	2.0	2	1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1
nvi_ch_1_int_msk	SNVT_state	On	In	2.0	2	1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1
nvi_new_trig_ch	SNVT_count	On	In	2.0	2	1
nvo_curr_trig_ch	SNVT_count	On	Out	2.0	2	1
nvo_old_trig_ch	SNVT_count	On	Out	2.0	2	1
nvi_reset	SNVT_switch	On	In	2.0	2	1.0 0

Bits "operational" e "trigger acknowledged" da máscara de interrupção desativados

Figura 47. Máscara de interrupção padrão inibindo a geração do sinal de interrupção em função da ativação dos bits *operational* e *trigger acknowledge* do registrador de estado padrão

Indicação da execução do reset

Requisição de serviço

Execução do comando de reset através da alteração do valor da variável

Name	Format	Poll	Dir	Interval	Len	Value
Humidity	SNVT_lev_percent	On	Out	2.0	2	53.330
nvo_global_stat	SNVT_state	On	Out	2.0	2	0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,1
nvo_ch_1_stat	SNVT_state	On	Out	2.0	2	0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,1
nvi_glob_int_msk	SNVT_state	On	In	2.0	2	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
nvi_ch_1_int_msk	SNVT_state	On	In	2.0	2	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
nvi_new_trig_ch	SNVT_count	On	In	2.0	2	1
nvo_curr_trig_ch	SNVT_count	On	Out	2.0	2	1
nvo_old_trig_ch	SNVT_count	On	Out	2.0	2	1
nvi_reset	SNVT_switch	On	In	2.0	2	1.0 0

Figura 48. Registradores de estado após a execução do comando de *reset*