

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RICARDO SAMUEL CITOLIN

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

SISTEMA DE TERMOMETRIA PARA SILOS

PORTO ALEGRE

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**TERMOMETRIX
SISTEMA DE TERMOMETRIA PARA SILOS**

**Projeto de Diplomação apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
parte dos requisitos para Graduação em
Engenharia Elétrica.**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcelo Götz

**PORTO ALEGRE
2012**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RICARDO SAMUEL CITOLIN

**TERMOMETRIX
SISTEMA DE TERMOMETRIA PARA SILOS**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da disciplina “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Marcelo Götz, UFRGS

Doutor pela Univesität Paderborn – Paderborn, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Hamilton Duarte Klimach, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. Marcelo Götz, UFRGS

Doutor pela Univesität Paderborn – Paderborn, Alemanha

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido para suprir os requisitos para graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trata-se da proposta de solução para o problema da deterioração dos grãos armazenados em silos. Esta degradação é devida a fungos, insetos e outros organismos vivos, que dependem do calor e umidade para se propagar, e pode ser evitada a partir do monitoramento da temperatura interna do silo. O documento apresenta o desenvolvimento de um sistema de termometria baseado em termistores com coeficiente de temperatura negativo (NTC). É relatado o processo de caracterização dos sensores, condicionamento e multiplexação dos sinais e a transmissão dos dados coletados entre o sistema (microcontrolador) e o dispositivo de interface com o usuário (computador). A partir da leitura dos dados, o sistema permite o monitoramento da temperatura em diversos pontos do silo e a eventual detecção de focos de aquecimento, que são indicadores do aparecimento de pragas e de degradação dos grãos.

Palavras-chave: armazenamento, microcontrolador, NTC, silo, termometria.

ABSTRACT

This study was developed to meet the requirements for graduation in Electrical Engineering from Universidade Federal do Rio Grande do Sul. This is the proposed solution to the problem of deterioration of grain stored in silos. This degradation is due to fungi, insects and other living organisms that depend on the heat and humidity to propagate, and can be avoided through monitoring the temperature inside the silo. The document describes the development of a thermometry system, based on thermistors with a negative temperature coefficient (NTC). The paper presents the characterization of the sensors, signal conditioning, multiplexing and transmission of the collected data between the system (microcontroller) and the computer responsible for user's interface. The system allows temperature monitoring in several points of the silo and the possibility of detecting heating zones, which are indicators of pests and degradation of the grains.

Keywords: **ensilage, microcontroller, NTC, silo, thermometry.**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 JUSTIFICATIVA.....	14
2.1 A agricultura: economia e alimento.....	14
2.2 A produção de grãos e capacidade de armazenamento.....	17
2.3 O sistema de armazenagem.....	22
2.3.1 Conservação dos grãos.....	24
2.3.2 Umidade, secagem e aeração.....	25
2.3.3 Temperatura e termometria.....	27
2.4 Objetivos.....	29
2.5 Critérios de projeto.....	30
3 REVISÃO TEÓRICA.....	33
3.1 Conceitos de instrumentação e medidas.....	33
3.2 Medição de temperatura.....	35
3.2.1 NTC.....	36
3.3 Microcontroladores – PIC.....	37
3.4 Programação em Linguagem C#.....	41
3.5 Rede RS-485.....	41
3.5.1 Terminações.....	43
3.5.2 Polarização de segurança da rede RS-485.....	44
3.6 Protocolos de comunicação – Modbus.....	46
3.6.1 Descrição do protocolo.....	47
3.6.2 Modelo de dados e endereçamento.....	49
3.6.3 CRC-16.....	50
3.6.4 Function Code 03: Read Holding Registers.....	52
4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	55
4.1 Proposta de solução do problema.....	55
4.2 Etapa 1: Alimentação.....	57
4.3 Etapa 2: Instrumentação e condicionamento do sinal.....	58
4.3.1 Caracterização do sensor.....	58

4.3.2 Linearização do NTC – Ponte de Wheatstone.....	66
4.3.3 Amplificador diferencial.....	69
4.3.4 Cadeia de medida e especificação do conversor analógico/digital.....	73
4.4 Etapa 3: Multiplexação.....	76
4.5 Etapa 4: Microcontrolador.....	78
4.5.1 Programação do microcontrolador.....	81
4.5.2 Tratamento da interrupção: aplicação do protocolo Modbus.....	83
4.5.3 Calibração por software.....	85
4.6 Etapa 5: Comunicação.....	87
4.6.1 Testes de comunicação.....	91
4.7 Etapa 6: Supervisório.....	93
4.7.1 Comunicação.....	94
4.7.2 Gerenciamento de informações.....	94
4.7.3 Interface.....	95
5 FINALIZAÇÃO DO PROJETO E RESULTADOS.....	98
5.1 Placa de circuito impresso.....	98
5.2 Materiais e custos.....	99
5.3 Prototipação e testes.....	101
5.4 Resultados gerais e propostas de melhorias.....	105
6 CONCLUSÕES.....	106
7 REFERÊNCIAS.....	107

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Participação na produção nacional por região, 2010.....	18
Figura 2: Participação na produção nacional por região, 2012 (previsão).....	19
Figura 3: Déficit de capacidade de armazenamento de grãos.....	21
Figura 4: (a) Silo metálico; (b) silos de concreto; e (c) armazém graneleiro.....	23
Figura 5: Ecossistema de armazenagem.....	24
Figura 6: Diagrama da boa conservação.....	26
Figura 7: (a) Estrutura para ensilagem de grãos; (b) vista em corte.....	30
Figura 8: Dois termistores do tipo NTC.....	37
Figura 9: Pinagem dos microcontroladores (a) PIC16F877A e (b) PIC18F4550.....	39
Figura 10: Mapa de memória dos MCUs (a) PIC16F877A e (b) PIC18F4550.....	40
Figura 11: Topologia de rede daisy-chain.....	43
Figura 12: Rede RS-485 half-duplex com resistores de terminação.....	44
Figura 13: Circuito de polarização da rede RS-485.....	46
Figura 14: Algoritmo para computação do CRC-16.....	52
Figura 15: Diagrama de blocos do projeto.....	56
Figura 16: Circuito de alimentação.....	57
Figura 17: Interferência gerada pelo regulador.....	58
Figura 18: Tabela da análise de variância (ANOVA).....	60
Figura 19: Dispersão de valores de resistência dos termistores.....	61
Figura 20: Curvas de resposta de três termistores (NTC).....	62
Figura 21: Curva de transferência teórica do termistor NTC.....	64
Figura 22: Diferença de resistência elétrica entre termistores.....	65
Figura 23: Diferença porcentual de resistência elétrica entre termistores.....	66
Figura 24: Ponte de Wheatstone com um termistor.....	67
Figura 25: Relação entre a tensão V_a da ponte e a temperatura do termistor.....	68
Figura 26: Ponte de Wheatstone calculada.....	69
Figura 27: Amplificador diferencial.....	69
Figura 28: Tensão de saída V_o em função da temperatura do termistor.....	71
Figura 29: Linearização da tensão de saída V_o em função da temperatura.....	72

Figura 30: Circuito condicionar com ponte e amplificador diferencial.....	73
Figura 31: Cadeia de medidas do sistema.....	75
Figura 32: Especificações elétricas do multiplexador 74HC4051.....	77
Figura 33: Circuito multiplexador conectado a uma linha de termistores.....	78
Figura 34: Circuito principal (microcontrolador).....	79
Figura 35: Fluxograma do código do microcontrolador.....	83
Figura 36: Efeito da variabilidade da resistência do NTC na resposta do circuito condicionar.....	87
Figura 37: Diagrama de comunicação entre o sistema e o computador.....	88
Figura 38: Bloco de comunicação do sistema de termometria.....	89
Figura 39: Circuito de comunicação.....	89
Figura 40: Transceptor RS-485/RS-422 da Maxim.....	90
Figura 41: Conversor RS-485/USB.....	90
Figura 42: Pinagem do conversor TSX CUSB485.....	91
Figura 43: Configurações da comunicação Modbus.....	92
Figura 44: Tela de comunicação do programa ModLink Demo.....	92
Figura 45: Tela principal do programa supervisorio.....	96
Figura 46: Placa do circuito principal.....	98
Figura 47: Placa do circuito multiplexador.....	99
Figura 48: Placa principal (microcontrolador).....	101
Figura 49: Placa dos multiplexadores.....	102
Figura 50: Esquema de conexão do protótipo dos sensores.....	102
Figura 51: Protótipo completo na bancada de testes.....	103
Figura 52: Leitura dos sensores (sem calibração por software).....	104
Figura 53: Leitura dos sensores após calibração.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Maiores Exportadores de Produtos Agrícolas, 2010.....	15
Tabela 2: Produção mundial de soja, 2009/2010.....	15
Tabela 3: Produção mundial de milho, 2009/2010.....	16
Tabela 4: Dados da produção agrícola no Brasil (alguns grãos).....	17
Tabela 5: Participação na produção nacional por estado, 2010.....	18
Tabela 6: Participação na produção nacional por estado, 2012 (previsão).....	18
Tabela 7: Capacidade estática de armazenagem do país.....	20
Tabela 8: Características dos microcontroladores PIC16F877A e PIC18F4550.....	38
Tabela 9: Características RS-485.....	43
Tabela 10: Modelo de camadas OSI (Interconexão de Sistemas Abertos).....	47
Tabela 11: Unidade de Dados do Protocolo MODBUS.....	48
Tabela 12: Quadro da mensagem MODBUS RTU.....	48
Tabela 13: Tipos de dados do protocolo Modbus.....	49
Tabela 14: Endereços MODBUS.....	50
Tabela 15: Função 03: Read Holding Registers - Requisição.....	53
Tabela 16: Função 03: Read Holding Registers - Resposta.....	53
Tabela 17: Função 03: Read Holding Registers - Exceção.....	54
Tabela 18: Códigos de exceção (erro) do protocolo Modbus para a função 03.....	54
Tabela 19: Características nominais do NTC.....	59
Tabela 20: Dados do ensaio de três termistores NTC.....	59
Tabela 21: Dados do NTC para cálculo do coeficiente β	63
Tabela 22: Especificação do conversor A/D.....	74
Tabela 23: Descrição das portas e conexões atribuídas ao microcontrolador.....	79
Tabela 24: Registradores de configuração do PIC16F877A.....	82
Tabela 25: Exemplo de requisição da função 03 (Modbus).....	84
Tabela 26: Lista de materiais e custos.....	99

LISTA DE ABREVIações

ADC	<i>Analog-Digital Converter</i> (Conversor Analógico/Digital)
A/D	Analógico/Digital
ADU	<i>Application Data Unit</i> (Unidade de Dados de Aplicação)
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> (Verificação de Redundância Cíclica)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
MCU	Microcontrolador
MUX	Multiplexador
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> (Coeficiente de Temperatura Negativo)
PDU	<i>Protocol Data Unit</i> (ver UDP)
PIB	Produto Interno Bruto
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i> (Coeficiente de Temperatura Positivo)
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i> (Detector de Temperatura Resistivo)
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
UDP	Unidade de Dados de Protocolo
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i> (Transmissor Receptor Síncrono Assíncrono Universal)
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é uma nação extremamente competente em vista de sua produção agropecuária. Ocupa posição de destaque frente a outras grandes nações mundiais, detendo o *ranking* de terceiro maior exportador agrícola. A produção nacional de grãos ultrapassa a faixa de 150 milhões de toneladas anuais. Como produtor de soja, o país é o segundo do mundo. Para que este cenário continue positivo, é importante que o desenvolvimento tecnológico do setor acompanhe o seu crescimento.

Um dos maiores problemas na produção de cereais, leguminosas e oleaginosas está na quantidade de sítios de armazenamento e na qualidade destes locais. Sem a manutenção de um ambiente propício para o armazenamento, é fácil prever a degradação do material ensilado devido à ação de pragas, tais como fungos e insetos. Mesmo um moderno silo metálico pode propiciar a deterioração dos grãos, se não houver cuidado e controle adequados.

O projeto de um sistema de termometria, objeto de estudo deste trabalho, surge como proposta de solução para o problema da deterioração da matéria orgânica armazenada no silo. Parte do pressuposto, portanto, de que a temperatura é fator indicativo e contribuinte dos processos degradantes. O trabalho apresenta, em cinco capítulos, todo o desenvolvimento do sistema.

Na JUSTIFICATIVA são apresentados os motivos e motivações que levaram o autor a desenvolver sua ideia. Também são definidos os objetivos e sugeridos os primeiros critérios técnicos do projeto, que aparecem com a devida fundamentação do autor.

O capítulo seguinte, REVISÃO TEÓRICA, inicia o processo de pesquisa sobre todos os assuntos que estão diretamente envolvidos no desenvolvimento do projeto. São, por assim dizer, o embasamento científico por trás do sistema. Fazem parte deste capítulo o estudo de redes de computadores, protocolo de comunicação Modbus, conceitos de instrumentação e de medição de temperatura, termistores, microcontroladores e linguagens de programação.

Finalmente inicia o DESENVOLVIMENTO DO PROJETO. Dentro deste capítulo é feito o estudo e caracterização dos sensores utilizados, os termistores do tipo NTC. É realizada a linearização e o condicionamento dos sinais, multiplexação e conversão dos valores analógicos em digitais. É nesta parte que é apresentada toda a programação referente ao microcontrolador utilizado e ao *software* supervisor, responsável pela interface com o usuário final.

A FINALIZAÇÃO DO PROJETO E RESULTADOS são apresentados no penúltimo capítulo. Aqui é abordado o processo de confecção do protótipo, realização dos testes de comunicação e de leitura dos sensores e, por fim, exibidos os resultados alcançados com base nos objetivos propostos.

No último capítulo são dadas as CONCLUSÕES do autor sobre o desenvolvimento do sistema de termometria e também do Projeto de Diplomação do curso de Engenharia Elétrica, do qual se trata este trabalho.

2 JUSTIFICATIVA

2.1 A agricultura: economia e alimento

A agricultura, definida como o conjunto de técnicas e conhecimentos que o solo exige para produzir e cultivar plantas, está presente na civilização humana desde a pré-história, quando ainda dividia espaço de forma equivalente com a caça e a coleta na obtenção de alimentos. Elogiada e criticada através do tempo, atualmente é incontestável a sua importância. É a base da economia de muitas nações ao redor do mundo além de, em alguns casos, a única fonte de alimento disponível.

Na economia, o termo agropecuária, que é a união da agricultura e da pecuária, é utilizado para definir um setor de mercado e denominar toda a produção proveniente do campo. A agropecuária é, então, a área do setor primário responsável pela produção de bens de consumo mediante o cultivo de plantas e da criação de animais.

No Brasil, a agropecuária foi responsável por quase 5,5% do PIB nacional no ano de 2011; o equivalente a R\$ 192,7 bilhões, segundo dados do IBGE [1]. Além disso, a agropecuária foi o setor que apresentou o maior crescimento, atingindo 3,9%. O maior responsável por este aumento foi a agricultura, que obteve uma safra recorde de cereais, leguminosas e oleaginosas (159,9 milhões de toneladas).

A produção agrícola no Brasil, tal como no resto do mundo, serve a três destinos principais: o consumo, seja ele próprio (agricultura de subsistência) ou comunitário (coletivista); a venda (agricultura comercial) e desenvolvimento de um mercado internacional através de exportações; a pesquisa e desenvolvimentos de novas técnicas ou melhorias para o setor (agricultura científica) [2].

O país destaca-se fortemente na produção e exportação de açúcar (do qual é o maior exportador mundial [3]), etanol (cana-de-açúcar), café, suco de laranja, tabaco, soja e milho, além de outros produtos de origem animal.

Recentemente, o Brasil ultrapassou o Canadá, tornando-se o terceiro maior exportador agrícola do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos e da União Europeia. Segundo dados da Organização Mundial do Comércio [4], o Brasil exportou, em 2010, U\$ 69 bilhões. Este é um valor ainda baixo se comparado com a exportação americana, que atingiu U\$ 143 bilhões no mesmo período. Os dados completos podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Maiores Exportadores de Produtos Agrícolas, 2010

PAÍS / REGIÃO	VALOR	PORCENTUAL
União Europeia	U\$ 532 bi	39,1%
Estados Unidos	U\$ 143 bi	10,5%
Brasil	U\$ 69 bi	5%
Canadá	U\$ 52 bi	3,8%
China	U\$ 52 bi	3,8%
Indonésia	U\$ 36 bi	2,6%
Tailândia	U\$ 35 bi	2,6%
Outros		32,6%

O Brasil ainda figura entre os maiores produtores de grãos do mundo. Segundos dados do *Foreign Agricultural Service* do Departamento Americano de Agricultura (*United States Department of Agriculture*) [5], o Brasil, na safra de 2009/2010, foi responsável por 26,43% da produção mundial de soja, 6,85% da produção de milho e 3,18% da produção total de grãos (trigo, arroz e outras sementes para consumo animal). O primeiro dado leva o país para a segunda colocação no *ranking* de maiores produtores mundiais de soja, atrás apenas dos Estados Unidos.

Tabela 2: Produção mundial de soja, 2009/2010

PAÍS / REGIÃO	PRODUÇÃO (em milhões de toneladas)
MUNDO	261,03
EUA	91,42
Brasil	69
Argentina	54,5

PAÍS / REGIÃO	PRODUÇÃO (em milhões de toneladas)
China	14,98
Indonésia	9,7
Canadá	3,51
Outros	17,92

Tabela 3: Produção mundial de milho, 2009/2010

PAÍS / REGIÃO	PRODUÇÃO (em milhões de toneladas)
MUNDO	819,23
EUA	332,55
China	163,97
União Europeia	56,95
Brasil	56,10
Argentina	23,30
México	20,37
Índia	16,72
Canadá	9,56
Outros	139,71

Mas não é apenas na economia e na geração e movimentação de ativos que a agricultura está envolvida. O bom desenvolvimento do setor é importante para garantir um dos direitos humanos mais básicos: a alimentação. Como exemplo, o programa Fome Zero [6] do governo federal brasileiro tem como um dos quatro eixos principais para seu funcionamento o desenvolvimento da agricultura familiar. O programa busca incentivar a agricultura como atividade econômica fundamental, oferecendo garantias e benefícios em períodos de secas, especialmente nas regiões semiáridas do país.

Parte-se do princípio de que sem um desenvolvimento sustentável, o setor agropecuário sozinho não tem condições de gerar alimentos para toda a população; por exemplo, a agricultura familiar é uma atividade econômica fundamental para a geração de renda no campo e para suprir a demanda de produtos para consumo,

especialmente dos grupos socioeconômicos mais desprivilegiados. Sem uma estrutura agrícola eficiente, o país passa a ser dependente de importações e deixa de tomar posto de privilégio no mercado internacional.

Em suma, é importante manter a qualidade do setor, investir em tecnologia, em pesquisa e promover o bom uso das técnicas já existentes.

2.2 A produção de grãos e capacidade de armazenamento

O Brasil é um grande produtor de grãos dos mais variados tipos, entre cereais (trigo, arroz), leguminosas (feijão) e oleaginosas (soja, canola). A produção nacional extrapola os milhões de toneladas por safra. No caso de algumas culturas (ou dependendo do clima e do tipo de plantio), podem haver mais de uma safra por ano.

A Tabela 4 apresenta os valores da produção de alguns cereais das safras de 2011 e previsões para 2012. Estes dados foram obtidos na página do IBGE [7].

Tabela 4: Dados da produção agrícola no Brasil (alguns grãos)

PRODUTO	OBTIDO (2011) (toneladas)	ESPERADO (2012) (toneladas)
Milho (1ª safra)	34 194 745	34 748 270
Milho (2ª safra)	21 904 917	28 518 295
Soja	74 829 383	67 852 740
Trigo	5 646 166	5 134 522
Arroz	13 456 369	11 681 081

O Rio Grande do Sul é um dos estados mais influentes na totalização da produção nacional de grãos. Conforme dados do IBGE [8], exibidos na Tabela 5, em 2010 o estado gaúcho foi responsável por quase 17% da produção total. As estimativas para 2012, no entanto, são da redução deste valor para 13,4%, conforme mostra a Tabela 6. Esta redução se deve a estiagem, pela qual foi acometida a região sul no período de dezembro/2011 e janeiro/2012.

Tabela 5: Participação na produção nacional por estado, 2010

ESTADO	PARTICIPAÇÃO (%)
PR	21,6
MT	19,3
RS	16,9
GO	9,0
MG	6,8
MS	6,4
SP	4,5
SC	4,4
BA	4,3
Outros	6,7

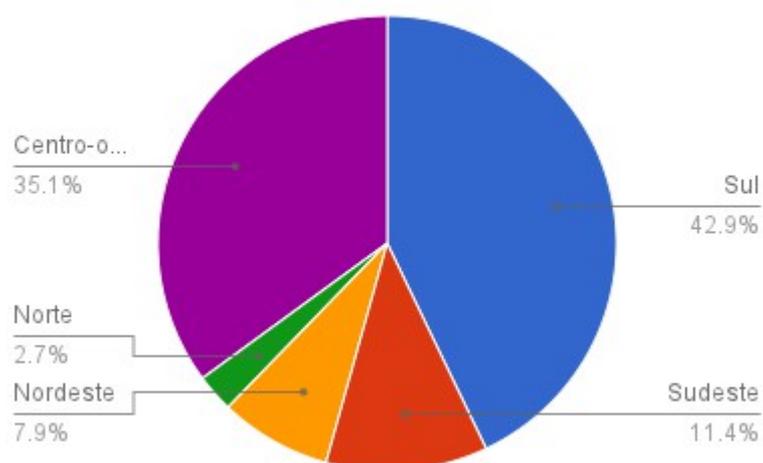


Figura 1: Participação na produção nacional por região, 2010.

Tabela 6: Participação na produção nacional por estado, 2012 (previsão)

ESTADO	PARTICIPAÇÃO (%)
MT	22,2
PR	19,6
RS	13,4
GO	9,7
MG	7,4
MS	6,0

ESTADO	PARTICIPAÇÃO (%)
BA	4,7
SC	4,2
SP	4,0
Outros	9,0

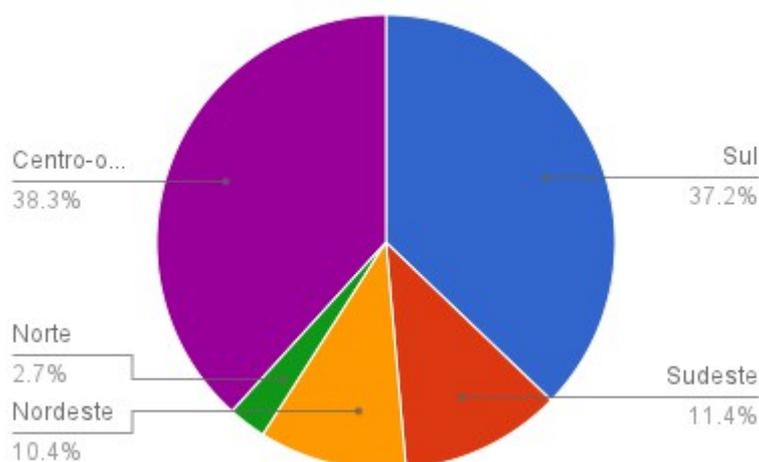


Figura 2: Participação na produção nacional por região, 2012 (previsão).

Toda a produção de grãos, sejam eles cereais ou leguminosas, precisa ter algum destino após a colheita. Parte será transportada para outras regiões para venda; outra parte irá diretamente para refinarias ou fábricas de ração; uma outra parte, ainda, poderá ser mantida pelo produtor para consumo próprio. Como nem sempre o destino dos grãos é definido com antecedência, é muito importante que exista um lugar onde eles possam permanecer armazenados.

Existe um órgão nacional que faz o controle dos postos de armazenagem, cadastrando sua situação e capacidade. A CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento [9] é responsável por estas informações, que são fornecidas abertamente em sua página.

Na Tabela 7 pode-se observar a capacidade de armazenagem do país, com dados fornecidos pela própria CONAB. É importante perceber que estes números indicam apenas os locais que foram cadastrados juntos à entidade. Além disso, representam os silos, armazéns convencionais e graneleiros em situação regular e também os impedidos (sem condições de armazenar).

Destaque para as regiões sul e centro-oeste, que são as maiores produtoras agrícolas e juntas totalizam 75% de toda a capacidade de armazenamento brasileira.

Tabela 7: Capacidade estática de armazenagem do país

REGIÃO	UF	CAPACIDADE (toneladas)	CAPACIDADE TOTAL (toneladas)
Sul	PR	27 912 491	54 376 622
	RS	26 459 093	
	SC	5 038 168	
Centro-oeste	MT	27 618 865	48 267 351
	GO	12 988 313	
	MS	7 195 927	
	DF	464 246	
Sudeste	SP	12 988 328	22 832 546
	MG	8 277 878	
	ES	1 382 064	
	RJ	184 276	
Nordeste	BA	4 018 566	8 812 681
	MA	1 783 645	
	PE	1 005 648	
	PI	952 845	
	AL	550 652	
	CE	346 773	
	PB	93 627	
	RN	57 704	
	SE	3 221	
Norte	TO	1 169 264	2 939 880
	RO	635 737	
	PA	581 298	
	AM	376 279	
	RR	148 000	
	AC	28 486	
	AP	816	
TOTAL			137 229 080

A Figura 3, a seguir, ilustra o cenário de armazenagem brasileiro no período de 2011 a 2012. Conforme dados do IBGE [8] já apresentados anteriormente, a produção nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas no ano de 2011 foi de 159.868.604 toneladas. Considerando a capacidade de armazenagem de 137.229.080 toneladas (CONAB [9], 2012), podemos calcular um valor de 22.639.524 toneladas que não tem um local apropriado para ser armazenada. Isto representa mais de 14% da produção total.

Deve-se levar em conta que, idealmente, a capacidade de armazenagem deve ser pelo menos 20% superior à capacidade de produção de uma região para suprir as necessidades de demanda, visto que os silos e armazéns podem ainda conter excedentes não comercializados de safras anteriores.

Se esta quantidade excedente não for consumida, exportada ou armazenada, será perdida. O inconveniente da perda de parte da safra não está apenas na fatia de lucros que se deixou de ganhar, mas na possibilidade de alimentar um grande parte da população, que não tem o que comer. Faltando produto no mercado, seu preço sobe e todos são prejudicados. Havendo um local apropriado para a armazenagem, as safras que não são vendidas poderão ser estocadas para serem consumidas ou comercializadas em épocas de menor rendimento.

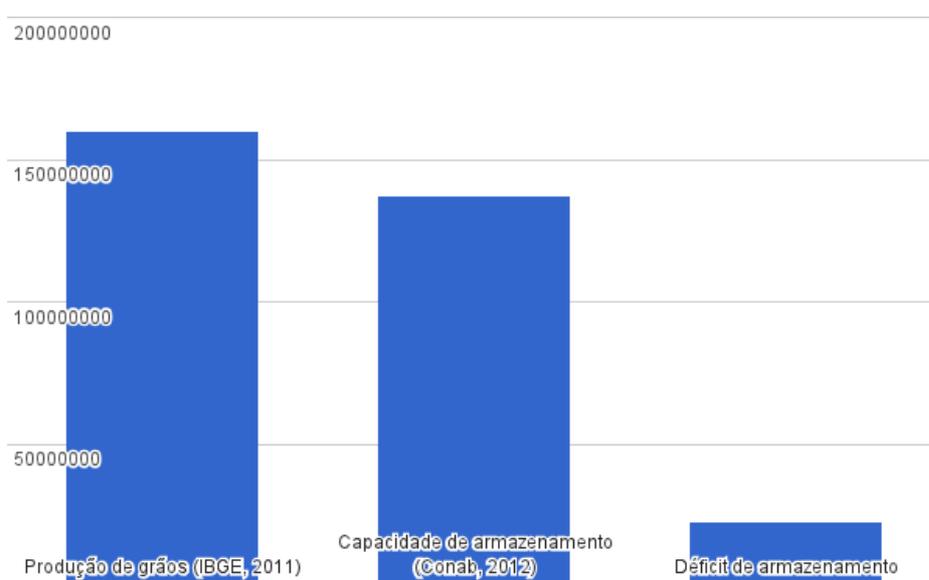


Figura 3: Déficit de capacidade de armazenamento de grãos.

É fácil, então, perceber que uma grande fatia da produção de grãos está – e

irá permanecer por algum tempo – estocada em silos, graneleiros e armazéns, que estão localizados não só nas proximidades das áreas de plantio, mas, muitas vezes, em zonas semiurbanas. É aí que entra a necessidade de utilizar processos de monitoramento e controle, visando o não comprometimento da produção armazenada por insetos, fungos ou pragas de qualquer natureza.

2.3 O sistema de armazenagem

Existe uma série de vantagens na utilização de sistemas de armazenamento técnica e convenientemente localizados. Além de tornar o sistema produtivo mais econômico, propicia a comercialização do produto em melhores períodos, evitando as pressões naturais de mercado na época de colheita; é também possível garantir a continuidade de distribuição da produção mesmo em períodos de secas, nos quais as safras são fortemente prejudicadas e reduzidas.

Como nem sempre as unidades armazenadoras estão localizados nas regiões de maior demanda, a retenção da produção dentro da própria unidade rural é responsável por novas vantagens, tais como [10]:

- minimização das perdas na colheita;
- economia no transporte, que será solicitado apenas quando for necessário;
- maior rendimento e melhor qualidade do produto.

Entretanto, é preciso tomar uma série de cuidados para que se possa fazer uso destas vantagens e explorar todos os seus benefícios. É evidente que um ambiente para armazenamento de matéria orgânica, seja ele um silo, um armazém ou um graneleiro de qualquer porte, precisa de uma série de cuidados na fabricação, manutenção, limpeza e manuseio do material a ser depositado.

As principais estruturas de armazenagem de grãos utilizadas são [11]:

- silos: caracterizam-se por unidades armazenadoras na forma de tanques, podendo ser hermeticamente fechados ou não, e oferecem boas condições para a armazenagem por períodos prolongados. Podem ser construídos em alvenaria ou metal;

- silos de concreto: são estruturas resistentes, de baixo custo, comparados com silos metálicos, e grande durabilidade, construídos para armazenar grandes quantidades de grãos;
- silos metálicos: atualmente, apesar do custo elevado, é a proposta de armazenagem mais difundida no Brasil devido às suas facilidades de automação e melhores condições para conservação do produto;
- graneleiros: são, talvez, os de menor custo, cuja estocagem é feita a granel e disposta em compartimentos horizontais separados por septos (vãos);

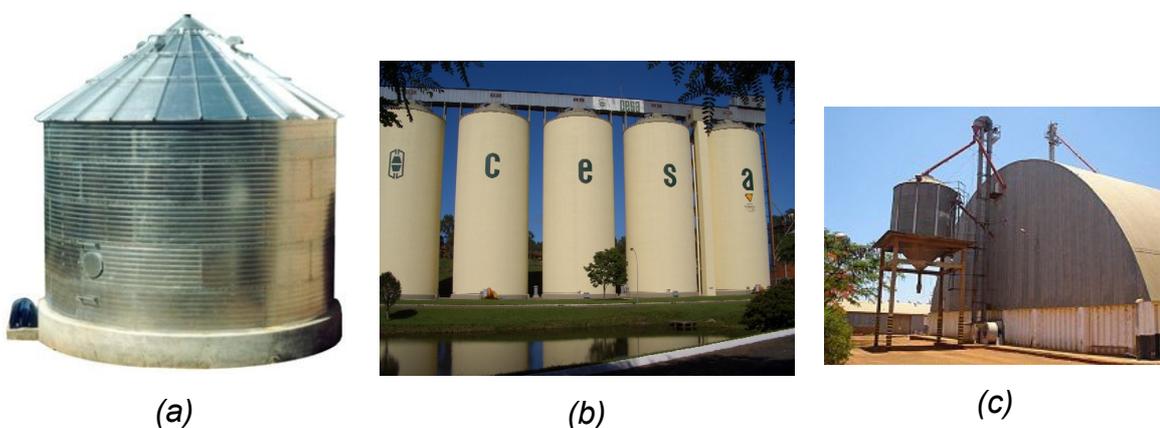


Figura 4: (a) Silo metálico; (b) silos de concreto; e (c) armazém graneleiro.

- armazéns convencionais: constituem estruturas únicas, construídas em concreto, alvenaria, estruturas metálicas ou mistas, nos quais o processo de estocagem é feito, normalmente, em sacas, fardos, caixas, etc.

Os silos, por causa de suas inúmeras vantagens técnicas, são os mais utilizados e difundidos pelo país. Em comparação com as demais estruturas, pode-se citar as seguintes vantagens sobre a utilização de silos para armazenagem:

- menor tempo de manipulação do produto;
- dispensa sacarias, uma vez que a carga e descarga é feita diretamente no veículo (caminhão);
- elevada capacidade mecanização e automação;

- grande velocidade em operações, tais como carga, descarga, expurgo, ventilação, entre outras;
- melhor aproveitamento do espaço;
- reduzida necessidade de mão de obra.

2.3.1 Conservação dos grãos

O principal organismo dentro de um silo é o próprio grão, que permanece estocado em estado de dormência. Entretanto, ele não é o único ser vivo dentro do depósito. Além das impurezas do próprio produto e da matéria morta (poeira, areia, pedras), o ambiente é composto por diversos organismos vivos que transformam o lugar em um ecossistema. Da mesma forma que os próprios grãos, estes outros organismos devem permanecer dormentes a fim de evitar que sua influência cause a contaminação e posterior deterioração das sementes.

A Figura 5 ilustra a série de organismos e características que compõem o

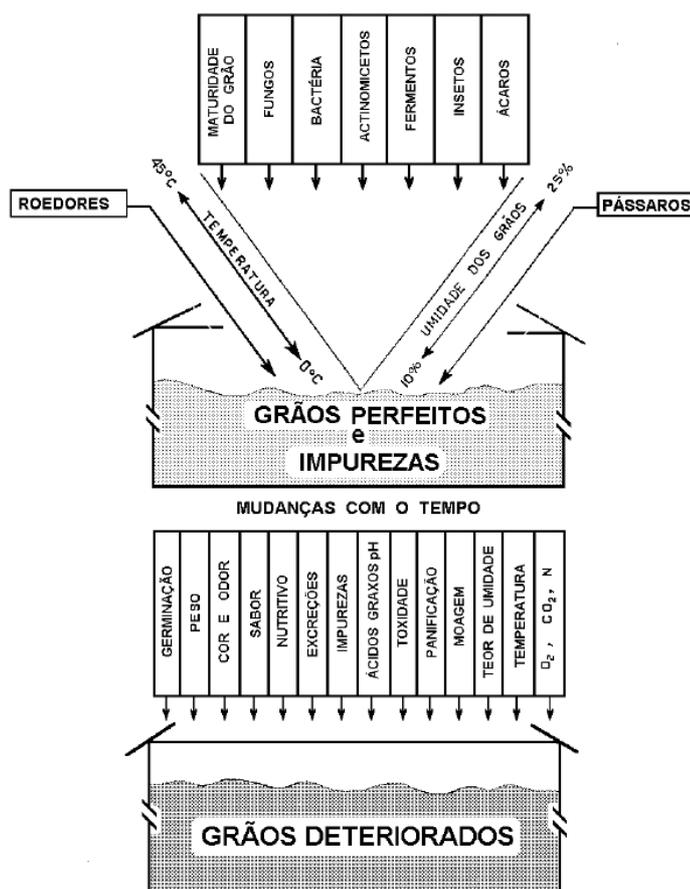


Figura 5: Ecossistema de armazenagem.

Fonte – HARA, Tetuo. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem [12].

meio ambiente no qual produto é armazenado. Todos estes elementos juntos formam o que se denomina ecossistema de armazenagem. E são estes elementos que irão definir o tempo de vida e qualidade do produto armazenado.

Evitar perdas na produção, neste âmbito, significa evitar a deterioração dos grãos. Antes disso, é necessário conhecer todos os aspectos e variáveis responsáveis, que podem ser:

- físicas: temperatura, umidade da massa de grãos, umidade do ar intergranular, propriedades dos grãos, estrutura de armazenagem;
- químicas: oxigênio, nitrogênio e outros gases;
- biológicas (internas): respiração, maturação, germinação;
- biológicas (externas): pássaros, roedores, ácaros, insetos, bactérias, fungos, leveduras.

Conservar o produto consiste, de uma forma geral, em evitar a proliferação de fungos e insetos, a aproximação de pássaros, roedores ou outros animais que buscam se alimentar das sementes, impedir o crescimento e desenvolvimento dos próprios grãos, manter o ambiente limpo e livre de impurezas que possam afetar a estrutura, textura e demais características inerentes e naturais do produto.

A Figura 6 apresenta um gráfico da relação entre a temperatura e o teor de umidade da massa de grãos armazenado. O gráfico está dividido em quatro zonas, sendo três delas zonas de condição favorável para o desenvolvimento de insetos, fungos ou do próprio grão.

Manter o grão dentro da chamada “zona boa para conservação”, garante a redução das atividades metabólicas dos grãos e dos diversos organismos associados.

2.3.2 Umidade, secagem e aeração

Embora outros fatores possam exercer influência sobre a conservação dos grãos, o teor de umidade é o elemento que governa a qualidade do produto armazenado. Um baixo teor de umidade está geralmente relacionado a um armazenamento eficiente, enquanto que um alto teor de umidade torna-se um meio

para o desenvolvimento de micro-organismos, fungos, insetos e ácaros.

Além disso, a atividade vital dos grãos (respiração) é controlada pelo teor de umidade. Se esta atividade não permanecer reduzida, o grão inicia o processo de germinação, perdendo todas suas características de cereal, leguminosa ou oleaginosa.

O teor de umidade representa a quantidade de água contida no grão. Os

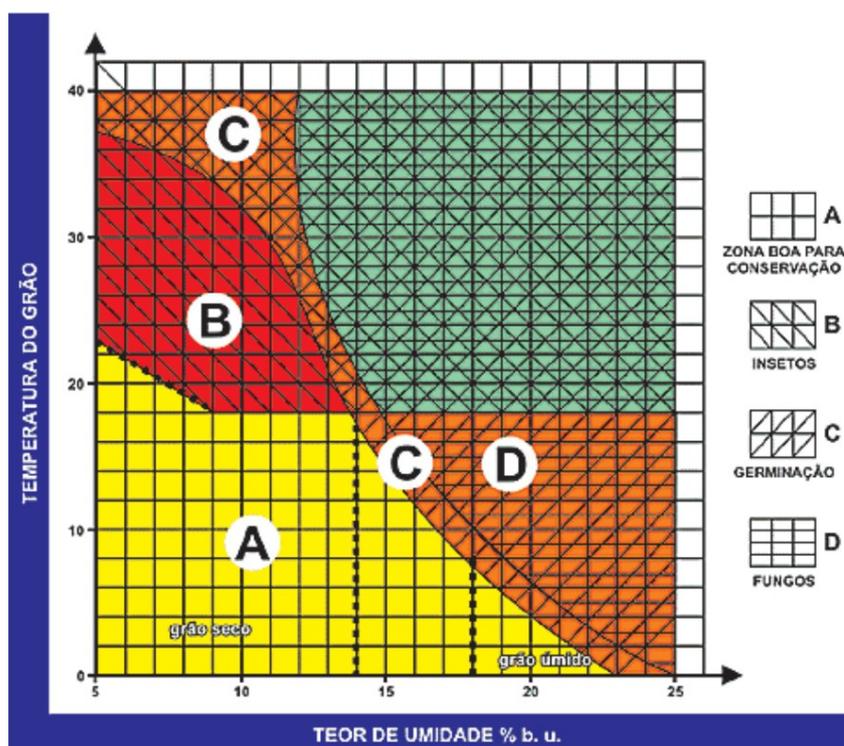


Figura 6: Diagrama da boa conservação.

Fonte – HARA, Tetuo. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem [12].

grãos, no interior do local de armazenamento, irão manter o equilíbrio higroscópico, isto é, manter seu teor de umidade em equilíbrio com a umidade relativa do ar a uma dada temperatura.

Quando a pressão de vapor de água dentro do grão diferir da pressão do vapor de água contido no ar, haverá transporte de umidade, que passará do ponto de maior para o ponto de menor pressão.

O teor de umidade ideal para armazenamento varia entre 12% e 13%. Mas é importante observar que, devido ao gradiente de temperatura existente dentro do

silos, este valor pode oscilar de ponto a ponto, fazendo com que a umidade se desloque para as regiões do silo onde a temperatura é mais elevada. Em períodos mais frios, a região mais quente é o centro do silo; já em períodos quentes, a região mais crítica é o fundo. Em resumo, as diferenças de temperatura criam uma corrente convectiva de ar que transferem a umidade de uma parte do silo para outra. Este processo pode acarretar acúmulo de umidade em locais específicos, proporcionando condições favoráveis para o desenvolvimento de organismos responsáveis pela deterioração dos grãos.

Para resolver ou, pelo menos, amenizar o problema da umidade, os grãos passam por dois processos muito bem conhecidos: secagem e ventilação (ou aeração). A secagem consiste em reduzir o teor de umidade do produto a um nível adequado para sua estocagem por um período de tempo prolongado, visando manter ao máximo a sua qualidade.

Sempre antes de serem armazenados, os grãos passam por um processo de limpeza, no qual são removidas as impurezas, o que garante também uma melhor eficiência do secador, e, posteriormente, a secagem, cujo processo baseia-se no equilíbrio higroscópico já mencionado anteriormente. Este processo é facilitado pela propriedade pela qual o aumento da temperatura do ar diminuiu a sua umidade, tornando-o capaz de absorver a umidade disponível em outros corpos.

A aeração é o simples processo de submeter a mercadoria à circulação de ar. Os grãos são, então, ventilados com um fluxo de ar dimensionado para promover a redução e uniformização da temperatura na massa armazenada. Essa homogeneização da temperatura impede a migração da umidade e a formação de bolsas de calor. São utilizados ventiladores e exaustores para executar esta tarefa.

2.3.3 Temperatura e termometria

A temperatura na massa de grãos precisa ser tratada de duas formas diferentes: como causa e como efeito. Os principais focos de aquecimento externos que influenciam na temperatura dos grãos são a própria temperatura do ar (clima) e a incidência de radiação solar (especialmente em silos metálicos). Ambos os efeitos causam a variação da temperatura dos grãos, mas tem muita pouca influência em

silos hermeticamente fechados. Além disso, não existe forma de controle para estas variáveis externas.

Por este motivo a temperatura é tratada de forma mais particular como efeito de algum outro fator. Tal qual o corpo humano, a existência de alguma anormalidade é acompanhada de uma elevação da temperatura. Este incremento, quando perceptível, nos permite localizar os problemas existentes: focos de umidade, fungos e calor.

Como foi visto, o gradiente de temperaturas no interior do ambiente de armazenamento causa a movimentação da umidade para os pontos mais quentes do silo, gerando regiões críticas onde as chances do surgimento de alguma praga são mais elevados.

É possível, felizmente, localizar estes focos com certa facilidade. Os grãos possuem baixo coeficiente de condutibilidade térmica, devido às suas características orgânicas e porosidade. Isso, somado ao ar intergranular, que possui também baixa condutibilidade térmica, ajuda a manter eventuais focos de aquecimento isolados e com propagação lenta. Uma vez identificada sua existência, é possível realizar o tratamento preventivo através da aeração e evitar que qualquer volume excessivo do material seja comprometido.

É aqui que, através do problema de controle da umidade e da quantidade de calor em pontos específicos, surge a ideia de monitorar a temperatura interna do ambiente de armazenamento.

Para fazer a monitoração e controle da temperatura, são utilizados sistemas de termometria. Surge, então, a questão: se a umidade é muito mais importante do que a temperatura na conservação dos grãos, por que não fazer a medição desta primeira grandeza?

Os motivos são diversos e pode-se citar os principais:

- sistemas de medição de umidade são muito mais complexos e caros do que sistemas de medição de temperatura. Muitos deles, inclusive, se baseiam no princípio de diferenças de temperatura para informar a umidade do ar;

- quando se fala em sensor para medição de umidade, o que se mede é a umidade relativa do ar e não do grão. A medição da umidade do grão é feita apenas em laboratório, com uma quantidade amostral retirada aleatoriamente do silo, em um processo dispendioso e lento;
- em regiões onde a produção é muito desenvolvida, existem pequenas estações meteorológicas que informam com boa aproximação a umidade do ar e temperatura. O produtor poderá se basear nestas informações para decidir se fará ou não a aeração do produto estocado. Entretanto, embora a umidade externa seja bem conhecida e próxima da umidade intergranular, é a temperatura que irá influenciar na absorção ou não desta umidade;
- todos os focos de originação de pragas ou bolsas de umidade são muito bem caracterizados por elevações ou variações no gradiente de temperatura do silo, de forma que medir e controlar a temperatura se torna um processo muito vantajoso e eficiente na identificação destes problemas.

2.4 Objetivos

Apresentado o problema, o objetivo do projeto pode ser definido como:

- Desenvolver um sistema de termometria para monitoração da temperatura interna de um silo de armazenamento dos grãos.

Visando responder as perguntas “para que serve” e “para quem se destina o projeto”, propõe-se objetivos secundários, referentes ao sistema de termometria e à produção de grãos:

- Minimizar as perdas causadas por pragas que dependem principalmente, mas não exclusivamente, da temperatura interna do silo;
- Alertar o produtor sobre variações de temperatura em pontos isolados da estrutura;
- Possibilitar o controle automático do sistema de aeração/ventilação do silo

através do monitoramento da temperatura;

- Formalizar o monitoramento através de relatórios, gráficos ou planilhas com informações espaciais e quantitativas de temperatura.

2.5 Critérios de projeto

Os critérios de projeto, definidos inicialmente para serem tomados como base no plano de desenvolvimento do sistema, são considerações feitas na tentativa de modelar o trabalho já com características de importância fundamental. Por exemplo: tratando-se de um sistema de termometria, é indispensável que se defina, em primeira instância, o tipo de efeito utilizado na medição de temperatura e, por consequência, o tipo de sensor. Na sequência, define-se a quantidade de sensores e assim sucessivamente até caracterizar totalmente o projeto.

A Figura 7 apresenta a ideia básica da estrutura do sistema de termometria para o silo. Na vista em corte, é possível perceber os pêndulos, que se estendem sobre toda a altura do silo, no interior dos quais estão os sensores utilizados para a medição de temperatura.

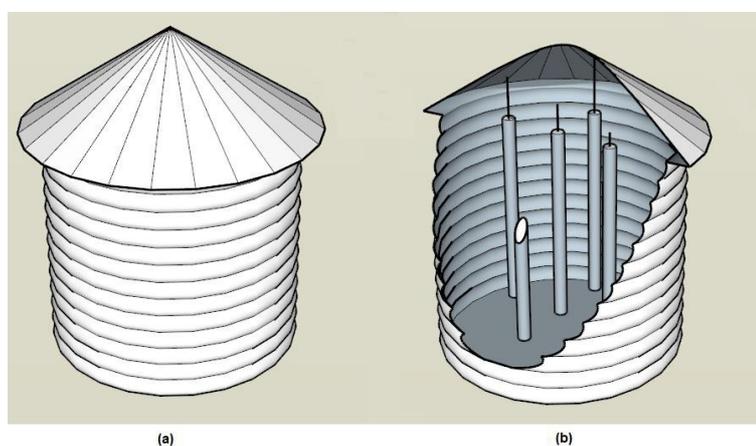


Figura 7: (a) Estrutura para ensilagem de grãos; (b) vista em corte.

Baseado nisso, são critérios de projeto:

- Tipo de sensor: das opções de sensores termorresistivos, o que melhor se enquadra nos requisitos do projeto é o NTC (*Negative Temperature Coefficient*), por causa de seu preço reduzido (se comparado, por exemplo, com um RTD de platina) e sua elevada sensibilidade à variação

de temperatura dentro de uma faixa especificada;

- Quantidade de sensores: considerando a utilização de uma placa de aquisição por silo, o número de sensores deve ser variável, pois sua quantidade é diretamente proporcional ao tamanho do silo. Considerando ainda pêndulos com oito a dez sensores e até oito pêndulos por silo, o número máximo de sensores não deve ser inferior a sessenta;
- Características da medição de temperatura: como a ideia principal aqui é identificar os focos de aquecimento e as variações de temperatura em diferentes pontos do silo, é importante que a leitura dos sensores informem valores confiáveis entre si. Com isso se sugere que é mais importante, para o sistema, que exista uma boa relação entre os sensores (por exemplo, dois sensores diferentes, em posições diferentes, mas com a mesma temperatura devem apresentar o mesmo valor de leitura), do que reflitam com exatidão a temperatura real (convencional) do silo;
- Controle e processamento: é essencial a utilização de um centro de controle para o sistema de termometria, pois caberá a ele a responsabilidade de gerenciar o endereçamento dos multiplexadores, a comunicação e demais periféricos associados ao sistema. O microcontrolador escolhido é da família PIC, fabricado pela Microchip. Sua escolha se deve ao fato de ser um componente acessível, confiável e dentro das capacidades de operabilidade previstas para o sistema;
- Comunicação: o sistema como um todo será composto por um dispositivo mestre (computador) conectado, através de uma rede, a um determinado número de dispositivos escravos. Esta rede será diferencial, em par trançado, para evitar os efeitos de ruído eletromagnético e também por ser uma rede de custo reduzido, em relação a sua funcionalidade. As características desta rede serão ditadas pelo padrão RS-485;
- Protocolo de comunicação: sobre a rede física, o protocolo Modbus será utilizado como estrutura de comunicação entre os diversos dispositivos, pois é um protocolo desenvolvido para a indústria, voltado para redes com característica de mestre e escravo (solicitação e resposta), aberto, ou

seja, sem custos, e de relativa facilidade de aplicação;

- Alimentação: para simplicidade, será considerado que existe disponível uma tensão de alimentação contínua, que pode variar entre 5 e 30 volts. Não serão explorados conceitos de fontes chaveadas para ligação em rede alternada 127 ou 220 volts, mas apenas o processo de regulação de tensão contínua de baixo nível;
- Supervisório: o dispositivo mestre, representado por um computador, irá rodar um *software* desenvolvido em linguagem de programação orientada a objetos. Por ser uma linguagem de alto nível, com muitos recursos e plataformas de programação gratuitas disponíveis, foi escolhido o C# (*C sharp*) para o desenvolvimento do supervisório. Além disso, este programa será capaz de se comunicar com cada uma das placas do sistema de termometria e apresentar uma interface com o usuário do sistema.

3 REVISÃO TEÓRICA

Nesta etapa serão revisados conceitos teóricos indispensáveis para a leitura e perfeita compreensão deste trabalho. É importante salientar que, tratando-se de um trabalho dentro da área de Engenharia Elétrica, alguns conceitos fundamentais, tais como as relações básicas da eletricidade, leis da física em geral, conceitos empíricos da fabricação de circuitos eletrônicos e fundamentos de linguagens de programação não serão abordados.

3.1 Conceitos de instrumentação e medidas

Aqui são apresentados alguns conceitos teóricos que serão úteis no desenvolvimento do trabalho. Estas definições estão baseadas na quarta edição brasileira do VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia), publicado pelo INMETRO [17], cuja edição preliminar está disponível publicamente para consulta.

Grandeza: são todas as propriedades de um fenômeno ou substância, que podem ser expressas quantitativamente através de um número ou de uma referência, tal como o comprimento, a massa, a velocidade, a temperatura, entre outros;

Unidade: elemento simbólico utilizado para caracterizar a grandeza de um número e com a qual se pode relacionar outros tipos de grandezas, como por exemplo, watt (potência elétrica), hertz (frequência), volt (tensão elétrica), metro (comprimento);

Medição: processo experimental para aquisição do valor de uma grandeza, cujo resultado é dito valor medido;

Valor verdadeiro: conceito teórico utilizado para referenciar o valor de uma grandeza com a sua própria definição, ou seja, é o valor real ou naturalmente real de uma grandeza;

Como o valor verdadeiro é, na prática, desconhecido ou incerto, é definido, através de um acordo, um valor convencional para uma determinada grandeza para

ser utilizado sob determinadas condições. Por exemplo: em condições gerais, à aceleração da gravidade terrestre é atribuído o valor $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

Exatidão: comparação qualitativa (com o uso de palavras ou adjetivos) entre um valor medido e o valor convencional esperado;

Precisão: comparação quantitativa (numérica) entre uma série de valores medidos e o valor convencional esperado;

Erro: diferença entre um valor medido e um valor de referência;

Reprodutibilidade: característica de um experimento, quando executado sobre um mesmo objeto ou substância, de apresentar valores de medição dentro de uma pequena faixa de precisão independentemente do local, do operador ou do sistema de medição;

Repetitividade: característica de um experimento ou medida de apresentar valores dentro de uma pequena faixa de precisão quando sob determinadas condições (mesmo procedimento, mesmo operador, mesmo sistema, mesmo local, mesmo objeto medido);

Incerteza: parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, isto é, o quanto o valor ou medida pode ser diferente, para mais ou para menos, do valor de referência utilizado;

Sensor: elemento que é afetado de forma direta pela grandeza a ser medida;

Transdutor: dispositivo que fornece uma grandeza na saída que está relacionada com uma grandeza de entrada através de uma função de transferência, que pode ou não ser conhecida;

Cadeia de medição: série de elementos (transdutores, filtros, amplificadores, etc.) que constituem um caminho desde o sensor até o elemento de saída de um sistema de medição;

Sensibilidade: razão entre a variação da grandeza de saída de um sistema e a variação da grandeza de entrada, por exemplo, a sensibilidade de $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ de um sensor de temperatura LM35 equivale a dizer que a saída deste componente varia em 10 mV para cada grau Celsius de variação de temperatura;

Resolução: é a menor variação de uma grandeza na entrada de um sistema que causa variação visível ou detectável na saída.

3.2 Medição de temperatura

Os processos e instrumentos para medição de temperatura vem sendo aprimorados desde o século XVII, quando Galileu inventou o primeiro termômetro [14]. Seu uso, limitado para fins médicos e meteorológicos, invadiu os setores de produção, controle e automação com o surgimento e desenvolvimento dos processos industriais.

Dentre os diversos dispositivos para medição de temperatura, destacam-se na história os termômetros de mercúrio, termômetros bimetálicos de dilatação e, atualmente, os sensores termoelétricos e os de efeito termorresistivo.

Um determinado material condutor é dito termorresistivo quando a sua resistência elétrica varia com a variação de temperatura. Não é errado dizer que esta é uma característica inerente a praticamente todos os materiais; alguns materiais, no entanto, apresentam essa propriedade de forma acentuada, tornando-os ótimos transdutores de temperatura em resistência elétrica. É o caso dos RTDs e termistores.

RTD é o termo utilizado para designar todos os detectores de temperatura resistivos. Nesta categoria entram, entre outros, os sensores de platina, níquel e cobre. Esses materiais, com o aumento da temperatura, elevam sua resistência elétrica de forma praticamente linear em uma faixa determinada e bem conhecida. Apresentam excelente repetitividade e sensibilidade relativa na ordem de décimos de ohm por grau Celsius.

Os termistores (ou termístores) são elementos semicondutores que apresentam, geralmente, uma grande variação de resistência com a variação de temperatura. Têm a vantagem de, por serem bastante difundidos, apresentarem baixo custo e um enorme número de fabricantes. São encontrados com diversos valores nominais de resistência dados à temperatura ambiente. Os termistores são classificados em dois tipos: os de coeficiente de temperatura positivo (PTC), que aumentam sua resistência elétrica com o aumento da temperatura, e os de

coeficiente de temperatura negativo (NTC), que diminuem sua resistência elétrica com o aumento da temperatura.

3.2.1 NTC

Os termistores do tipo NTC são construídos a partir de óxidos metálicos, tais como cromo, níquel, ferro, manganês e titânio, que possuem a característica de variar sua resistência elétrica com a variação da temperatura. Esta variação de resistência, no entanto, esta inversamente (ou negativamente) relacionada com a variação da temperatura. Daí a denominação NTC: do inglês, Coeficiente Negativo de Temperatura.

Desconsiderando os efeitos espúrios, que podem atuar sobre o termistor e agregar incerteza sobre a resistência esperada, e considerando que, a uma dada temperatura conhecida T_0 , o termistor apresenta uma resistência conhecida R_0 , a função de transferência pode ser aproximada pela equação (1), abaixo.

$$R_T \simeq R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1)$$

Onde:

- R_T é a resistência no NTC para uma dada temperatura T , em Ohms;
- T_0 é a temperatura de referência, dada em Kelvin;
- R_0 é a resistência que o NTC apresenta na temperatura de referência T_0 , em Ohms;
- β é o coeficiente de temperatura do termistor, dado em graus Kelvin;
- T é a temperatura para a qual se quer determinar a resistência R_T , dada em graus Kelvin.

É importante lembrar que, para esta relação, se deve sempre utilizar a temperatura absoluta em graus Kelvin. A equação (2) mostra a relação entre as duas principais grandezas utilizadas para medir temperatura: graus Kelvin e graus Celsius.

$$T[\text{K}] = T[^\circ\text{C}] + 273,15 \quad (2)$$

A Figura 8 apresenta dois termistores do tipo NTC de 5 mm de diâmetro e valor nominal de 5 k Ω . Sua resposta é exponencial, como sugerido pela equação (1), e decresce com o aumento da temperatura. A Figura 21 pode ser utilizada como exemplo de curva de transferência de um NTC qualquer.



Figura 8: Dois termistores do tipo NTC.

3.3 Microcontroladores – PIC

Um microprocessador (ou simplesmente processador) é um dispositivo eletrônico com a capacidade de realizar cálculos e incorporar tantas outras funções e operação quanto forem programadas. O microcontrolador diferencia-se do processador, pois, além de possuir os elementos lógicos e aritméticos, ele integra uma série de periféricos em sua estrutura interna e permite conexões elétricas na forma de cargas em suas portas.

São elementos comuns em um microcontrolador:

- memória interna de leitura e escrita para armazenamento de dados;
- memória de programa volátil;
- memória EEPROM para armazenamento permanente de dados;
- conversores analógico/digitais;
- comparadores de tensão;
- interface de comunicação serial;
- oscilador (relógio) interno;
- contadores e temporizadores;
- entre outros.

Existe uma gama muito grande de fabricantes de microcontroladores do

mercado, que vão dos mais diversos tipos e para os mais variados usos. Pode-se citar, como exemplo, a *Atmel*, a *Intel*, a *Texas Instruments*, a *Nation Semiconductors* e a *Microchip Technology*.

Destes, a *Microchip* é dona de um dos microcontroladores mais difundidos no mercado: o PIC. Trata-se, na verdade, de uma família de microcontroladores com arquitetura *Harvard*¹. PIC é uma abreviação para *Peripheral Interface Controller*, mas também pode significar *Programmable Intelligent Computer*.

A fabricante *Microchip* fornece tanto o ambiente de programação² (em linguagem *assembler*) quanto o *software* de programação para seu microcontrolador gratuitamente, o que lhe dá uma grande vantagem frente a outros concorrentes.

Para o desenvolvimento deste trabalho, serão estudados dois microcontroladores: o PIC16F877A e outro modelo mais novo, o PIC18F4550. A Tabela 8 exhibe as principais características dos dois dispositivos para comparação. Muito embora o dispositivo mais novo seja visivelmente superior ao outro, o PIC16F877A possuiu características suficientes para cumprir a sua função. É possível, inclusive, que o segundo dispositivo esteja superdimensionado para atuar como controlador do sistema de termometria. Mas ambos os dispositivos estão disponíveis para uso e por isso do comparativo.

Tabela 8: Características dos microcontroladores PIC16F877A e PIC18F4550.

CARACTERÍSTICA	PIC16F877A	PIC18F4550
Frequência de operação	20 MHz	48 MHz
Memória de programa (Bytes)	8192	32768
Memória de dados (Bytes)	368	2048
Memória EEPROM (Bytes)	256	256
Interrupções	15	20
Comunicação	MSSP, USART	MSSP, EUSART
Temporizadores	3	4

1 Arquitetura de computador, cuja característica principal é a existência de duas memórias diferentes e independentes, uma para o programa e outra para os dados, mas ambas conectadas ao processador principal.

2 MPLAB IDE.

CARACTERÍSTICA	PIC16F877A	PIC18F4550
Canais do conversor A/D de 10 bits	8	13
Comparadores Analógicos	2	2
Portas	A, B, C, D e E	A, B, C, D e E

Como mostra a Figura 9, os dois dispositivos são compatíveis pino a pino, pois apresentam praticamente as mesmas portas e conexões, bastando apenas algumas modificações no *software* para que se possa substituir um pelo outro sem perda de funcionalidades.

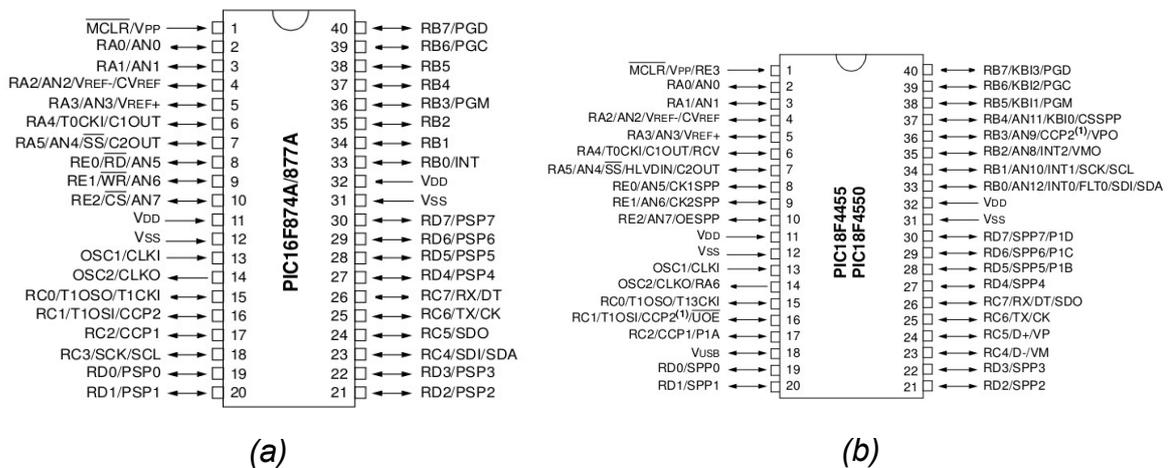


Figura 9: Pinagem dos microcontroladores (a) PIC16F877A e (b) PIC18F4550.

Uma das principais diferenças entre os dois microcontroladores em discussão diz respeito à organização da memória. A Figura 10 apresenta os mapas de memória de programa dos dois dispositivos, lado a lado. Enquanto que, para o PIC16F877A a memória é dividida em quatro blocos de mesmo tamanho, no PIC18F4550 esta memória é composta por um único bloco contíguo. O efeito direto desta organização em blocos é que o projetista, na hora de programar, deve cuidar para endereçar apenas a memória do bloco no qual está trabalhando, ou o microcontrolador cometerá erros durante a execução do programa. Este cuidado não é necessário com o PIC18F4550, pois o endereçamento de memória é feito de modo direto, isto é, cada byte de memória possui o seu próprio endereço, que é o único dentro do dispositivo. No caso do PIC16F877A, o endereçamento indireto faz com que estes endereços se repitam em cada banco; portanto, o cuidado é redobrado.

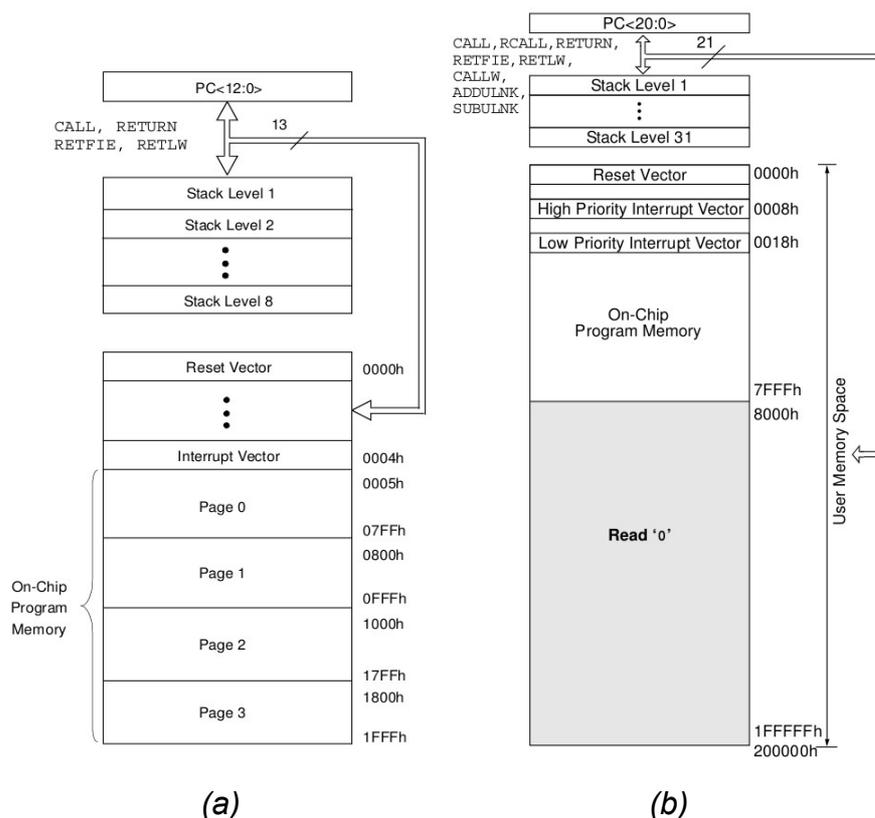


Figura 10: Mapa de memória dos MCUs (a) PIC16F877A e (b) PIC18F4550.

E o mesmo vale para a memória de dados. O PIC16F877A possui 368 bytes de memória de dados, mas apenas 336 estão disponíveis para uso geral. O restante é reservado para registradores específicos. Estes 336 bytes estão separados em quatro bancos: um de 96 bytes e outros três, de 80 bytes cada. O efeito direto desta divisão é que, programando o microcontrolador em linguagem C, deve-se evitar declarar uma variável do tipo *array*³ que seja maior do que o espaço disponível no banco de memória em que ela for alocada. Caso contrário, se o compilador não gerar um erro em tempo de execução, o microcontrolador não irá rodar o programa corretamente, podendo entrar em um laço, gerar comandos aleatórios ou se perder completamente.

Este método de endereçamento indireto dá uma grande vantagem na utilização da família 18F do PIC, tornando a família 16F obsoleta. No Brasil, no

3 Estrutura de organização de dados utilizada em programação, na qual os valores são agrupados em sequências de tamanho variável ou matrizes. Cada elemento de um *array* ocupa sempre o mesmo espaço de memória de outro elemento qualquer dentro do mesmo *array*.

entanto, como ainda há uma grande quantidade desse material estocado e em venda, o PIC16F877A é uma opção bastante válida e, ao contrário do que acontece no mercado externo, mais barata do que o dispositivo mais atualizado.

3.4 Programação em Linguagem C#

A linguagem de programação C# foi desenvolvida pela Microsoft para unificar os convencionais programas escritos em C e C++, que rodavam apenas em computadores de mesa, com aplicativos que pudesse ser utilizados e acessos pela Internet, em quaisquer tipos de dispositivos. O C# é uma linguagem de programação visual dirigida por eventos e totalmente orientada a objetos [17].

A plataforma (ou ambiente) de desenvolvimento é o *Microsoft Visual Studio*. Existe uma versão gratuita deste software, lançada em 2010. Todos os aplicativos são desenvolvidos para rodar exclusivamente no sistema operacional Windows.

Programar em linguagem C# pode se tornar uma tarefa complexa para aqueles que nunca tiveram contato com outras linguagens. Para quem já conhece C e outra linguagem orientada a objetos, vai se adequar rapidamente com a sintaxe utilizada. É preciso, no entanto, muita atenção com as nomenclaturas e tipos, classes e estruturas utilizadas.

Para suporte, durante o desenvolvimento deste trabalho, será utilizado o livro “C# - Como Programar”, de H. M. Deitel, lançado pela editora *Pearson Education* [17].

3.5 Rede RS-485

Uma rede, também designada como rede de comutadores para efeito de desambiguação, é um conjunto de dispositivos interligados através de canais de comunicação, que lhe permitem compartilhar informações. As redes podem ser classificadas pelo tipo de mídia utilizado no transporte das informações, pelo protocolo, topologia ou organização.

O padrão de rede RS-485, também conhecido como EIA-485 e TIA/EIA-485, é uma norma que define padrões elétricos para dispositivos transmissores e

receptores conectados em um sistema multiponto balanceado [18]. Por sistema multiponto balanceado entende-se uma rede, cujos cabos e interconexões estão balanceados (impedâncias casadas através de resistores de terminação) e na qual estão conectados múltiplos dispositivos.

É importante destacar que o padrão RS-485 apenas especifica as características dos dispositivos e não faz nenhum tipo de apologia ou recomendação a protocolos de comunicação. Trata-se apenas da camada mais baixa (rede física) do modelo OSI (ver Tabela 10).

A rede opera com um par de fios trançados, cujos sinais elétricos são lidos de forma diferencial. Isto garante uma maior imunidade a ruídos eletromagnéticos uma vez que ambos os condutores são influenciados da mesma forma pelas interferências. O RS-485 permite ainda a existência de um terceiro condutor como sinal de referência (terra) para os níveis de tensão do par diferencial.

A pinagem do padrão segue a seguinte nomenclatura:

- **A**, '-', **TxD-/RxD-** ou pino **inversor**;
- **B**, '+', **TxD+/RxD+** ou pino **não-inversor**;
- **SC**, **G** ou **referência**.

Alguns fabricantes, como a *Texas Instruments*, por exemplo, podem inverter a nomenclatura dos pinos A e B em suas folhas de dados e outros tipos de documentação.

São alguns exemplos de módulos transreceptores e conversores RS-485 os circuitos integrados: MAX-483, MAX-485, ISL4489 e LTC2850, mas existe uma infinidade de outros componentes similares no mercado.

Uma rede RS-485 permite que até 32 dispositivos estejam conectados simultaneamente e garante taxas de comunicação de até 10 Mbps, quando a distancia entre os terminais remotos não ultrapassa 12 metros. Para uma distância máxima de 1200 metros, essa taxa cai para 100 Kbps.

A comunicação é feita, geralmente, em modo *half-duplex*, isto é, o mesmo par de fios é utilizado ora para transmissão, ora para recepção. No entanto, é possível

construir uma rede *full-duplex* utilizando-se dois pares de fios e dispositivos capazes de transmitir e receber dados ao mesmo tempo.

A Tabela 9 apresenta um resumo das características elétricas de uma rede RS-485.

Tabela 9: Características RS-485.

PARÂMETRO	VALOR
Modo de operação	Diferencial
Número de dispositivos	32
Comprimento máximo	1200 metros
Taxa máxima de comunicação	10 Mbps
Tensão mínima de comunicação (com carga)	$\pm 1,5$ volts
Tensão mínima de comunicação (sem carga)	± 5 volts
Impedância mínima da carga	60 Ω
Impedância recomendada	120 Ω
Sensibilidade do receptor	± 200 mV

Um outra particularidade desta rede diz respeito à topologia da rede. É aconselhado que os dispositivos sejam conectados em uma linha reta, na chamada *daisy-chain*, conforme ilustra a Figura 11. Nesta topologia, um par trançado conecta em apenas um dispositivo; um segundo par trançado conecta este dispositivo ao seguinte na rede e assim sucessivamente.

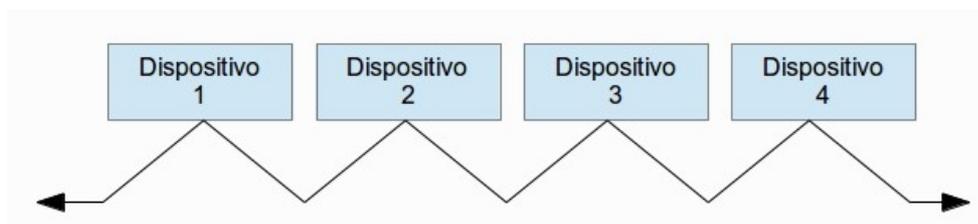


Figura 11: Topologia de rede daisy-chain.

3.5.1 Terminações

Para garantir a confiabilidade da rede RS-485 é essencial que as reflexões nas linhas de comunicação sejam mantidas no menor nível possível. Isso pode ser realizado utilizando resistores de terminação que sejam compatíveis com a rede

utilizada.

Quando as linhas são muito curtas, isto é, o tempo de transição entre o nível baixo e o alto é maior do que quatro vezes o atraso de propagação da linha, não há necessidade de utilizar terminações, pois as reflexões não causam influência na qualidade do sinal [19]. Por outro lado, quando a velocidade de transmissão é alta ou a linha é muito extensa, as terminações garantem que o sinal originado no dispositivo de origem será completamente (ou suficientemente) dissipado no último dispositivo conectado nesta linha.

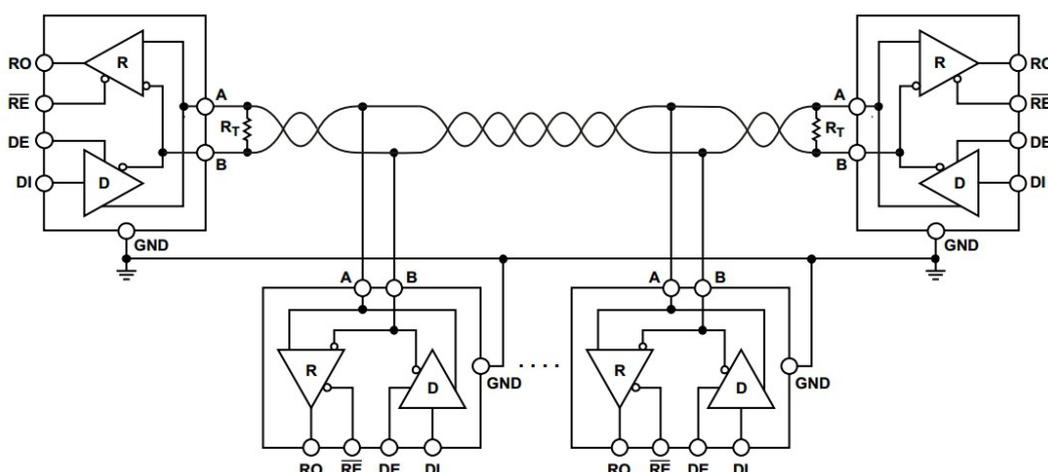


Figura 12: Rede RS-485 half-duplex com resistores de terminação.

Fonte – RS-485/RS-422 Circuit Implementation Guide. Analog Devices:
AN-960 Application Note [19].

Uma rede RS-485 *half-duplex*, então, recebe resistores de terminação em ambas as extremidades do cabo de comunicação (o mestre e o último dispositivo escravo da linha, por exemplo). Os resistores devem ter o mesmo valor da impedância característica da linha, que, no caso de um par trançado, é de 120 Ohms. A Figura 12 apresenta uma rede RS-485 *half-duplex* com os resistores de terminação R_T .

3.5.2 Polarização de segurança da rede RS-485

O padrão especifica que os receptores de uma rede RS-485 devem ter suas saídas em nível alto (1) quando a diferença de tensão entre os dois canais for maior do que 200mV e em nível baixo (0), quando esta diferença for menor do que

-200mV. Assim, quando a tensão diferencial estiver entre os dois limites estipulados, a saída poderá assumir tanto nível alto, quanto baixo.

Em uma rede em espera, na qual todos os dispositivos estão aguardando (nenhum está transmitindo informações), a linha deve permanecer em nível alto. Quando um dispositivo deseja iniciar uma transmissão de dados, ele irá enviar seu *start bit*, que tem nível baixo. É neste momento que a saída intermitente dos receptores poderá gerar dados aleatórios, que irão comprometer a integridade da informação transmitidos.

Existem três cenários que podem causar este estado indesejado, no qual a saída do receptor é desconhecida:

- um dispositivo foi desconectado da rede, seja por mal funcionamento ou por rompimento dos cabos;
- um curto-circuito entre diferentes pares de condutores; ou
- quando nenhum dos transreceptores estão ativos (transmitindo).

Este último caso ocorre com frequência, pois os escravos permanecem muitas vezes em silêncio antes que um mestre envie uma solicitação pela linha.

Para evitar este efeito, a solução é polarizar a rede com um resistor ligado entre o terminal não-inversor e a fonte de alimentação da rede (*pull-up*) e outro, ligado entre o terminal inversor e a terra (*pull-down*). Se estes resistores foram corretamente calculados, é possível garantir que, mesmo numa condição de silêncio, a rede permaneça sempre com um nível de tensão superior a 200mV e, portanto, nível elevado na saída dos receptores.

Observando a Figura 13, é possível calcular os resistores considerando as relações expressas em (3), (4) e (5).

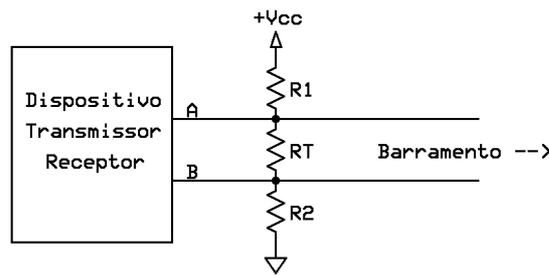


Figura 13: Circuito de polarização da rede RS-485.

Lembrando que só é necessário incluir os resistores em um ponto da rede.

$$R = R_1 = R_2 \quad (3)$$

$$V_A - V_B \geq 200 \text{ mV} \quad (4)$$

$$V_A - V_B = R_T \cdot \frac{V_{CC}}{2R + R_T} = 200 \text{ mV} \quad (5)$$

Onde:

- V_{CC} é a tensão de alimentação da rede; e
- R_T é o resistor de terminação.

3.6 Protocolos de comunicação – Modbus

Protocolos de comunicação são convenções ou padrões utilizados para especificar, controlar e possibilitar a conexão, comunicação e transferência de informações entre dois dispositivos. O Modbus, desenvolvido inicialmente pela *Modicon*, em 1979, é um protocolo aberto e mantido pela *Modbus Organization*, juntamente com fornecedores e fabricantes de equipamentos que utilizam esse padrão.

Foi desenvolvido para uso industrial e se difundiu principalmente por causa de sua facilidade, por não ter quase nenhuma restrição de uso ou de comercialização e, principalmente, por ser um protocolo aberto e sem taxas de uso de propriedade (*royalties*).

3.6.1 Descrição do protocolo

O Modbus é um protocolo desenvolvido para a camada de aplicação do modelo OSI, conforme ilustra a Tabela 10, que provê uma estrutura de comunicação entre diversos dispositivos conectados em uma mesma rede através de barramentos de dados.

Tabela 10: Modelo de camadas OSI (Interconexão de Sistemas Abertos).

7	Aplicação	Interface entre a máquina e o usuário do aplicativo.
6	Apresentação	Formatação de dados, conversão de caracteres e criptografia.
5	Sessão	Negociação e estabelecimento de conexão entre dispositivos.
4	Transporte	Meios e métodos para transmissão de pacotes de dados entre dispositivos.
3	Rede	Roteamento de pacotes entre uma ou várias redes.
2	Enlace	Detecção e correção de erros introduzidos pelo meio de transmissão.
1	Física	Transmissão de dados (sinais) através de meios físicos (cabos, conectores, etc.).

O princípio de funcionamento deste protocolo é de requisição/resposta, ou seja, conectados em um mesmo barramento haverá um dispositivo mestre, que fará as requisições e terá prioridade de uso do barramento, e um ou mais dispositivos escravos, que apenas utilizarão a rede quando solicitados, isto é, em resposta às solicitações realizadas pelo mestre.

Toda e qualquer requisição é feita através de códigos de funções. São estes códigos que caracterizam o protocolo Modbus. Desta forma, pode-se dizer que um dispositivo capaz de se comunicar em uma rede Modbus é um dispositivo que sabe interpretar ou responder a um ou mais destes códigos.

O protocolo Modbus define uma simples unidade de dados de protocolo independente de outras camadas do modelo ou de outros tipos de comunicação utilizadas. Por unidade de dados de protocolos, ou UDP (do inglês, PDU ou *Protocol*

Data Unit) entende-se o menor quadro de dados transmitidos para gerar uma comunicação. O UDP Modbus (ver Tabela 11) é inserido dentro da unidade de dados de aplicação (do inglês, ADU ou *Application Data Unit*), para gerar o quadro de mensagem da comunicação Modbus, conforme apresentado na Tabela 12.

Esta unidade de dados é construída pelo dispositivo no momento da comunicação. O padrão aqui descrito recebe o nome de Modbus RTU (do inglês *Remote Terminal Unit*). O protocolo Modbus ainda define o modelo de transmissão ASCII, que não será explorado neste documento.

Tabela 11: Unidade de Dados do Protocolo MODBUS.

UDP MODBUS	
Código da função	Dados

Tabela 12: Quadro da mensagem MODBUS RTU.

UDP MODBUS DA LINHA SERIAL			
Endereço do escravo	Código da função	Dados	CRC
1 byte	1 byte	0 – 252 bytes	2 bytes
UDP MODBUS			

Quando um dispositivo inicia uma comunicação, ele escreve na rede uma mensagem com o endereço do dispositivo com o qual ele quer se comunicar juntamente do código numérico da função. O campo de dados pode ou não conter informações, neste caso, o que vai depender da função utilizada, como será visto mais a frente. No final da mensagem é inserido um código de 2 bytes para verificação de erros de transmissão. Como este código é calculado é apresentado na seção 3.6.3 (CRC-16).

O dispositivo alvo (escravo), ao receber a requisição, irá executar a função solicitada e encaminhar uma resposta para o mestre. Esta resposta poderá ser de dois tipos: função de resposta ou função de exceção.

Se não ocorreu nenhum erro durante a transmissão ou na realização da função solicitada, o escravo escreverá na rede o mesmo quadro apresentado na

Tabela 12, retornando para o mestre o próprio endereço, o código da função solicitada, os dados requisitados e o código de verificação e encerrando o processo de comunicação.

Caso tenha ocorrido um erro, esta mensagem será chamada de função de exceção. No lugar do código da função será retornado um código que representa o tipo ou motivo do erro. Da mesma forma que anteriormente, esta resposta irá encerrar a comunicação entre os dois dispositivos. Caberá ao mestre (ou ao programador) averiguar o erro acometido pelo sistema.

3.6.2 Modelo de dados e endereçamento

O Modbus se baseia em quatro tipos de dados para manusear as informações transmitidas através de comunicação. A Tabela 13 apresenta estes tipos.

Tabela 13: Tipos de dados do protocolo Modbus.

DADO	TAMANHO	TIPO
<i>Discretes Input</i>	1 bit	Apenas leitura
<i>Coils</i>	1 bit	Leitura e escrita
<i>Input Registers</i>	16 bits (palavra)	Apenas leitura
<i>Holding Registers</i>	16 bits (palavra)	Leitura e escrita

Estes dados, no entanto, não possuem diferenças significativas entre si além daquelas mencionadas na tabela. Seu uso está condicionado apenas a interpretação que o dispositivo fará ao receber uma requisição com qualquer uma destas informações. Por exemplo, ao gerar uma solicitação de escrita em um ou mais registradores, o programador irá utilizar funções que sejam caracterizadas pelo endereçamento de *coils* ou *holding registers*. O dispositivo irá interpretar os endereços destes registradores e escrever os dados, conforme solicitado. Entretanto, não será possível escrever nenhum tipo de dado nas entradas do dispositivo (*discrete inputs*).

O protocolo Modbus permite o endereçamento de até 65.536 itens (o equivalente a dois bytes).

Toda a vez que uma função faz uma requisição para ler um determinado

registorador, ela aponta para o número deste registorador (*data reference*) e não seu endereço da memória do dispositivo (*data address*). O programador deve tomar o cuidado de relacionar ambos os endereços conforme a necessidade. Todos os endereços de referência do Modbus são índices inteiros, positivos e iniciam a contagem no zero.

O primeiro byte do quadro de mensagem Modbus (apresentado na Tabela 12) representa o endereço do dispositivo escravo conectado ao barramento. A Tabela 14 apresenta os valores de endereços válidos. O protocolo permite, por número de endereços, que até 248 dispositivos estejam conectados ao mesmo barramento. Entretanto, este número geralmente estará limitado pela rede física. No caso de uma rede RS-485, o número máximo de dispositivos será de 32.

Tabela 14: Endereços MODBUS.

0	1 a 247	248 a 255
Endereço para <i>broadcasting</i>	Endereços dos escravos	Reservado

3.6.3 CRC-16

O método para detectar possíveis erros de transmissão de um quadro de mensagem é chamado de CRC, do inglês *Cyclic Redundancy Check* ou Verificação de Redundância Cíclica. O método consiste em realizar uma série de operações aritméticas entre os valores transmitidos e um polinômio específico chamado de polinômio gerador.

Existem diversos tipos de polinômios geradores, que são classificados conforme o grau (termo de maior expoente). No caso do CRC-16, por exemplo, é utilizado um polinômio de grau 16. A mesma regra vale para o CRC-32, CRC-8 e assim por diante.

O Modbus utiliza, prioritariamente, o CRC-16. Entretanto não há restrições para utilização de outros tipos, desde que todos os dispositivos ligados ao barramento utilizem o mesmo método. A equação (6) apresenta um polinômio de grau 16 no qual todos os coeficientes têm peso unitário.

$$P(x) = x^{16} + x^{15} + x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x^1 + x^0 \quad (6)$$

Para o cálculo do CRC-16, este polinômio é ponderado, do grau zero ao grau quinze, sob coeficientes específicos para formar o polinômio gerador. No Modbus, é utilizado o valor hexadecimal “A001” para representar os coeficientes deste polinômio, como mostrado em (7).

$$A001_{hex} = 1010\ 0000\ 0000\ 0001_{bin} \quad (7)$$

Para que o polinômio tenha grau 16, o termo de mesmo grau sempre recebe coeficiente unitário. Os demais termos serão ponderados na ordem do menor para o maior grau, partindo da direita para a esquerda no valor apresentado em (7). Assim, forma-se (8):

$$P(x) = 1 \cdot x^{16} + 1 \cdot x^{15} + 0 \cdot x^{14} + 0 \cdot x^{13} + 0 \cdot x^{12} + 0 \cdot x^{11} + 0 \cdot x^{10} + 0 \cdot x^9 + 0 \cdot x^8 + 0 \cdot x^7 + 0 \cdot x^6 + 0 \cdot x^5 + 0 \cdot x^4 + 0 \cdot x^3 + 1 \cdot x^2 + 0 \cdot x^1 + 1 \cdot x^0 \quad (8)$$

Finalmente, o polinômio gerador do CRC-16 é dado por (9):

$$P(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1 \quad (9)$$

Matematicamente, o processo de cálculo consiste em dividir o polinômio construído a partir de cada um dos bits da mensagem a ser transmitida pelo polinômio gerador. O resto desta divisão será um polinômio de grau 15, ou seja, haverá 16 coeficientes binários (2 bytes) que poderão ser encaminhados no final da mensagem.

Computacionalmente, o processo é realizado de maneira simplificada, visando ganhar tempo e garantir velocidade mesmo em sistemas com baixa capacidade de processamento. Todas as operações de soma e subtração são transformadas em operações XOR (ou exclusivo) bit a bit.

A Figura 14 apresenta um fluxograma do algoritmo para cálculo do CRC-16. Neste diagrama são utilizados os seguintes registradores e funções:

- “crc”: registrador de 16 bits que irá armazenar o valor do CRC final;
- “high_crc”: armazena os 8 bits mais significativos de “crc”;
- “low_crc”: armazena os 8 bits menos significativos de “crc”;
- “i”: registrador que representa a posição do bit dentro do byte analisado;

- “n”: registrador utilizado para contar o número de bytes da mensagem;
- “AND”: operação E lógico entre os dois registradores;
- “XOR”: operação de ou exclusivo entre os dois registradores;
- “ $\text{crc} \leftarrow \text{crc} \gg 1$ ”: função de rotação para a direita, na qual todo o registrador é deslocado um bit para a direita. O bit mais a direita é descartado e a posição do bit mais a esquerda é preenchida com zero.

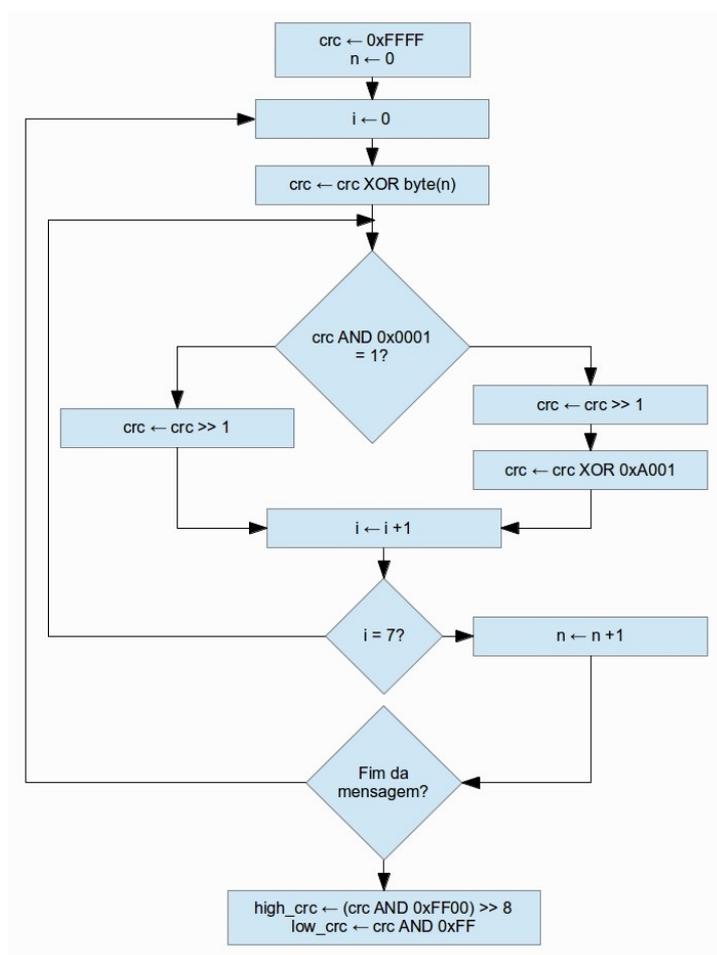


Figura 14: Algoritmo para computação do CRC-16.

3.6.4 Function Code 03: Read Holding Registers

Como foi mostrado, o protocolo Modbus executa a comunicação entre dispositivos utilizando funções ou códigos específicos. Dentre os códigos de funções

publicas, isto é, funções que já foram definidas nos documentos de normatização do protocolo e cuja toda documentação está disponível para uso, a função “03: *Read Holding Registers*” será a base de comunicação do sistema desenvolvido neste trabalho.

Esta função é utilizada para ler um bloco de registradores contíguos armazenados em um dispositivo remoto. O PDU de requisição (Tabela 15) especifica o endereço do primeiro registrador a ser lido e também o número de registradores a partir deste endereço inicial. É importante lembrar que os registradores tem tamanho de 2 (dois) bytes e seu endereçamento inicia em 0 (zero). O número máximo de registradores que podem ser lidos em uma única solicitação é de 125. Isto porque a mensagem de resposta (Tabela 16) está limitada a 255 bytes (um de endereço, um da função, um para quantidade de bytes, até 250 de dados e 2 para o CRC).

Tabela 15: Função 03: Read Holding Registers - Requisição.

Função	1 byte	0x03
Endereço inicial	2 bytes	0x0000 a 0xFFFF
Quantidade de registradores	2 bytes	1 a 125 (0x7D)

Tabela 16: Função 03: Read Holding Registers - Resposta.

Função	1 byte	0x03
Quantidade de bytes de dados	1 byte	2 a 250 (0x02 a 0xFA) (N)
Valores dos registradores	2 x N bytes	

A resposta, como apresentada, é composta por dois bytes para cada registrador, sendo justificada à direita, ou seja, o byte de maior valor é enviado primeiro.

No caso da ocorrência de um erro, a Tabela 17 apresenta a resposta de exceção. Este PDU é composto pelo código erro, que em Modbus será sempre “0x83” seguido do código de exceção, que poderá ser qualquer um dos quatro apresentados na Tabela 18.

Tabela 17: Função 03: Read Holding Registers - Exceção.

Código de erro	1 byte	0x83
Código de exceção	1 byte	0x01, 0x02, 0x03 ou 0x04

Tabela 18: Códigos de exceção (erro) do protocolo Modbus para a função 03.

CÓDIGO	NOME	SIGNIFICADO
01	ILLEGAL FUNCTION	A função solicitada não existe ou não foi implementada no dispositivo escravo. Pode significar que o escravo ainda está aguardando informações de configuração e não está pronto para responder a este tipo de solicitação.
02	ILLEGAL DATA ADDRESS	A solicitação de endereços não é válida. Pode ocorrer por mais de um motivo: o endereço inicial não é válido (é maior do que o maior endereço do dispositivo); a quantidade de registradores é nula; o valor de endereço inicial somado ao número de endereços a serem lidos extrapola o endereço de maior valor do dispositivo.
03	ILLEGAL DATA VALUE	Um valor número dentro da mensagem não é válido para a aplicação, solicitação ou dispositivo.
04	SLAVE DEVICE FAILURE	Um erro irrecuperável ocorreu enquanto o dispositivo executava a solicitação.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

4.1 Proposta de solução do problema

Até esta etapa, o cenário base já foi completamente explorado. De um lado, o problema do armazenamento dos grãos em ambientes não controlados. Do outro, os conhecimentos de medição de temperatura, automação e comunicação. Foi da colisão de ambos, juntamente com uma pequena ideia, que eclodiu uma proposta de solução para este problema. De maneira sintética e objetiva, pode-se descrever o problema como:

“Redução da qualidade e/ou destruição da matéria orgânica armazenada em um silo devido a atuação de pragas, fungos, de aquecimento, umidade, entre outros fatores.”

Assim, a proposta de solução mais viável é desenvolver um sistema que permita o controle monitoramento da temperatura em diversos pontos dentro do silo. A partir dos resultados, será possível tomar uma atitude que auxilie na preservação da matéria orgânica armazenada. Esta, no entanto, é uma descrição superficial. Tratando-se de um projeto de engenharia, se está interessado nas características elétricas e funcionalidades práticas do sistema. A proposta de solução, então, deve abordar aspectos relacionados a engenharia do sistema.

Partindo do objetivo básico, definido na seção 2.4 (Objetivos) deste relatório, e tendo como base os critérios, que foram apresentados e fundamentados na seção 2.5 (Critérios de projeto), pode-se começar a descrever a proposta de solução para o problema, tal qual apresentada na Figura 15.

Este diagrama apresenta sete blocos, que representam o sistema como um todo. Estes blocos se conectam e comunicam entre si, conforme a necessidade. São eles:

- Alimentação: provê a energia para o funcionamento de todos os dispositivos de *hardware*;

- Microcontrolador: responsável pelo controle dos demais blocos do sistema (é o núcleo central de processamento);
- Sensores: são os componentes (transdutores) que transformam a grandeza temperatura em outra grandeza que pode ser analisada por um circuito eletrônico (resistência elétrica);
- Multiplexação: rege as conexões elétricas entre a etapa de condicionamento do sinal e cada um dos sensores, chaveando suas ligações;
- Instrumentação: responsável por converter e tratar o sinal recebido dos sensores;
- Comunicação: bloco responsável pela comunicação entre o sistema e outro dispositivo remoto;
- Supervisório: aplicação desenvolvida em um computador que opera como mestre do sistema, requisitando informações e permitindo uma interface com o usuário final.

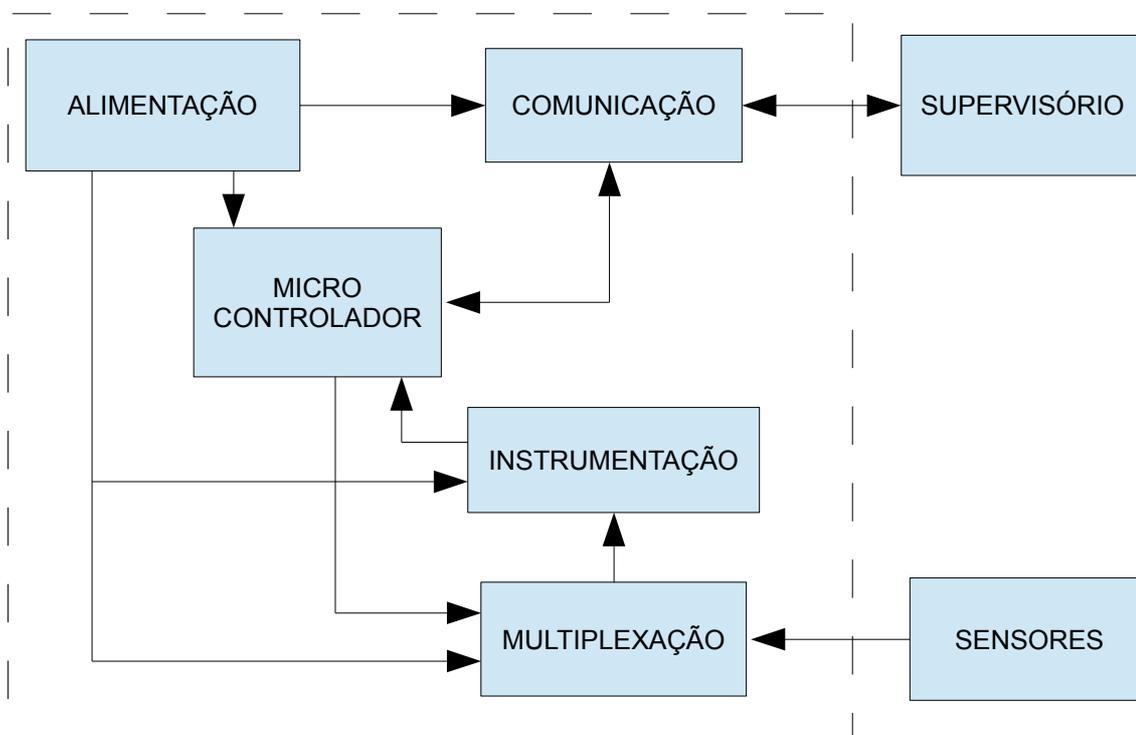


Figura 15: Diagrama de blocos do projeto.

Resumidamente, os sensores, que estarão espalhados pelo interior do silo, farão a transdução da temperatura naquele ponto em um sinal de resistência elétrica. Quando o sensor for conectado ao bloco de instrumentação através do multiplexador, este bloco irá converter sua grandeza em um sinal elétrico, que poderá ser lido pelo microcontrolador. Este dispositivo, por sua vez, além de controlar o funcionamento do MUX, irá ler a o sinal elétrico e convertê-lo (através do módulo conversor analógico/digital interno) em um número. Finalmente, este número poderá ser enviado, através do bloco de comunicação, pela rede até um computador, onde roda um *software* supervisor.

Dentro deste *software*, os dados são recebidos e organizados na forma de um mapa do silo, que será disponibilizado para o usuário para o controle e monitoramento da temperatura.

4.2 Etapa 1: Alimentação

A alimentação do sistema completo será realizado por meio de uma fonte de 24 volts CC (corrente contínua). Entretanto, como os componentes eletrônicos utilizados (microcontrolador, multiplexadores, transreceptores, etc.) requerem uma tensão na faixa de 3,5 a 5,5 volts CC, a tensão de entrada será regulada para o valor de 5,0 volts CC.

Foi proposto o circuito da Figura 16. Trata-se de um regulador alimentado diretamente pela tensão de entrada através do conector J2. O LED D2 serve apenas como indicativo de que o circuito está alimentado.

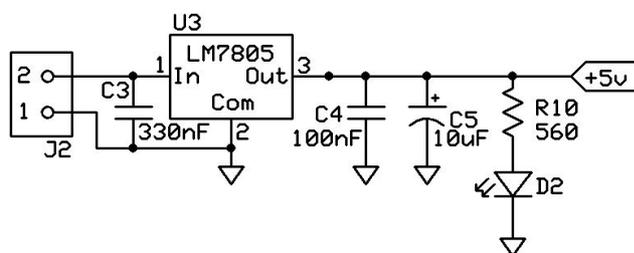


Figura 16: Circuito de alimentação.

Os capacitores conectados na saída e na entrada do LM7805 servem para

filtrar os ruídos provenientes da regulação. A Figura 17 apresenta o sinal de saída deste regulador sem a etapa de filtragem, quando a tensão de entrada é maior do que a tensão de regulação de 5 volts, comprovando a necessidade destes capacitores.

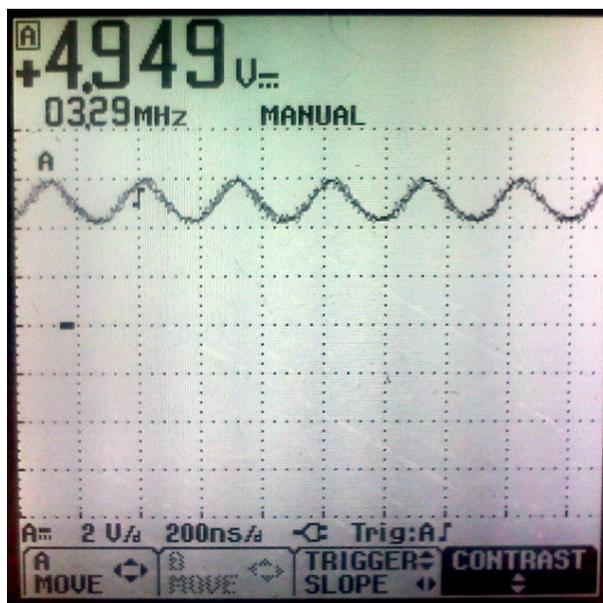


Figura 17: Interferência gerada pelo regulador.

O regulador LM7805 possui as seguintes características elétricas:

- tensão de alimentação máxima: 35 volts CC;
- corrente de saída máxima: 1 ampère;
- potência dissipada máxima (sem dissipador): 2 watts;
- tensão de saída: 4,8 (mínimo) a 5,2 (máximo) volts CC.

4.3 Etapa 2: Instrumentação e condicionamento do sinal

4.3.1 Caracterização do sensor

Antes de desenvolver um sistema de condicionamento do sinal a ser medido, é necessário conhecer e caracterizar este sinal. Tomou-se uma amostra de três termistores de um lote fechado de cem unidades, que serão utilizadas para o desenvolvimento do projeto, para realizar um ensaio. Os termistores apresentam as

características nominais apresentadas na Tabela 19.

É importante deixar claro que o objetivo deste estudo é assegurar a funcionalidade do sistema dentro de uma faixa de temperatura apropriada, independente do fabricante dos termistores utilizados, mantidos os valores nominais especificados e garantida a integridade de suas características físicas.

Tabela 19: Características nominais do NTC.

	CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDADE
R	Resistência elétrica a 25° C	5000	Ohm
β	Coeficiente de temperatura	4000	K
d	Diâmetro	5	mm

Para a execução do experimento, três termistores foram fixados bem próximos e eletricamente isolados, de forma que a temperatura deles fosse tão próxima quanto possível; junto aos termistores, foi anexada a ponteira para medição de temperatura (termopar) do multímetro *Fluke 16*. Os componentes foram imersos em um recipiente cheio de água gelada, que foi sendo aquecida gradativamente. A resistência elétrica de cada um dos termistores foi medida para pontos aleatórios de temperatura.

Os dados coletados neste ensaio estão na Tabela 20. É importante observar que o instrumento utilizado para realizar estas medidas, o multímetro *Fluke 16*, fornece uma incerteza de $\pm(1\% + 0,8^{\circ}\text{C})$ sobre o valor de temperatura medido e $\pm(0,9\% + 10\Omega)$ para os valores de resistência elétrica, conforme especificação do fabricante Error: Reference source not found.

Tabela 20: Dados do ensaio de três termistores NTC.

TEMPERATURA [°C]	RESISTÊNCIA ELÉTRICA [kΩ]		
	NTC 1	NTC 2	NTC 3
6,0	12,03	12,23	12,06
7,5	11,18	11,78	11,38
12,5	8,72	9,16	8,83
15,5	7,71	8,10	7,82
18,5	6,54	6,85	6,62

TEMPERATURA [°C]	RESISTÊNCIA ELÉTRICA [kΩ]		
	NTC 1	NTC 2	NTC 3
21,5	5,73	6,01	5,79
26,3	4,58	4,76	4,63
27,6	4,42	4,60	4,46
30,9	3,680	3,828	3,79
35,7	3,055	3,185	3,144
40,8	2,474	2,558	2,515
48,8	1,802	1,864	1,844
54,9	1,397	1,454	1,432
65,5	0,948	0,979	0,959
71,5	0,769	0,794	0,778
82,5	0,523	0,544	0,538

Na tabela da Figura 18 é possível verificar o resultado da análise de variância (ANOVA) aplicado aos dados coletados. A última coluna da tabela indica a probabilidade da hipótese nula, que é, no caso, a probabilidade de que todos os valores não iguais. O baixo valor apresentado garante que todos os valores medidos são significativos, isto é, para cada valor de temperatura existe um valor de resistência elétrica que lhe é representativo e diferente dos valores para outras temperaturas. Uma vez que foram utilizados termistores diferentes para caracterizar a relação entre temperatura e resistência elétrica, este resultado também sugere que os termistores são iguais.

ANOVA Table					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	620.648	15	41.3765	2385.89	2.24112e-044
Error	0.555	32	0.0173		
Total	621.203	47			

Figura 18: Tabela da análise de variância (ANOVA).

Na verdade, o uso de um ou outro termistor deste mesmo lote não é

significativo perante a dispersão dos dados medidos. A Figura 19 apresenta um gráfico com as medidas de dispersão dos pontos em relação ao valor médio de resistência para cada temperatura. Pode-se observar que a incerteza quanto ao valor médio é tão maior quanto menor for a temperatura ou, de forma complementar, quanto maior a resistência elétrica.

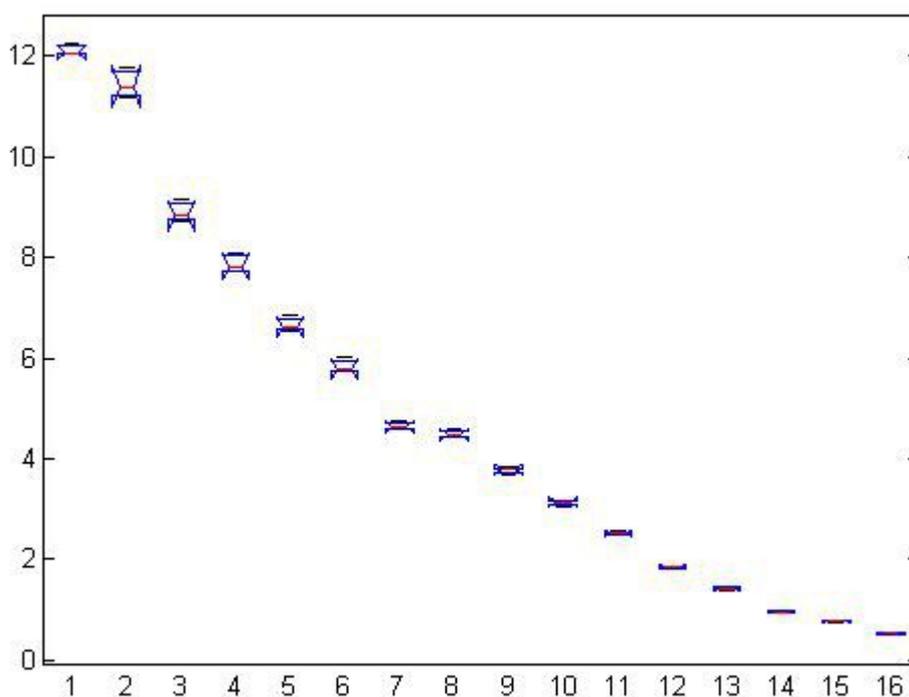


Figura 19: Dispersão de valores de resistência dos termistores.

Validados os dados, é possível levantar a curva de transferência dos termistores e, conseqüentemente, sua função. A Figura 20 apresenta, em um mesmo gráfico, as curvas dos três termistores NTC estudados. Como esperado, todos eles têm comportamento exponencial (logarítmico) e um valor muito próximo do nominal (5 kΩ) à temperatura ambiente (25°C).

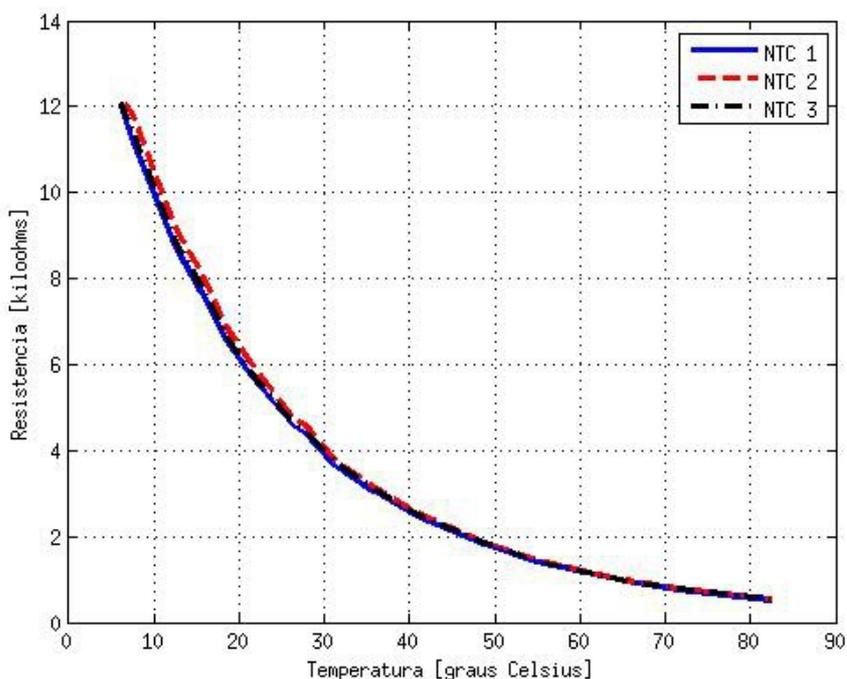


Figura 20: Curvas de resposta de três termistores (NTC).

O coeficiente de temperatura deste termistor pode ser calculado a partir da equação que descreve aproximadamente o seu comportamento, apresentada em (1). Isolando β , é possível chegar em (10).

$$\beta_{T_1/T_2} = \frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (10)$$

Onde:

- β é o coeficiente de temperatura do termistor, o qual se pretende determinar;
- T_1 e T_2 são temperaturas dentro da curva do termistor, diferentes, dadas em Kelvin;
- R_1 e R_2 são as resistências associadas a cada uma das temperaturas T_1 e T_2 , dadas em Ohms.

Observa-se que β depende de dois pontos específicos de temperatura e resistência elétrica associada. Por este motivo, β é dado em função destes dois

pontos e grafado como β_{T_1/T_2} .

A faixa de maior utilização do termistor está compreendida entre cerca de 5°C e 40°C. Para determinar o coeficiente de temperatura, escolhe-se dois pontos e aplica-se na equação (10). A Tabela 21 apresenta a média de alguns valores medidos nos ensaios realizados, a partir dos quais será calculado o β médio para os termistores.

Tabela 21: Dados do NTC para cálculo do coeficiente β .

TEMPERATURA [°C]	TEMPERATURA [K]	RESISTÊNCIA [kΩ]
6,0	279,5	12,12
12,5	285,5	8,90
18,5	291,5	6,67
40,8	313,8	2,52
48,8	321,8	1,84

Foram selecionadas quatro regiões para o cálculo do coeficiente β , conforme demonstrado nas equações (11) a (14).

$$\beta_{6,0/40,8} = \frac{\ln\left(\frac{12,12}{2,52}\right)}{\frac{1}{279,5} - \frac{1}{313,8}} = 4016,11 \quad (11)$$

$$\beta_{12,5/40,8} = \frac{\ln\left(\frac{8,90}{2,52}\right)}{\frac{1}{285,5} - \frac{1}{313,8}} = 3994,48 \quad (12)$$

$$\beta_{18,5/48,8} = \frac{\ln\left(\frac{6,67}{1,84}\right)}{\frac{1}{291,5} - \frac{1}{321,8}} = 3987,02 \quad (13)$$

$$\beta_{12,5/48,8} = \frac{\ln\left(\frac{8,90}{1,84}\right)}{\frac{1}{285,5} - \frac{1}{321,8}} = 3989,52 \quad (14)$$

Em todos os casos o valor calculado está muito próximo do valor nominal do termistor, que é 4000, validando os dados ensaiados. Este coeficiente depende particularmente do tipo de NTC utilizado, sendo uma característica intrínseca do mesmo. A função de transferência do termistor NTC pode ser aproximada por (15) e sua curva, gerada a partir da equação, é apresentada na Figura 21.

$$R_T \simeq 8900 \cdot e^{3996,8 \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{285,5} \right)} \Omega \quad (15)$$

Onde o β utilizado é a média aritmética dos valores calculados anteriormente e a temperatura de referência escolhida foi de 12,5°C (285,5 K).

Comparando os valores dos termistores um a um, é possível perceber que a maior disparidade ocorre em baixas temperaturas, quando o valor da resistência elétrica é elevado. O gráfico da Figura 22 foi gerado a partir do valor absoluto (módulo) da diferença de resistência elétrica entre os termistores, calculado dois a dois.

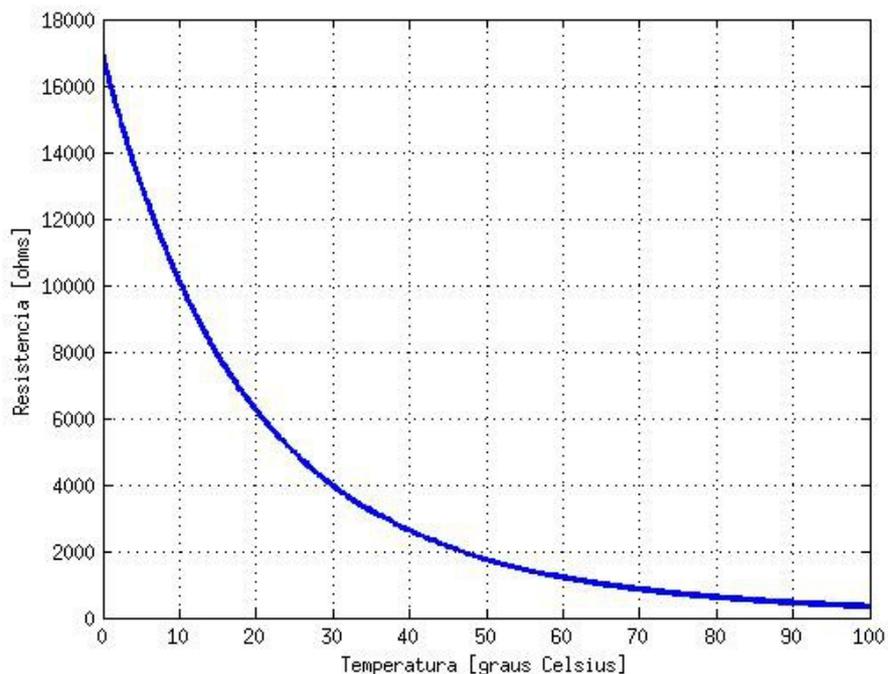


Figura 21: Curva de transferência teórica do termistor NTC.

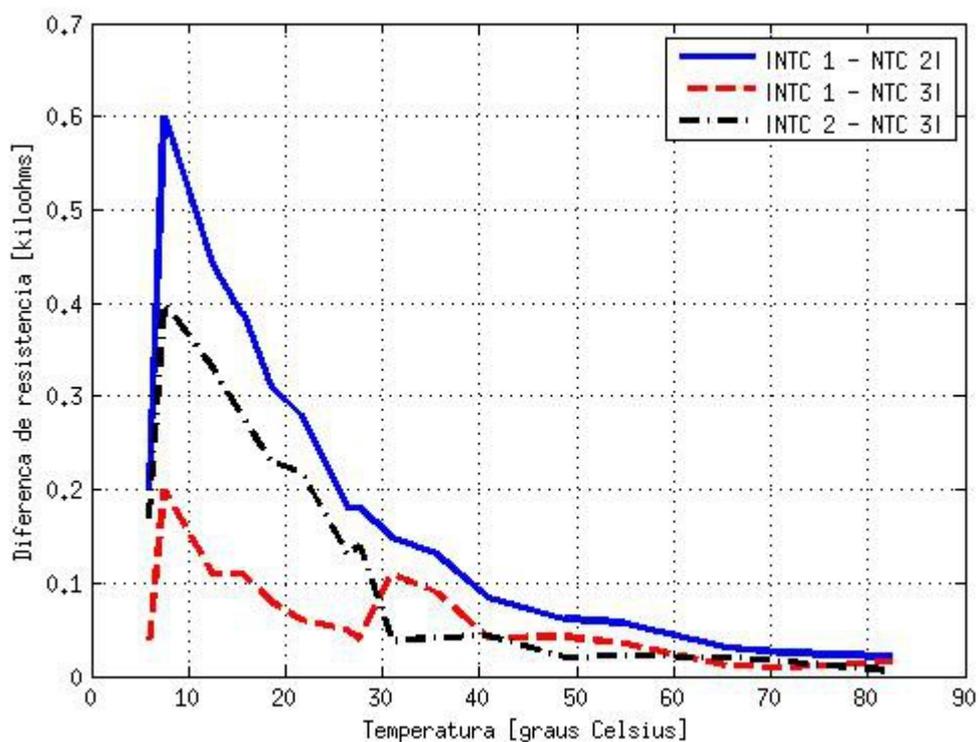


Figura 22: Diferença de resistência elétrica entre termistores.

Se estes valores forem normalizados tomando como base o valor esperado de resistência, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 23. Aqui é possível perceber que, independente da temperatura na qual se encontram os termistores, a diferença de resistência elétrica entre eles permanece dentro da faixa de 1% a 5%. Comparando com os dados da Tabela 19, comprova-se que esta variabilidade de 5% está dentro do padrão de tolerância especificado pelo fabricante.

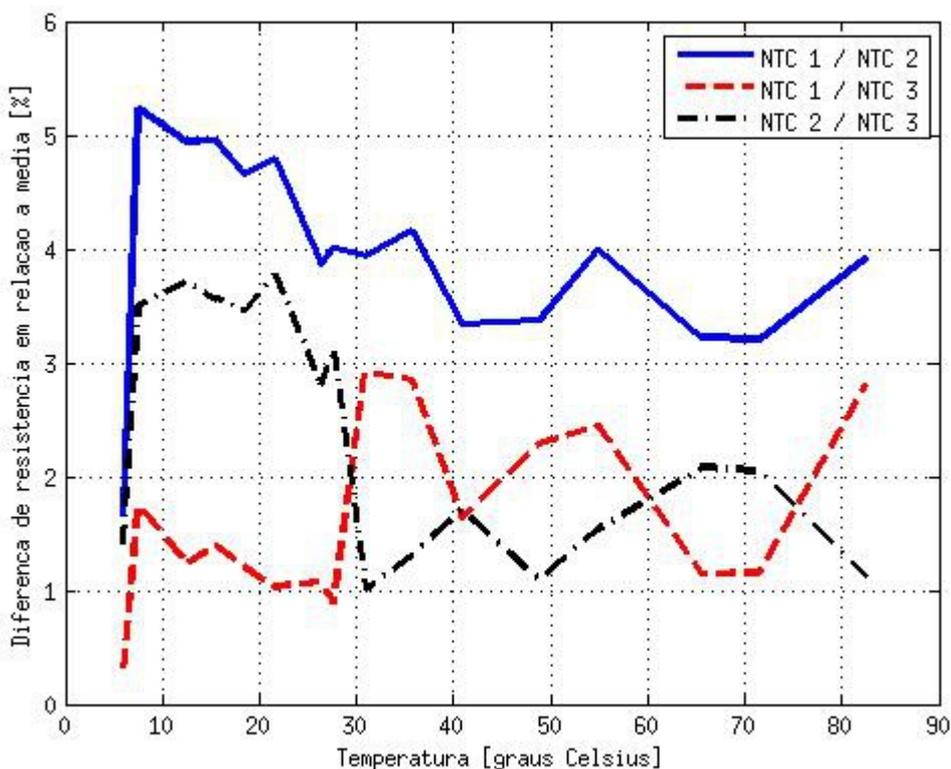


Figura 23: Diferença porcentual de resistência elétrica entre termistores.

4.3.2 Linearização do NTC – Ponte de Wheatstone

Um dos principais métodos para linearizar a curva de um termistor consiste na utilização de um resistor em paralelo. No caso da ponte de Wheatstone utilizada (Figura 24), o resistor R será responsável pela linearização de R_T dentro de uma faixa de temperatura especificada, que, neste caso, será de 0°C a 50°C .

Para calcular o valor de R , utiliza-se um dos diversos métodos disponíveis. O método dos três pontos equidistantes, que será utilizado, prove uma melhor linearização nas extremidades da faixa, conforme será visto a seguir. A resistência equivalente, denominada R_P , obtida do paralelo entre R e R_T como mostra a equação (16).

$$R_P = \frac{R_T \times R}{R_T + R} \quad (16)$$

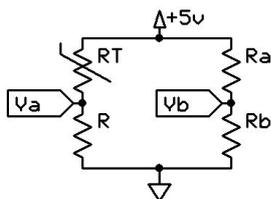


Figura 24: Ponte de Wheatstone com um termistor.

Parte-se do princípio de que três pontos dentro da curva de transferência do termistor devem coincidir com uma linha reta. A curva utilizada foi apresentada na Figura 21. Sendo os três pontos equidistantes e T_2 a temperatura central, a equação (17) deve ser satisfeita.

$$T_1 - T_2 = T_2 - T_3 \quad (17)$$

Assim sendo, tem-se:

$$R_{P1} - R_{P2} = R_{P2} - R_{P3} \quad (18)$$

Considerando o valor de R_P , apresentado em (16), pode-se resolver para R , obtendo (19).

$$R = \frac{R_{T2} \cdot (R_{T1} + R_{T3}) - 2 \cdot R_{T1} \cdot R_{T3}}{R_{T1} + R_{T3} - 2 \cdot R_{T2}} \quad (19)$$

A partir da equação de transferência do NTC (15), calculam-se os valores de resistência dos três pontos de temperatura escolhidos:

- $R_{T1} = 16,895 \text{ k}\Omega$ ($T_1 = 0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$);
- $R_{T2} = 4,947 \text{ k}\Omega$ ($T_2 = 25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$);
- $R_{T3} = 1,752 \text{ k}\Omega$ ($T_3 = 50^\circ\text{C} = 323 \text{ K}$).

Aplicando esses valores em (19), obtém-se:

$$R = \frac{R_{T2} \cdot (R_{T1} + R_{T3}) - 2 \cdot R_{T1} \cdot R_{T3}}{R_{T1} + R_{T3} - 2 \cdot R_{T2}} = 3,776 \text{ k}\Omega \quad (20)$$

O valor comercial escolhido foi de $3,9 \text{ k}\Omega$. Considerando uma tensão de alimentação de 5 V e V_a dada pela equação (21). O gráfico de V_a em relação à temperatura é apresentado na Figura 25.

$$V_a = 5 \frac{3,9 \text{ k}\Omega}{3,9 \text{ k}\Omega + R_T} V \quad (21)$$

O amplificador operacional permite uma excursão de tensão de saída entre um valor muito próximo de 0 V e 3,5 V. Com o objetivo de utilizar o máximo desta excursão, define-se que a saída será igual a 0 V, para uma temperatura de 0°C, e 3,5 V, para uma temperatura de 50°C, crescendo linearmente neste intervalo. A aproximação da curva obtida na Figura 25 gera um erro máximo de linearidade de $\pm 0,05$ V dentro do intervalo.

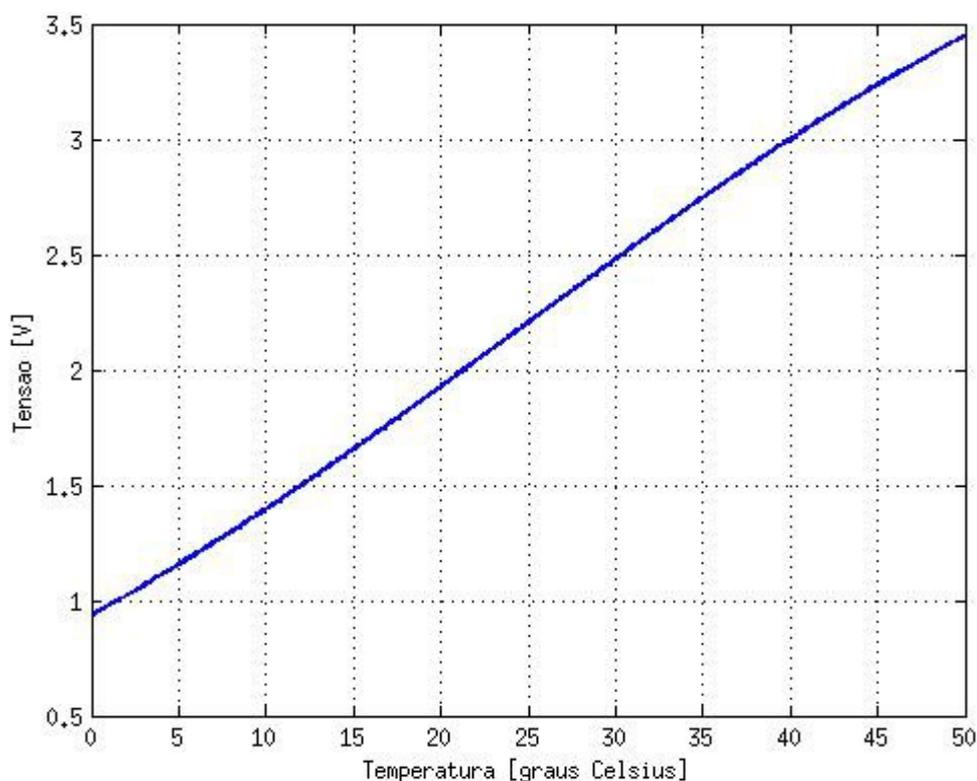


Figura 25: Relação entre a tensão V_a da ponte e a temperatura do termistor.

Para calcular o ramo de V_b , é preciso conhecer ou estabelecer um valor para esta tensão. A relação proposta é apresentada em (22). O valor de 1,6 V representa aproximadamente duas vezes o valor da tensão V_a do ponto de 0°C. O motivo desta escolha será abordado a seguir.

$$V_b = \frac{5 \cdot R_a}{R_a + R_b} = 1,6 \text{ V} \quad (22)$$

Reorganizando os termos, obtém-se a relação expressa em (23).

$$2,125 R_b = R_a \quad (23)$$

Escolhendo arbitrariamente um valor de 47 kΩ para o resistor R_a , R_b deverá assumir o valor comercial de 22 kΩ para que V_b seja igual a 1,59 V.

A ponte completa, então, pode ser observada na Figura 26.

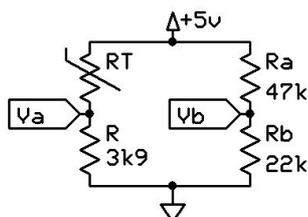


Figura 26: Ponte de Wheatstone calculada.

4.3.3 Amplificador diferencial

O amplificador diferencial será responsável por subtrair as tensões (V_a e V_b) da ponte e multiplicar o resultado por um ganho determinado de forma que a excursão de tensão na saída seja tão ampla quanto a faixa disponível para temperaturas de 0°C a 50°C.

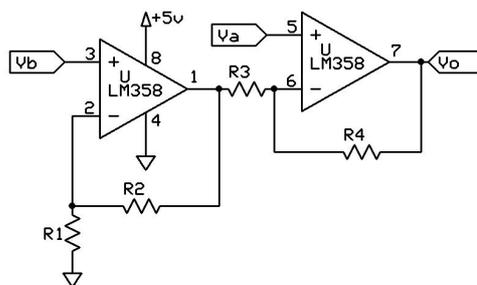


Figura 27: Amplificador diferencial.

O pré-requisito para a construção deste amplificador é que ele seja *single supply*, ou seja, não necessite de alimentação simétrica. Como o circuito integrado LM358 possui dois amplificadores operacionais construídos para trabalhar com alimentação não-simétrica, ele foi escolhido para a o circuito. Este amplificador permite operação (tensão de saída) entre o valor de tensão de referência (terra ou 0 V) e o valor de alimentação menos 1,5 V.

O circuito da Figura 27 funciona como um amplificador diferencial, cuja equação de saída é dada por (24).

$$V_o = \left[V_a - \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_b \right] \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) + \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_b \quad (24)$$

É possível mostrar que, caso a condição imposta em (25) seja satisfeita, esta equação pode ser reduzida para (26).

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (25)$$

$$V_o = (V_a - V_b) \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (26)$$

O importante aqui é observar que a porção expressa em (27), que está contida em (24), representa a saída do primeiro amplificador operacional. Este valor de tensão, tal como a tensão V_o , não deve extrapolar o valor limite de 3,5 V.

$$V_b' = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_b \leq 3,5 \text{ V} \quad (27)$$

Desta forma, é possível reescrever (24) como:

$$V_o = (V_a - V_b') \left(\frac{R_4}{R_3} \right) + V_a \quad (28)$$

Para o caso em que a temperatura é mínima (0°C), se quer que V_o seja mínimo. Não é possível deixar de perceber que existe um *offset* de V_a volts em V_o . Para minimizar V_o , *então*, é preciso fazer com que a parcela V_b' seja tão grande quando possível. Entretanto, como V_b' está limitado a 3,5 V, arbitrando uma relação unitária para $R_2:R_1$, V_b fica limitado a 1,75 V.

Analisando o caso crítico, no qual V_a é máximo (50°C), é preciso garantir que V_o também seja menor do que 3,5 V. Desta forma:

$$\left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) V_a - \left(\frac{R_4}{R_3} \right) V_b' \leq 3,5 \text{ V} \quad (29)$$

Calculando valores de V_a , tais que:

- $V_a(0^\circ\text{C}) = 0,94 \text{ V}$;
- $V_a(50^\circ\text{C}) = 3,45 \text{ V}$.

E utilizando uma relação $R_4:R_3 = 12 \text{ k}\Omega:47 \text{ k}\Omega = 0,255$, é possível resolver as inequações (27) e (29) e obter um valor de V_b que deve ser menor ou igual a $1,62 \text{ V}$, o que justifica a escolha feita em (22).

A tensão obtida na saída do circuito de condicionamento, tendo como referência a temperatura do NTC, é mostrada na Figura 28.

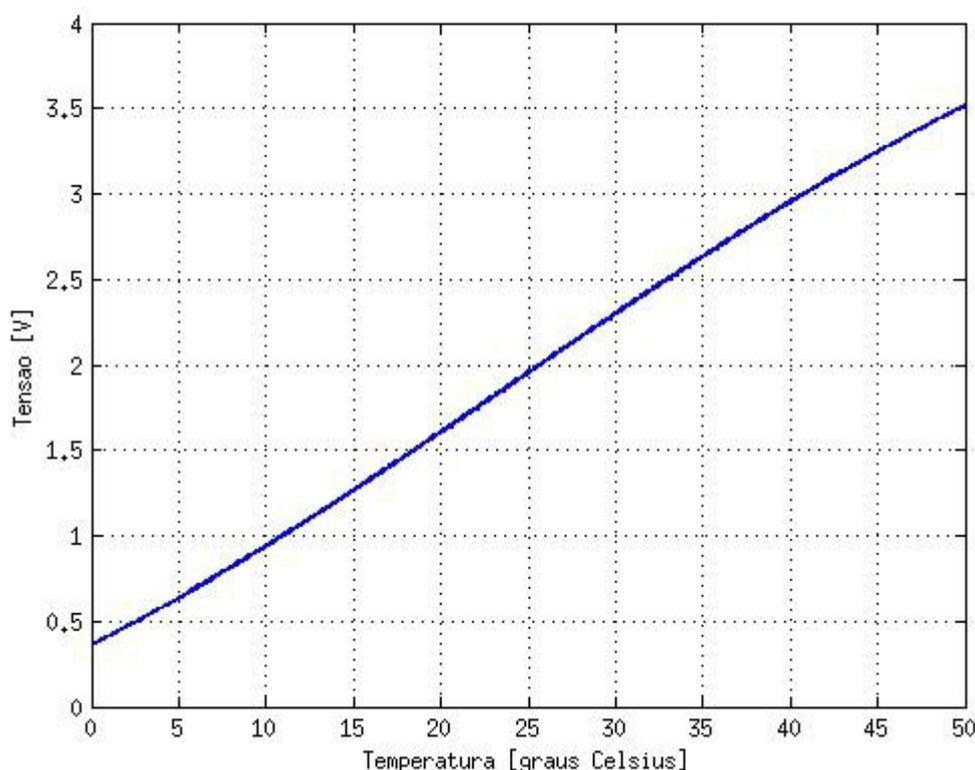


Figura 28: Tensão de saída V_o em função da temperatura do termistor.

O pequeno *offset* existente na temperatura de 0°C é importante pois torna possível identificar a ruptura do sensor. Quando o sensor está aberto, a tensão de saída cai para um valor que é muito próximo de 0 V e, portanto, menor do que nível apresentado.

Esta função pode ser aproximada por uma reta que tem equação:

$$V_o = 0,06556 \cdot T + 0,3074 \quad [\text{V}] \quad (30)$$

O erro de linearidade esta aproximação é de $\pm 0,56$ V, conforme mostra a Figura 29.

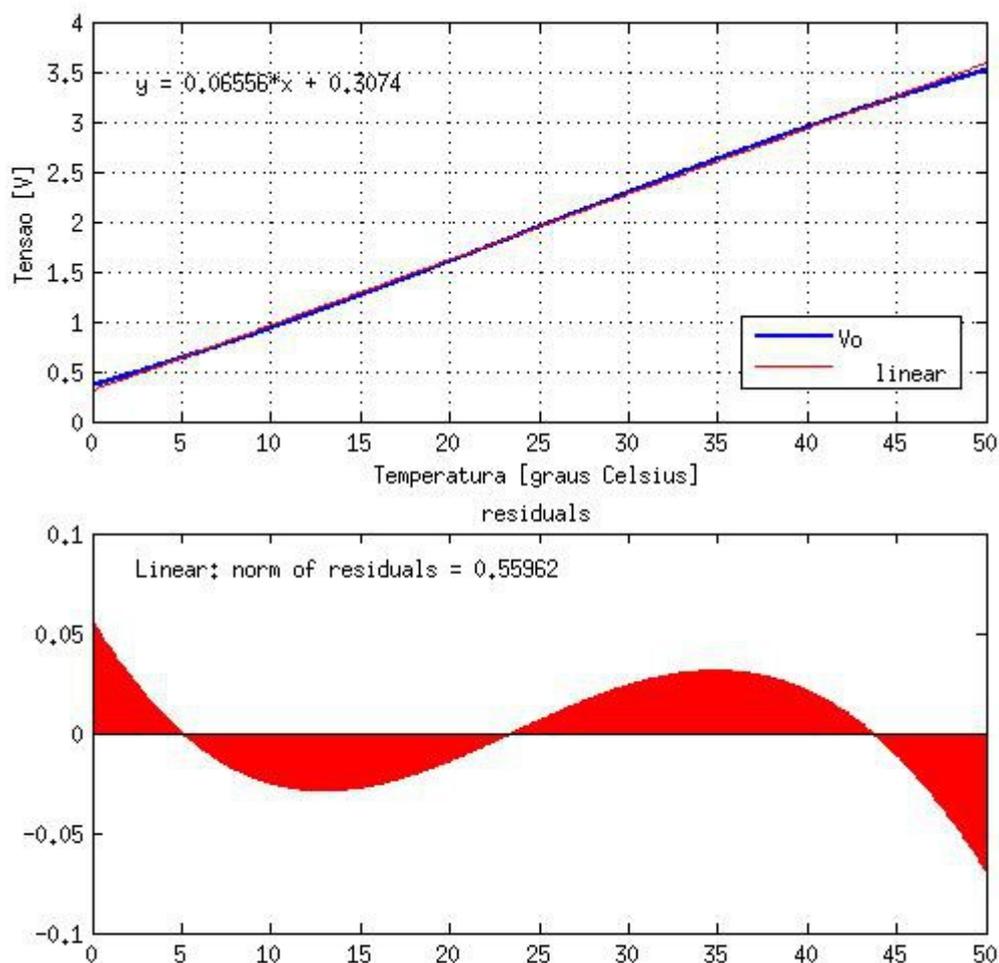


Figura 29: Linearização da tensão de saída V_o em função da temperatura.

Finalmente, o circuito final de condicionamento é mostrado na Figura 30. Este circuito é composto pela ponte de Wheatstone ligada ao amplificador diferencial, que foram apresentados nas Figuras 26 e 27. O conector J8 recebe o NTC, que está multiplexado. A saída “AD_IN” liga no módulo ADC do microcontrolador.

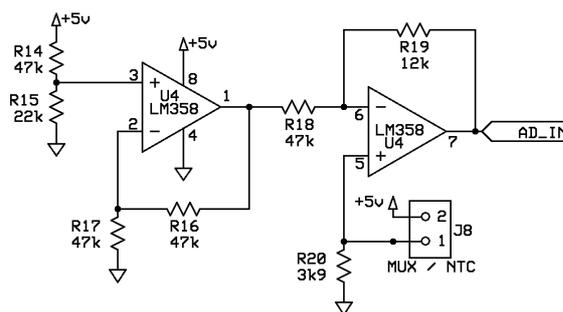


Figura 30: Circuito condicionar com ponte e amplificador diferencial.

Para este circuito, considerando os resistores utilizados, a equação que relaciona a tensão de saída com a tensão V_a é dada por:

$$V_o = 1,255 \cdot V_a - 0,814 \quad (31)$$

Sendo que V_a é função da resistência do NTC e é dada por:

$$V_a = 5 \cdot \frac{3900}{3900 + R_T} \text{ V} \quad (32)$$

O gráfico da equação (31) foi apresentado na Figura 28, em função da temperatura (foi utilizada a equação de transferência apresentada em (15) para calcular o valor de R_T).

4.3.4 Cadeia de medida e especificação do conversor analógico/digital

O conversor analógico/digital, ou simplesmente conversor A/D, é o responsável por converter o sinal analógico, proveniente do transdutor (sensor e condicionador), em um sinal digital, que pode ser lido e analisado pelo microcontrolador.

Existe uma série de parâmetros que devem ser levados em consideração na escolha certa de um conversor A/D, tais como:

- relação linear entre a entrada de tensão e o valor de saída;
- resolução: maior diferença entre qualquer tensão de entrada em relação ao número de saída;
- tempo de conversão: tempo necessário para que se conclua a conversão

do valor de entrada em um número binário;

- taxa de conversão: maior número de conversões por unidade de tempo que o conversor é capaz de realizar;
- estabilidade à temperatura: diz respeito a capacidade do conversor de manter suas características nominais dentro de um limite mínimo de certeza frente a variações de temperatura.

Neste momento, no entanto, é interessante apenas a relação entre a resolução do conversor, os limites de entrada e saída e seus efeitos sobre a medição de temperatura.

Inicialmente, são especificados os valores expostos na Tabela 22 para o conversor.

Tabela 22: Especificação do conversor A/D.

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	VALOR
V_{REF-}	Tensão de referência negativa do conversor A/D	0 volt
V_{REF+}	Tensão de referência positiva do conversor A/D	5 volts
n	Número de bits do conversor A/D	10 bits
V_{IN}	Faixa de tensão de entrada	0 ~ 5 volts

A resolução de saída deste conversor é dada pela equação (33) e representa qual a mínima variação de tensão que precisa ocorrer na entrada para que a saída varie em 1 (um) bit.

$$q = \frac{V_{REF+} - V_{REF-}}{2^n - 1} = \frac{5V - 0V}{2^{10} - 1} = \frac{5V}{1023} \approx 4,89 \text{ mV} \quad (33)$$

Tendo conhecimento da margem dinâmica de temperatura na entrada do sistema e a resolução necessária, é possível calcular a quantidade de bits aproximada do conversor A/D. Este cálculo é apresentado em (34), considerando que a temperatura varia entre 0,0°C e 50,0°C, com uma resolução de 0,1°C.

$$MD(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{50,0^\circ\text{C} - 0,0^\circ\text{C}}{0,1^\circ\text{C}} \right) = 20 \log(500) = 53,98 \text{ dB}$$

$$MD(\text{dB}) = 6 \times n \quad (34)$$

$$n = \frac{53,98}{6} \approx 9 \text{ bits}$$

Isto quer dizer que um ADC de 9 bits é suficiente para assegurar que a margem de tensão na entrada corresponda aos valores de temperatura requeridos.

A Figura 31 apresenta todos os resultados dos circuitos de linearização, condicionamento, amplificação e conversão consolidados em uma única cadeia de medidas.

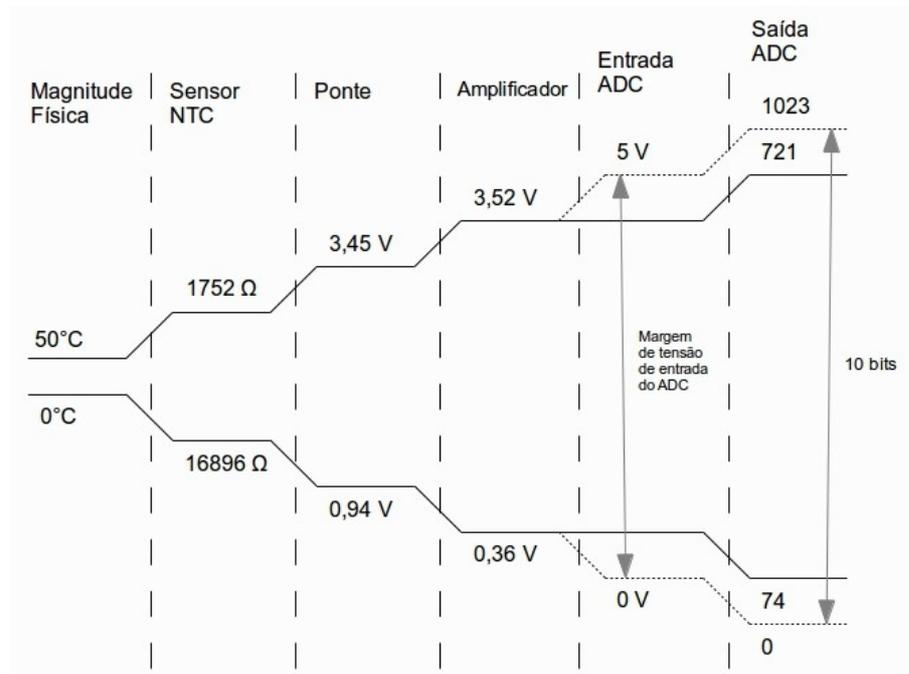


Figura 31: Cadeia de medidas do sistema.

O passo final, a ser realizado pelo software do microcontrolador ou do programa supervisor, será relacionar de forma linear a saída digital com os valores de temperatura. Isto poderá ser feito através de uma tabela ou de uma equação e terá um erro agregado visto que a resolução fornecida é maior do que a resolução necessária, conforme mostrado em (35).

$$Res_{saída} = \frac{50,0^{\circ}\text{C}}{721 - 74} = 0,077^{\circ}\text{C} \neq 0,1^{\circ}\text{C} \quad (35)$$

Considerando que L seja o valor lido e convertido pelo ADC e T , a temperatura de saída, a equação (36) dá uma aproximação deste valor.

$$T = 0,0773 \cdot (L - 74) \quad (36)$$

4.4 Etapa 3: Multiplexação

A escolha do multiplexador envolve a decisão sobre um grande número de parâmetros, que vão desde o número de canais que o dispositivo é capaz de manusear até os efeitos do dispositivo sobre estes sinais. A seguir estão listados e fundamentados os mais importantes destes parâmetros, que foram levados em conta na escolha do componente.

Tipo de multiplexador: existem dois grupos gerais de multiplexadores: os analógicos e os digitais. Enquanto os digitais apenas trafegam sinais binários, os analógicos se comportam como conexões elétricas e permitem o transporte de sinais de diferentes níveis de tensão. Portanto, para chaveamento dos sinais dos termistores será necessário um MUX analógico, pois é importante que o nível de tensão sobre os sensores seja transmitido com a maior fidelidade possível até o conversor A/D.

Tensão de alimentação: parâmetro fundamental e crítico para o projeto, o componente deve funcionar com uma tensão de 5 volts, que foi o padrão estabelecido para todo o sistema.

Quantidade de canais: de uma forma geral, não é importante o número de canais que cada componente pode chavear, visto que eles podem ser interligados para aumentar o número total de canais do sistema. Entretanto, um número mínimo de 8 (oito) canais é sugerido para minimizar a quantidade de circuitos.

Das características físicas e elétricas do multiplexador, existem dois parâmetros principais, chamados de " R_{ON} " e " t_{ON} ", que devem ser observados. O tempo de propagação (t_{ON}) diz respeito ao tempo que o circuito integrado leva para propagar um comando (endereçamento) para saída, ou seja, o tempo para chavear

uma das entradas na saída. O valor de R_{ON} representa a resistência elétrica oferecida entre um canal de entrada qualquer e a saída, quando conectados (ligados).

O quadro da Figura 32 apresenta as características elétricas do MUX 74HC4051, que foi escolhido por atender a todas as especificações sugeridas neste capítulo. A tensão de alimentação deste dispositivo pode variar entre 2 e 6 volts. Possui oito canais, cujo tempo de propagação de chaveamento é de 20 nanossegundos, tipicamente. Considerando sua utilização em um sistema de medição de temperatura, no qual os tempos de propagação estão na faixa de segundos, este valor pode ser desprezado.

A resistência entre dois canais, no entanto, possui um valor típico de 70 Ω .

DC Electrical Specifications

PARAMETER	TEST CONDITIONS				AMBIENT TEMPERATURE, T_A						UNITS	
	V_{IS} (V)	V_I (V)	V_{EE} (V)	V_{CC} (V)	25°C			-40°C - 85°C		-55°C - 125°C		
					MIN	TYP	MAX	MIN	MAX	MIN		MAX
HC TYPES												
High Level Input Voltage, V_{IH}				2	1.5	-	-	1.5	-	1.5	-	V
				4.5	3.15	-	-	3.15	-	3.15	0	V
				6	4.2	-	-	4.2	-	4.2	-	V
Low Level Input Voltage, V_{IL}				2	-	-	0.5	-	0.5	-	0.5	V
				4.5	-	-	1.35	-	1.35	-	1.35	V
				6	-	-	1.8	-	1.8	-	1.8	V
On Resistance, r_{ON} $I_O = 1mA$, (Figure 11)	V_{CC} or V_{EE}	V_{IL} or V_{IH}	0	4.5	-	70	160	-	200	-	240	Ω
			0	6	-	60	140	-	175	-	210	Ω
			-4.5	4.5	-	40	120	-	150	-	180	Ω
	0		4.5	-	90	180	-	225	-	270	Ω	
	0		6	-	80	160	-	200	-	240	Ω	
	-4.5		4.5	-	45	130	-	162	-	195	Ω	
Maximum On Resistance Between any Two Channels, Δr_{ON}				0	4.5	-	10	-	-	-	-	Ω
				0	6	-	8.5	-	-	-	-	Ω
				-4.5	4.5	-	5	-	-	-	-	Ω

Figura 32: Especificações elétricas do multiplexador 74HC4051.

Considerando o circuito da Figura 33, o qual representa um conjunto de oito termistores (NTC) conectados cada qual a uma das entradas do multiplexador, pode-se calcular o erro acrescido ao valor dos sensores devido a resistência R_{ON} . Tomando como base a equação de transferência do NTC (15) e considerando o pior

caso (temperatura igual a 50°C), o erro é dado por:

$$erro = \frac{R_{ON}}{R_T(50^\circ C)} \cdot 100\% = \frac{70}{1752} \approx 4\% \quad (37)$$

O que não é um valor desprezível, muito embora a própria incerteza sobre o restante dos componentes utilizados esteja na faixa de 5%. Entretanto, como se trata de um valor fixo de resistência, este é um erro sistemático do sistema, sendo encontrado de igual magnitude em todas as medições. Portanto, uma solução simples é calibrar a leitura dos valores através do *software* do microcontrolador, eliminando a sua influência sobre o sistema.

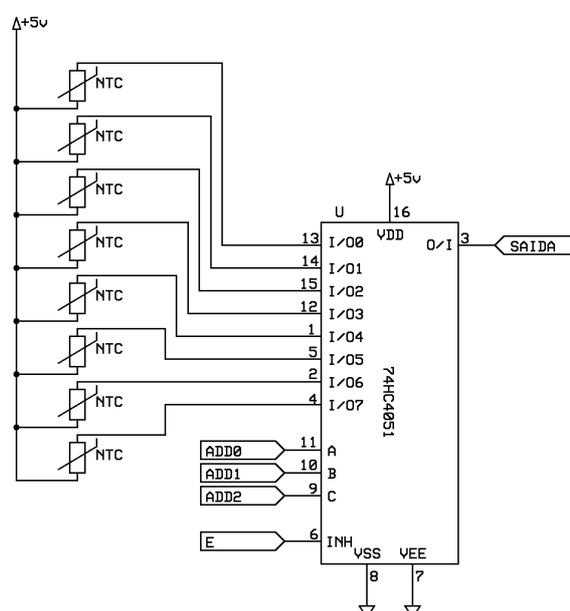


Figura 33: Circuito multiplexador conectado a uma linha de termistores.

4.5 Etapa 4: Microcontrolador

O microcontrolador é responsável pelo controle e processamento do sistema e seu projeto está dividido, essencialmente, em duas partes: *software* e *hardware*. É natural que cada uma destas partes esteja atrelada a outra, de forma que não é possível o funcionamento do sistema na ausência ou falha de qualquer um deles. O uso de um microcontrolador, no entanto, permite que todo o projeto de *hardware* seja efetuado antes da programação, apenas conhecendo as características do dispositivo utilizado.

Baseado nesta ideia, a Figura 34 apresenta o circuito proposto para o

PINO	PORTA	RÓTULO	DESCRIÇÃO / FUNÇÃO
11, 32	V _{DD}		Alimentação (+5 volts).
12, 31	V _{SS}		Alimentação (referência).
13, 14	OSC1, OSC2		Entrada o oscilador (cristal).
15	RC0		Entrada digital (chave de toque).
16	RC1		LED indicativo.
17	RC2		Entrada digital (chave de toque).
22	RD3		Endereçamento da placa (comunicação).
24	RC5	DATA_CTRL	Controle da etapa de comunicação. Habilita (1) / Desabilita (0) a transmissão.
25	RC6/TX	DATA_TX	Transmissão da USART.
26	RC7/RX	DATA_RX	Recepção da USART.
27	RD4		Endereçamento da placa (comunicação).
28	RD5		Endereçamento da placa (comunicação).
29	RD6		Endereçamento da placa (comunicação).
30	RD7		Endereçamento da placa (comunicação).
33	RB0/AN12	SS_0	Endereçamento do sensor.
34	RB1/AN10	SS_1	Endereçamento do sensor.
35	RB2/AN8	SS_2	Endereçamento do sensor.
36	RB3/AN9	SS_3	Endereçamento do sensor.
37	RB4/AN11	SS_4	Endereçamento do sensor.
38	RB5	MUX1	Endereçamento do circuito multiplexador.
39	RB6	MUX2	Endereçamento do circuito multiplexador.
40	RB7	MUX3	Endereçamento do circuito multiplexador.

O circuito possui três LEDs indicativos, dois deles sendo controlados pelo microcontrolador. O LED verde liga no instante que o circuito é alimentado, pois está conectado ao barramento de 5 volts. O LED vermelho está conectado juntamente com o pino de controle da comunicação. Sempre que uma transmissão for efetuada, o pino de controle “DATA_CTRL” adquire nível alto por alguns milissegundos e o LED pisca. Enquanto este LED estiver aceso, a placa está impossibilitada de receber qualquer tipo de comunicação.

O último LED, de cor amarela, é o único que não possui função própria e, portanto, está completamente a disposição do programador. A este LED, no entanto, foi atribuído o carácter informativo de evento. Sempre que um evento (calibração dos sensores, por exemplo) estiver em andamento, ele permanecerá ligado ou em modo intermitente (piscando).

As duas chaves de toque, conectadas aos pinos 15 e 17 do microcontrolador, foram introduzidas no sistema para gerar determinados eventos. Elas mantêm nível baixo na entrada da porta e trocam este nível para alto, quando pressionadas.

Todos os pinos listados com função de endereçamento foram configurados como saídas digitais e seu uso é reservado, como o nome sugere, para endereçar cada um dos sensores. Excetuam-se os pinos reservados para endereço de comunicação. Estes, em número de cinco (pinos 22 e de 27 a 30), definem o endereço da placa dentro da rede, que pode variar entre 0 (zero) e 31.

4.5.1 Programação do microcontrolador

O *software* do microcontrolador, devido a sua arquitetura, é dividido em duas partes: a sequência principal e a sequência de interrupção. O programa gravado no microcontrolador roda continuamente a sequência principal, até que um evento externo force a chamada de uma rotina secundária. Esta *interrupção* é uma importante característica do desenvolvimento de um sistema com microcontrolador.

O diagrama da Figura 35 ilustra a sequência de passos realizada pelo código do microcontrolador. Tão logo o sistema é alimentado, o programa efetua as configurações necessárias de todos os periféricos utilizados. Isto é feito escrevendo nos registradores específicos os códigos numéricos necessários. A Tabela 24 mostra todos os registradores utilizados para cada módulo do PIC. De forma geral, as configurações foram:

- Portas: configuração da direção dos dados (entrada ou saída) realizada através dos registradores TRIS, conforme Tabela 23:
 - Entradas digitais: chaves de toque, recepção serial, oscilador;
 - Entrada analógica: canal AN0 (pino 2) do conversor A/D;
 - Saídas digitais: LED indicativo, controle da comunicação, sinais de endereçamento, transmissão serial.
- Conversor A/D: canal AN0 como entrada analógica e o restante como entradas e saídas digitais, frequência do oscilador igual a $F_{osc}/64$, módulo ligado, resultado justificado a direita (o seis bits mais significativos do

registrador ADRESH são lidos como zero);

- USART: transmissão assíncrona de oito bits;
- Interrupções: interrupção de recebimento de dados via USART ativada;
- Comparadores: todos os comparadores desativados.

Tabela 24: Registradores de configuração do PIC16F877A.

MÓDULO / FUNÇÃO	REGISTRADORES / BITS
Comparadores	COMCON
Conversor A/D	ADCON0, ADCON1, ADRESH, ADRESL
Interrupção de recepção	PIE1.RCIE, PIR1.RCIF
Interrupções	INTCON.GIE, INTCON.PEIE
Portas	TRISA, TRISB, TRISC, TRISD, TRISE
Recepção USART	RCSTA, RCREG
Transmissão USART	TXSTA, TXREG
USART	SPBRG

A configuração da comunicação através do módulo USART do microcontrolador exigiu um pequeno cálculo para definir a velocidade de transmissão. O *baud rate* é dado por:

$$baud\ rate = \frac{F_{osc}}{16(SPBRG+1)} \quad (38)$$

Onde SPBRG é o valor do registrador de mesmo nome. Assim, para um *baud rate* de 9600 e um cristal oscilador de 20 MHz, é necessário preencher SPBRG com o valor dado em 39.

$$SPBRG = \frac{F_{osc}}{16(baud\ rate)} - 1 = \frac{20 \cdot 10^6}{16 \cdot 9600} - 1 \approx 129 \quad (39)$$

Realizadas as configurações, o próximo passo é verificar a quantidade de sensores que estão conectados nos barramentos dos multiplexadores. Para isso o programa aciona cada uma das entradas e lê os valores dos sensores. O microcontrolador foi programado para cessar a contagem quando encontrar três portas desconectadas (sem sensores) em sequência. Deste momento em diante o

sistema irá apenas verificar o número de sensores conectados. Com isso se ganha muito tempo, pois não há necessidade de fazer medições de componentes inexistentes.

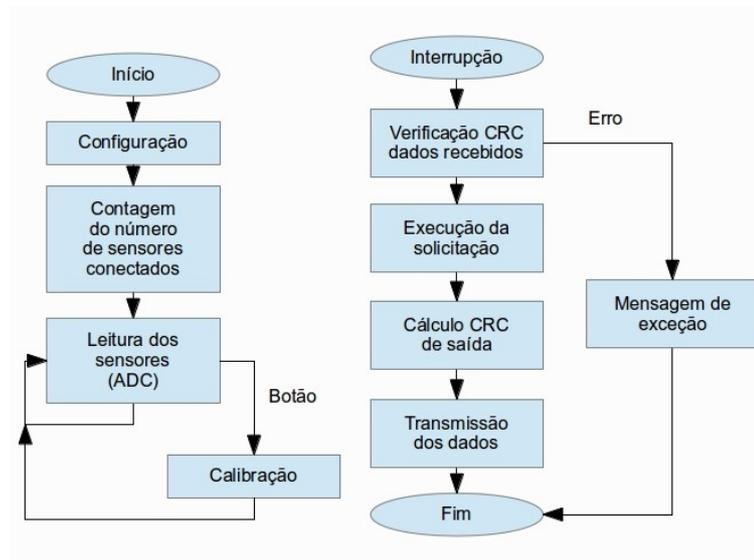


Figura 35: Fluxograma do código do microcontrolador.

A partir deste ponto, o programa passa a rodar indefinidamente, lendo cada um dos termistores e armazenado o valor referente da conversão em um registrador específico. Ele apenas abandonará esta rotina com o surgimento de um, entre dois eventos disponíveis.

O primeiro deles é uma solicitação para calibração, que será abordada em uma seção específica (ver 4.5.3). O segundo evento é uma recepção de dados via interface serial. Esta recepção fará com que o *software* incie uma rotina diferente, interrompendo o fluxo principal. Por este motivo esta rotina é denominada simplesmente de interrupção.

4.5.2 Tratamento da interrupção: aplicação do protocolo Modbus

Sempre que o módulo USART do microcontrolador receber um dado através da rede, um bit de sinalização (PIR1.RCIF) irá para nível alto e o programa entrará na rotina de interrupção.

A rotina de tratamento dos dados recebidos foi desenvolvida para lidar diretamente com a instrução de leitura dos registradores, apresentada na Tabela 15,

composta por 8 bytes. Desta forma, o programa irá aguardar até que essa quantidade de dados seja recebida ou que estoure o tempo limite de transmissão.

A Tabela 25 mostra um exemplo de requisição da função de leitura de dez registradores, endereçada ao dispositivo de número um e registrador inicial zero.

Tabela 25: Exemplo de requisição da função 03 (Modbus).

Endereço	0x01	1
Função	0x03	3
Primeiro registrador	0x00	0
	0x00	
Quantidade	0x00	10
	0x10	
CRC	0x06	6
	0x44	68

Uma vez recebidos, os dados são armazenados em um *array* e o algoritmo de cálculo do CRC é aplicado pela primeira vez. Antes disso, no entanto, é feita uma rápida comparação entre o endereço do microcontrolador o primeiro byte da mensagem, para certificar que o pacote recebido está no destinatário correto. O diagrama apresentado na Figura 14 foi transformado no seguinte pedaço de código:

```

check = 0xffff;
for (n = 0; n < 3; n++)
{
    check = check ^ msg[n];
    for (i = 8; i > 0; i--)
    {
        if (check & 0x0001)
            check = (check>>1) ^ 0xA001;
        else
            check >>= 1;
    }
}

```

O valor obtido em “check” é um número de 16 bits. Comparando este valor, calculado para cada byte do *array* “msg[n]”, é possível determinar se houve algum

erro de recepção. Se for comprovada a existência de erros, o programa irá ignorar a solicitação.

Outra verificação adicional é realizada neste ponto. A solicitação de endereços de registradores e quantidade é comparada com as posições de memória alocadas dentro do microcontrolador. Caso exista algum erro (quantidade de registradores solicitados é maior do que os disponíveis, por exemplo), a resposta à requisição será um código de exceção.

No caso da verificação ser aceita e nenhuma exceção gerada, o *software* irá buscar cada um dos valores solicitados e montar a mensagem de saída. Neste ponto é aplicado o cálculo do CRC pela segunda vez.

Se tudo ocorreu bem até aqui, a mensagem é enviada pela rede de volta ao mestre, no padrão da Tabela 16, e o programa retorna para a rotina principal até ser interrompido por uma nova solicitação.

4.5.3 Calibração por software

Este processo de calibração tem por base o conhecimento de duas fontes de erro na medição de temperatura a partir dos termistores. Ambas já foram estudadas neste trabalho.

O propósito da calibração, então, é eliminar ou minimizar o efeito destas duas fontes de erro na medida final de temperatura.

A primeira delas diz respeito a resistência interna do circuito multiplexador, parâmetro apresentado pela primeira vez na seção 4.4. Este valor contribui com uma incerteza de, no máximo, 4% sobre o valor da resistência do NTC, o que é um erro relativamente pequeno, mas considerável quando o termistor está operando a baixas temperaturas.

O segundo parâmetro, muito mais influente, está relacionado com a baixa confiabilidade sobre o valor nominal dos termistores utilizados. O fabricante fornece uma tolerância de 5%, como mostrado no final da seção 4.3.1 (Caracterização do sensor), sobre o valor medido entre termistores do mesmo tipo e lote.

Isto significa que, para uma dada mesma temperatura, devido a essas

incertezas, o sistema irá informar valores de temperatura diferentes em cada ponto do silo, invalidando a proposta original do sistema de termometria.

A proposta de calibração por *software* surge para normalizar os valores dos sensores quando em equilíbrio térmico. Para que isso seja feito, no entanto, é preciso considerar a premissa de que todos os valores de incerteza sejam calculados sobre o valor dos termistores linearizados. Assim, qualquer variação pode ser interpretada como um deslocamento (*offset*) de sua curva de resposta para cima ou para baixo.

Isto é comprovado através do gráfico da Figura 36. A linha contínua do centro é a resposta de tensão do circuito condicionador, ou seja, a mesma resposta apresentada na Figura 28. A linha tracejada logo inferior à linha central foi traçada a partir do acréscimo de 5% sobre o valor do termistor, apenas. Já a linha mais de baixo, traço e ponto, considerou um acréscimo de 10%. As linhas simétricas superiores foram traçadas através de decréscimos do valor de resistência do NTC. Pode-se perceber que, de fato, a condição de linearidade é satisfeita.

Foi proposto e aplicado, então, o método descrito a seguir para calibração dos sensores. Este método, no entanto, requer que todos eles estejam na mesma temperatura, em repouso, caso contrário seu uso é completamente desaconselhado.

Uma vez que a condição sugerida for satisfeita, se espera que todos os termistores tenham a mesma resistência elétrica entre seus terminais, o que se provou inverídico. Então basta pressionar a chave de toque do sistema por alguns segundos para acionar a rotina de calibração. Esta rotina irá, então, medir e armazenar o valor de todos os sensores conectados. Da soma dos valores medidos e com a quantidade de sensores, é possível obter a média aritmética. Esta média é, finalmente, subtraída dos valores de cada um dos sensores e o resto desta subtração é armazenado em registradores cujo endereço corresponda ao do sensor do qual a amostra foi extraída.

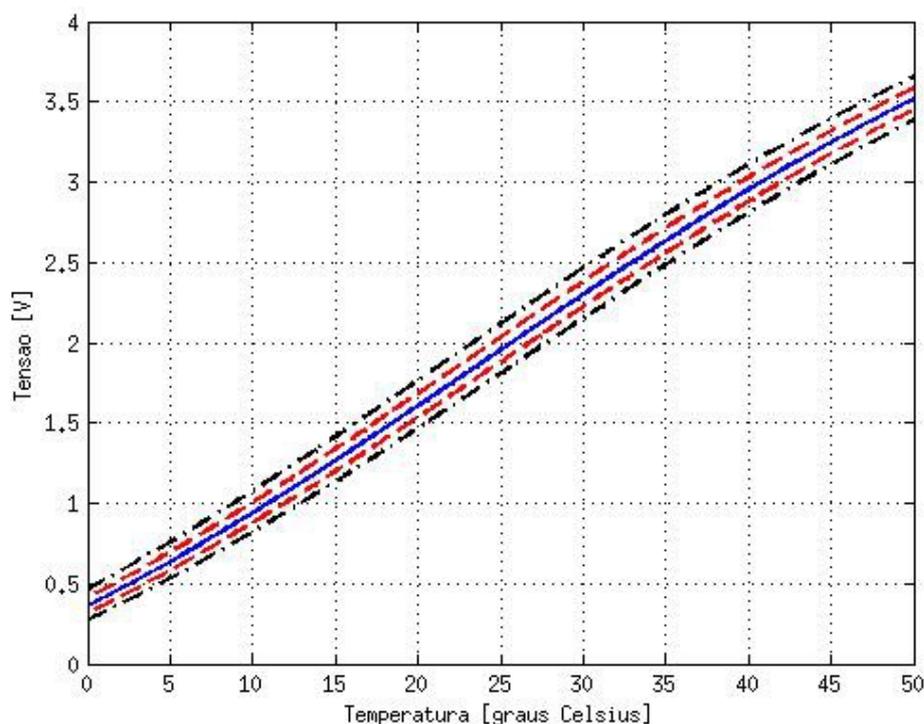


Figura 36: Efeito da variabilidade da resistência do NTC na resposta do circuito condicionador.

Este resto representa, então, o desvio em relação à curva de resposta esperada. A partir da próxima medição, o sistema passará a somar (ou subtrair) este desvio de cada uma das medidas, formando um valor normalizado.

Este valor poderá, finalmente, ser usado como comparativo com os demais pontos de temperatura do silo. Muito embora o processo possa aumentar a incerteza sobre o valor verdadeiro (convencional) da temperatura, ele garante que dois pontos do silo, caso estejam com a mesma temperatura, exibam informação de igual magnitude, o que é mais importante, neste caso.

4.6 Etapa 5: Comunicação

A comunicação entre os blocos do sistema se dará fundamentalmente através de dois dispositivos principais: o microcontrolador e o computador. Um diagrama de blocos simplificado pode ser observado na Figura 37.

É evidente que, para que se possa estabelecer uma comunicação entre ambos os blocos apresentados, é necessário dispor de todos elementos citados. Em

especial, é importante que o sistema tenha capacidade de comunicação através de um bloco específico.

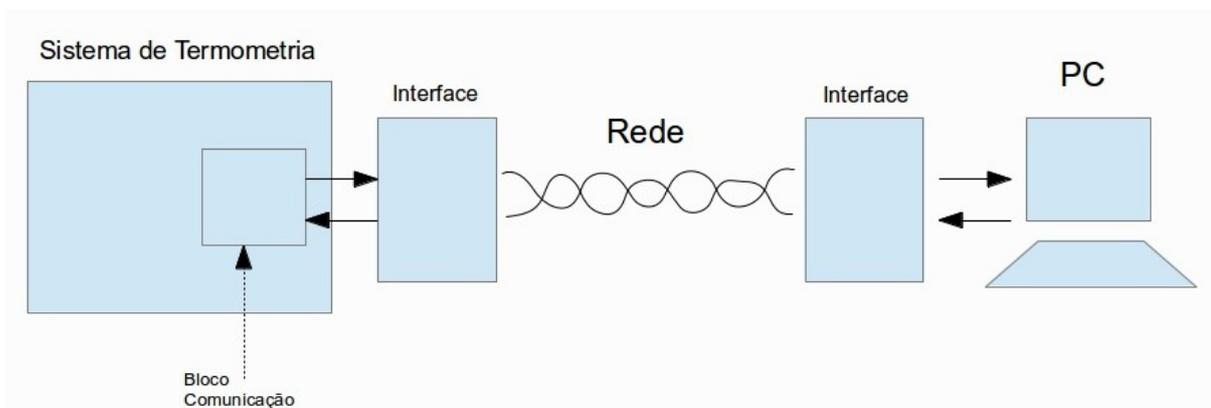


Figura 37: Diagrama de comunicação entre o sistema e o computador.

Desta forma, aprofundando o detalhamento do diagrama, pode-se enxergar a etapa de comunicação do sistema como um bloco genérico com entradas e saídas, o que é uma boa representação de um circuito elétrico. Este bloco é apresentado na Figura 38.

São componentes desta etapa:

- alimentação positiva;
- referencial de tensão;
- entrada de dados (transmissão);
- saída de dados (recepção);
- controle de fluxo;
- saída não-inversora (A);
- saída inversora (B).

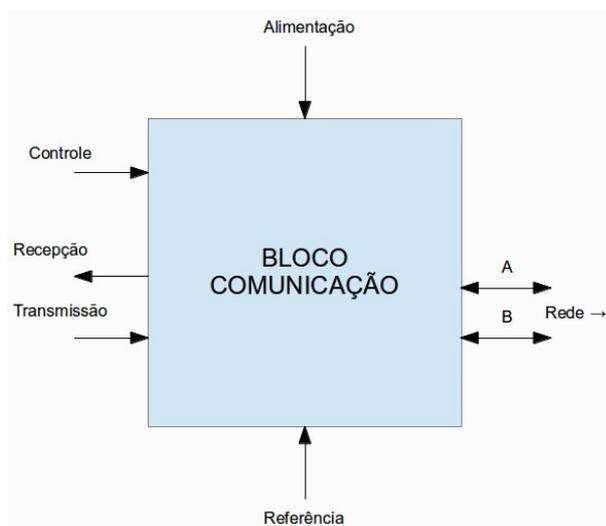


Figura 38: Bloco de comunicação do sistema de termometria.

A partir deste diagrama, foi desenvolvido o circuito Figura 39, abaixo. Este módulo faz o papel de interface entre o sistema de comunicação serial do microcontrolador (USART) e a rede RS-485.

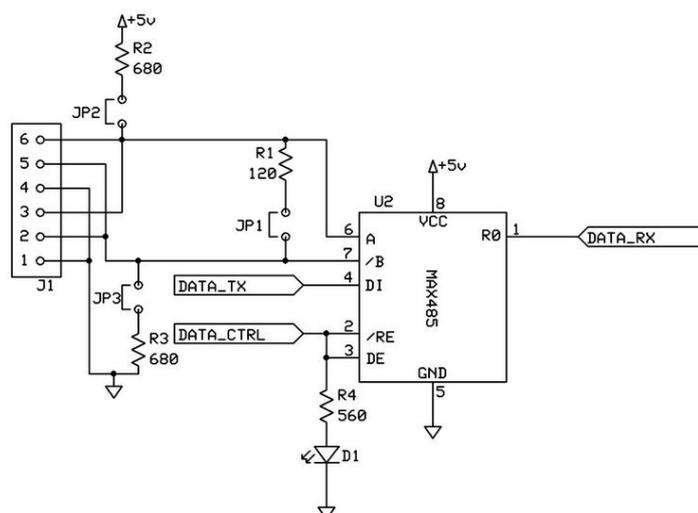


Figura 39: Circuito de comunicação.

Este circuito não é nada mais do que a aplicação prática de um módulo transceptor RS-485. Figura 40 foi extraída do *datasheet* de um transceptor RS-485/RS-422, fabricado pela *Maxim*. Note a semelhança deste componente com a estrutura sugerida na Figura 38.

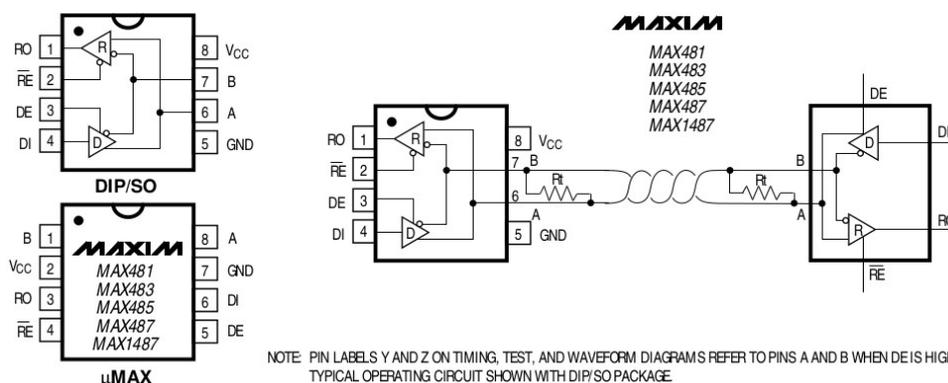


Figura 40: Transceptor RS-485/RS-422 da Maxim.

Fonte - Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers

Datasheet. MAXIM.

Na parte do computador foi utilizado o dispositivo da Figura 41 para fazer a interface entre a porta USB e a rede RS-485. Trata-se de um conversor fabricado pela *Telemecanique*, da *Schneider Electric*. Após a instalação dos *drivers* proprietários, o sistema operacional reconhece a porta USB do computador, na qual o módulo está conectado, como uma porta de comunicação serial (COM).

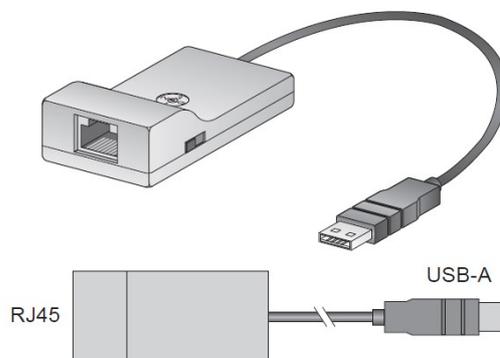
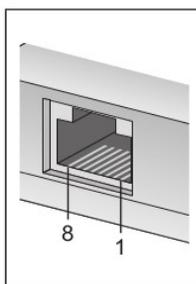


Figura 41: Conversor RS-485/USB.

Fonte – *Schneider TSXCUSB485 Converter Reference Guide. Telemecanique (Schneider Electric)*.

A saída deste dispositivo foi ligada ao circuito formado pelo transceptor, na placa principal, através de um cabo de rede RJ-45, cuja pinagem é apresentada na Figura 42.



RJ45			
1	N.C.		
2	N.C.		
3	PMC	Port Mode Control	
4	D1 (B)	Transceiver Terminal 1	
5	D0 (A)	Transceiver Terminal 0	
6	NDE	RS485 Driver Enable (INPUT)	
7	VP (OUT)	Power Supply (5V, 500 mA max)	
8	Common	Signal and power supply Common	

Figura 42: Pinagem do conversor TSX CUSB485.

Fonte – Schneider TSXCUSB485 Converter Reference Guide. Telemecanique (Schneider Electric).

Onde os pinos 4 e 5 são conectados, respectivamente, nos terminais A e B do transceptor (ao contrário do que indica a figura) e o pino 8 (*Common*) é a referência de tensão da linha serial.

4.6.1 Testes de comunicação

Para testar a comunicação entre os dois dispositivos (a placa e o computador), primeiramente foi fechado o elo de comunicação. Para isso, conectou-se o dispositivo de interface USB para RS-485 (Figura 41) no computador e este na placa do sistema de termometria através de um cabo de rede RJ-45 comum.

O programa utilizado para o teste se chama *ModLink Demo* e roda no sistema operacional Windows. Ao abrir o *software* é preciso configurar a porta na qual foi conectado o dispositivo. Esta porta pode ser encontrada no Gerenciador de Dispositivos do Windows, caso a lista seja muito extensa. Reiniciando o programa, ele irá automaticamente abrir a porta para a comunicação.

O passo seguinte foi configurar a comunicação conforme as características definidas no microcontrolador. Definiu-se um *baud rate* de 9600, transmissão de 8 bits sem paridade, um bit de parada, Modbus RTU e nenhuma sinalização. A Figura 43 mostra a tela de configuração do aplicativo (*Modbus Connection Options*).

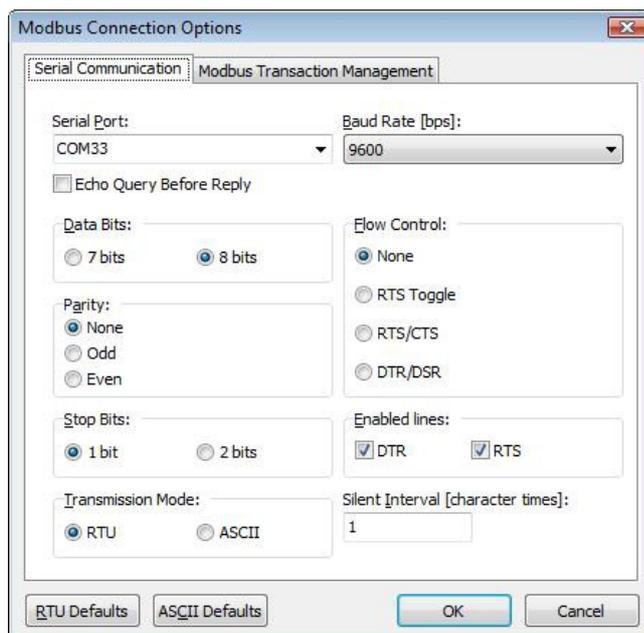


Figura 43: Configurações da comunicação Modbus.

Este programa possui as principais funções utilizadas no protocolo Modbus. O que interessa, no entanto, é apenas a função *Read Holding Registers*, que está na aba *Register Access*, como mostra a Figura 44.

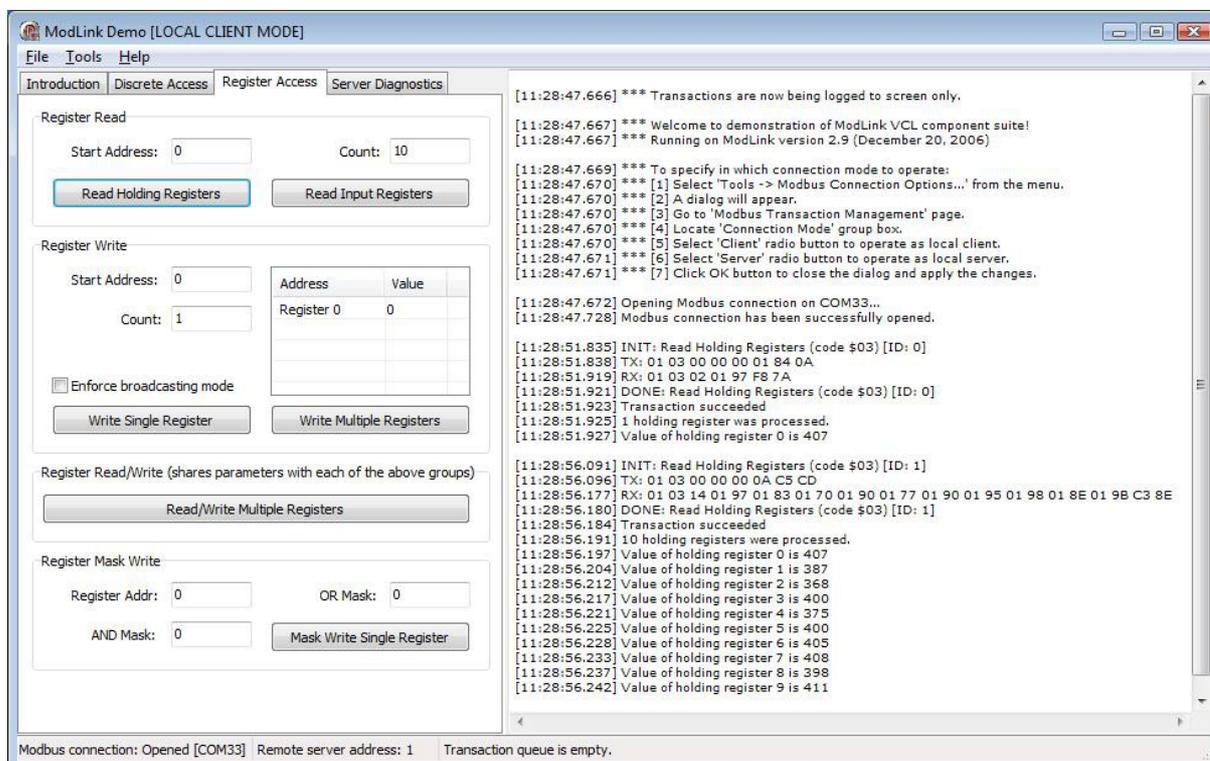


Figura 44: Tela de comunicação do programa ModLink Demo.

Esta imagem já representa um teste de comunicação realizado com sucesso. No quadro à direita o programa mostra o estado das transações e a resposta do microcontrolador à solicitação de leitura dos dez primeiros registradores (a contar do de número zero).

Os valores apresentados ainda não foram calibrados, mas este teste serviu para comprovar o funcionamento da comunicação. Concluída esta etapa, foi dado prosseguimento ao trabalho.

4.7 Etapa 6: Supervisório

O programa supervisório foi desenvolvido em Linguagem C# para sistema operacional Windows, apenas, através do *software Microsoft Visual Studio 2010*. Trata-se de uma solução completa para programação, compilação e depuração de código em uma ou mais linguagens à escolha do usuário.

São especificações básicas do programa supervisório:

- capacidade de se comunicar com uma ou mais placas do sistema de termometria, ou seja, ter a capacidade de gerar e de interpretar códigos e funções do protocolo Modbus;
- capacidade de ler e armazenar as informações coletadas;
- capacidade de verificar e informar erros de comunicação ou de leitura de sensores;
- mostrar um diagrama com todos os valores de temperatura lidos;
- permitir configuração de comunicação, tal como velocidade, paridade, porta, entre outras;
- ser de fácil utilização.

Da mesma forma que anteriormente, o programa foi dividido três etapas para mais facilmente solucionar o problema: comunicação, gerenciamento de informações e interface.

4.7.1 Comunicação

A parte de transmissão do programa seguiu os seguintes passos:

1. Listagem de todas as portas de comunicação disponíveis no computador através do comando “SerialPort.GetPortNames”;
2. Leitura das configurações de comunicação definidas pelo usuário:
 - Porta (COM);
 - *Baud Rate*;
 - Quantidade de bits (oito ou nove);
 - Paridade (par ou ímpar);
 - Número de bits de parada (1, 1,5 ou 2).
3. Leitura das configurações de mensagem do protocolo Modbus:
 - Endereço do dispositivo destino;
 - Endereço do primeiro registrador;
 - Quantidade de registradores a serem lidos.
4. Criação de uma “SerialPort”;
5. Configuração dos parâmetros e abertura da porta através da propriedade “.Open”;
6. Montagem da mensagem a ser transmitida;
7. Envio da mensagem através de “SerialPort.Write”.

Após o envio o programa aguarda pela resposta e lê os dados recebidos através da propriedade “SerialPort.ReadByte”. Finalmente o programa verifica a integridade da mensagem através do cálculo do CRC-16.

4.7.2 Gerenciamento de informações

Esta etapa diz respeito a como os dados são tratados uma vez que recebidos via interface de comunicação serial. Uma vez que o programa supervisor funciona como o mestre, todas as requisições feitas pelo *software* já foram analisadas

previamente, ou seja, a ordem dos registradores solicitados já foi predeterminada antes mesmo da recepção dos respectivos valores.

Todo o trabalho da etapa de gerenciamento é organizar os dados em suas posições de memória, de forma a não trocar nenhum de lugar. A correspondência de um registrador com sua respectiva posição em um pêndulo de sensores dentro do silo e também com sua posição no diagrama do programa supervisorio deve ser prevista ainda durante o desenvolvimento do *software*. Para facilitar, os dados foram lidos de baixo para cima e da direita para esquerda. Caberá ao montador, na hora de conectar os cabos dos sensores na placa, de verificar a ordem das ligações.

Através do protocolo, cada registrador é transmitido como um número de 16 bits que, quando convertidos, formam um número inteiro de 0 (zero) a 65535. Tanto o primeiro quanto o último valor foram utilizados para caracterizar erros nos sensores. O que interessa, realmente, é a faixa que vai de 74 (setenta e quatro) a 720 (setecentos e vinte). Este número representa o valor da conversão realizada pelo ADC do microcontrolador e já processado em seu interior.

Observando novamente a Figura 31 e conhecendo-se o processo utilizado que forneceu estes valores, constata-se que esta faixa tem uma relação linear com a faixa de temperatura de entrada do sistema. Aplicando a equação Error: Reference source not found e formatando o resultado para apresentar apenas uma casa decimal, é possível obter uma faixa de de 0,1 a 50,0, que representa a temperatura do sensor.

Esta conversão é realizada para cada um dos registradores e recebidos que são, então, escritos dentro dos rótulos reservados a cada um deles, dentro do diagrama do silo.

4.7.3 Interface

A Figura 45 apresenta a tela principal do programa supervisorio, que faz interface com o usuário. Seu projeto visa, principalmente, simplicidade e reduzida quantidade de configurações. Isto é devido a se tratar de apenas um protótipo, uma aproximação de um produto final, mas, mais do que isso, é importante que o sistema seja acessível a pessoas de todos os graus de conhecimento em informática que

irão, eventualmente, interagir com o programa.

Ao clicar no botão “ON/OFF”, posicionado no canto superior esquerdo da tela, o rótulo em vermelho ao lado passará de “DESLIGADO” para “LIGADO” e se tornará verde. Neste estado, o programa irá, continuamente, enviar a solicitação de “*Read Holding Registers*” (ver seção 3.6.4) para a rede. A placa que contiver o mesmo endereço do valor inserido no campo “Placa” deverá responder. De posse dos dados, o aplicativo fará a análise dos dados, conforme descrito anteriormente, e irá preencher os valores dentro dos rótulos expostos na imagem.

Como foi exposto na seção anterior, os dados foram organizados de baixo para cima e da direita para a esquerda. Assim, o sensor de número um é representado pelo rótulo (caixa de texto) inferior esquerdo dentro do diagrama do silo, e o último sensor, de número 25, corresponde ao rótulo superior à direita.



Figura 45: Tela principal do programa supervisorio.

Como funcionalidade adicional, o sistema compara o valor de temperatura de cada bloco com valores definidos nos campos “Faixa de temperatura” - “min” e “max”. Caso a temperatura seja menor do que a mínima estipulada, o rótulo recebe cor de fundo azul. Se for maior do que a máxima, o fundo se torna vermelho. Caso a

temperatura esteja dentro da faixa, o bloco permanece verde. Ainda, se o valor recebido corresponder a um dos valores destinados a notificações de erro, o rótulo irá exibir a palavra “FALHA” sobre um plano de fundo vermelho escuro.

O quadro na lateral esquerda exibe os registros de comunicação, isto é, a cada tentativa de comunicação, o sistema informará se houve sucesso, erro de CRC ou também qualquer um dos erros referentes ao protocolo, como especificados na Tabela 18.

Além disso, o programa também permite configurar as propriedades da comunicação, conforme exibidas no quadro inferior esquerdo da janela. Ali é possível selecionar a porta do computador na qual está conectado o dispositivo de interface com a rede e também a velocidade de comunicação (*baud rate*), o número de bits enviados por pacote, a paridade utilizada e a quantidade de bits de parada (*stop bits*).

É possível ainda definir o intervalo entre solicitações através do campo “Intervalo de atualização”. O valor de tempo é dado em milissegundos. Caso o usuário não queira que o programa rode automaticamente, é possível utilizar o botão “Atualizar” para gerar uma única solicitação para o dispositivo configurado e atualizar os valores do diagrama.

Finalmente, os campos “Endereço inicial” e “Quantidade” se referem, respectivamente, ao endereço do primeiro registrador lido na placa e à quantidade de registradores que devem ser lidos a contar deste.

5 FINALIZAÇÃO DO PROJETO E RESULTADOS

A partir daqui, resta apenas os detalhes finais de prototipação e testes. Depois de montado, o sistema foi testado em bancada e sofreu diversos ajustes de *software* e de *hardware*, necessários para um bom funcionamento. As seções seguintes descrevem o processo de fabricação das placas, bem como custos e outras particularidades.

5.1 Placa de circuito impresso

O *layout* das placas de circuito impresso foi desenvolvido com o *software* gratuito *ExpressPCB*, da união dos circuitos de alimentação (Figura 18), comunicação (Figura 39), condicionamento do sinal (Figura 30) e do microcontrolador (Figura 34). A Figura 46 é composta pela sobreposição do lado cobreado da placa (em verde), das ilhas (em vermelho) e da camada grafada na superfície das placas e contorno dos componentes (em amarelo).

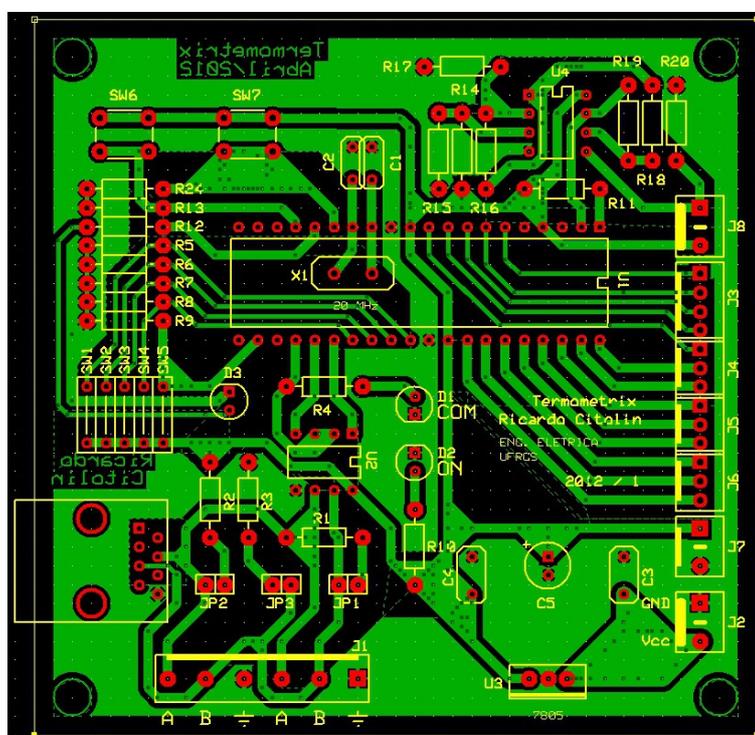


Figura 46: Placa do circuito principal.

A etapa de multiplexação, cujo circuito pode ser observado na Figura 33, foi feito separadamente da placa principal, o que permite o uso de mais do que uma placa, dependendo do número de sensores. A placa do protótipo projetada está na Figura 47.

Na parte superior, foram deixados os conectores de endereçamento dos sensores, habilitação do MUX, alimentação e saída do sensor. Na parte inferior estão os conectores dos sensores, nos quais são ligados os pêndulos sensitivos.

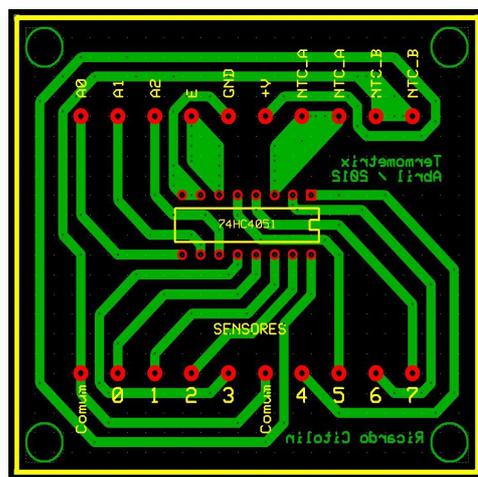


Figura 47: Placa do circuito multiplexador.

5.2 Materiais e custos

A Tabela 26 apresenta uma lista de todos os materiais utilizados para a confecção das placas de protótipo apresentadas nas Figuras 46 e 47.

Tabela 26: Lista de materiais e custos.

COMPONENTE	QUANTIDADE	PREÇO UNITÁRIO	PREÇO TOTAL
Barra de pinos	1	R\$ 1,35	R\$ 1,35
Cabo 0,2mm	30	R\$ 0,30 (metro)	R\$ 9,00
Capacitor 100nF	1	R\$ 0,20	R\$ 0,20
Capacitor 10 μ F/25V	1	R\$ 0,20	R\$ 0,20
Capacitor 15pF	2	R\$ 0,20	R\$ 0,40
Capacitor 330nF	1	R\$ 0,20	R\$ 0,20
Chave de toque	2	R\$ 0,50	R\$ 1,00

COMPONENTE	QUANTIDADE	PREÇO UNITÁRIO	PREÇO TOTAL
Chave Dip-Switch 6p.	1	R\$ 2,00	R\$ 2,00
CI 74HC4051	3	R\$ 1,50	R\$ 4,50
CI LM358	1	R\$ 1,00	R\$ 1,00
CI MAX485	1	R\$ 2,00	R\$ 2,00
Conector 2p.	15	R\$ 0,60	R\$ 9,00
Conector 3p.	14	R\$ 0,90	R\$ 12,60
Conector RJ-45	1	R\$ 1,70	R\$ 1,70
Cristal 20 MHz	1	R\$ 1,80	R\$ 1,80
Dissipador	1	R\$ 1,50	R\$ 1,50
LED	3	R\$ 0,20	R\$ 0,60
NTC 5 k Ω	25	R\$ 0,20	R\$ 5,00
PIC16F877A	1	R\$ 12,00	R\$ 12,00
Placa 10x10 cm	3	R\$ 1,50	R\$ 4,50
Regulador 7805	1	R\$ 1,00	R\$ 1,00
Resistor 10 k Ω	8	R\$ 0,10	R\$ 0,80
Resistor 12 k Ω	1	R\$ 0,10	R\$ 0,10
Resistor 120 Ω	1	R\$ 0,10	R\$ 0,10
Resistor 22 k Ω	1	R\$ 0,10	R\$ 0,10
Resistor 3,9 k Ω	1	R\$ 0,10	R\$ 0,10
Resistor 47 k Ω	3	R\$ 0,10	R\$ 0,30
Resistor 560 Ω	3	R\$ 0,10	R\$ 0,30
Resistor 680 Ω	2	R\$ 0,10	R\$ 0,20
Soquete CI 16p.	3	R\$ 0,30	R\$ 0,90
Soquete CI 40p.	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Soquete CI 8p.	2	R\$ 0,20	R\$ 0,40
TOTAL			R\$ 75,35

Para a construção deste protótipo, composto por uma placa principal, três placas de multiplexação e cinco conjuntos de sensores, foi gasto, aproximadamente, R\$ 75,35. Tal valor é um custo muito reduzido, considerando que todos os componentes foram adquiridos a varejo e o valor agregado do sistema, dada quantidade de tempo, conhecimento e pesquisa utilizados, que não pode ser expresso em números.

5.3 Prototipação e testes

O protótipo do sistema foi construído a partir da confecção das placas de circuito impresso, cujo *layout* foi apresentado na seção 5.1. A Figura 48 mostra a placa principal, com todos os componentes soldados. O cabo de rede, que conecta a placa ao computador, está na parte inferior esquerda. Os conectores a direita foram utilizados para endereçar os multiplexadores, cuja placa é mostrada na Figura 49.

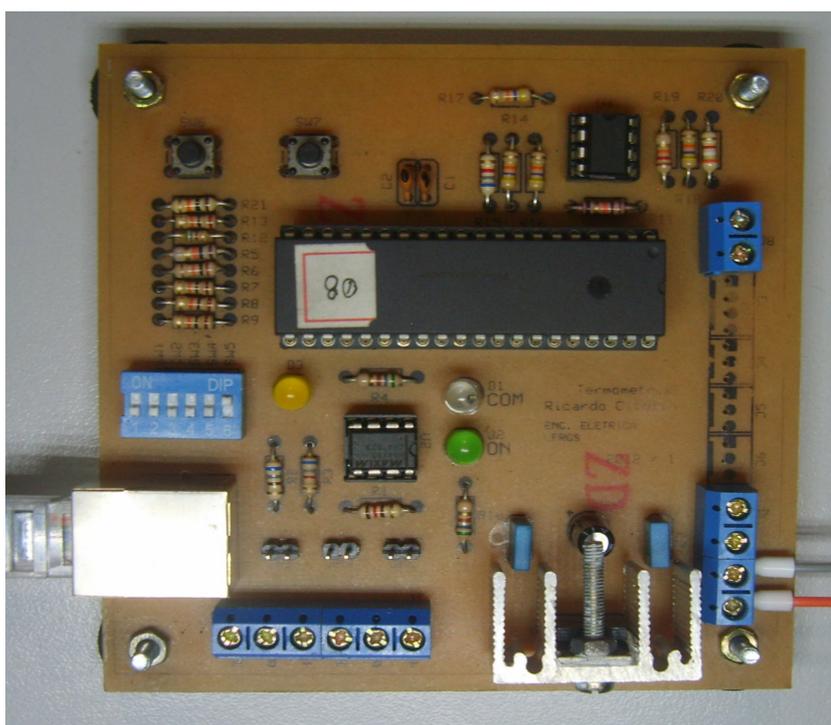


Figura 48: Placa principal (microcontrolador).

Foram utilizadas duas placas de MUX, que foram confeccionadas lado a lado para otimização do espaço. Juntas, elas permitem a conexão de até 16 sensores (parte inferior). Na figura mostrada, estão conectados apenas dez sensores, cujos bornes têm coloração cinza. Os bornes de cor branca representam os condutores comuns dos cabos de sensores.

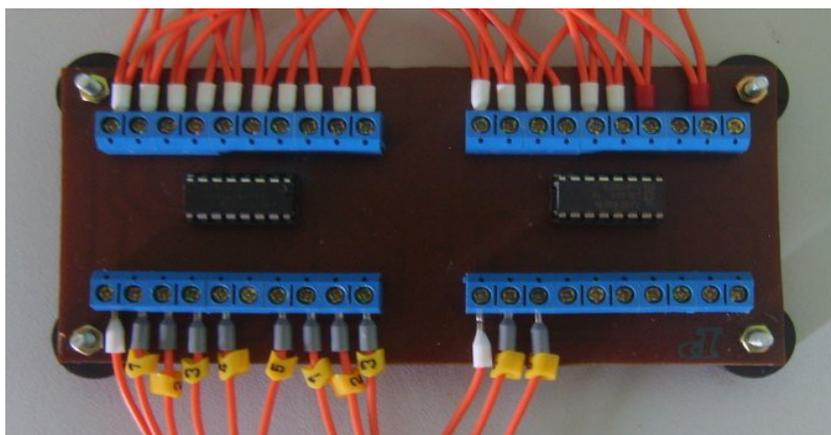


Figura 49: Placa dos multiplexadores.

A Figura 50 apresenta o esquema de ligação dos termistores, tal qual sugerido no esquema elétrico da Figura 33. O filamento comum, que na imagem aparece sem isolamento, é o mesmo conector com borne branco apresentado anteriormente. Estes protótipos de sensores foram construídos para simular os pêndulos que irão dentro do silo, conforme a ideia inicial (ver Figura 7). Esta montagem foi revestida com uma capa de espaguete termocontrátil, com o intuito de proteger e isolar os termistores.



Figura 50: Esquema de conexão do protótipo dos sensores.

O sistema de teste completo é apresentado na Figura 51.

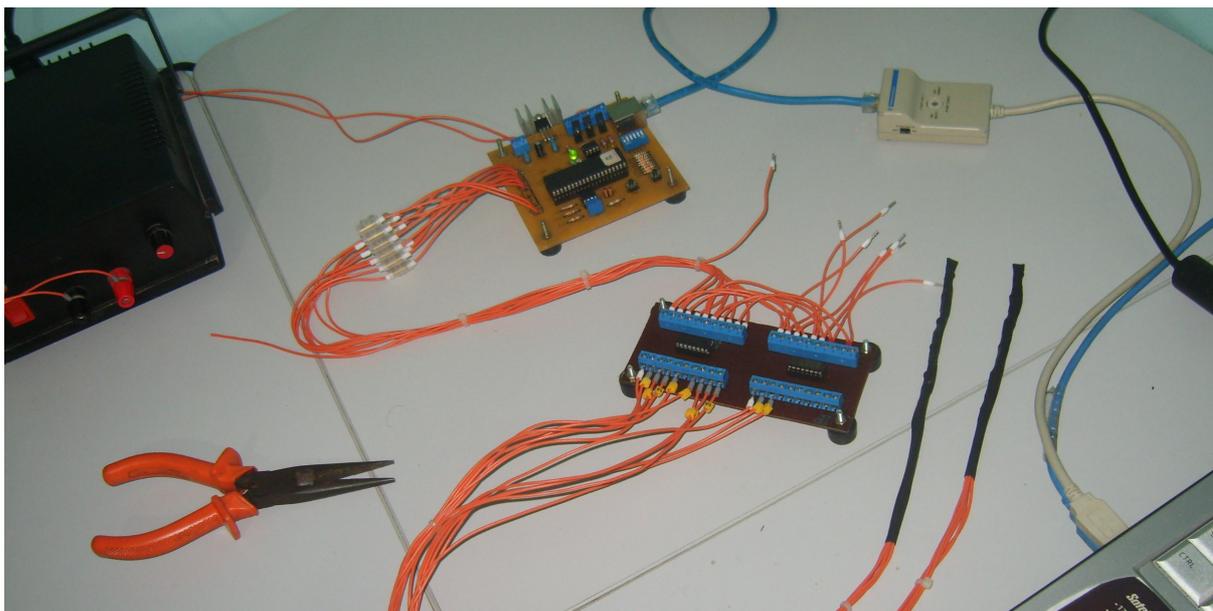


Figura 51: Protótipo completo na bancada de testes.

Foram conectados dois conjuntos de cinco termistores para o primeiro teste. Entretanto, os dois últimos foram curto-circuitados para verificação da detecção de falha. Uma vez acionado o circuito e finalizado o tempo de estabilização e contagem dos sensores, iniciou-se o programa supervisor no computador.

A tela da Figura 52 mostra a primeira requisição realizada e os valores obtidos dos sensores. É importante observar que, apesar dos valores de temperatura ter relativa proximidade entre si, eles não são idênticos, como era de se esperar, uma vez que estão na mesma temperatura ambiente. Os demais valores representam a tentativa de leitura de sensores não conectados (abertos) ou em curto-circuito; portanto, o sistema assume, como mostrado, que são sensores em “FALHA”.

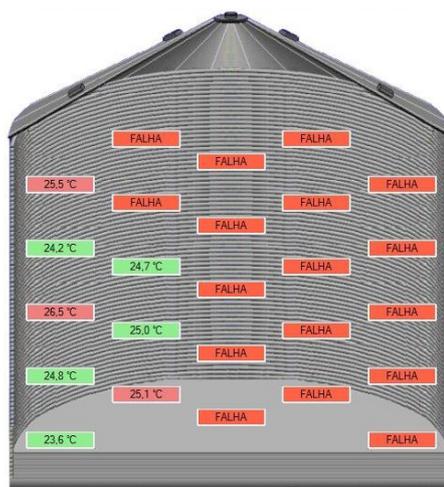


Figura 52: Leitura dos sensores (sem calibração por software).

O passo seguinte foi testar a rotina de calibração, como discutido na seção 4.5.3. Após manter o botão pressionado por alguns segundos, o sistema rodou o código de calibração, apresentando a seguinte tela Error: Reference source not found, após nova atualização:

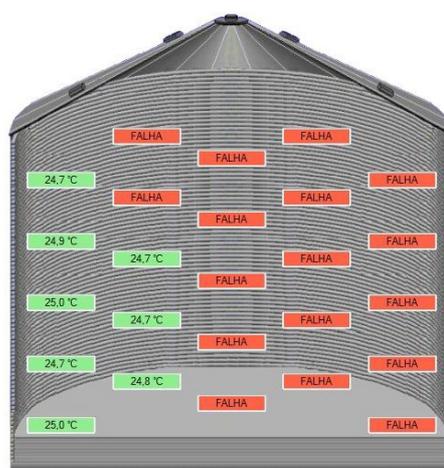


Figura 53: Leitura dos sensores após calibração.

Agora os sensores apresentam a mesma temperatura, apenas com a diferença de alguns décimos de grau, conforme o caso, o que significa que seu ajuste de *offset* foi corrigido pelo *software*. Este tipo de comportamento é muito mais eficiente na detecção de anormalidades do que o anterior.

Comprovado o funcionamento do sistema, encerrou-se a etapa de testes.

5.4 Resultados gerais e propostas de melhorias

Como apresentado nas seções anteriores, foi possível desenvolver um sistema de termometria que atende a todos os critérios de projeto especificados. Apesar da necessidade de calibração, os sensores apresentaram uma boa repetibilidade de informações, facilitando o monitoramento e a visualização de focos de aquecimento, caso existam.

Entretanto, como produto, o sistema ainda carece de uma série de melhorias. Algumas delas, as principais, podem ser definidas como:

- Calibração via *software*: a proposta é eliminar todo e qualquer contato eletromecânico da placa, pois, uma vez que ela vai ficar em um ambiente sujeito a umidade e poeira, estes dispositivos irão acelerar o processo de degradação. Além disso, é mais viável que o processo possa ser acionado a partir da sala de controle, sem a necessidade de se locomover até o ponto onde o sistema foi instalado;
- Endereçamento: o endereço da placa na rede é feito através de uma chave de cinco posições, permitindo valores de 0 a 31. É interessante poder endereçar a placa com números de 0 a 255, suportados pelo protocolo Modbus;
- Eliminar *jumpers*: tal como sugerido no primeiro item, elementos e contatos abertos estão sujeitos à rápida deterioração por efeito das intempéries. Essas partes podem ser substituídas por outras, isoladas;
- Fonte de alimentação: da forma como foi construído, o sistema precisa de uma alimentação contínua, nem sempre disponível em meio industrial. Propõe-se, então, o desenvolvimento de uma fonte chaveada, que suporte a tensão alternada da rede;
- Multiplexadores: a placa de multiplexação, que inicialmente foi projetada como módulos a serem conectados na placa principal, pode se tornar parte integrante da mesma. Assim, uma única placa facilitaria a instalação e aumentaria a rigidez do sistema.

6 CONCLUSÕES

Do ponto de vista de projeto, foi possível desenvolver um sistema de termometria capaz de caracterizar a temperatura de um número finito de pontos dentro do silo. O sistema permite, de forma simplificada, que o usuário final faça não apenas o monitoramento, mas o controle do produto armazenado. Esta ideia abre oportunidade para automatização e realização de uma série de melhorias no processo de armazenagem. É, mais do que um simples produto, um incentivo para o desenvolvimento tecnológico no setor.

Os sensores utilizados para medição de temperatura – termistores do tipo NTC de baixo custo e alta tolerância – foram linearizados através de uma ponte de Wheatstone e condicionados por um amplificador diferencial para remoção do nível DC presente. Através do conversor A/D do microcontrolador, foi possível armazenar os valores lidos, calcular a temperatura relacionada e disponibilizar esses dados para um *software* supervisor através de uma rede RS-485 com protocolo Modbus.

De forma geral, foi possível desenvolver um sistema de termometria funcional utilizando apenas componentes de baixo custo. Este sistema, no entanto, não apresenta grande veracidade entre os valores apresentados como resposta e a temperatura real do ambiente. Isto é resultado da alta tolerância existente entre os termistores, cujo processo de calibração é complexo e pouco eficiente. Para calibrar o NTC é necessário o ajuste de três parâmetros de sua curva exponencial: a resistência de referência, a temperatura de referência e o coeficiente térmico, todos desconhecidos. Por este motivo, o uso do sistema fica limitado na detecção dos focos de aquecimento dentro do silo, apenas.

Finalmente, ficam como sugestões de melhoria para o projeto, o uso de sensores mais eficientes, com uma exatidão maior; a aplicação de outros tipos de sensores para auxiliar no processo de calibração e o desenvolvimento de uma cadeia de medidas com a faixa de valores de cada bloco e suas devidas incertezas.

7 REFERÊNCIAS

- [1] IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema de Contas Nacionais**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/pib/defaultcnt.shtm>>. Acesso em: 16 mar. 2012.
- [2] Wikipédia, a enciclopédia livre. **Agropecuária**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Agropecuária>>. Acesso em: 18 mar. 2012.
- [3] USDA/FAS. United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. **Sugar: World Markets and Trade (November, 2011)**. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/>>. Acesso em: 19 mar. 2012.
- [4] WTO. World Trade Organization (Organização Mundial do Comércio). **Mechandise Trade, 2010**. Disponível em: <<http://www.wto.org>>. Acesso em: 15 mar. 2012.
- [5] USDA/FAS. United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. **World Agricultural Production**. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/wap/current/default.asp>>. Acesso em: 15 mar. 2012.
- [6] FOME ZERO. Página oficial. Governo brasileiro. Disponível em: <<http://www.fomezero.gov.br/programas-e-acoas/eixo2.htm>>. Acesso em: 18 mar. 2012.
- [7] IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola no Brasil**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/defaulttab.shtm>>. Acesso em: 15/03/2012.
- [8] IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Participação na produção agrícola por estado**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15/03/2012.
- [9] CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Capacidade estática de armazenamento**. Disponível em: <<http://conab.gov.br/detalhe.php?a=1077&t=2>> ou <<http://www.sisdep.conab.gov.br/capacidadeestatica>>.

Acesso em: 16 mar. 2012.

- [10] D'ARCE, Marisa A. B. Regitano. **Pós colheita e armazenamento de grãos**. Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição. ESALQ. USP. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/lan/pdf/Armazenamentodegraos.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2012.
- [11] CASEMG. Companhia de Armazens e Silos do Estado de Minas Gerais. **Armazenagem, secagem e processo de conservação dos grãos**. Disponível em: <<http://www.casemg.com.br/index.html>>. Acesso em: 10 mar. 2012.
- [12] HARA, Tetuo. **Armazenagem de grãos**. Disponibilizado na página do INMETRO, Instituto Brasileiro de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, em: <<http://www.inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/PalestraArmazenagem.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2012.
- [13] INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br>>.
- [14] BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas, v.1**. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 2v. ISBN: 85-216-1496-9.
- [15] MICROCHIP. **PIC16F87XA Data Sheet**. Microchip Technology Inc, 2003.
- [16] MICROCHIP. **PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet**. Microchip Technology Inc, 2004.
- [17] DEITEL, H. M. **C# - Como Programar**. São Paulo: Editora Pearson Education, 2003. 1154 p. ISBN: 85-346-1459-8.
- [18] WIKIPEDIA. **RS-485**. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/RS-485>>. Acesso em: 03 jun. 2012.
- [19] MARAIS, Hein. **RS-485/RS-422 Circuit Implementation Guide**. AN-960 Application Note. ANALOG DEVICES: 2008.
- [20] MODBUS Organization. **Modbus Application Protocol V1.1b**. Especificações do protocolo Modbus de 28 de dezembro de 2006. Disponível em:

<www.modbus.org>.

[21] FLUKE. **Calibration Information and Support Manuals**. Disponível em:
<<http://www.fluke.com/fluke/usen/Digital-Multimeters/Fluke-16.htm?PID=56018>>. Acesso em: 03 jun. 2012.