

Sistemas de Aquisição de Dados Baseados em Microcontrolador

José Alexandre de França

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba - Campus II como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Raimundo Carlos Silvério Freire, Dr.

Orientador

Gurdip Singh Deep, Ph.D.

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©José Alexandre de França, Junho de 1997

Sistemas de Aquisição de Dados Baseados em Microcontrolador

José Alexandre de França

Dissertação de Mestrado apresentada em Junho de 1997

Raimundo Carlos Silvério Freire, Dr.

Orientador

Gurdip Singh Deep, Ph.D.

Orientador

José Felício da Silva, Dr.

Componente da Banca

José Sérgio da Rocha Neto, Dr.

Componente da Banca

Campina Grande, Paraíba, Brasil, Junho de 1997



F814s

Franca, Jose Alexandre de.

Sistemas de aquisicao de dados baseados em microcontrolador / Jose Alexandre de Franca. - Campina Grande, 1997.

96 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal da Paraiba, (Campina Grande) Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Aquisicao de Dados - Microcontrolador. 2. Sistema de Aquisicao de Dados. 3. Engenharia Eletrica. 4. Dissertacao I. Konig, Annemarie, Prof. Dr. II. Ceballos, Beatriz S. O., Prof. Dr. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

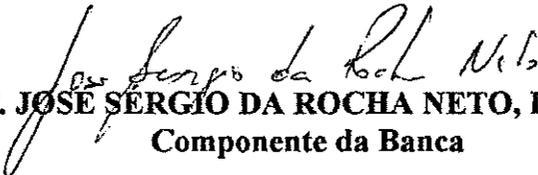
CDU 621.391(043)

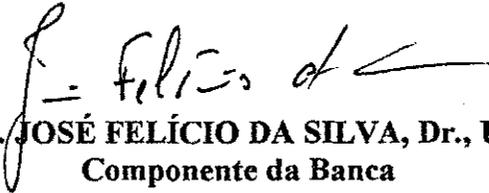
SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS BASEADOS EM MICROCONTROLADOR

JOSÉ ALEXANDRE DE FRANÇA

Dissertação Aprovada em 03.07.1997


PROF. RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFPB
Orientador


PROF. JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFPB
Componente da Banca


PROF. JOSÉ FELÍCIO DA SILVA, Dr., UFPB
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Julho - 1997

Dedicatória

À minha mãe, quem primeiro acreditou em mim.

À minha esposa, pela sua companhia vinte e quatro horas por dia a quase três anos.

A meu filho Tiago, pelos vários momentos de alegria a mim proporcionados em seus poucos anos de vida.

Agradecimentos

Ao professor Raimundo Carlos Silvério Freire, pela incansável e dedicada orientação, sem a qual não seria possível a conclusão deste trabalho e ao professor Gurdip Singh Deep, pela sua imensa paciência e conversas esclarecedoras.

Ao professor Antônio Marcus N. Lima, pelas sugestões que contribuíram para elevar o nível do trabalho.

Aos colegas de laboratório, pela amizade.

À Minha esposa, pelas correções no texto do trabalho.

Aos colegas Geovany, pelo apoio técnico, e Ícaro, pela ajuda na última fase do projeto.

À CAPES que financiou a realização deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho apresenta uma discussão sobre sistemas de aquisição de dados, em especial os baseados em microcontroladores. Para isto, são apresentadas as suas funções principais e alguns conceitos relacionados a esse tipo de sistema.

As principais opções de projeto usadas nestas aplicações também são discutidas: suas principais características, vantagens, desvantagens e arquiteturas básicas.

Discute-se também a aquisição de dados remotos, de difícil acesso, ou em ambientes hostís, assim como todas as considerações adicionais a esse tipo de sistema: armazenamento, codificação e transmissão de dados, consumo, dimensões físicas, etc.

Para melhor ilustrar as considerações necessárias ao projeto de sistemas de aquisição de dados, quatro sistemas são analisados. Suas especificações de projeto, testes realizados e os resultados adquiridos, também são apresentados.

Abstract

The present essay presents a discussion about data acquisition systems, specifically the ones based in microcontrollers. Therefore, its main functions and some concepts related to this kind of system are presented.

The main project options used in these applications are also discussed, such as, its main characteristics, advantages, disadvantages and basic design. It is also discussed data acquisition of remote places, difficult access places and hostile environment, as well as all additional considerations to this kind of system, such as, storage, data codification and transmission, energy consumption, physical dimensions, etc.

In order to better illustrate the necessary considerations to the data acquisition systems, four systems are analysed. Its projects specifications, experiments done and the acquired results are also presented.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Tabelas	x
Lista de Figuras	xi
Lista de Símbolos e Abreviaturas	xiv
1 Introdução	1
2 Sistemas de Aquisição de Dados	4
2.1 Definição	4
2.2 Blocos Funcionais	5
2.2.1 Transdutor	5
2.2.2 Condicionador	6
2.2.3 Aquisição, Análise e Apresentação dos Dados	9
2.3 Estrutura de Barramentos	10
2.4 Alternativas	10
2.4.1 Barramento GPIB	11
2.4.2 Barramento VXI	12
2.4.3 Comunicação Serial	13
2.4.4 Cartões de Aquisição	14
2.5 Três Perguntas sobre a Escolha do Sistema	18
2.6 Armazenamento e Apresentação dos Dados	20
2.7 Aquisição de Dados Remotos ou em Locais Especiais	22
2.8 Exemplos Discutidos	25
2.9 Principais Características do Microcontrolador MC68HC11	27
2.10 Conclusão	28

3	Aquisição de Dados para Manutenção Preditiva em Sistemas Elétricos	29
3.1	Métodos de Medição do Grau de Poluição	31
3.1.1	Densidade Equivalente de Depósito de Sal	32
3.1.2	Condutância da Superfície	32
3.1.3	Corrente de Fuga	33
3.2	Escolha do Método	35
3.3	Características do Sistema Proposto	36
3.3.1	Controle Automático de Ganho	37
3.3.2	Detector de Pico	38
3.3.3	Retificador de Precisão	39
3.3.4	Microcontrolador MC68HC11	40
3.3.5	Modulação FSK	42
3.3.6	Acoplamento Óptico	43
3.3.7	Apresentação e Armazenamento dos Dados em Microcomputador	44
3.4	Conclusão	45
4	Sistema de Aquisição de Dados Agrometeorológicos	47
4.1	Características do Sistema	47
4.2	Grandezas Agrometeorológicas Monitoradas	48
4.3	Sistema de Aquisição de Dados	50
4.3.1	Princípio de Operação	50
4.3.2	Aquisição dos dados	52
4.4	Condicionadores dos Sinais Elétricos	53
4.5	Conversão A/D por Integrações Sucessivas	54
4.6	Armazenamento das Amostras	55
4.7	Conclusão e Propostas Futuras	57
5	Registrador de Perturbações em Subestações de Energia Elétrica	60
5.1	Registro de Perturbações em Sistemas Elétricos	61
5.2	Critérios de Gatilho	62
5.3	Características do Sistema Proposto	63
5.4	Princípio de Operação	65
5.4.1	Transdutores Utilizados	66
5.4.2	Aquisição e Transferência dos Dados	68
5.4.3	Armazenamento e Análise dos Dados	71
5.5	Conclusão	71

6	Medição de Temperatura em Pára-Raios Energizados	74
6.1	Sistema de Aquisição de Dados e Controle de Temperatura	76
6.2	Sistema de Aquisição de Temperatura em Pára-Raios	78
6.3	Sensores de Temperatura e Isolação Elétrica	79
6.4	Modulação e Acoplamento Óptico	85
6.5	Redução do Ruído Aditivo	86
6.6	Programas Gerentes	89
6.7	Conclusão e Propostas Futuras	89
7	Discussão e Conclusão	91

Lista de Tabelas

4.1	Faixa das grandezas físicas e sinais elétricos correspondentes (N: número de canais)	50
4.2	Transdutores e os resistores utilizados nos seus condicionadores	54
5.1	Valores dos resistores usados nos condicionadores do sistema de aquisição de dados para registro de perturbações.	68

Lista de Figuras

2.1	Sistema de aquisição de dados.	4
2.2	Estrutura básica um sistema de aquisição de dados.	5
2.3	Curva característica do termopar tipo T.	6
2.4	Relação entre grandeza, transdutor e condicionamento.	9
2.5	Exemplo de comunicação RS-232.	13
2.6	Característica do filtro necessário para recuperar um sinal de largura de faixa BW, amostrado com uma frequência de amostragem $f = 2 \cdot BW$	16
2.7	Exemplo de redução de ruídos através da média. (a) forma de onda com ruído. (b) após a média de dez medições.	17
2.8	Estrutura de diretório usada para armazenagem de arquivos de dados no disco rígido.	21
2.9	Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados baseado em microprocessadores.	22
2.10	Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados baseado em um DSP.	23
2.11	Esquema da arquitetura interna do microcontrolador MC68HC11.	27
3.1	Diagrama de bloco do circuito usado para medição da condutividade da superfície de um isolador.	33
3.2	Esquema de conexão dos contadores de surtos para o método da corrente de fuga.	34
3.3	Corrente de fuga versus grau de poluição para uma dada tensão.	35
3.4	Diagrama de bloco do sistema de monitoramento da corrente de fuga.	36
3.5	Circuito de chaveamento do controle automático de ganho.	38
3.6	Detector de pico do sinal da corrente de fuga.	39
3.7	Circuito retificador de precisão.	39
3.8	Sinal aplicado ao conversor A/D do MC68HC11 caso não houvesse retificação e após a retificação.	40
3.9	Fluxograma do programa que controla as tarefas do microcontrolador.	41

3.10	Modulador FSK baseado no CI 4046.	43
3.11	Receptor FSK baseado no CI 4046.	43
3.12	Isolação do sistema de monitoramento da corrente de fuga.	44
4.1	Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados meteorológicos.	51
4.2	Fluxograma do programa em assembler do Módulo II do sistema de aquisição de dados meteorológicos.	52
4.3	Condicionadores dos sinais amostrados pelo sistema de aquisição de dados meteorológicos.	53
4.4	Diagrama de tempo do processo de aquisição de dados.	55
4.5	Fluxograma do programa executado no microcomputador para o sistema de aquisição de dados agrometeorológicos.	56
4.6	Ligações entre o microcontrolador e o display modelo OPTREX 40218.	58
4.7	Interface entre o microcontrolador e um teclado telefônico de doze teclas.	59
5.1	Diagrama de blocos do sistema para registro de perturbações em sistemas elétricos.	64
5.2	Esquema de interface de comunicação entre unidades remotas e o sistema central de controle, para transmissão de dados e gatilho remoto.	64
5.3	Forma típica de onda da tensão, em uma fase, amostrada pelo sistema de registro de perturbações (primeiros 200 ms).	66
5.4	Esquema de armazenadores digitais de perturbações.	66
5.5	Circuito condicionador para os sinais de tensão e corrente.	67
5.6	Diagrama de blocos do sistema desenvolvido com microcontrolador MC68HC11 para o sistema de aquisições de dados para registro de perturbações.	69
5.7	Fluxograma do programa que gerencia as funções do microcontrolador para o sistema de registro de perturbações.	70
5.8	Fluxograma da sub-rotina de coleta de dados, do programa executado no microcomputador, para o sistema de registro de perturbações.	72
5.9	Formato do nome do arquivo para o registrador de perturbações.	72
5.10	Tela principal do programa de visualização dos dados.	73
6.1	Esquema de instalação de um pára-raios.	74
6.2	Diagrama de blocos do sistema de aquisição e controle de temperatura proposto por Daher e outros.	77
6.3	Diagrama de blocos do sistema de aquisição de temperatura em pára-raios energizados.	78

6.4	Característica do termopar tipo T (supondo a junção fria à 0 °C) (a) para a sua faixa de atuação e (b) para a faixa usada no projeto.	80
6.5	J ₁ é o termopar com coeficiente de Seebeck conhecido, J ₂ e J ₃ são termopares espúrios.	80
6.6	Diagrama de blocos do circuito utilizado para compensar a junção fria de termopares.	81
6.7	Circuito de compensação da junção fria de termopares baseado no CI LM 335.	82
6.8	Esquema em ponte para compensação automática da junção fria de termopares.	82
6.9	Circuito de compensação da junção fria de termopares utilizado no projeto de medição de temperatura.	83
6.10	Característica do circuito utilizado para compensação da junção fria de termopares.	84
6.11	Circuito somador usado para condicionar o sinal dos termopares.	84
6.12	Circuito condicionador do termopar com sistema de chaveamento.	85
6.13	Sistema de aquisição usado para validar o circuito condicionador do termopar.	86
6.14	(a) Característica <i>Temperatura × Tensão</i> do termopar cobre-constantan, (b) erro diferencial.	87
6.15	Circuito de modulação FM e acoplamento óptico.	87
6.16	Sistema de aquisição usado para validar o circuito modulador FM e acoplamento óptico.	88
6.17	Característica tensão-freqüência do circuito modulador FM e do acoplamento óptico. (a) apenas um ponto por amostra e (b) média de dez pontos por amostra.	88
6.18	Característica de um RTD (National Semiconductor).	90

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ANSI	American National Standard International.
EIA	Electronic Industries Association.
GPIOB	General Purpose Interface Bus
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineer.
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments.
RS-XXX	RS-232, RS-422 e RS-485.
I ² C	Barramento Inter I ² C.
BW	Largura de faixa de um sinal qualquer.
$H(f)$	Resposta ao impulso de um sinal qualquer.
ESDD	Equivalent Salt Deposit Density.
$I_{highest}, I_h$	Valor de pico da corrente de fuga em cadeias de isoladores.
I_c	Valor de pico crítico da corrente de fuga.
V_c	Valor da tensão aplicada quando a corrente é I_c .
$I_{máx}$	Valor de pico da corrente de fuga registrado antes do "flashover".
ZnO	Óxido de Zinco.
SiC	Carboneto de Silício.
$V_{J_x}(T_y)$	Tensão na junção J_x devido à temperatura T_y .
T_S, T_{TC}	Temperatura na junção de um termopar.
V_S	Tensão de Seebeck.
S	Coefficiente de Seebeck.
V_a	Tensão na junção fria de um termopar devido a temperatura ambiente.
T_a	Temperatura ambiente.
RTD	"Resistance-Temperature Detector".

Capítulo 1

Introdução

No mundo atual, os processos físicos nas mais diversas áreas científicas, industriais, médicas, etc, dependem fortemente do conhecimento e do monitoramento de grandezas físicas a eles associadas. Na indústria mecânica por exemplo, o controle de robôs e de outras máquinas não seria possível sem dados exatos sobre suas condições de funcionamento [1]. Na medicina, a maioria das técnicas recentes, usadas em áreas que envolvem da cardiologia à fisiologia, baseiam-se no conhecimento de variáveis biológicas através de instrumentos altamente complexos [2]. Sem o conhecimento de dados agrometeorológicos, o planejamento do plantio de diversas culturas estaria comprometido [3].

Neste contexto, com o avanço da tecnologia VLSI e a conseqüente redução dos preços de componentes eletrônicos, além da popularização dos computadores em todos os campos do conhecimento, os sistemas de aquisição de dados tornaram-se muito usados em diversas áreas.

Até alguns decênios passados, alguns trabalhos apresentavam sistemas de aquisição de dados baseados em instrumentos de medição (como osciloscópio) e microprocessadores, computadores, ou até mesmo calculadoras programáveis [4], [5], [6] e [7]. Atualmente, vários organismos (ANSI, EIA, IEEE, por exemplo) desenvolveram padrões para auxiliar o projeto e desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados. Alguns desses padrões são aceitos mundialmente e centenas de fabricantes oferecem milhares de equipamentos compatíveis com tais padrões.

Esses padrões definem critérios para controle remoto de instrumentos eletrônicos e para a comunicação destes entre si, através de barramentos ou protocolos de comunicação. Dentre os mais utilizados para este fim, destacam-se o IEEE-488, VXI e o RS-XXX (RS-232, RS-422, RS-485) [1], [8] e [9]. Cada padrão tem suas características, vantagens e desvantagens, desse modo um conhecimento detalhado de tais padrões é indispensável para o projeto de sistemas de aquisição de dados.

A evolução da tecnologia dos conversores A/D e a popularização dos computadores fizeram dos cartões de aquisição de dados ("DAQ Boards") uma excelente opção para sistemas de aquisição de dados de fácil implementação. Os computadores, por sua vez, interagem com todas essas configurações, por isso é uma das plataformas de controle mais usadas em aplicações de aquisição de dados.

As características necessárias a um sistema de aquisição de dados são ditadas pelo processo do qual deseja-se adquirir dados e pelas necessidades do usuário do sistema. Por isso, alguns sistemas especiais que adquirem dados remotos, de difícil acesso, ou em ambientes hostis, necessitam de algumas considerações adicionais. Nesse tipo de sistema, pode-se usar um arranjo composto por dois subsistemas: um para aquisição de dados e outro para armazenamento e análise. No projeto de tais subsistemas de aquisição de dados, microprocessadores, DSP's e principalmente microcontroladores ainda são usados.

Os microcontroladores, por conterem em uma mesma pastilha a maioria dos blocos funcionais necessários a um sistema de aquisição de dados, são muito usados no desenvolvimento desses subsistemas.

A partir dessas considerações, pretende-se com este trabalho auxiliar os projetistas no processo de desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados, em especial os baseados em microcontroladores. Para isto, os blocos funcionais que compõem um sistema de aquisição de dados, bem como os conceitos associados a cada um desses blocos são discutidos, além de ser feita uma descrição detalhada das tecnologias principais existentes para o desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados.

A classe especial de sistemas de aquisição de dados remotos, de difícil acesso, ou em ambientes hostis, bem como várias considerações a respeito desses sistemas: transmissão e codificação de dados, limitações de consumo e dimensões, também são discutidas.

Para fazer tais discussões, o conteúdo desta dissertação esta dividido da seguinte forma:

No capítulo 2, os sistemas de aquisição de dados são discutidos. Apresentando-se sua definição, seus blocos funcionais principais, seus parâmetros (resolução, taxa de amostragem, etc) e suas funções principais (aquisição, análise e apresentação dos dados). Além disso, discute-se as topologias mais usadas no projeto desses sistemas, bem como as considerações adicionais necessárias a sistemas de aquisição de dados remotos, de difícil acesso ou em ambientes hostis. O capítulo termina com a apresentação de quatro sistemas de aquisição de dados que são discutidos nos capítulos subseqüentes.

No capítulo 3 é apresentado e discutido um sistema de aquisição de dados para ma-

nutenção preditiva em subestações de energia elétrica. Este sistema adquire dados da corrente de fuga de isoladores de sistemas elétricos e envia-os para um microcomputador central, onde os mesmos são armazenados e ficam disponíveis para análise através de um programa gráfico.

No capítulo 4, um sistema de aquisição de dados agrometeorológicos é analisado. O sistema é composto de dois módulos: o primeiro adquire dados no campo sobre diversas variáveis agrometeorológicas e o segundo coleta os dados adquiridos e transporta-os até um microcomputador, onde são armazenados para futuras análises.

No capítulo 5, outro sistema de aquisição de dados é analisado. Desta vez é um registrador de perturbações em subestações de energia elétrica. Este sistema registra as formas de onda da corrente e da tensão de fase do sistema elétrico, durante alguma perturbação. Em seguida, os dados são enviados até um microcomputador, onde ficam disponíveis para análise através de um programa gráfico.

No capítulo 6, apresenta-se um sistema de aquisição de dados para medição de temperatura em seções de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) energizados. O sistema coleta dados de temperatura em dez pontos da seção e em seguida os dados são armazenados em um microcomputador, onde ficam disponíveis para análise em programas adequados.

No capítulo 7, são discutidas as características comuns e individuais dos quatro sistemas analisados neste trabalho, e apresenta-se as conclusões finais.

Capítulo 2

Sistemas de Aquisição de Dados

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos pertinentes a sistemas de aquisição de dados, seus blocos funcionais e suas características principais. Além disso, mostra-se porque o microcomputador é uma das principais plataformas usadas em sistemas de aquisição de dados e apresenta-se as tecnologias principais usadas com esta plataforma.

No final deste capítulo, apresenta-se os quatro sistemas de aquisição de dados exemplos utilizados neste trabalho para demonstrar o projeto de sistemas desse tipo, além das características principais do microcontrolador MC68HC11, no qual baseiam-se os quatro exemplos discutidos.

2.1 Definição

Um sistema de aquisição de dados deve fornecer informações detalhadas e exatas sobre um determinado processo ao usuário (Figura 2.1), para que este possa avaliá-lo, controlá-lo, etc. No projeto deste sistema é necessário conhecer-se as características das variáveis do processo e as necessidades do usuário. Desse modo, pode-se dizer então que *um sistema de aquisição de dados é um conjunto de elementos inter-relacionados que se coloca entre um processo e seu observador, visando a aquisição, análise e apresentação de dados sobre o processo.*

Deve-se notar que o usuário do sistema de aquisição de dados não é necessariamente um indivíduo. Em um sistema de controle de uma estufa, por exemplo, o usuário do

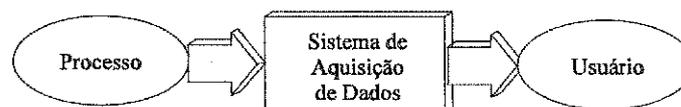


Figura 2.1: Sistema de aquisição de dados.



Figura 2.2: Estrutura básica um sistema de aquisição de dados.

sistema de aquisição de dados pode ser apenas um algoritmo que deve executar alguma ação para manter a temperatura constante.

2.2 Blocos Funcionais

Os blocos funcionais de um sistema de aquisição de dados podem ser classificados e interligados como mostrado na Figura 2.2. Cada um desses blocos pode desempenhar diversas funções, dependendo da aplicação.

2.2.1 Transdutor

O transdutor é o componente responsável pela transformação da grandeza do processo em outra que o sistema de aquisição de dados possa usar. Ou seja, ele "sente" o fenômeno físico e produz sinais elétricos que os circuitos de aquisição de dados podem tratar. São exemplos de transdutores: termopares, termistores, microfones.

Os transdutores podem ser formados a partir de sensores que variam alguma grandeza de natureza passiva (resistência, capacitância, indutância) em função da grandeza de medição, logo necessitam de alguma excitação externa; ou a partir de sensores ativos que geram diretamente um sinal elétrico na forma de corrente, tensão, carga elétrica.

Geralmente, deseja-se que os transdutores produzam sinais elétricos que tenham uma relação linear com os parâmetros da grandeza física que eles estão "sentindo". Na prática, a maioria dos transdutores são não-lineares, porém possuem linearidade suficiente em uma determinada faixa de interesse ou sua curva de resposta pode ser linearizada no processamento dos sinais elétricos. Devido ao grande esforço empregado no projeto de transdutores com linearidade suficiente para determinadas aplicações, a palavra não-linear adquiriu conotação pejorativa. Contudo, se as características não-lineares são bem definidas, suas respostas podem ser linearizadas por um condicionamento analógico ou numérico.

Funções contínuas adequadas permitem a translação de uma relação empírica entre a grandeza medida e a saída do transdutor. Por exemplo, na Figura 2.3 apresenta-se a característica temperatura *versus* tensão de Seebeck do termopar tipo T, que tem uma relação empírica com a equação 2.1,

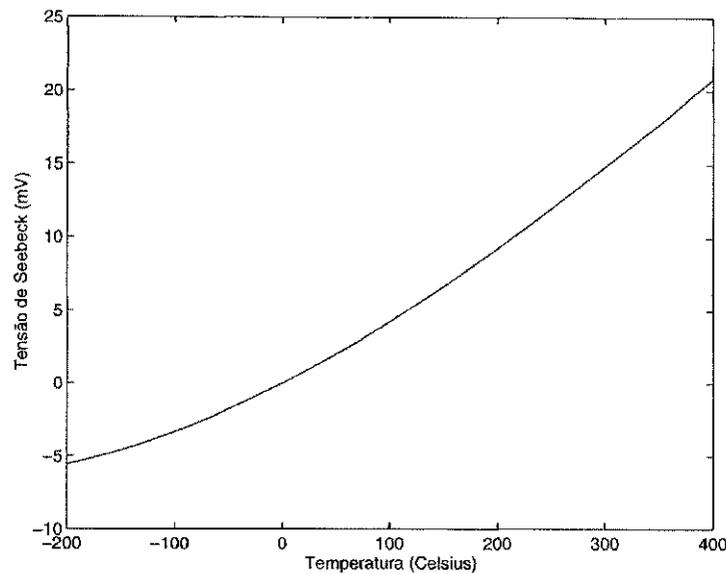


Figura 2.3: Curva característica do termopar tipo T.

$$f(x) = 0.0383x^3 - 0.0019x^2. \quad (2.1)$$

Desse modo, fazendo x igual a tensão de Seebeck (V_S) e $f(x)$ a temperatura na junção do termopar (T_S), a temperatura pode ser medida com um erro de $0,3\text{ }^\circ\text{C}$ [10].

2.2.2 Condicionador

Os sinais elétricos gerados pelos transdutores precisam ser convertidos em uma forma aceitável pelo circuito de aquisição de dados. Condicionadores de sinais podem amplificar ou atenuar, deslocar nível médio, detectar pico, nível médio ou valor eficaz, linearizar, filtrar e/ou isolar o sistema para uma medição mais exata e segura. Eles podem também gerar sinais de excitação para sensores e transdutores. As funções mais importantes desempenhadas pelos condicionadores são discutidas a seguir.

- Amplificação e Atenuação

A amplificação e a atenuação são necessárias sobretudo em sistemas de aquisição baseados em conversores A/D. As baixas tensões geradas nos termopares pelo efeito Seebeck, por exemplo, precisam ser amplificadas para adequá-las às faixas de conversões desses conversores e melhorar consequentemente a resolução. Por razões semelhantes, os sinais da rede elétrica precisam ser atenuados.

- Detectores de pico, nível médio e valor eficaz

Quando se deseja conhecer parâmetros de um sinal alternado, tais como: valor eficaz, de pico, de pico a pico e/ou médio, usa-se os detectores apropriados ou pode-se adquirir os dados correspondentes a um ciclo do sinal e por um processamento numérico determinar-se esses parâmetros.

- Deslocamento de nível

Algumas vezes, a grandeza pode assumir valores numa faixa muito maior do que a de interesse. Nestes casos, desloca-se o nível do sinal para que na entrada do conversor A/D tenha-se somente a faixa de interesse, cobrindo todos os valores aceitos. Desse modo, melhora-se a exatidão da aquisição dos dados. Por exemplo, para adquirir-se dados correspondentes ao valor eficaz de uma rede elétrica que tenha um valor eficaz nominal de 220 V e tolerância máxima de $\pm 10\%$, portanto podendo variar entre 198 V e 242 V, pode-se utilizar atenuadores e detectores de pico ou de valor eficaz para converter o sinal alternado em um sinal contínuo correspondente. Se os níveis aceitos na entrada do conversor A/D são limitados entre 0 e 5 V, precisa-se então fazer um deslocamento de nível, de tal forma que 198 V eficaz corresponda a 0 V contínuo e 242 V eficaz corresponda a 5 V contínuo.

- Isolação

Outro tipo comum de condicionador de sinal é a isolação. O processo monitorado pode conter transitórios de alta-tensão que podem causar riscos ao sistema de medição e aos operadores, havendo necessidade portanto de uma isolação entre o processo e o sistema de aquisição de dados. Uma razão adicional para o uso de isolação é o efeito das diferentes tensões de modo-comum. Ou seja, podem ocorrer alguns problemas quando o sistema de medição e o sinal adquirido possuem alguma diferença em relação à referência de terra. Esta diferença pode causar erros na representação do sinal adquirido, ou se for muito elevada, danos ao sistema de medição. Com uso de isolação as tensões de modo-comum são eliminadas e os dados são adquiridos com maior exatidão.

- Linearização

Como discutido na seção 2.2.1, a linearização é um condicionamento necessário em alguns casos. Ela pode ser feita de forma analógica ou numérica. No primeiro caso, usa-se normalmente um circuito que tenha uma característica inversa à do transdutor, por exemplo: um termistor varia sua resistência de forma exponencial com sua temperatura, usando-se um amplificador logarítmico pode-se então linearizar a resposta. No segundo caso, o sinal de saída do transdutor é convertido para a forma digital e suas amostras são linearizadas a partir de um processo numérico usando equações ou pelo uso de tabelas. Evidentemente, a resolução do sistema dependerá da quantidade de pontos na tabela e sobretudo da resolução do conversor A/D.

- Filtragem

Muitas vezes, o espectro de frequências do sinal na saída dos transdutores pode ser muito mais amplo do que é de interesse, usa-se então filtros para limitá-lo. Por exemplo, na aquisição de sinais biológicos do ser humano, geralmente está presente na saída do transdutor um sinal indesejável correspondente ao sinal da rede elétrica. Quando o sinal útil é limitado a alguns hertz, pode-se usar um filtro rejeita-faixa ou passa-baixas, para diminuir-se o ruído de 60 Hz da rede.

- Excitação

Alguns transdutores necessitam de sinais de excitação (tensões ou correntes externas). Por exemplo, detectores de temperatura resistivos necessitam de uma fonte de corrente para converter a variação de resistência em uma tensão que possa ser medida.

Funções tais como multiplicação (analógica ou numérica), conversão F/V (frequência para tensão) e V/F (tensão para frequência), etc, também são exemplos de condicionamento.

Na Figura 2.4, é ilustrada a relação entre grandeza, transdutor e condicionamento.

A grandeza a ser adquirida determina o tipo de transdutor a ser utilizado. Contudo, a escolha do tipo de transdutor deve ser tomada tendo em vista a faixa de interesse



Figura 2.4: Relação entre grandeza, transdutor e condicionamento.

da grandeza a ser observada. Por exemplo, para medir a temperatura ambiente o ideal talvez fosse os circuitos integrados (CI's) sensores de temperatura, pois apresentam dimensões muito pequenas, preços reduzidos e boa linearidade. Contudo, para faixas de centenas de graus, a melhor opção pode ser os termopares, pois possuem uma faixa de medição muito extensa.

Conhecidas as características dos transdutores a serem utilizados no projeto, fica evidente as propriedades dos condicionadores necessários ao projeto. Se os transdutores, e conseqüentemente as características dos condicionadores, já tenham sido escolhidos antes do início do projeto do sistema de aquisição de dados, então a preocupação do projetista resume-se à aquisição, análise e apresentação dos dados.

2.2.3 Aquisição, Análise e Apresentação dos Dados

Os microcomputadores possuem alta performance e podem adequar-se às mais diversas aplicações de aquisição de dados e controle de sistemas. Cartões de aquisição de dados e interface para instrumentos estão disponíveis para todas as mais populares plataformas - PC/XT/AT, PS/2, Macintosh. Além disso, estão disponíveis linguagens de alto nível (como a linguagem C) que podem ser usadas para criar rapidamente programas de alto desempenho, necessitando de pouca memória, e que proporcionam acesso conveniente aos dispositivos de entrada e saída.

De fato, uma das principais vantagens dos sistemas baseados em microcomputadores é a possibilidade de programá-los para uma determinada tarefa. Ao contrário dos circuitos analógicos e digitais, quando as circunstâncias assim exigirem, programas de computador podem ser facilmente modificados durante a etapa de desenvolvimento. Além disso, algoritmos de alta complexibilidade podem ser implementados usando-se sistemas baseados em programação.

Por todas essas razões, atualmente o computador tende a ser principal plataforma utilizada no projeto de sistemas de aquisição de dados, nos quais é responsável pela coordenação da aquisição, pela análise e apresentação dos dados. Pode-se dizer que a popularização dos computadores pessoais foi a principal responsável pela evolução dos sistemas de medição e de controle.

Atualmente, pode-se encontrar alguns sistemas baseados em tecnologia analógica ou em sistemas digitais complexos. Contudo, a familiarização crescente das pessoas com os microcomputadores em todos os setores industriais, comerciais e sociais, deve fazer com que aplicações baseadas em outras plataformas sejam cada vez mais raras.

Escolhido o microcomputador como a plataforma com a qual se vai trabalhar, resta escolher dentre as alternativas existentes a que mais adequa-se as necessidades do projeto. Para isto, um conhecimento das alternativas principais existentes é essencial.

2.3 Estrutura de Barramentos

Um barramento é um caminho elétrico comum entre múltiplos dispositivos. Um exemplo comum de barramento é o usado nos microcomputadores, que consiste de algumas trilhas de cobre paralelas, com conectores espaçados em intervalos regulares para inserir memória e placas de Entrada/Saída (E/S) [11]. São exemplos de barramentos o barramento EISA (usado em alguns microcomputadores baseados no 80386), o Microchannel (PS/2) e o VME (680x0).

Alguns dispositivos que se conectam a um barramento são ativos (mestres ou "talkers") e podem iniciar transferências pelo barramento, enquanto outros são passivos (escravos ou "listeners") e esperam requisições. Um dispositivo ligado a um barramento, em instantes diferentes, pode ser mestre ou escravo, além disso mais de um dispositivo pode querer ser mestre (ter o controle do barramento) no mesmo instante. Por isso é necessário a existência de um algum mecanismo para coordenar o controle de um barramento. Este mecanismo normalmente é chamado de arbitragem de barramento e o dispositivo que o executa, de árbitro de barramento.

Na ciência da medição vários tipos de barramentos são utilizados para controlar remotamente instrumentos eletrônicos, possibilitando a implementação rápida de sistemas de aquisição de dados bastante complexos. Como exemplo de tais barramentos, têm-se o IEEE-488, o VXI, o HS-488 e o I²C. Na seção seguinte, alguns desses barramentos são discutidos com um pouco mais de detalhes.

2.4 Alternativas

A tecnologia de instrumentação elétrica encontra-se em constante evolução, e para o projeto de sistemas de aquisição de dados é importante o conhecimento das tecnologias principais disponíveis. A evolução da tecnologia de conversão A/D e de acessórios de condicionamento tornaram o uso de cartões de aquisição uma das opções mais

populares para sistemas de instrumentação. Sistemas baseados nos barramentos IEEE 488 e VXI são geralmente utilizados para medições mais sofisticadas. Por outro lado, para uso em sistemas de aquisição de dados mais simples e para controle remoto de subsistemas de medição, sistemas baseados em instrumentos que se interligam através de algum protocolo de comunicação serial, também são muito populares. Estas quatro tecnologias, atualmente, são as opções tecnológicas mais usadas [8] e [12]. Para que se possa usufruir totalmente das vantagens de todas as opções disponíveis, é importante observar que essas diferentes tecnologias podem ser empregadas em conjunto.

2.4.1 Barramento GPIB

Em 1965, a Hewlett-Packard projetou o barramento *Hewlett-Packard Interface Bus* (HP-IB), posteriormente chamado GPIB, para conectar sua linha de instrumentos programáveis à microcomputadores. Devido às altas taxas de transferências (nominalmente 1 M-octeto/s), este barramento foi rapidamente aceito. Para melhorar sua performance, vários outros padrões foram definidos (IEEE 488-1975, ANSI/IEEE 488.1-1987, ANSI/IEEE 488.2-1987). Em 1990, criou-se o padrão SCPI ("Standard Commands for Programmable Instruments") a partir da combinação e redefinição dos padrões IEEE 488.2 e TMSL ("Tektronix Analog Data Interchange Format"). Nos dias de hoje, vários fabricantes equipam seus instrumentos com interface para esses tipo de barramento.

Num sistema de aquisição de dados baseado em barramento GPIB, são necessários equipamentos que adquiram os dados desejados e o barramento é usado para a comunicação entre um arbitro de barramento (normalmente um computador) e os instrumentos.

O padrão GPIB possibilita o controle de até 32 instrumentos compatíveis (porém nominalmente é recomendado apenas 14) e a transmissão de dados, através de um barramento e de um conjunto de instruções no formato ASCII ("American Standard Code for Information Interchange"). Os projetistas têm que conhecer o conjunto de comandos de cada instrumento, pois cada um deles possui instruções próprias para sua programação. Os padrões novos IEEE 488.2 e SCPI resolvem o problema da não-padroneização dos comandos, mas infelizmente o padrão IEEE 488.1 ainda é o mais usado.

Para melhorar a interface com o usuário de sistemas de medição baseados em GPIB, vários fabricantes criaram pacotes gráficos de alto nível como o LabWindows, LabVIEW, Measure, Asystant GPIB. Esses pacotes vêm acompanhados de bibliotecas de interfaces para instrumentos. Estas interfaces trazem incorporados os comandos apro-

priados no formato ASCII para cada instrumento, enviam dados pelo barramento, e também podem realizar análise e apresentar dados.

Para possibilitar altas taxas de transmissão de dados, o padrão impôs algumas limitações [13]:

- Dois equipamentos devem estar separados pela distância máxima de 4 m, e;
- O comprimento total dos cabos não podem ultrapassar 20 m.

Contudo, alguns fabricantes põem à disposição dos usuários vários acessórios que permitem diminuir estas restrições. Por exemplo, extensões de fibra óptica que permitem aumentar a distância entre os instrumentos para até 2 km, além de expansores (que permitem a conexão de mais 14 instrumentos), isoladores (que proporcionam isolação óptica de até 1.600 V), etc.

2.4.2 Barramento VXI

Introduzido inicialmente em 1987, a tecnologia VXI obteve um grande sucesso. Hoje em dia, mais de 250 fabricantes comercializam mais de 1.000 produtos VXI. Além disso, alguns especialistas indicam que no ano 2000 metade dos sistemas usados em instrumentação irão basear-se no barramento VXI.

Com uma arquitetura semelhante à dos computadores modernos, um barramento paralelo de performance alta, VXI combina eficientemente a versatilidade dos computadores com instrumentos de medição.

Instrumentos VXI's usam um chassi que suporta no máximo 13 cartões, proporcionando um sistema altamente modular. Além disso, o VXI é baseado no barramento VME, portanto pode-se usar também módulos VME em sistemas VXI. Desse modo, o barramento VXI combina o melhor da tecnologia GPIB, a modularidade dos cartões de aquisição e uma tecnologia moderna de computadores. Como o GPIB, o VXI oferece uma variedade de instrumentos produzidos pelas empresas em todo o mundo. Entretanto, como os cartões de aquisição, o VXI oferece modularidade, flexibilidade e alta performance.

Além disso, os sistemas VXI suportam taxas altas de comunicação através da combinação de técnicas dos instrumentos GPIB e dos cartões de aquisição. Com sua arquitetura multiprocessadora, o padrão VXI suporta compartilhamento de memória, possibilitando processamento de canais múltiplos em tempo real.

Uma grande seleção de módulos de aquisição de dados está disponível. Estes módulos incluem: conversores A/D, entrada/saída, multiplexadores e condicionadores de sinal com várias taxas de amostragem, resolução e número de canais.

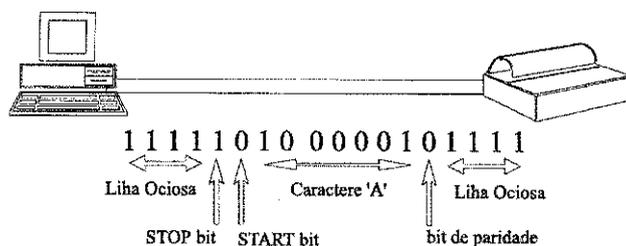


Figura 2.5: Exemplo de comunicação RS-232.

Por todas essas características, um sistema VXI atende a uma grande variedade de casos. Sua modularidade e a possibilidade de integrá-lo com sistemas já existentes fazem do VXI um padrão aceito largamente em todo o mundo.

2.4.3 Comunicação Serial

Como nos sistemas baseados em GPIB, os sistemas de aquisição de dados baseados nos padrões seriais de comunicação, como o RS-232, também necessitam de equipamentos dotados deste padrão para adquirirem os dados desejados.

A comunicação serial é um meio bastante usual de transmitir dados entre um computador e um periférico, como uma impressora, um "plotter", ou um instrumento programável. Os dados são transmitidos, bit a bit, usando-se como meio uma linha simples. Na Figura 2.5, é apresentado um protocolo de comunicação serial.

Os protocolos mais comuns para comunicação serial são RS-232, RS-422 e RS-485 [8]. Contudo, o mais popular é o RS-232 (Figura 2.5).

Padrão RS-232

Este tipo de comunicação é ideal para transferência de dados em taxas baixas e distâncias longas. A sua limitação é a possibilidade de comunicação com apenas um dispositivo. Para acomodar vários dispositivos, é necessário o uso de uma placa com portas seriais múltiplas ou uma porta multiplexada.

Padrão RS-422

É o padrão serial encontrado nos computadores Macintosh. Este padrão usa um sinal elétrico diferencial, em oposição ao sinal com referência ao terra do padrão RS-232. A transmissão diferencial utiliza duas linhas para cada um dos sinais de envio e de transmissão. Isso resulta em uma maior imunidade a ruído e um aumento no comprimento máximo entre os dispositivos seriais. Além disso, este padrão aumenta, o número máximo de dispositivos seriais conectados a uma única porta, para 10.

Padrão RS-485

Este é um melhoramento do padrão RS-422, pois aumenta o número máximo de dispositivos de 10 para 32, e define as características elétricas necessárias para garantir os níveis de tensão adequados durante a conexão do número máximo de dispositivos seriais. Com essas características, pode-se criar redes complexas de dispositivos com uma porta serial única.

É importante notar que os padrões RS-XXX definem apenas as características elétricas - e não o protocolo de comunicação. Contudo, a opção mais comum é um conjunto de instruções no formato ASCII que constituem comandos para os dispositivos. Estes protocolos são geralmente implementados de maneira assíncrona em configurações de mestre/escravo, nas quais um dispositivo (usualmente um computador) é o mestre e os outros são escravos.

A empresa *National Instruments* oferece inúmeros pacotes com rotinas de alto nível que simplificam a comunicação serial. Os pacotes LabWindows, LabVIEW e Measure têm bibliotecas completas com funções para configuração, envio e recebimento de dados de instrumentos seriais [8].

2.4.4 Cartões de Aquisição

Os cartões de aquisição são conectados diretamente no barramento dos computadores e são encarregados de adquirirem os sinais desejados. Relacionados com cartões de aquisição de dados, estão vários tipos de especificações, tais como: número de canais, resolução, taxa de aquisição, faixa de conversão, não-linearidade, e todos os fatores que afetam a qualidade do sinal digitalizado.

Número de Canais

Os cartões de aquisição possuem um número limitado de canais de entrada. Por isso, durante a escolha do cartão, deve-se considerar o número de canais necessários à aplicação. Para aumentar-se o número de entradas, um multiplexador e um circuito de amostragem e retenção podem ser usados nos casos em que não se deseje amostras simultâneas dos sinais, caso contrário, ainda pode-se usar o multiplexador, mas deve-se usar um circuito de amostragem e retenção para cada canal. Como exemplo pode-se citar os produtos SCXI da *National Instruments*, que podem usar módulos de multiplexação para aumentar o número de canais para até 3.072, com um único cartão de aquisição [14].

A multiplexação está intimamente relacionada com a taxa de aquisição de dados.

Por exemplo, o cartão AT-MIO-16H-9 da *National Instruments* tem taxa de amostragem de 100 kHz, para 10 canais a taxa de amostragem de cada canal individualmente é [8]:

$$\frac{100 \text{ kHz}}{10 \text{ canais}} = 10 \text{ kHz/canal.}$$

Resolução

A resolução é o número de bits que o conversor A/D usa para representar o sinal analógico. Quanto maior a resolução, maior é o número de níveis da faixa de conversão do A/D. Por exemplo, um A/D de 3 bits divide sua faixa de conversão em apenas oito níveis, logo o erro de quantização pode ser grande. Aumentando-se a resolução para 16 bits, o número de níveis cresce para 65.536 e as amostras digitais representam muito melhor o sinal original.

Faixa de Conversão

A faixa de conversão refere-se aos níveis de tensão máximo e mínimo que o A/D pode quantizar. Alguns cartões de aquisição oferecem faixas de conversão e ganhos selecionáveis, tal que as placas possam ser configuradas para diversos níveis de tensão. Com isto, dispõe-se de toda a resolução do A/D.

A resolução e o ganho disponível na placa de aquisição determinam a tensão mínima detectável pelo A/D, também chamada de largura de código. Por exemplo, com uma faixa de conversão de 0 a 10 V, uma resolução de 16 bits e um ganho de 100, a largura de código é [8]

$$\frac{10 \text{ V}}{100 \times 2^{16}} = 1,5 \mu\text{V.}$$

Logo, a resolução teórica de um bit do sinal digitalizado é 1,5 μV .

Esta largura de código é usada na recuperação do sinal. Contudo, vários erros podem contribuir para a perda de exatidão durante a recuperação, dois exemplos são os erros nos valores dos ganhos e os devidos à tensões de desvio. Eles podem afetar a amplitude do sinal antes mesmo da conversão, e conseqüentemente deformar o sinal quando de sua recuperação.

Pode-se remover os erros de ganho e os devidos à tensão de desvio usando circuitos ou programas de calibração. Os circuitos de calibração corrigem esses erros por circuitos elétricos, deslocando o nível do sinal e corrigindo o ganho de forma manual ou automática comandada por programas. Os programas de calibração corrigem esses erros por um processo numérico, ou seja, os sinais são adquiridos sem correção e em seguida faz-se a correção de forma numérica.

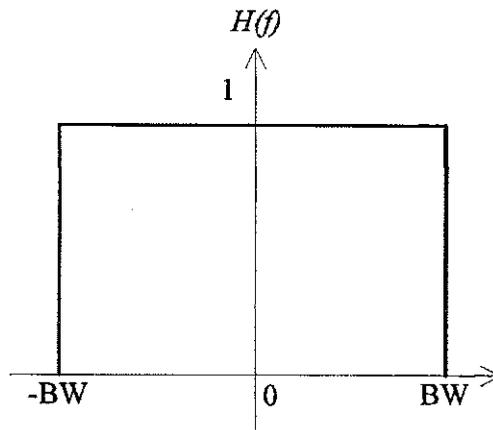


Figura 2.6: Característica do filtro necessário para recuperar um sinal de largura de faixa BW , amostrado com uma frequência de amostragem $f = 2 \cdot BW$.

Taxa de amostragem

A taxa de amostragem determina a frequência com a qual as conversões são realizadas. Uma taxa de amostragem maior implica em mais pontos amostrados, e conseqüentemente em uma melhor representação do sinal. Para digitalizar um sinal para análise de maneira apropriada, o teorema da amostragem deve ser respeitado. Esse teorema diz que a frequência de amostragem deve ser de no mínimo duas vezes a frequência máxima contida no sinal. Contudo, este teorema parte do princípio que um filtro passa-baixas com a resposta ao impulso, $H(f)$, apresentada na Figura 2.6, deve ser usado para recuperar o sinal.

Infelizmente, este filtro não é realizável fisicamente pois $H(f)$ é não-causal. Por isso, a decisão da taxa de amostragem deve ser tomada em conjunto com a escolha da técnica de recuperação do sinal [12].

A recuperação do sinal pode ser analisada no domínio do tempo ou no domínio da frequência. No domínio do tempo, a recuperação do sinal pode ser vista como um processo de interpolação numérica que conecta duas amostras discretas. No domínio da frequência, a recuperação envolve limitação de frequências através de um filtro passa-baixas linear, para atenuar as componentes do espectro repetitivo dos dados amostrados.

Normalmente, para apresentar os dados amostrados, simplesmente é feita uma interpolação linear (que corresponde a um filtro passa-baixas de primeira ordem) do sinal, neste caso, uma frequência de amostragem $f = 10 \cdot BW$ é aconselhável. Onde BW é a largura de faixa do sinal.

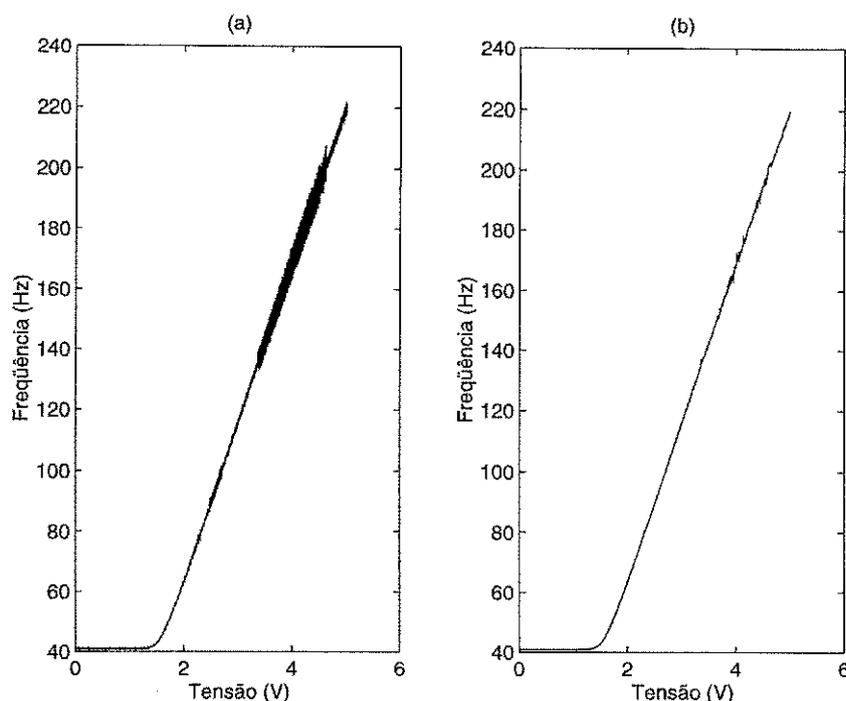


Figura 2.7: Exemplo de redução de ruídos através da média. (a) forma de onda com ruído. (b) após a média de dez medições.

Ruído

A variação do sinal provocada por interferências é bastante indesejável, pois acrescenta incerteza nos valores adquiridos. Em particular, com sinais de nível baixo ou em ambientes ruidosos, o ruído pode deteriorar bastante a medição. Em sistemas digitais, o valor médio da forma de onda é uma técnica bastante comum em instrumentação para reduzir o ruído aditivo sobre o sinal, bem como para aumentar a resolução.

Assumindo que o ruído é decorrelacionado e tem média zero, então, se a média de aquisições múltiplas é realizada, a forma de onda resultante deve ter uma relação sinal-ruído (S/N) bem melhor, como é apresentado na Figura 2.7.

O aumento na razão S/N é proporcional a raiz quadrada de n , com n igual ao número de pontos usados no cálculo da média. Por exemplo, se a razão S/N é 10:1, após uma média entre quatro pontos consecutivos, a razão aumenta para 20:1.

No caso de sistemas digitais, a média não somente melhora a razão S/N , como aumenta significativamente a resolução do sistema. O aumento da resolução é devido ao cálculo da média geralmente ser feito com uma resolução bem maior que a do sinal digitalizado. Por exemplo, geralmente em um sinal digital de 8 bits, ruídos de nível baixo causam dois ou três bits (8 níveis em 256) de incerteza nos bits menos significativos do sinal digitalizado. Neste caso, se a média é realizada com uma resolução de

16 bits, esta variação pode ser reduzida para 10 ou 12 níveis em 65.536.

Existem vários modos de calcular-se a média dos pontos amostrados. Um método muito usado é chamado média exponencial. Neste caso a quantidade de pontos amostrados tem que ser múltiplo de dois. O método é ilustrado na equação 2.2.

$$M[n] = M[n - 1] + \frac{x[n] - M[n - 1]}{2^m}. \quad (2.2)$$

Na qual

$$\begin{aligned} M[n] &= \text{média após } n \text{ pontos;} \\ M[n - 1] &= \text{média anterior;} \\ x[n] &= \text{medição mais recente, e;} \\ m &= \text{inteiro positivo.} \end{aligned}$$

Em um sistema digital, a equação 2.2 pode facilmente ser implementada. Entretanto, o fator $\frac{x[n] - M[n-1]}{2^m}$ exige muito do processador para ser calculado e dependendo do número de pontos envolvidos no cálculo da média, pode tornar-se um fator limitante do projeto.

Taxas Altas de Transferência de Dados

Cartões de aquisição de dados extremamente rápidos necessitam de uma maneira rápida de transmitir os dados para a memória. Por isto, alguns cartões de aquisição utilizam acesso direto a memória (DMA) para sustentarem taxas altíssimas de transmissão. Um controlador DMA transfere dados diretamente para a memória com taxas altas com uso mínimo da CPU. Algumas placas, como a AT-MIO da *National Instruments*, usam um canal duplo de DMA para eliminar alguns problemas técnicos que reduziriam a taxa de transferência via DMA, conseguindo assim, uma taxa de transferência ainda maior [8].

Outros tipos de placas utilizam listas FIFO's ("First-In First-Out") para armazenar dados temporariamente durante atrasos na transmissão dos dados, por isso podem suportar aquisição de dados de sinais de alta frequência.

2.5 Três Perguntas sobre a Escolha do Sistema

Para a escolha da configuração utilizada no projeto de sistemas de aquisição de dados, três pontos devem ser observados:

- Qual a meta a ser alcançada?

É muito importante definir-se inicialmente a meta a ser atingida para que o projeto tenha início, meio e fim. A definição das expectativas é importante para que as opções possam ser avaliadas. Além disso, como dito anteriormente, o conhecimento das características das grandezas físicas e dos transdutores usados no sistema facilitam bastante o seu projeto.

- O sistema terá que se integrar com um já existente, ou um novo sistema será iniciado?

É importante notar que as tecnologias podem ser mescladas para criar-se diferentes configurações. Por exemplo, pode-se construir um sistema apenas com instrumentos VXI's, ou pode-se integrar módulos VXI's com instrumentos GPIB's e cartões de aquisição. Cada uma das configurações têm suas vantagens.

- Que benefícios cada configuração traz para a aplicação?

Para responder a esta pergunta, tem-se que ter em mente as características de cada tecnologia, suas vantagens e desvantagens. A seguir, tem-se um resumo das características principais.

- IEEE 488

Aceito largamente desde 1975;

Milhares de instrumentos de centenas de fabricantes;

Projetado para controle remoto de instrumentos programáveis;

Controla nominalmente 14 instrumentos;

Protocolo paralelo de 8 bits, e um conjunto de parâmetros ASCII, e;

Taxas de transferência acima de 1 M-octetos/s.

- Cartões de Aquisição

Combina baixo custo com desempenho moderado;

Instrumento instalado diretamente no barramento do PC;

Transfere dados diretamente para a memória do PC;

Resolução de 8 a 16 bits, taxas de amostragens podendo chegar acima de 1 MHz, e;

Conversão A/D, D/A, operações de temporização.

- Comunicação Serial

Controle remoto serial para instrumentos simples;

Usual para distâncias longas;

Usual para controle remoto de subsistemas de aquisição de dados;

A maioria dos computadores possui uma interface RS-232, e;

Milhares de instrumentos estão disponíveis.

- Barramento VXI

Padrão mundialmente aceito desde 1987;

Instrumentos sofisticados, de alto desempenho;

Componentes modulares;

Compatível com os padrões VME e IEEE 488, e;

Velocidade alta e compartilhamento de memória.

2.6 Armazenamento e Apresentação dos Dados

Evidentemente, a aquisição não tem sentido se os dados não podem ser analisados. Por isto, o sistema de aquisição de dados deve dar condições para a análise dos dados coletados. Para isto, nem sempre é necessário o desenvolvimento de uma interface gráfica, pois o usuário do sistema pode estar familiarizado com alguma ferramenta de análise já existente. Neste caso, o sistema de aquisição necessita apenas armazenar os dados em um formato reconhecido pelo programa de análise do usuário.

Mesmo que uma interface gráfica deva ser desenvolvida junto com o sistema, é desejável que o arquivo de dados desta interface seja compatível com outras ferramentas de análise do usuário, se houver.

A maioria dos aplicativos de análise aceita arquivos de dados no formato ASCII. Contudo, estes arquivos possuem um tamanho (em octetos) muito superior aos arquivos binários. Por isto, se o volume de dados for muito elevado, pode-se armazenar os dados em arquivos binários e prover algum conversor para o formato ASCII.

Se os dados são adquiridos como números inteiros (como é o caso dos conversores A/D), é vantajoso conservá-los assim, pois tem-se uma economia de espaço de armazenamento. Neste caso, os dados devem ser convertidos para uma forma conveniente antes da análise. Para isto, é muito importante registrar a largura de código utilizada e

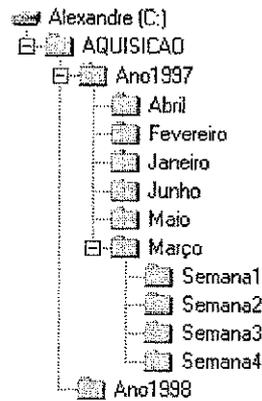


Figura 2.8: Estrutura de diretório usada para armazenagem de arquivos de dados no disco rígido.

as características do condicionamento (ganho, tensão de desvio, etc). Além disso, caso tenha sido usado um transdutor (a grandeza da qual se quer obter informação não é elétrica), as características do mesmo tem que ser usada para recuperar a informação desejada (seção 2.2.1).

Se a aquisição for feita contínua e automaticamente, o nome do arquivo de dados deve ser gerado sem a ajuda do usuário. Uma boa opção é usar o nome do arquivo de dados como uma codificação da data da aquisição. Por exemplo, um arquivo de dados gerado em 13 de junho de 1997 às 10:53 h pode ter o nome "97061310.dat". Esta opção, além de nomear o arquivo, possibilita que este seja facilmente identificado. Contudo, alguns "softwares" não suportam nomes de arquivos iniciados por números e, neste caso, alguma outra alternativa deve ser usada.

A data da aquisição também pode ser usada para organizar os arquivos de dados no disco rígido do computador. Por exemplo, pode-se usar a estrutura de diretórios apresentada na Figura 2.8 para localizar facilmente os dados referentes a uma data específica.

Caso seja necessário o desenvolvimento de uma interface gráfica para o sistema de aquisição de dados, deve-se optar por uma interface que seja familiar ao usuário do sistema. Ou seja, se o usuário já usa um instrumento de medição para visualizar o processo do qual se quer adquirir dados, é aconselhável que a interface do sistema de aquisição seja parecida com este instrumento. Isto facilitará bastante o uso do sistema. Um exemplo deste tipo de interface é o pacote LabView da empresa *National Instruments*. O LabView é um pacote para visualização e análise de dados que permite ao usuário criar a interface gráfica de sua preferência. Após ser criada pelo usuário, a interface torna-se o que o fabricante chama de instrumento virtual [8].

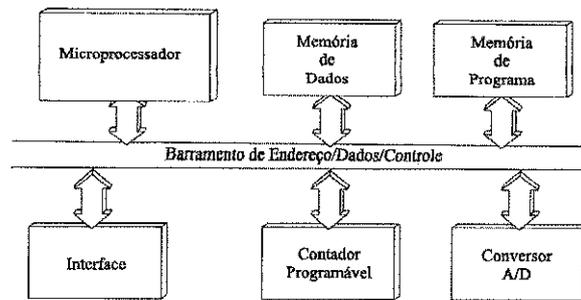


Figura 2.9: Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados baseado em microprocessadores.

Ferramentas de análise dos dados como integral, FFT, filtragem, podem não ser da responsabilidade do projetista de sistemas de aquisição de dados, porém ferramentas de visualização como o *zum* são muito importantes para a checagem dos dados adquiridos, e devem ser oferecidas pela interface do sistema de aquisição de dados.

2.7 Aquisição de Dados Remotos ou em Locais Especiais

Até agora, considerou-se que o local onde as grandezas estão presentes não impõe nenhuma restrição ao projeto. Contudo, nem sempre isto é verdade. Por exemplo, instrumentos biomédicos necessitam ser de pequenas dimensões, fáceis de usar e altamente modulares [2]. Além disso, amplificadores para isolação são uma segurança necessária na instrumentação biomédica, já que, dependendo dos transdutores e do local da medição, as correntes de fuga permisíveis são extremamente pequenas.

Devido às restrições de isolação e dimensões os instrumentos de medição usados em biomédica usam, na maioria das vezes, sistemas baseados em microprocessadores como o da Figura 2.9 [2] e [15].

O sistema da Figura 2.9 é composto por um microprocessador que opera em conjunto com um cartão de aquisição (placa de conversão A/D). Este sistema pode ser configurado para realizar aquisição de dados, além de possibilitar a geração de sinais de controle através de um dos pinos de saída do microprocessador. Durante a aquisição, os dados podem ser armazenados em memórias voláteis, e em seguida eles precisam ser enviados, através de uma interface serial ou paralela, a um dispositivo de armazenamento e análise (geralmente um microcomputador). Caso uma quantidade maior de canais seja necessária, um multiplexador analógico pode ser acrescentado ao sistema, contudo a taxa de aquisição de dados é reduzida pela quantidade de canais.

necessário apenas uma capacidade maior de armazenamento. Entretanto, a velocidade de processamento, principalmente em relação as operações de ponto flutuante, é bem inferior aos DSP's.

Por já possuir internamente a maior parte das funções necessárias a um sistema de aquisição de dados, o microcontrolador apresenta um ótimo equilíbrio entre custo, facilidade de uso e eficiência.

Os sistemas de aquisição descritos nesta seção necessitam de mais algumas considerações. Por exemplo, o sistema pode estar localizado onde não exista energia elétrica, e neste caso o consumo será um parâmetro adicional do projeto. Além disso, geralmente os dados inicialmente são armazenados em um local temporário e em seguida precisam ser transferidos para o local de armazenamento definitivo. Neste caso, dependendo da quantidade de pontos amostrados antes da transferência para o local definitivo, o armazenamento dos dados pode ser um fator limitante.

A transferência dos dados em si pode ser outra fonte de problemas, caso a distância seja muito grande ou haja muita interferência no trajeto. Por exemplo, um sistema de aquisição de dados usado para monitorar a estabilidade de uma usina nuclear não pode admitir a ocorrência de erros.

Na transmissão de dados por distâncias longas geralmente é usado um protocolo de comunicação serial (como o RS-232). Contudo, pode haver ocasiões em que o uso de linha física não seja aconselhável. Neste caso, o uso da telemetria via rádio frequência (RF) para a transmissão de dados, além de garantir, se necessário, uma maior isolação dos sistemas, elimina a necessidade de linha física.

Outra vantagem da telemetria via RF diz respeito à sistemas distribuídos. Neste tipo de sistema, no qual é necessário uma comunicação entre um grande número de subsistemas, o uso de telemetria via RF reduziria a complexidade da transmissão dos dados.

Quanto a incidência de erros, o sistema de aquisição pode operar em um ambiente que não possui apenas a informação desejada, mas também perturbações indesejadas e desconhecidas. Por isto, o sistema deve ser projetado de forma a diminuir o grau desta incerteza. Para esta tarefa, várias técnicas podem ser empregadas. Dentre elas pode-se citar os códigos de detecção e correção de erros.

Quando estes códigos são utilizados, adicionam-se bits extras a cada palavra de dado, de uma forma especial. Quando uma palavra é recebida, os bits extras são verificados para validar os dados recebidos.

Para se detectar d erros simples, é necessário um código de distância $d + 1$, pois com tal código não é possível converter uma palavra-código válida em outra com d

erros simples. Similarmente, para corrigir d erros simples é necessário um código de distância $2d + 1$, pois assim as palavras-código estão tão distantes que mesmo com d mudanças, a palavra original está ainda mais próxima que qualquer outra, e assim, pode ser determinada unicamente.

Um código de detecção de erros bastante eficiente é o código Reed-Solomon ou código $RS(n, k)$. No qual a capacidade de correção de erros é dada pela equação 2.3,

$$t = \frac{(n - k)}{2}, \quad (2.3)$$

na qual, k é o número de símbolos gerados pela fonte e n é o número de símbolos enviados após a codificação, que é igual a $n = 2^L - 1$, onde $L = \log_2^{n+1}$ é o comprimento da palavra.

Por exemplo, o código $RS(255, 155)$ permite corrigir $t = (255 - 155)/2 = 100$ erros simples, ou seja, em uma palavra de comprimento $L = 8$ bits, para cada 51 octetos de informação tem-se 20 octetos de redundância. Para enviar 1 k-octeto de informação, precisa-se de $1024 \times 20/51 = 402$ octetos de redundância.

2.8 Exemplos Discutidos

Para melhor ilustrar os passos necessários para o projeto e desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados baseados em microcontroladores, quatro sistemas de aquisição de dados são discutidos. Os fatos que motivaram o desenvolvimento dos sistemas e os resultados conseguidos também são analisados.

Os quatro sistemas desenvolvidos são:

- Aquisição de Dados para Manutenção Preditiva em Sistemas Elétricos

Um protótipo experimental de um sistema de aquisição de dados baseado em microcontrolador para monitoramento da corrente de fuga em isoladores de torres de transmissão é apresentado. Os dados adquiridos são enviados a um microcomputador, onde são armazenados. Um programa permite a análise dos dados através da apresentação em gráficos e algumas ferramentas de visualização, como o *zum*. Uma análise adequada desses gráficos possibilita a realização de uma manutenção preditiva em sistemas elétricos.

- Registrador de Perturbações em Subestações de Energia Elétrica¹

Algumas classes de manobras em sistemas elétricos de potência podem causar surtos. Em decorrência de uma atuação indevida da proteção da linha, estes surtos podem provocar o desligamento das linhas de transmissão. O conhecimento e a medição dos parâmetros desses surtos são importantes na identificação das suas causas. Para este caso, desenvolveu-se um protótipo de um sistema de aquisição de dados que registra as tensões e correntes do sistema elétrico, bem como os estados dos relés de proteção e de manobra no momento dos surtos. Os dados adquiridos são enviados a um microcomputador para armazenamento e estudo através de gráficos.

- Medição de Temperatura em Pára-Raios Energizados

Com o objetivo de estudar a estabilidade, a capacidade de absorção de energia e dissipação térmica dos pára-raios, associados ao seu desempenho elétrico, quando submetidos a diversos esforços, desenvolveu-se um sistema de aquisição de dados para medição de temperatura em seções de testes de pára-raios de óxido de zinco. As seções são submetidas a sobretensões na frequência industrial com níveis e duração distintos e impulsos de corrente com forma de onda $8/20 \mu s$. Os dados medidos são enviados até um microcomputador, no qual são armazenados, podendo-se analisá-los posteriormente com a ajuda de programas comerciais.

- Sistema de Aquisição de Dados Agrometeorológicos²

O planejamento do plantio de diversas culturas, bem como a determinação da necessidade de irrigação depende de vários tipos de dados meteorológicos. Mostra-se a implementação de um sistema de aquisição para estudo dessas grandezas. Para facilitar a coleta dos dados, usou-se dois módulos: um localizado no campo que coleta os dados e armazena-os em uma memória EEPROM, e outro que fica no laboratório e tem a função de receber os dados gravados na EEPROM e transferí-los até um computador, para análise posterior.

¹Sistema desenvolvido em conjunto com Elizabeth Lira Mendes (PIBIC/CNPq) sob orientação de Raimundo Carlos S. Freire e Gurdip Singh Deep.

²Sistema originalmente desenvolvido por Elizabeth Lira Mendes (PIBIC/CNPq) sob orientação de Raimundo Carlos S. Freire, Gurdip Singh Deep e Pedro V. Azevedo.

que combina a redução de tamanho e a alta velocidade dos TTL com o baixo consumo e alta imunidade a ruído dos dispositivos CMOS [16].

Para o desenvolvimento de projetos baseados no microcontrolador MC68HC11, existem diversas placas, mas neste trabalho utilizou-se a M68HC11EVB, que possui programa monitor de interface amigável (BUFFALO), gravado em memória EPROM. Além disso, ela possui também um adaptador para comunicação serial baseado no circuito integrado MC6850, memória RAM e EPROM, oferecendo um ambiente de desenvolvimento eficiente para a maioria das aplicações.

Por todas essas características, o MC68HC11 se constitui em uma ferramenta bastante poderosa para o desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados e controle.

2.10 Conclusão

As funções principais do sistema de aquisição de dados são: aquisição, análise e apresentação dos dados. Contudo, para desempenhar estas funções, eles necessitam de dois tipos de acessórios: transdutores e condicionadores de sinais.

Atualmente o microcomputador é uma das plataformas mais usadas em sistemas de aquisição de dados. Para esta plataforma, quatro soluções são mais usadas: cartões de aquisição, comunicação serial, barramento GPIB e VXI. Cada configuração tem características e vantagens bem definidas, sendo que a comunicação serial é utilizada em sistemas mais simples, enquanto que o barramento VXI suporta aplicações mais refinadas. Contudo, deve-se lembrar que essas topologias podem ser mescladas para melhor atender às necessidades do usuário do sistema.

Sistemas de aquisição de dados remotos, localizados em ambientes hostis ou de difícil acesso, devem ter características adicionais, como a transmissão de dados através de longas distâncias, necessidade de baixo consumo, pequenas dimensões, etc. Para esses sistemas, os microcontroladores são ótimas alternativas, pois incorporam vários blocos funcionais necessários à essa aplicação.

Na maioria dos casos, os sistemas de aquisição de dados vêm acompanhados de programas computacionais que têm as funções de gerenciamento das tarefas e análises dos dados. Para isto, várias características devem ser satisfeitas. Em particular, um programa de aquisição de dados deve oferecer várias ferramentas de visualização e análise de um conjunto particular dentre os dados coletados. Além disso, sua interface deve ser bastante intuitiva, assemelhando-se a um instrumento de medição.

Para um melhor entendimento das discussões apresentadas aqui, nos próximos capítulos, os quatro exemplos de sistemas de aquisição de dados são apresentados.

Capítulo 3

Aquisição de Dados para Manutenção Preditiva em Sistemas Elétricos

Em regiões com alto grau de poluição (altas taxas de partículas de materiais suspensas no ar), como por exemplo nas proximidades de grandes parques industriais, forma-se na superfície dos isoladores de sistemas elétricos, uma camada de poluentes contendo sais solúveis diluídos, ácidos ou alcalinos. Esta camada de poluição pode ser por si só condutora ou não. Caso não seja, quando a superfície do isolador torna-se parcialmente ou totalmente umedecida (por neve, chuva, gelo, umidade, etc), a camada de poluição torna-se condutora.

A partir daí, uma vez energizado o isolador, uma corrente de fuga flui através da superfície condutora formada pelos poluentes. Esta corrente gera calor, que seca algumas regiões da superfície poluída. Contudo, esta "secagem" é sempre não uniforme e em seu lugar a condutividade é quebrada por bandas secas que interrompem a corrente. Apesar disso, a tensão aplicada através destas bandas (que podem ter apenas poucos centímetros de largura) causa a ruptura do dielétrico do ar e elas são ultrapassadas por arcos cada vez que ocorre uma descarga.

Com o aumento da camada de poluição, estas descargas são cada vez mais frequentes. Nos casos mais extremos os arcos são capazes de conduzir a corrente continuamente ao longo do isolador, estabelecendo-se um caminho fase-terra, e o "flashover" ocorre.

Este processo provocou noventa e oito falhas transitórias no sistema de transmissão da CHESF, no período de julho de 1980 a dezembro de 1992, sendo que em mais de cinco situações, este fenômeno provocou atuações indevidas do sistema de proteção, levando ao corte de energia elétrica em diversos estados desta região [17].

Para não se chegar a tais situações, é necessário efetuar-se uma manutenção nas cadeias de isoladores que compõem o sistema. O método mais eficiente de manutenção consiste na lavagem da superfície dos isoladores [18]. Por esta razão, várias empresas do setor elétrico têm desenvolvido métodos para efetuar esta lavagem. Como por exemplo, após o desligamento de uma de suas linhas de transmissão em 1983, provocado por um surto proveniente do depósito de poluentes nos isoladores daquela linha, a ELETRONORTE desenvolveu um método de lavagem de isoladores em "linha viva" de 500 kV [19].

O método de lavagem dos isoladores necessita do desenvolvimento de uma coordenação de lavagem de isoladores, e conseqüentemente, da aquisição de equipamentos especializados e de treinamento de pessoal. Por isso, apesar de eficiente, o método é bastante caro. Isto levou à busca de técnicas para diminuir a freqüência das lavagens. A técnica mais simples consiste em aumentar-se o comprimento da cadeia de isoladores. Apesar disso, devido a relação custo/benefício, nem sempre esta prática pode ser empregada.

O surgimento de novos materiais que repelem a água permitiu um enfoque novo do problema. Alguns testes mostram que isoladores revestidos com silicone ou alguns derivados do petróleo propiciam proteção para os isoladores [18]. Apesar disso, a exposição contínua ao efeito corona, à luz ultravioleta, à erosão provocada pela água, ou a alguma falha na camada de proteção, fazem com que a propriedade de repelir a água desses materiais seja reduzida. Quando isto ocorre, a camada tem que ser retirada e uma nova terá que ser aplicada, a um custo considerável.

Portanto, apesar da existência de materiais que garantem a proteção dos isoladores contra o efeito corona, ainda é necessário uma manutenção para melhorar a relação custo/benefício. Sem um conhecimento detalhado da evolução da poluição nos isoladores, ou seja, sem o conhecimento da degradação da capacidade de isolação com o tempo, é necessário realizar-se periodicamente uma manutenção preventiva no sistema. Esta manutenção pode estar sendo realizada em um espaço de tempo desnecessariamente curto. Um estudo mais detalhado sobre a evolução da poluição possibilita anunciar antecipadamente a ocorrência de "flashover" e, com isso, a diminuição da freqüência da manutenção.

O estudo da evolução da degradação da capacidade de isolação das cadeias de isoladores com o tempo, além de auxiliar na manutenção de tais cadeias, é de grande importância na escolha do tipo de isolação para áreas poluídas, quando se vai expandir o sistema elétrico. Como exemplo, podem-se citar várias pesquisas desenvolvidas para avaliar-se o efeito da poluição na performance de isoladores localizados na região do

deserto da Arábia Saudita [20], [21] e [22]. Neste caso, foram erguidas duas estações de testes, uma na costa daquele país e outra a 7 km de distância. Foram coletados então, mensalmente, dados referentes ao grau de poluição das cadeias de isoladores através de vários métodos (corrente de fuga, $I_{highest}$ e contagem de surtos), levando-se em consideração a altura da cadeia de isoladores em relação ao solo, condições climáticas, período do ano, hora do dia, orientação da cadeia de isoladores, etc.

No trabalho realizado na Arábia Saudita, usou-se também um recipiente graduado instalado a uma distância padrão de 3 m do solo, para coletar-se informação sobre o grau de poluição da região. Com uma confiança razoável, conseguiu-se estimar o grau de contaminação daquela área [21]. Esta deve ser a ferramenta mais barata para este propósito.

Existem hoje diversos métodos para verificar-se o grau de poluição em isoladores. Cada método baseia-se em uma determinada variável que dá indicação do grau de contaminação dos isoladores (ESDD, condutância da superfície do isolador, "salt fog", etc). Esta indicação pode ser dada monitorando-se a corrente de fuga que flui pela superfície dos isoladores, visto que, o aumento da camada de poluentes provoca um aumento correspondente na intensidade da corrente de fuga. As pesquisas desenvolvidas no deserto da Arábia Saudita [21] apontaram o método baseado na corrente de fuga como sendo o de melhor resultado, em comparação com outros métodos analisados.

Apresenta-se neste capítulo, um sistema de aquisição de dados para monitorização do valor de pico da corrente de fuga ($I_{highest}$) em cadeias de isoladores. Os dados adquiridos são armazenados no disco rígido de um microcomputador e um programa gráfico permite a visualização dos resultados. O sistema é proposto para auxiliar na manutenção das cadeias de isoladores, porém, como dito anteriormente, também pode ser usado como um auxílio para ajudar na escolha da isolação adequada em regiões poluídas.

3.1 Métodos de Medição do Grau de Poluição

Existem vários tipos de métodos para determinar-se o grau de poluição de uma região. A escolha de um destes métodos depende de fatores como o local onde a isolação será usada, a natureza das fontes de poluição mais próximas, a extensão do sistema de potência, etc.

Dentre os métodos de medição do grau de poluição, talvez os mais importantes sejam: Densidade Equivalente de Depósito de Sal ("Equivalent Salt Deposit Density" - ESDD), Condutância da Superfície e Corrente de Fuga [23].

3.1.1 Densidade Equivalente de Depósito de Sal

A Densidade Equivalente de Depósito de Sal ("Equivalent Salt Deposit Density" - ESDD) é o depósito de sal equivalente, em $mg \cdot NaCl/cm^2$ da área da superfície de um isolador, que terá uma condutividade elétrica igual a do depósito atual dissolvido na mesma quantidade de água.

Para realizar o teste é necessário retirar-se amostras da poluição da superfície do isolador. Em seguida, a amostra é dissolvida em uma quantidade conhecida de água destilada. A ESDD pode ser calculada da condutividade da solução resultante, da área da superfície do isolador, do volume de água e da sua temperatura.

Para determinar-se o grau de poluição, medições precisam ser feitas com frequência suficiente para encontrar-se o nível máximo entre períodos de lavagem natural. Se lavagens naturais são freqüentes, um intervalo de amostra maior pode ser suficiente para obter-se informações sobre o acúmulo de poluição como função do tempo. Por outro lado, se a poluição acumula-se rapidamente, um período de tempo menor precisa ser usado.

É importante notar que a ESDD é afetada não apenas pelo tipo de isolador, mas também por sua posição, isto é, seu ângulo em relação a vertical e sua orientação.

3.1.2 Condutância da Superfície

A condutância da superfície é a razão da corrente que flui sobre um isolador pela tensão aplicada. A tensão usada é alta (em torno de 30 kV por metro do comprimento do isolador), mas ela é menor que a tensão de serviço, além disso ela é aplicada apenas por poucos segundos.

A condutância da superfície indica o estado geral do isolador. Logo, é considerado um método ótimo para determinar-se o grau de poluição de uma região.

As experiências têm revelado que a tensão deve ser aplicada por um período que vai de dois a cinco ciclos, e que a corrente que flui durante o primeiro ciclo deve ser ignorada.

Na Figura 3.1 apresenta-se o diagrama de blocos do circuito de medição utilizado para medir-se a condutância da superfície. A tensão de 10 kV eficaz é aplicada durante dois ciclos e a corrente de fuga é detectada por meio de um detector de pico. Essas medições são normalmente repetidas a cada quinze minutos, e os resultados são armazenados.

O uso de uma tensão de teste menor que a de serviço é a grande vantagem deste método, pois reduz o risco da ocorrência de "flashover" durante o teste. Além disso, o

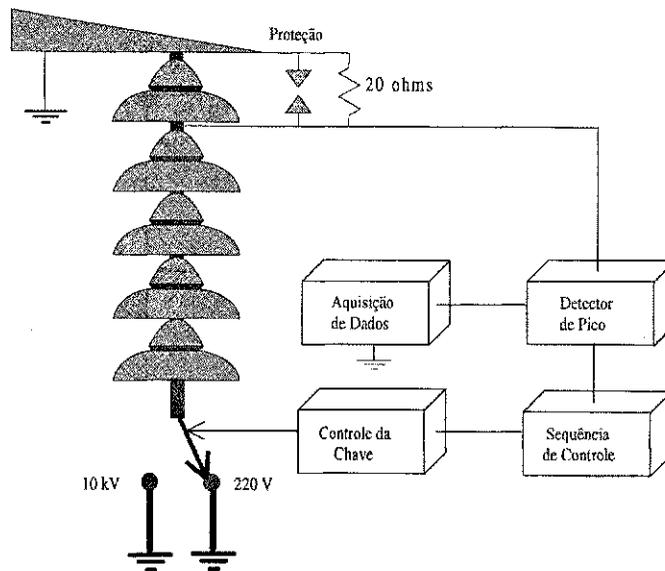


Figura 3.1: Diagrama de bloco do circuito usado para medição da condutividade da superfície de um isolador.

uso de uma tensão menor necessita de um isolamento relativamente barato, e o risco baixo da ocorrência de "flashover" permite uma automação completa dos dispositivos de medição.

3.1.3 Corrente de Fuga

Existem dois métodos de medição do grau de poluição através da monitorização da corrente de fuga na superfície dos isoladores, um é baseado na contagem dos surtos e o outro na magnitude destes surtos.

Contagem de Surtos

O método da contagem de surtos é baseado no registro, por um período dado, do número de vezes que a amplitude da corrente de fuga sobre um isolador energizado na sua tensão de serviço, ultrapassa um determinado valor.

A ocorrência da corrente de fuga precede a fase final do processo de poluição. Ambas, frequência e magnitude do surto, aumentam com a aproximação do processo de "flashover". Por isso, através do método de contagem de surtos pode-se monitorar a condição de poluição do isolador e ter-se uma indicação da iminência do processo de "flashover". Na Figura 3.2 ilustra-se o esquema de conexão do contador.

Os contadores utilizados são normalmente configurados para operar acima de um nível de corrente tal como 20, 50, 100 ou 250 mA. Entretanto, estudos recentes revela-

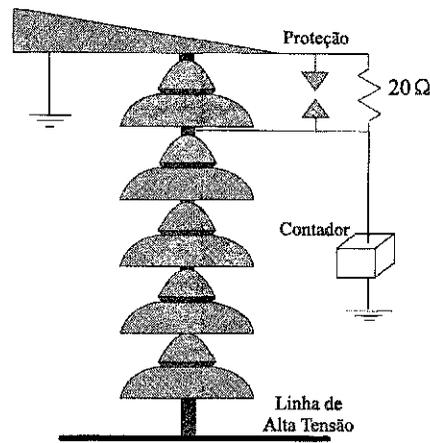


Figura 3.2: Esquema de conexão dos contadores de surtos para o método da corrente de fuga.

ram que os níveis de 100 e 250 mA são mais expressivos [24] e [25].

A grande desvantagem deste método é a dependência do número de surtos com o tipo do isolador. Portanto, não possibilita uma medida absoluta do grau de poluição. Por isso, o método é aconselhável para indicar o comprimento da cadeia para ampliação ou reinstalação do sistema. Por outro lado, as grandes vantagens deste método são os baixos custos e a possibilidade de monitorizar-se vários isoladores continuamente e ao mesmo tempo.

Magnitude da Corrente de Fuga ($I_{highest}$)

O método que usa a magnitude da corrente de fuga baseia-se no registro do pico desta corrente (I_h) durante um dado período, sobre um isolador continuamente energizado na sua tensão de trabalho.

I_h aumenta até um certo valor crítico, I_c , acima do qual o "flashover" ocorre (Figura 3.3). O valor correspondente da tensão aplicada é denominado V_c . O limite inferior do pico da corrente de fuga no semiciclo anterior ao "flashover", $I_{máx}$, quando registrado é uma boa aproximação para I_c . Desta forma, o valor crítico, I_c , pode ser facilmente determinado experimentalmente.

O instrumento utilizado para fazer-se a monitorização precisa ser simples e livre de necessidade de manutenção, pois a medição de I_h tem que ser realizada por um período grande de tempo.

A principal vantagem deste método é a possibilidade de um registro contínuo do efeito combinado das condições climáticas e da tensão aplicada sobre o desempenho do isolador, além disso pode-se citar como vantagem também a sua simplicidade e a

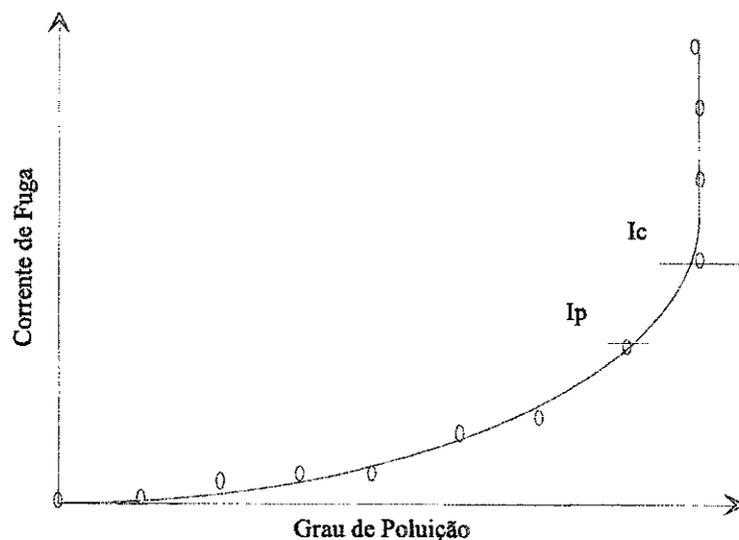


Figura 3.3: Corrente de fuga versus grau de poluição para uma dada tensão.

facilidade de comparar-se os dados coletados com dados adquiridos experimentalmente. Por outro lado, os custos dos equipamentos utilizados para a realização dos testes em laboratório são relativamente altos.

3.2 Escolha do Método

A escolha do método de monitorização depende das características do sistema elétrico, dos poluentes encontrados na região e do objetivo para o qual se está fazendo a monitorização. Alguns métodos existentes necessitam de equipamentos relativamente caros (como transformadores, fontes de alimentação com baixa impedância), logo não são indicados para regiões onde a poluição não é intensa ou para sistemas de pequeno porte. Entretanto, tais métodos seriam justificados em sistemas com uma rede elétrica grande.

Existem métodos que são dependentes do modelo e da orientação das cadeias de isoladores no espaço (como por exemplo o ESDD, seção 3.1.1), por isso deve ser usado um modelo padrão de isolador para realizar-se comparações entre regiões.

Outro fator muito importante é o tempo. Para determinar-se o grau de poluição de uma região, e conseqüentemente o tipo de isolação adequada para essa região, é necessário que a monitorização seja realizada por tempo suficiente. Este tempo varia de região para região e depende do tipo de poluentes encontrados na região. Como exemplo, o sal pode contaminar um isolador, em áreas costeiras, em apenas algumas horas, porém basta uma simples chuva fina para retirar a camada de poluentes. Já outros tipos de poluentes, como a poeira de cimento, necessita de vários meses para impregnar

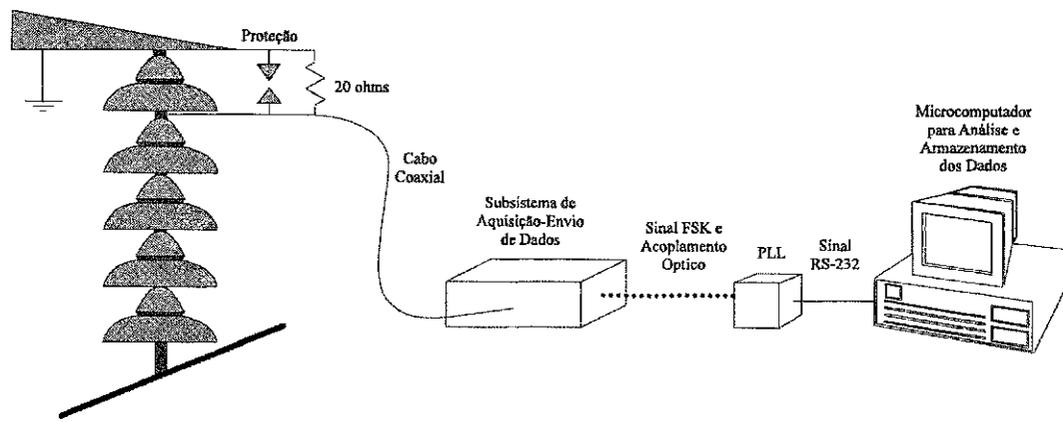


Figura 3.4: Diagrama de bloco do sistema de monitoramento da corrente de fuga.

uma cadeia de isoladores [23]. Neste caso, um intervalo de monitorização de alguns anos tem que ser levado em consideração para chegar-se a conclusões importantes.

3.3 Características do Sistema Proposto

O sistema proposto deve adquirir, em intervalos de 15 min, os valores de pico da corrente de fuga de isoladores localizados no pátio das subestações e envia-los até um microcomputador para armazenamento. Para isto, durante quinze minutos são amostrados dez valores de pico da corrente de fuga (um a cada 1,5 minuto). Após 15 minutos, a média desses dez valores é efetuada e armazenada. Além disso, para um melhor estudo do comportamento da corrente de fuga, a cada quinze minutos (após efetuar-se a média dos dez valores de pico), amostra-se o sinal da corrente de fuga durante dois ciclos de 60 Hz, com uma taxa de 62,5 kHz, perfazendo um total de 2.084 amostras, que são armazenadas conjuntamente com a média dos valores de pico da corrente de fuga. Posteriormente, os dados coletados podem ser analisados em um microcomputador tipo PC.

Como os dados são adquiridos em isoladores no pátio da subestação, o sistema foi dividido em dois subsistemas (Figura 3.4), o subsistema de aquisição-envio de dados e o subsistema de coleta-análise de dados. O primeiro é responsável pela temporização dos eventos, a aquisição dos dados e o envio dos mesmos até o subsistema de coleta-análise de dados, que é encarregado de receber os dados enviados, armazená-los, além de possibilitar uma visualização posterior.

As principais características do sistema proposto são apresentadas a seguir:

- Amplificador com controle automático do ganho;

- Retificador de exatidão para aumentar a resolução das conversões;
- Detector de pico com largura de faixa de 1 MHz para medir o valor máximo da corrente de fuga;
- Temporização dos eventos e aquisição de dados baseada no microcontrolador MC68HC11;
- Modulação FSK para envio dos dados coletados no subsistema de aquisição-envio de dados até o subsistema de coleta-envio de dados;
- Acoplamento óptico para isolamento, e;
- Microcomputador para armazenagem e análise dos dados coletados.

Como é apresentado nas próximas seções, o uso do microcontrolador para desenvolvimento do sistema facilitou bastante a implementação das características deste. Cada uma dessas características é analisada a seguir.

3.3.1 Controle Automático de Ganho

A intensidade da corrente de fuga varia muito durante o ano e até no decorrer do dia, dependendo significativamente das condições climáticas, do grau de poluição da região e da solução eletrolítica formada na superfície do isolador. Para que se tenha uma melhor resolução na conversão A/D do sinal de corrente de fuga, faz-se necessário o uso de um bloco funcional que altere o ganho dos condicionadores dos sinais de entrada dependendo de suas intensidades. Este bloco foi desenvolvido com um amplificador inversor com ganho variável e com o microcontrolador.

O amplificador com ganho variável (Figura 3.5) usa um multiplexador analógico para selecionar o resistor que define o ganho de malha fechada do amplificador de entrada. A seleção deste resistor é efetuada por um sinal proveniente de uma das portas de saída do microcontrolador, aplicado a linha de controle do sistema de chaveamento (Figura 3.5). Este controle seleciona inicialmente o ganho mínimo e então realiza a conversão de dois ciclos do sinal da rede elétrica. Como o conversor A/D do MC68HC11 é de oito bits, o sinal digitalizado está entre 0 e 255, por isto, verifica-se se pelo menos uma das amostras é maior que 127 (metade da faixa). Caso isto seja verdade, o ganho está compatível com a grandeza da corrente de fuga e os dados serão armazenados, caso contrário, o ganho do amplificador é dobrado e uma nova conversão da corrente de fuga é realizada, até que o ganho ideal seja encontrado ou chegue ao ganho máximo.

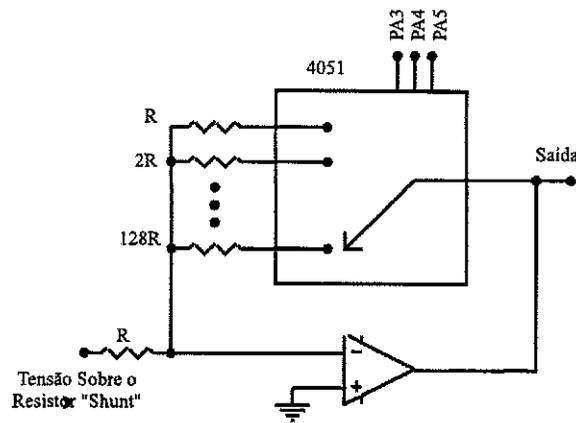


Figura 3.5: Circuito de chaveamento do controle automático de ganho.

Para o circuito de chaveamento, utilizou-se o circuito integrado 4051 que possibilita a escolha de oito ganhos diferentes, o primeiro igual a um, o segundo igual a dois e assim por diante, até o oitavo com ganho igual a 128.

Um ganho automático é indicado em qualquer sistema de aquisição de dados, cuja amplitude da grandeza medida varie muito durante a observação. O controle automático de ganho discutido nesta seção tem uma faixa de ganho muito elevada, porém, durante a análise dos dados coletados, uma compensação deve ser feita devido a exatidão dos resistores usados no controle. No sistema proposto, esta compensação é feita pelo programa de visualização dos dados. Contudo, um sistema de autocalibração, usando uma tensão de referência fixa, também poderia ser usado.

3.3.2 Detector de Pico

O conversor A/D do microcontrolador MC68HC11 tem taxa máxima de amostragem de 62,5 kHz. Isto não é suficiente para registrar o valor máximo do sinal da corrente de fuga, pois este sinal, em alguns casos, pode ter componentes na faixa de 1 MHz. Por isso, é necessário um detector de pico com esta largura de faixa. O detector de pico proposto é apresentado na Figura 3.6. O transistor T1 funciona como uma chave que abre (permitindo o carregamento do capacitor) ou fecha (descarregando o capacitor) dependendo do comando dado pelo microcontrolador. A cada 1,5 min o pico é armazenado e o microcontrolador envia um sinal, através de um de seus pinos de saída, para descarregar o capacitor (Figura 3.6), e após 15 minutos (ou seja, após o armazenamento de dez valores de pico), é retirada a média dos dez valores de pico armazenados, e apenas esta média é enviada.

Sozinho, este detector de pico não atende a todos os pré-requisitos do projeto, pois, como dito na seção 3.3, pretende-se armazenar um valor de pico a cada 1,5 minuto. Este

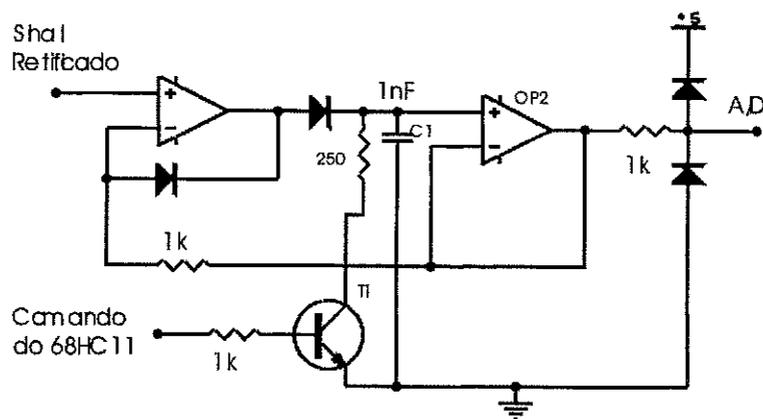


Figura 3.6: Detector de pico do sinal da corrente de fuga.

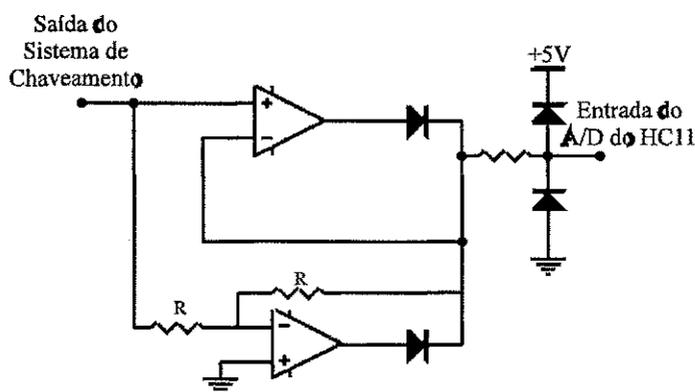


Figura 3.7: Circuito retificador de precisão.

intervalo de tempo é bastante grande e o capacitor C1 (Figura 3.6) pode descarregar-se através do amplificador OP2, devido a sua corrente de polarização. Uma solução encontrada para este caso é verificar-se a cada $16 \mu s$ (intervalo de amostragem mínimo do A/D do MC68HC11) se o valor da tensão sobre o capacitor C1 não é maior que o valor anterior. Se for, o valor será atualizado. Dessa forma, reduz-se o tempo máximo que o capacitor C1 pode descarregar-se através do amplificador OP2 de 1,5 minuto para $16 \mu s$.

3.3.3 Retificador de Precisão

Como o sinal da corrente de fuga é simétrico, ou seja, o que acontece durante o pico positivo tende a ocorrer no pico negativo, o sinal após ser amplificado é retificado para aumentar-se a resolução das conversões. Para isto foi usado o circuito retificador da Figura 3.7. Após a retificação, durante a visualização dos dados, o programa residente no PC realiza a restauração do sinal original.

Caso esta retificação não fosse usada, cada semiciclo da corrente de fuga ocuparia

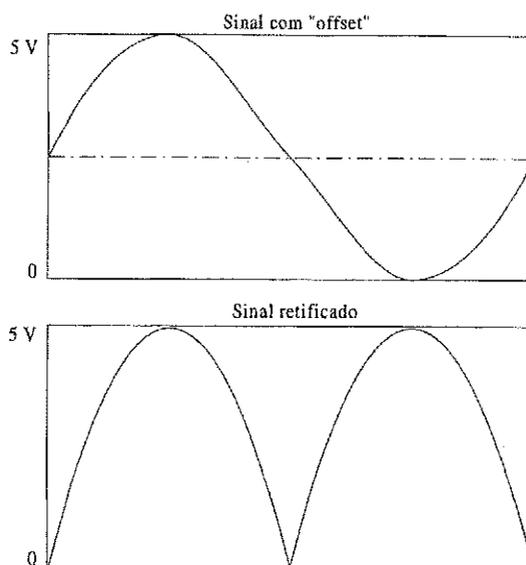


Figura 3.8: Sinal aplicado ao conversor A/D do MC68HC11 caso não houvesse retificação e após a retificação.

metade da faixa de conversão do A/D (Figura 3.8), com seu uso, cada semiciclo ocupa toda essa faixa. Isto aumenta em um bit a resolução das conversões.

Esta retificação para sinais simétricos, soma-se ao que foi discutido na seção 2.4.4 sobre aumento da resolução dos dados.

3.3.4 Microcontrolador MC68HC11

O microcontrolador MC68HC11 é o componente principal do sistema de aquisição-envio de dados. Ele é responsável pela temporização dos eventos, pela aquisição dos dados, pelo controle automático de ganho e pelo envio de dados até o subsistema de coleta-análise de dados.

Para este sistema conta-se com os recursos de um conversor A/D de aproximações sucessivas de oito bits, com tempo de conversão de $16 \mu s$, um temporizador de 16 bits, que tem frequência de funcionamento de 2 MHz, além de portas de entrada/saída compatíveis com o padrão RS-232.

As tarefas do microcontrolador são gerenciadas por um programa executivo desenvolvido em linguagem assembler, cujo fluxograma é apresentado na Figura 3.9.

Primeiramente o programa inicializa seu contador, que vai ser responsável pela temporização de todas as tarefas do microcontrolador, e configura sua interface RS-232. Em seguida, verifica se já é tempo de efetuar a aquisição de dois ciclos da corrente de fuga (as aquisições são feitas a cada 15 minutos). Enquanto isto, a cada $16 \mu s$, é feita uma aquisição da tensão sobre o capacitor C1 (Figura 3.6). Se o valor encontrado

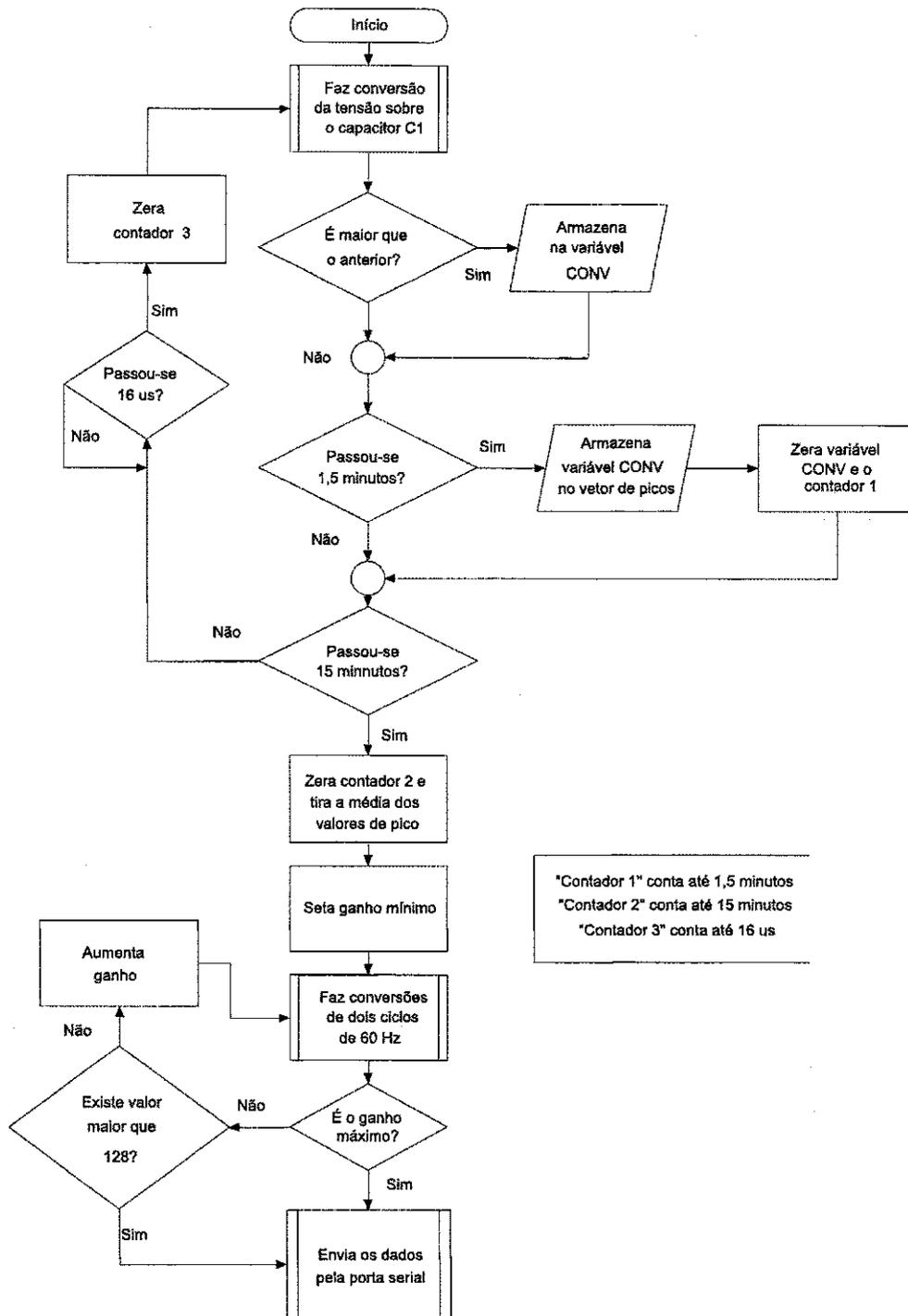


Figura 3.9: Fluxograma do programa que controla as tarefas do microcontrolador.

for maior que o anterior, o valor é atualizado. Logo após, verifica-se se já passou 1,5 minuto. Se sim, a média dos valores de pico é armazenada. Após quinze minutos, o microcontrolador armazena a média dos dez valores de pico coletados e seleciona o ganho mínimo (igual a um) para o amplificador do sinal da corrente de fuga e realiza 2.084 conversões deste sinal a uma taxa de 62,5 kHz. Caso não encontre nenhum valor maior que 127 (metade da tabela) o microcontrolador dobra o ganho do amplificador e realiza novas conversões, até que seja encontrado pelos menos um valor maior que 127 ou tenha-se chegado ao ganho máximo (como foi explicado na seção 3.3.1). Em seguida, o microcontrolador envia os dados coletados até um microcomputador, onde os mesmos serão armazenados.

Para desenvolver este protótipo foi projetado um sistema no qual o microcontrolador trabalha no modo multiplexado estendido, contando assim com 256 octetos de memória RAM e 512 octetos de EEPROM, ambas internas ao microcontrolador, além de 16 k-octetos de memória externa, da qual usou-se 8 k-octetos de memória RAM (para armazenamento dos dados amostrados) e 8 k-octetos de memória EPROM (para armazenamento do programa gerente).

Para alimentação do microcontrolador, assim como de todos os componentes dos sistema (como conversor A/D, memórias, registradores, decodificador), usa-se uma tensão de 5 volts, que foi conseguida a partir da rede elétrica. Desse modo, todas as grandezas tiveram que ser condicionadas a esta faixa de tensão.

3.3.5 Modulação FSK

Os dados adquiridos são enviados do subsistema de aquisição-envio de dados para o subsistema de coleta-análise dos dados. A distância entre os dois subsistemas e a incidência de interferências podem ser grandes, por isto, modula-se o sinal padrão RS-232 em salto de frequência (FSK), para melhorar a confiabilidade do envio dos dados até o microcomputador. Para isto, utiliza-se o circuito integrado 4046, tanto na modulação quanto na demodulação do sinal serial. O circuito de modulação é apresentado na Figura 3.10 e o de demodulação na Figura 3.11.

No transmissor, usou-se apenas o VCO interno ao 4046 para modular o sinal padrão RS-232. Neste caso, o VCO tem faixa de captura entre 10 kHz e 20 kHz, o que assegura uma transmissão segura a uma taxa de transmissão de até 4.800 Baud. Como o tempo entre cada envio de dados é de 15 minutos, esta velocidade é satisfatória.

Na recepção, o 4046 é configurado como PLL e tem uma faixa de captura entre 8,5 kHz e 21,5 kHz. Com a ajuda de um comparador, permite-se então recuperar o sinal RS-232 de forma aceitável.

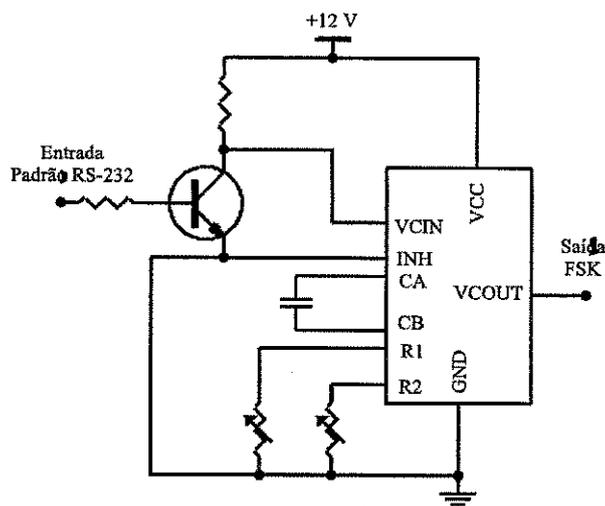


Figura 3.10: Modulador FSK baseado no CI 4046.

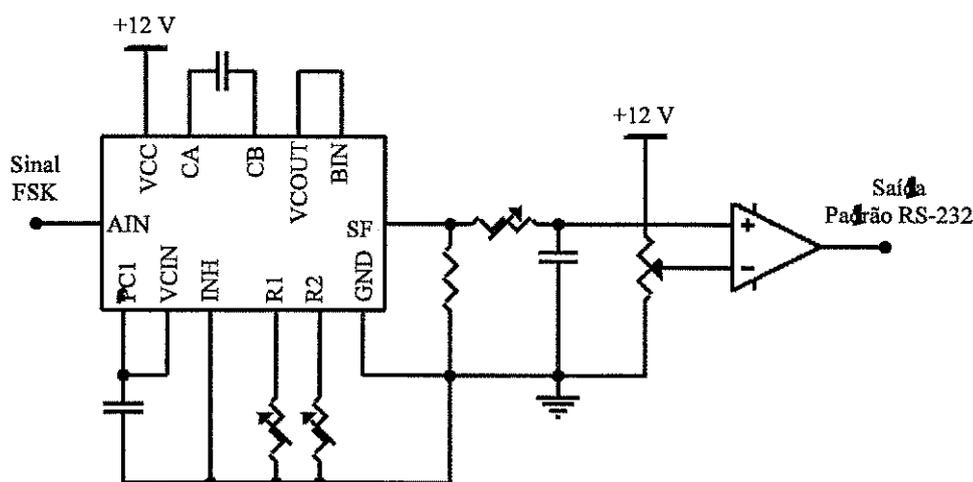


Figura 3.11: Receptor FSK baseado no CI 4046.

O uso de modulação em salto de frequência para envio de dados neste protótipo ilustra o que foi discutido na seção 2.7 sobre integridade dos dados durante a transmissão dos mesmos. Neste caso, os fatores que influenciaram o uso de modulação foram a grande distância entre os dois subsistemas e uma possível interferência externa. Além disso, não usou-se códigos com detecção e correção de erros, pois a existência de alguns dados errados dentre as amostras não constitui um problema muito grave, pois não causaria danos aos equipamentos ou operadores do sistema.

3.3.6 Acoplamento Óptico

Como os dados são adquiridos de sistemas de alta potência é necessário uma isolação entre os subsistemas que compõem o sistema de aquisição de dados. Por isso, após o

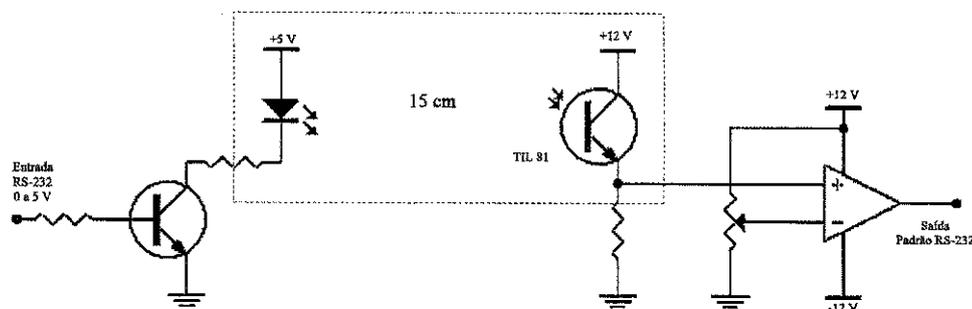


Figura 3.12: Isolação do sistema de monitoramento da corrente de fuga.

signal RS-232 ser modulado, é utilizado acoplamento óptico entre os dois subsistemas. O circuito implementado é mostrado na Figura 3.12. O fotodiodo é mantido a cerca de 15 cm do fototransistor por um cilindro plástico. Apesar da distância ser de 15 cm, o computador recupera o sinal RS-232 de forma aceitável.

Outra alternativa para a isolação de sistemas desse tipo é a telemetria com RF. O uso de telemetria com RF providencia uma isolação bem maior que o acoplamento óptico, além disso dispensa a necessidade de cabos que, dependendo da distância, podem encarecer o projeto.

Para o caso específico do sistema de monitoramento da corrente de fuga, a necessidade de usar-se linha física para transmissão de dados não constitui um problema grande, pois o sistema foi concebido para operar em subestações de energia elétrica, onde já existem vários cabos coaxiais interligando toda a subestação.

3.3.7 Apresentação e Armazenamento dos Dados em Microcomputador

Após as aquisições, os dados coletados são enviados a um microcomputador que fica dedicado exclusivamente ao sistema. No microcomputador os dados são armazenados e ficam disponíveis para visualização. Para isto, o programa residente no PC conta com uma interface em ambiente DOS bastante amigável, e possibilita a análise dos dados através de traçados de curvas, mudanças de escalas, zoom, etc.

Este programa permite a configuração da comunicação entre o microcontrolador e o microcomputador. Após esta configuração, o programa está pronto para efetuar a coleta dos dados indefinidamente. Contudo, caso deseje-se fazer a visualização dos dados, a coleta dos mesmos tem que ser interrompida. Isto poderia ser contornado se fosse utilizado um programa TSR¹ separado para a coleta dos dados.

¹Programa computacional que fica residente no PC e possibilita a execução de outros programas em "paralelo".

Como o volume de dados é muito grande, os dados são armazenados em arquivos binários, cujo os nomes codificam a data da aquisição como na seção 2.6.

3.4 Conclusão

A capacidade de isolação das cadeias de isoladores em áreas poluídas pode ser seriamente comprometida pelo acúmulo de poluentes na superfície dos isoladores que compõem tais cadeias. O conhecimento da evolução desta camada de poluentes com o tempo é de extrema importância na escolha da isolação ideal para uma determinada região poluída e para a manutenção preventiva desta isolação. Por isto, um método de monitorização da capacidade de isolação tem que ser adotado.

Na escolha deste método, vários fatores têm que ser levados em consideração. Por exemplo, o tamanho do sistema elétrico, o tipo de poluição local, os custos envolvidos para a implantação dos métodos, etc. Por isto, talvez seja aconselhável a adoção de mais de um método para encontrar-se o meio mais adequado ao caso em questão.

O método da magnitude da corrente de fuga ($I_{highest}$) tem mostrado ser bastante confiável como método de monitorização da capacidade de isolação de sistemas elétricos. Porém, o custo dos equipamentos necessários para a realização de testes em laboratório é relativamente alto. Por isto, sua escolha, como a de qualquer outro método, tem que ser estudada com cautela.

Mostrou-se um sistema de aquisição de dados para monitorização da corrente de fuga em isoladores de alta tensão. O sistema pode, sem dúvida, avaliar a corrente de fuga, porém, devido a dependência da corrente de fuga com as condições climáticas, seu uso na manutenção da isolação em sistemas elétricos só estará completo com o monitoramento, também, da temperatura e da umidade no decorrer das aquisições.

Com este sistema, ilustra-se então uma classe de sistemas de aquisição de dados que, além de localizar-se distante do local de análise dos dados, necessita funcionar independente de operador. Por isto, o sistema foi dividido em dois subsistemas e, por isto, necessita transmitir os dados até uma unidade de análise, além de ser portátil e livre de manutenção. Neste caso, não há preocupação com o consumo, pois o sistema é alimentado diretamente da rede elétrica.

Para a monitorização de várias cadeias de isoladores simultaneamente, o uso de telemetria com RF facilitaria a transmissão de dados entre vários subsistemas de aquisição-envio de dados e um único subsistema de coleta-análise de dados.

Neste sistema, apesar da possível degradação dos dados por interferências, foi utilizado apenas modulação para a transmissão dos dados. Em situações nas quais a inte-

gridade dos dados é indispensável, por exemplo, em sistemas nos quais erros nos dados causariam prejuízos financeiros grandes, ou poriam em risco vidas humanas, poder-se-ia fazer um estudo do tipo de interferência para usar-se um determinado código de detecção e correção de erros, como discutido na seção 2.7.

Capítulo 4

Sistema de Aquisição de Dados Agrometeorológicos

O conhecimento de dados agrometeorológicos é útil no planejamento do plantio em diversos tipos de solos, como por exemplo, para a determinação da necessidade e da quantidade de irrigação, especialmente na região nordeste brasileira, de um modo geral, carente de recursos hídricos. A aquisição de dados referente ao crescimento de uma determinada cultura existente fornece informações relacionadas ao seu desenvolvimento, podendo ser útil para dimensionar as necessidades de culturas futuras.

Com o objetivo de desenvolver pesquisas relacionadas a agrometeorologia para o estudo dos efeitos dos fatores climatológicos sobre diversas culturas, o Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle em conjunto com o Laboratório de Agrometeorologia, ambos da UFPB, desenvolveram um sistema de aquisição de dados usado no campo para colher informações sobre dados agrometeorológicos.

Este sistema foi desenvolvido por Elizabeth Lira Mendes, sob a orientação dos professores Raimundo C. Silvério Freire e Gurdip Singh Deep, e está sendo apresentado neste trabalho apenas para efeito de discussão. Nossa participação no desenvolvimento deste sistema limitou-se ao protocolo de comunicações entre o microcomputador e o módulo de aquisição.

4.1 Características do Sistema

Neste sistema é necessário adquirir dados sobre diversas grandezas no campo e transferi-las para o laboratório. Assim como no sistema analisado anteriormente, necessitava-se dividi-lo em dois subsistemas. Contudo, neste caso o uso de cabos coaxiais para a envio dos dados, devido ao acesso difícil ao local de aquisição dos dados,

seria um inconveniente. Por isto, o subsistema de aquisição dos dados foi dividido em dois módulos.

- Módulo I

Localizado no campo, é alimentado por bateria e armazena os dados em uma memória EEPROM, podendo armazenar dados dos oito canais analógicos referentes a apenas um dia de aquisição, e;

- Módulo II

Tem a função de coletar os dados armazenados no Módulo I, no campo (quando é alimentado por bateria), e transferí-los até um microcomputador, no laboratório (quando é alimentado pela rede elétrica), onde serão armazenados definitivamente.

As características do sistema e as grandezas escolhidas para monitorização foram ditadas pelas necessidades das pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Agrometeorologia. Sendo as principais características do sistema listadas a seguir:

- monitoramento da radiação global e refletida, saldo de radiação, fluxo de calor, temperatura e velocidade do vento;
- três faixas de ganho, selecionadas automaticamente, para os canais analógicos;
- microcontrolador para automação dos processos de aquisição e transferência de dados;
- armazenamento dos dados em microcomputador.

4.2 Grandezas Agrometeorológicas Monitoradas

As grandezas agrometeorológicas monitoradas pelo sistema, bem como seus respectivos transdutores são listados a seguir:

- radiação solar global

Muito importante no processo de fotossíntese, é medida em subestações climatológicas e é indispensável em estudos agrometeorológicos;

- radiação solar refletida

Medida por um radiômetro direcionado para o solo, é muito importante em estudos que visam a quantificação da evapotranspiração de culturas. É função da idade da cultura, da cobertura poliar e da configuração de plantio;

- saldo de radiação

Medido por um saldo radiômetro, é o resultado da interação entre os fluxos de radiação solar global e refletida, e radiação de onda longa. Seu conhecimento é indispensável na quantificação da evapotranspiração, que por sua vez é quem determina as lâminas de reposição de água ao solo, nas irrigações;

- fluxo de calor

Importante na identificação de propriedades físicas do solo e em estudos da evapotranspiração, é medido por um fluxímetro. Em diversos estudos o fluxo de calor não é quantificado, devido a menor sensibilidade dos fluxímetros em relação aos radiômetros, e também pelos altos custos dos transdutores e dificuldades de manuseio;

- temperatura

É medida por um termômetro a infra-vermelho. É a ferramenta mais moderna na atualidade no manejo de água na agricultura, e;

- velocidade do vento

É importante em estudos agrometeorológicos, pois interfere diretamente na transpiração das culturas. É medida por um anemômetro.

Os transdutores usados no projeto para medir as quatro primeiras grandezas usam termopares em série, sem necessidade de fonte de alimentação. Já o termômetro a infravermelho e o anemômetro necessitam de baterias de 12 e 5 V, respectivamente.

As grandezas necessárias para o projeto são apenas seis. Contudo, como o microcontrolador usado no projeto dispõe de com oito canais, usou-se um dos canais restantes para adquirir dados de mais um anemômetro, se necessário, e o outro para adquirir dados da tensão de referência dos canais, para ter-se uma referência absoluta dos outros canais, se necessário.

Na Tabela 4.1 lista-se os transdutores utilizados no sistema, bem como as faixas de variação de tensão em suas saídas.

N	Transdutor	Grandeza	Nível de Saída
2	Radiômetro	Radiação Solar Global	0 a 14 mV
2	Anemômetro	Velocidade do Vento	0 a 200 mV
1	Termômetro	Temperatura	200 a 400 mV
1	Radiômetro	Radiação Solar Refletida	0,1 a 1,5 mV
1	Fluxímetro	Fluxo de Calor	0 a 1,5 mV
1	Saldoradiômetro	Saldo de Radiação	0 a 14 mV

Tabela 4.1: Faixa das grandezas físicas e sinais elétricos correspondentes (N: número de canais)

4.3 Sistema de Aquisição de Dados

Como dito na seção 4.1, os processos de aquisição e transferência de dados foram automatizados usando-se o microcontrolador MC68HC11, que tem a função de escolher o ganho adequado para fazer aquisição das grandezas (como será explicado na seção 4.4), digitalizar os sinais oriundos dos transdutores (através de seu A/D de 8 bits, interno ao circuito integrado), armazenar temporariamente os dados em uma memória EEPROM de 2 k-octetos (interna ao circuito integrado), temporizar os eventos (através de seu temporizador de 16 bits), e enviar os dados coletados (através de comunicação RS-232) até um microcomputador, onde os mesmos são armazenados.

Neste sistema, como no de monitoramento da corrente de fuga, o uso do microcontrolador para compor os módulos I e II facilitou imensamente a implementação das características do sistema.

4.3.1 Princípio de Operação

Para adquirir os dados, o sistema precisa ser colocado no campo, dificultando o acesso as informações coletadas. Além disso, durante a aquisição dos dados, vários sensores que fazem as leituras necessárias, estão conectados ao sistema de medição, tornando difícil a remoção deste até o laboratório, onde os dados devem ser armazenados.

A solução encontrada para este problema foi dividir o sistema de aquisição de dados em dois módulos: o Módulo I, responsável pela aquisição dos dados propriamente dita, e o Módulo II, responsável pela transferência dos dados do Módulo I (no campo) para um computador (no laboratório). Na Figura 4.1 é mostrado o diagrama de blocos do sistema.

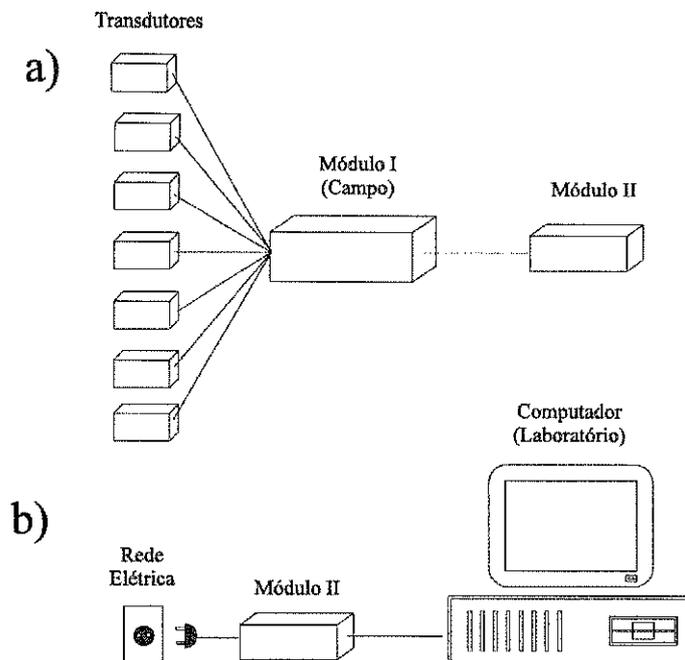


Figura 4.1: Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados meteorológicos.

O Módulo I permanece durante toda a aquisição localizado no campo conectado aos transdutores, onde é alimentado por bateria de 12 V e armazena os dados na memória EEPROM interna ao microcontrolador. Após um dia de aquisição, é necessário que o Módulo II seja levado até o campo e conectado ao Módulo I, através de um cabo que serve também como fonte de alimentação do mesmo (Figura 4.1.a). Por este cabo passam também os dados armazenados (via comunicação RS-232) do Módulo I para o Módulo II. Em seguida, o Módulo II deve ser levado ao laboratório onde transmite os dados coletados para um microcomputador (Figura 4.1.b). O fluxograma do programa do Módulo II é apresentado na Figura 4.2.

O Módulo II pode funcionar de duas formas, dependendo da posição de uma chave Transmitir/Receber. Esta chave coloca em nível baixo (Transmitir) ou em nível alto (Receber) um dos pinos de entrada do microcontrolador. Quando o Módulo II é levado ao campo para receber os dados, a chave Transmitir/Receber deve ser colocada na posição Receber, para que os dados sejam passados do Módulo I para o Módulo II. Por outro lado, quando o Módulo II é conectado ao PC para transmitir os dados, a chave deve ser posta na posição Transmitir. Com isto, o módulo pode transmitir os dados para o PC, onde serão armazenados.

Este sistema de aquisição de dados, assim como o de monitorização da corrente de fuga, faz aquisição de dados remotos. Neste caso, os dados não poderiam ser transmitidos para análise via cabos, pois os cabos teriam que ter uma extensão muito elevada.

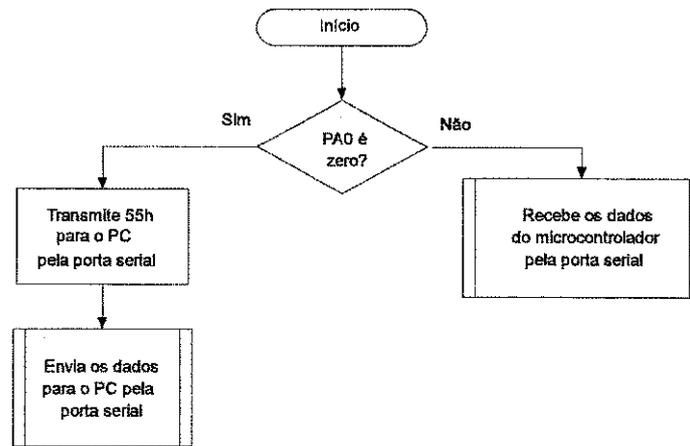


Figura 4.2: Fluxograma do programa em assembler do Módulo II do sistema de aquisição de dados meteorológicos.

Por isto, desenvolveu-se outro módulo (Módulo II) especialmente para coletar os dados do campo para o laboratório. Esta solução tira um pouco da automação do sistema. Uma solução mais automatizada seria o uso de telemetria por RF, porém, dependendo da distância, algumas restrições legais teriam que ser consideradas.

4.3.2 Aquisição dos dados

Na realidade, neste sistema de aquisição não deseja-se obter dados referentes à radiação, apesar de ter-se usado radiômetros. É desejado a obtenção de dados referentes à integral da radiação, ou seja, a energia. Por isto é feita uma soma discreta das amostras durante um intervalo de 15 min e, em seguida, esta soma é armazenada.

Por simplicidade, apesar de não ser necessário realizar-se integração da temperatura, os dados referentes a temperatura também foram somados no mesmo intervalo. Quando os dados estiverem armazenados no computador, o valor real da temperatura pode ser restaurado.

Para realizar a integral discreta dos canais, a cada 4 s é realizada uma conversão dos sinais nas entradas dos oito canais e o resultado é somado aos anteriores. Após uma soma de 225 amostras de cada canal (equivalente a 15 min de amostragem), a soma é armazenada em uma memória EEPROM. Desse modo, a cada 15 min tem-se dados referentes a integral discreta de cada canal.

Os dados são adquiridos com resolução de 16 bits, após uma soma de 225 amostras tem-se um resultado com 24 bits, que é truncado para 16 bits. Logo, para cada amostra necessita-se de 2 octetos de memória não volátil. Como existem 8 canais, ao final de 24 horas de aquisição, 1.536 posições da memória EEPROM do microcontrolador, onde

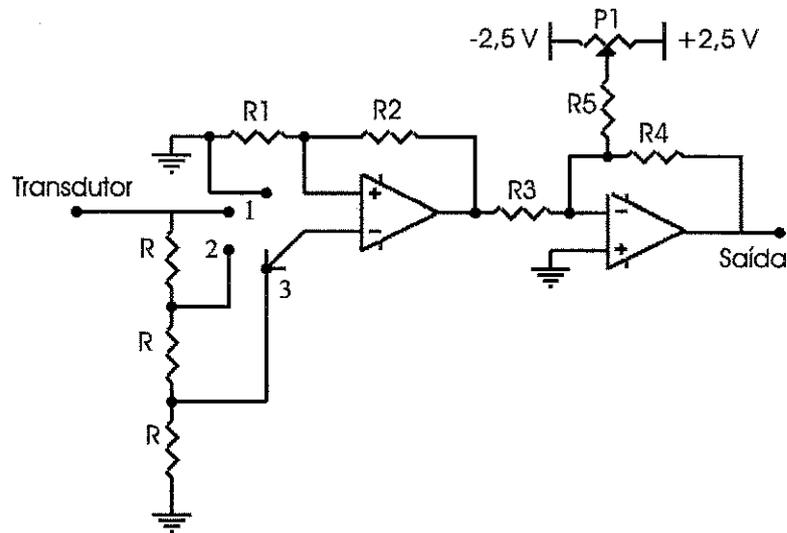


Figura 4.3: Condicionadores dos sinais amostrados pelo sistema de aquisição de dados meteorológicos.

os dados são armazenados, são preenchidas. Como essa EEPROM tem apenas 2 k-octetos, deve-se então transferir os dados coletados até um microcomputador, após um dia de aquisição, através do Módulo II.

4.4 Condicionadores dos Sinais Elétricos

Neste caso, o próprio usuário do sistema (o Laboratório de Agrometeorologia) proveu os transdutores utilizados. Por isso, o projeto do condicionamento dos sinais foi bastante automático. Os sinais gerados pelos transdutores são digitalizadas pelo A/D interno ao microcontrolador. Este módulo é alimentado por uma bateria de 12 V. A partir da qual gera-se tensões de ± 6 V para alimentar os condicionadores e $\pm 2,5$ V para alimentar, além do próprio microcontrolador, as tensões de referência do A/D interno ao microcontrolador. Por isso, para que os sinais elétricos ocupem toda a faixa de conversão do conversor A/D utilizado, é necessário que os sinais oriundos dos transdutores sejam condicionados a mesma faixa de tensão ($\pm 2,5$ V). Para isto, usou-se o mesmo circuito para todos os transdutores mudando-se apenas os valores dos resistores (ver Tabela 4.2). O circuito utilizado é reproduzido na Figura 4.3.

Este circuito, além de dar um ganho e inserir uma tensão de desvio no sinal de entrada, permite, através de um divisor resistivo e de um multiplexador analógico (Figura 4.3), selecionar-se quatro possibilidades de ganho para um sinal de entrada.

O resistor R (Figura 4.3) é, em todos os condicionadores, igual a $100\text{ k}\Omega$. Por isto, nos pontos 1, 2 e 3 tem-se, respectivamente, V_{in} , $2V_{in}/3$ e $V_{in}/3$ (na qual V_{in} é a

Transdutor	R1	R2	R3	R4	R5	P
Termômetro	1 k Ω	3,3 k Ω	1 k Ω	4,7 k Ω	680 Ω	470 Ω
Radiômetro	1 k Ω	4,7 k Ω	830 Ω	2,7 k Ω	2,2 k Ω	470 Ω
Restantes	1 k Ω	27 k Ω	1 k Ω	9,1 k Ω	6,8 k Ω	2,2 k Ω

Tabela 4.2: Transdutores e os resistores utilizados nos seus condicionadores

tensão gerada pelo transdutor).

Um multiplexador analógico (o CI 4052) faz a multiplexação entre os diversos pontos. Por isto, antes de fazer as conversões, o microcontrolador seleciona o ponto mais adequado para fazer a aquisição do sinal. Armazenando também, além da amostra, a posição do ponto de aquisição (1, 2 ou 3).

O circuito da Figura 4.3 é outro exemplo de controle automático de ganho (discutido no capítulo 2). Neste caso, a implementação do controle automático é bem mais simples, contudo toda a discussão anterior, sobre exatidão das medidas, continua válida.

4.5 Conversão A/D por Integrações Sucessivas

As amostras feitas a cada 4 s poderiam ter uma resolução de 8 bits que seria satisfatório para os requisitos do sistema. Poderia-se então utilizar diretamente o conversor A/D interno ao microcontrolador MC68HC11. Entretanto, para evitar-se ruído, especialmente o associado a rede elétrica, buscou-se uma técnica alternativa de conversão.

Várias técnicas foram estudadas, como por exemplo a conversão A/D de rampa múltipla e a conversão A/D por integração discreta das amostras. Contudo, utilizando-se qualquer uma dessas técnicas é necessário acrescentar-se alguns circuitos externos para cada um dos canais. Por isso, escolheu-se uma técnica que utiliza integrações sucessivas das amostras feitas pelo A/D interno do microcontrolador. São feitas 256 amostras de cada canal, durante 1/30 s (2 vezes o período do sinal da rede) que são somadas, obtendo-se um resultado em 16 bits. Como consequência desta integração discreta, pode-se melhorar também a exatidão dos valores das amostras.

Na Figura 4.4, está ilustrado o processo de aquisição de dados. A cada 4 s, é realizada a integração discreta durante 1/30 s, de 256 amostras, dos quatro primeiros canais, e em seguida, a integração discreta durante 1/30 s, de 256 amostras, dos quatro canais restantes (Figura 4.4). Desse modo, após 4 s de aquisição, tem-se 8 amostras de 16 bits de resolução, uma para cada canal. As amostras referentes a cada um dos canais, são então somadas às anteriores do mesmo canal, durante 15 min, obtendo-

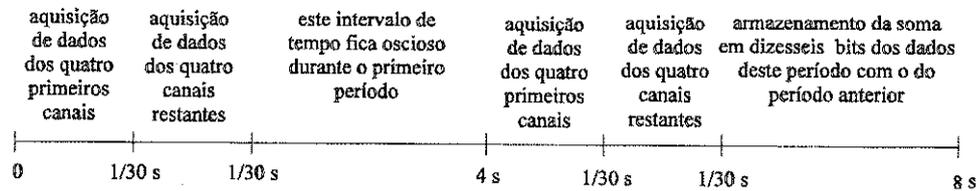


Figura 4.4: Diagrama de tempo do processo de aquisição de dados.

se uma soma de 24 bits de resolução, que é truncada para 16 bits e armazenada na memória não volátil do microcontrolador. Esse truncamento é feito objetivando-se diminuir a quantidade de posições de memória necessárias ao armazenamento.

Todas essas operações são realizadas em uma memória RAM, porém, ao final de 15 min os dados de 16 bits, referentes às integrações, são armazenados em EEPROM e, posteriormente, transferidos para o microcomputador através do Módulo II.

Dessa forma, tirando proveito da baixa taxa de variação das grandezas amostradas, conseguiu-se aumentar a exatidão do sistema sem acrescentar-se nenhum circuito externo, utilizando-se apenas programação.

4.6 Armazenamento das Amostras

Como foi visto na seção 4.3, os dados são transferidos para o microcomputador através do Módulo II. Quando o Módulo II é levado ao laboratório, este é alimentado pela rede elétrica (Figura 4.1.b) e transmite os dados através de uma interface RS-232 até o microcomputador. Porém, antes de ser ligado o Módulo II, a chave Transmitir/Receber (seção 4.3) deve ser colocada na posição Transmitir.

No microcomputador existe um programa que gerencia a coleta dos dados. Este programa deve ser executado antes que o Módulo II seja ligado, para que ele possa receber os dados pela porta serial e armazená-los no disco rígido. Seu fluxograma é mostrado na Figura 4.5.

O programa, quando executado, verifica continuamente se existe algum dado pronto na porta serial, caso exista, e se este dado for 85 (01010101 em binário), o programa adquire todos os dados coletados e converte-os, através da informação dos ganhos dos condicionadores previamente armazenada, para as tensões nas saídas dos condicionadores. Em seguida, pede ao usuário o nome do arquivo no qual serão armazenados os dados, e armazena-os no disco rígido. A partir daí, pode-se obter os valores das grandezas físicas considerando-se as curvas de calibração dos transdutores.

A função deste programa é apenas de coletar os dados do Módulo II para o microcomputador, além de converter os dados para as unidades das grandezas monitoradas.

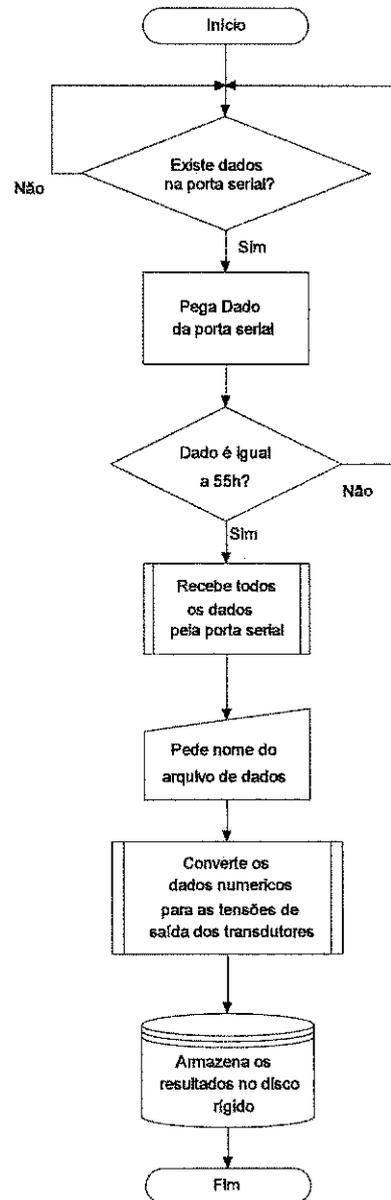


Figura 4.5: Fluxograma do programa executado no microcomputador para o sistema de aquisição de dados agrometeorológicos.

Ou seja, o usuário do sistema terá que usar algum programa comercial de sua preferência para fazer a análise dos dados.

4.7 Conclusão e Propostas Futuras

Como discutido na seção 4.3, a quantidade de memória EEPROM utilizada no projeto permite que o sistema adquira dados continuamente por um intervalo de tempo de apenas um dia. Contudo, o estudo de dados meteorológicos necessita de um período de observação relativamente longo. Por isto, a utilização de um quantidade de memória tão pequena quanto a utilizada no projeto, torna a coleta dos dados bastante cansativa. Faz-se necessário, então, o uso de uma quantidade de memória não-volátil maior, que permita um período de aquisição contínua de dados de no mínimo trinta dias. Para isto, seria necessário utilizar-se uma memória externa de no mínimo 48 k-octetos.

O uso de uma memória externa maior para armazenamento dos dados possibilita um intervalo de tempo de aquisição contínua de dados também maior. Contudo, como o sistema foi projetado, não é possível ao operador ter acesso aos dados durante a aquisição dos mesmos. Por isso, caso algum problema ocorra durante a aquisição de dados, só será percebido no final desta. Isto sugere a inclusão de alguma interface entre o Módulo I e o operador do sistema, para que este possa verificar a validade da aquisição de dados. Esta interface poderia ser conseguida através do uso de um teclado e um display no Módulo I.

O display utilizado poderia ser um módulo LCD inteligente, como por exemplo, o modelo OPTREX 40218 da linha Alfacom de Módulos Inteligentes, que consiste de apenas uma linha e quinze caracteres.

Os módulos LCDs inteligentes são constituídos de um display alfanumérico de cristal líquido, associado a circuitos controladores e de memória RAM. Estes módulos, dentre outras características, têm um consumo extremamente baixo, uma interface bastante simples e dimensões e pesos reduzidos. Além disso, o modelo OPTREX 40218 apresenta as características listadas a seguir:

- conexão direta com qualquer CPU de 4 ou 8 bits;
- compatível com o código ASCII;
- até oito caracteres especiais programáveis pelo usuário;
- gerador de caracteres e acionadores de linha/coluna já incluídos;
- possibilidade de utilização de cursor/display piscante, e;

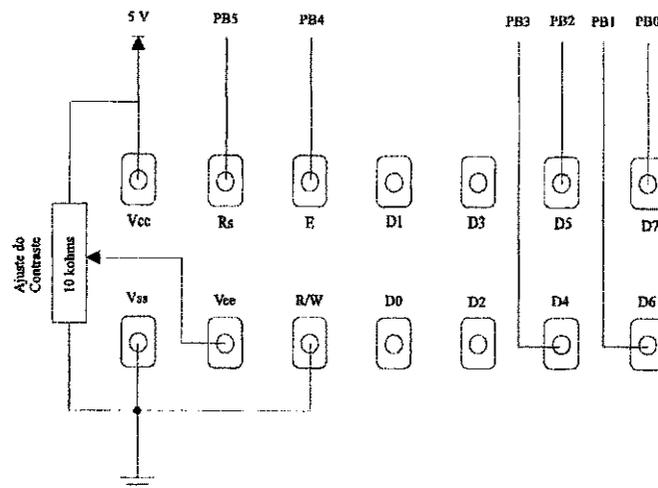


Figura 4.6: Ligações entre o microcontrolador e o display modelo OPTREX 40218.

- deslocamento da mensagem à direita/esquerda.

O módulo inteligente aceita dados e instruções de controle. Os dados são caracteres ASCII que são enviados ao módulo e armazenados na memória RAM interna, para em seguida serem apresentados no display.

Para reduzir a complexidade do sistema, pode-se utilizar a configuração de via de dados de quatro bits, ou seja, transmite-se os quatro bits mais significativos e em seguida os quatro menos significativos. Assim é possível fazer toda a interface com o LCD com apenas seis linhas de saída, sendo duas para controle (Rs e E, Figura 4.6) e quatro para dados (D4-D7). Contudo, esta simplicidade é conseguida através do aumento da complexidade de programação e diminuição da velocidade.

Na Figura 4.6 apresenta-se as ligações entre o microcontrolador e o módulo LCD. As linha de dados e de controle são conectadas aos pinos da Porta B do microcontrolador. A alimentação do display é feita com tensão de 5 V.

Para entradas de dados pelo usuário, poder-se-ia usar um teclado telefônico de doze teclas, sendo dez teclas utilizadas para os algarismos de 0 a 9, uma para correção e a última como tecla de entrada. Cada tecla deste tipo de teclado é formada por três contatos, sendo dois ligados a linha e coluna da tecla correspondente e o terceiro comum a todas elas. A tecla "#" possui dois contatos independentes que podem ser ligados à linha e a coluna 3, para simplificar o projeto.

Aqui, para simplificar o projeto físico, o decodificador de teclado pode ser dispensado. Contudo, a utilização do microcontrolador para esta tarefa complica a programação. Na Figura 4.7 apresenta-se a interface entre este teclado e o microcontrolador. Como o módulo LCD e o teclado não são acessados simultaneamente, a Porta B (os pinos PB0-PB3) do microcontrolador pode ser utilizada para fazer a varredura

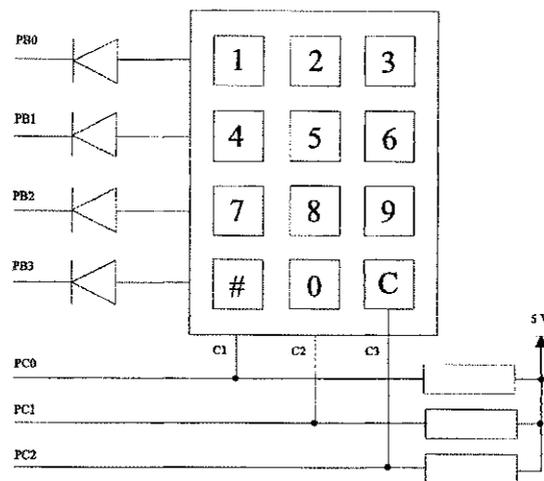


Figura 4.7: Interface entre o microcontrolador e um teclado telefônico de doze teclas.

das linhas do teclado (linhas L1-L4), enquanto que três pinos da Porta C (PC0-PC2) podem fazer a varredura das colunas (C1-C3).

Uma outra alternativa que solucionaria os problemas da capacidade de armazenamento, da interface com o operador e da transferência dos dados do campo para o laboratório, é o uso de telemetria por RF. Com telemetria por RF, os dados poderiam ser transmitidos periodicamente para o laboratório (evitando a necessidade de uma capacidade de memória muito grande). Além disso, poderia ser usado como interface entre o operador e o sistema de aquisição de dados (dispensando o uso de um display e do teclado), o próprio computador usado para armazenar os dados.

Capítulo 5

Registrador de Perturbações em Subestações de Energia Elétrica

O crescimento dos sistemas elétricos, bem como o aumento de suas interações, torna-os susceptíveis a perturbações, que podem ser provenientes, por exemplo, da perda de uma grande unidade geradora, provocando o desequilíbrio entre geração e carga, ou da queda de uma linha de transmissão, afetando a interligação entre sistemas vizinhos. Além disso, alguns tipos de cargas especiais, durante a sua operação normal, podem provocar distorção, flutuação, desequilíbrio ou variações de tensão no sistemas ao qual estão ligadas (ex.: fornos a arco, retificadores, máquinas de solda, laminadores).

Por esta razão, é necessário que o sistema seja projetado para suportar situações transitórias impostas a ele. Tal projeto envolve o dimensionamento dos equipamentos, para que estes possam suportar as perturbações com certa margem de segurança. Além disso, o estudo dessas perturbações é essencial para a adequação do modelo da dinâmica do sistema, e é indispensável em simulações usadas para definição de limites operacionais no sistema [26]. Neste sentido, o conhecimento do sistema, tanto no regime permanente como no transitório, é indispensável.

O conhecimento do sistema em regime permanente não constitui problema, pois as medições podem ser feitas em intervalos de tempo relativamente longos. Entretanto, o mesmo não se pode dizer da caracterização do sistema em regime transitório, que tem sido tema de vários trabalhos científicos, pois a duração destes é pequena, entre 0,7 e 4 s [27].

No caso da caracterização do sistema em regime transitório, ele deve sofrer uma perturbação que pode ser provocada ou natural e dados referentes ao comportamento do sistema, anteriores e posteriores a perturbação, devem ser adquiridos e armazenados para análise posterior. Vários trabalhos descrevem perturbações geradas a partir do

chaveamentos de reatores e capacitores ou da energização de transformadores [28]. Um exemplo é o sistema proposto por Lee e Osborne [29] para análise de falhas de alta impedância, no qual os testes foram efetuados sob condições controladas.

As perturbações provocadas ou "artificiais", além de levarem à discrepâncias dos dados coletados com os gerados por perturbações "naturais", podem danificar equipamentos dos consumidores. No Brasil, este procedimento ainda é permitido, enquanto que em outros países é proibido sob pena de severas punições. Por esta razão, outros sistemas de aquisição de dados sensíveis a ocorrência de perturbações, chamados de registradores de perturbações não-provocadas, foram propostos.

Apresenta-se aqui, uma alternativa para a monitorização dos sistemas elétricos, através do projeto de um oscilógrafo digital baseado em um sistema de aquisição de dados, que coleta informações sobre a tensão e a corrente de fase do sistema, enviando-as até um microcomputador para armazenagem e tratamento. Distribuídos em pontos-chaves do sistema, um conjunto desses oscilógrafos pode fornecer informações importantes à respeito da sua dinâmica.

5.1 Registro de Perturbações em Sistemas Elétricos

A especificação das grandezas a serem monitoradas dependem do sistema, do destino que se dará aos dados coletados e ao intervalo do transitório (pré-falha, falha, pós-falha) que se quer dar mais ênfase na análise. Porém, as grandezas mais importantes são [26]:

- Fluxo de potência ativa e reativa em pontos-chaves do sistema;
- Grandezas usadas na identificação de respostas das cargas principais;
- Grandezas referentes à geração: potência ativa e reativa na geração, tensão de saída, velocidade do rotor, etc;
- Estados de relés especiais e ações de controle usadas para manter a estabilidade, prevenir a propagação da perturbação;
- Freqüência e tensão no barramento principal.

A monitorização de todas essas grandezas fornece uma informação completa relacionada à estabilidade das interconexões do sistema, das características dinâmicas dos geradores e cargas, e da resposta transitória de ações de controle. Entretanto, o custo decorrente desta monitorização pode ser bastante alto, por isso um julgamento pode ser usado para determinar-se as grandezas mais importantes para o estudo do sistema.

Escolhidas as grandezas à serem monitoradas, deve-se ter alguns cuidados na hora de definir-se as características do sistema de monitoramento.

A armazenagem dos dados referentes a uma falha deve ter um gatilho automático que seja capaz de disparar para falhas remotas. Ou seja, durante a ocorrência de uma falha em uma determinada região, a própria perturbação deve ser capaz de disparar a gravação dos dados no sistema associado a esta região, assim como, em uma outra região não afetada pela perturbação. Outra característica necessária é a capacidade de adequar-se à diversos critérios de gatilho, discutidos na próxima seção.

Além disso, os dados gravados devem ser automaticamente transmitidos a uma unidade central, onde as grandezas registradas podem ser analisadas.

5.2 Critérios de Gatilho

Um critério de gatilho é essencial para a diminuição da quantidade de dados armazenados. Em 1988, um sistema de monitoramento de perturbações foi implantado na *Central Electricity Generating Board* (Londres), [30]. Neste sistema, os dados adquiridos eram gravados continuamente em quatro fitas de alta capacidade, 20 M-octetos cada, e podia-se armazenar apenas dados referentes a quatro dias de aquisição. Após este período, se existisse alguma perturbação de interesse, era necessário substituir as fitas. Como consequência desta experiência, um método de gatilho automático teve que ser considerado.

Também em 1988, outro sistema de monitoramento foi implementado em *Bonneville Power Administration* (Oregon, U.S.A.) [31]. Neste caso, o gatilho era sensível a desvios de frequências maiores que 0,05 Hz, e já estudava-se a possibilidade de gatilho através de uma técnica de processamento digital de sinais apropriada (FFT, densidade espectral de potência, etc).

Em [32], encontra-se uma lista de dispositivos que podem ser usados para disparar o gatilho:

- relés de sobrecorrente instantâneas;
- relés de subtensão instantânea;
- relés de subfrequência;
- relés de sobrefrequência;
- relés de taxa de variação de corrente;

- relés de sobretensão instantânea;
- relés de potência excessiva;
- taxa de variação de potência, frequência, ou diferença de fase entre dois barramentos.

Estes dispositivos são sensíveis a mudanças nas variáveis do sistema e são indicações das perturbações que estão sendo monitoradas.

Outro fator importante refere-se ao gatilho de unidades remotas. A menos que algum arranjo especial seja usado, algumas perturbações podem não afetar o critério de gatilho de unidades remotas. Uma solução para evitar-se este caso é usar um gatilho sensível à variações na potência ou tensão causada pela propagação de oscilações para as partes remotas do sistema [26]. Outra alternativa um pouco mais simples, mas que também pode ser usada, é a utilização de uma unidade central para gerenciar o gatilho solicitado por qualquer uma das unidades remotas. Com o recebimento desta solicitação, o sistema central pode enviar um sinal para as outras unidades remotas, disparando o registro de eventos.

5.3 Características do Sistema Proposto

Para a monitorização de sistemas elétricos, propõe-se um sistema de alta velocidade para capturar as formas de onda da corrente e tensão de uma fase, durante os períodos de pré-falha, falha e pós-falha, dentro de uma faixa de DC até 2,5 kHz. Além disso, o sistema deve registrar o estado de relés especiais e ações de controle usados para manter a estabilidade do sistema ou prevenir a propagação da perturbação para outras partes deste. Isto é usado principalmente para monitorar a eficiência de dispositivos de proteção ou de controle novos ou experimentais [33].

Novamente neste caso, o sistema de monitoramento foi dividido em dois subsistemas: o primeiro para fazer a aquisição dos dados, que é dividido em três módulos iguais (um para cada fase do sistema), e o segundo para armazenamento dos dados coletados, localizado distante do primeiro e formado basicamente por um computador. Na Figura 5.1, apresenta-se o diagrama de blocos do sistema proposto.

A vantagem deste tipo de arranjo é a possibilidade de conectar-se todas as unidades de aquisição de dados à uma mesma unidade de coleta. Dessa forma, os dados são facilmente acessíveis ao operador, e além disto, facilita-se o gatilho de sistemas remotos pela utilização do arranjo descrito na seção 5.2, no qual uma unidade central distribui

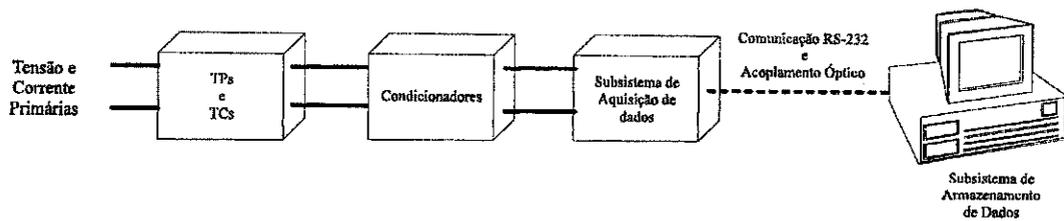


Figura 5.1: Diagrama de blocos do sistema para registro de perturbações em sistemas elétricos.

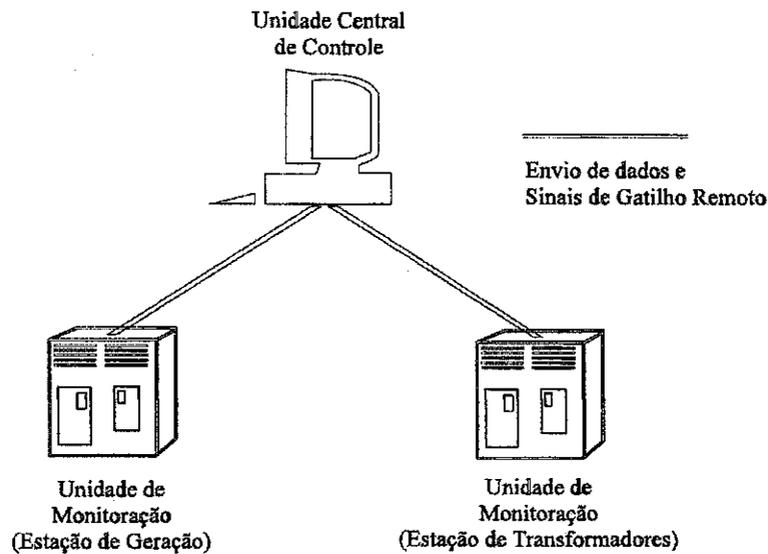


Figura 5.2: Esquema de interface de comunicação entre unidades remotas e o sistema central de controle, para transmissão de dados e gatilho remoto.

o sinal de gatilho por todas as unidades remotas. Na Figura 5.2 ilustra-se este esquema de comunicação entre as unidades de monitorização e o sistema central de controle.

O módulo do subsistema de aquisição de dados tem um canal analógico para monitorar a corrente e outro para monitorar a tensão de uma fase da rede elétrica, além de oito canais digitais para monitorar os estados dos relés especiais de proteção e de controle. As características do sistema foram impostas pelas necessidades das pesquisas desenvolvidas pela CHESF.

As principais características do sistema são listadas a seguir:

- Registrar a forma de onda da tensão e da corrente instantâneas das fases do sistema durante a duração do surto;
- Fornecer informações sobre a tensão e corrente das fases e sobre os estados de chaves, disjuntores, relés, etc, do sistema durante a duração do surto;
- Transmitir os dados coletados a uma unidade central de controle, onde os mesmos

serão armazenados em microcomputador para análise posterior;

- Possibilitar uma interpretação adequada dos valores máximos da frequência associada aos surtos;
- Classificar a natureza de cada um dos surtos quanto ao tipo de interferência que os provocam;
- Verificar as formas de onda do trem de surtos ou a forma de onda de uma das oscilações amortecidas medidas, para compará-las com os resultados esperados.

5.4 Princípio de Operação

Para registrar os surtos de tensão, o sistema realiza continuamente aquisição de todos os canais e armazena os dados coletados em uma memória volátil, até que receba um sinal externo avisando a ocorrência de um surto (gatilho). Em seguida, mantendo gravados os dados referentes aos 100 ms imediatamente anteriores ao recebimento do gatilho, o sistema realiza aquisição de dados durante mais 800 ms, ou seja, no final de uma ocorrência, têm-se dados correspondentes a um total de 900 ms de aquisição. Após esta aquisição o sistema envia os dados, através de cabos coaxiais, até um microcomputador, onde os mesmos são armazenados e podem ser analisados.

Na Figura 5.3 é apresentado os primeiros 200 ms de uma forma de onda típica da tensão, em uma fase do sistema, amostrada pelo registrador de perturbações.

Dos dois subsistemas o mais complexo é o de aquisição dos dados. Ele é formado por condicionadores dos sinais amostrados e por um sistema digital baseado no microcontrolador MC68HC11. A aquisição dos dados, temporização dos eventos e envio dos dados para o sistema central de controle, é gerenciada pelo microcontrolador MC68HC11. Os dados são amostrados com o A/D interno ao microcontrolador, e são armazenados em uma memória RAM de 8 k-octetos.

O envio dos dados até o sistema central de controle é feito através de porta de comunicação RS-232, por cabos coaxiais, através de uma das portas de Entrada/Saída do microcontrolador. No sistema central de controle, a coleta dos dados é feita através da porta de comunicação serial de um microcomputador, no qual existe um programa para receber e armazenar os dados no disco rígido, além de permitir uma análise gráfica dos mesmos.

A seguir são analisadas cada uma das partes que compõem o sistema de aquisição de dados para registro de perturbações.

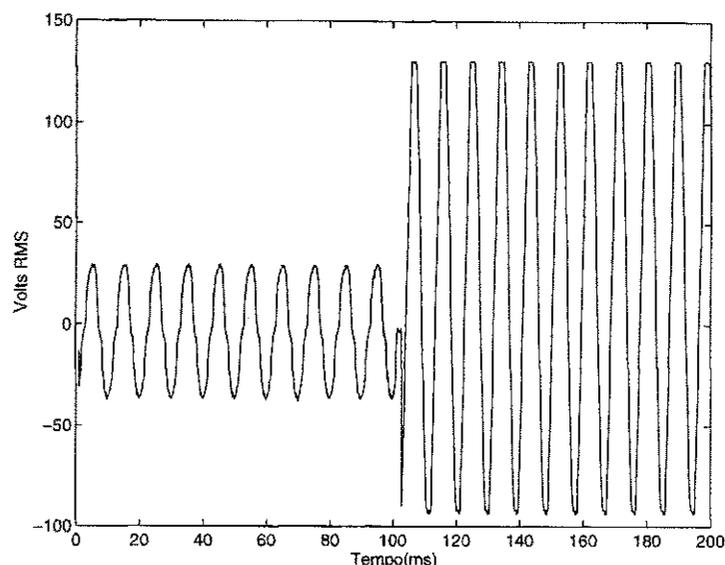


Figura 5.3: Forma típica de onda da tensão, em uma fase, amostrada pelo sistema de registro de perturbações (primeiros 200 ms).

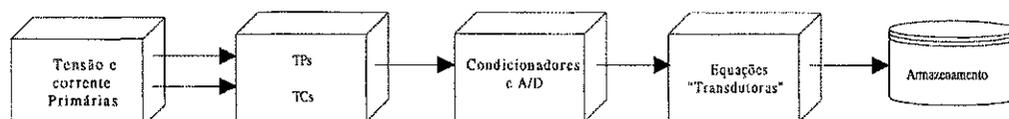


Figura 5.4: Esquema de armazenadores digitais de perturbações.

5.4.1 Transdutores Utilizados

É esperado que os equipamentos de monitorização de perturbações sejam conectados a estações de TPs (transformadores de potência) e TCs (transformadores de corrente) usadas para medição e isolamento. Para a maioria dos casos, a característica das estações de TPs e TCs são aceitáveis [26].

Por monitorar os valores instantâneos da corrente e tensão de uma fase do sistema, outras grandezas podem ser derivadas [26], [30] e [31]. Por exemplo, a potência pode ser derivada da corrente e da tensão de fase do sistema através da equação (equação transdutora) 5.1

$$P = VI^2. \quad (5.1)$$

Na Figura 5.4 é apresentado o esquema de ligação de um registrador de perturbações digital.

O primeiro estágio de um registrador digital consiste de condicionadores de sinais e isoladores. Os cálculos subsequentes são bastante simplificados se todas as grandezas forem amostradas ao mesmo tempo [26]. Após a conversão A/D, as "equações transdutoras" podem ser aplicadas diretamente aos dados amostrados.

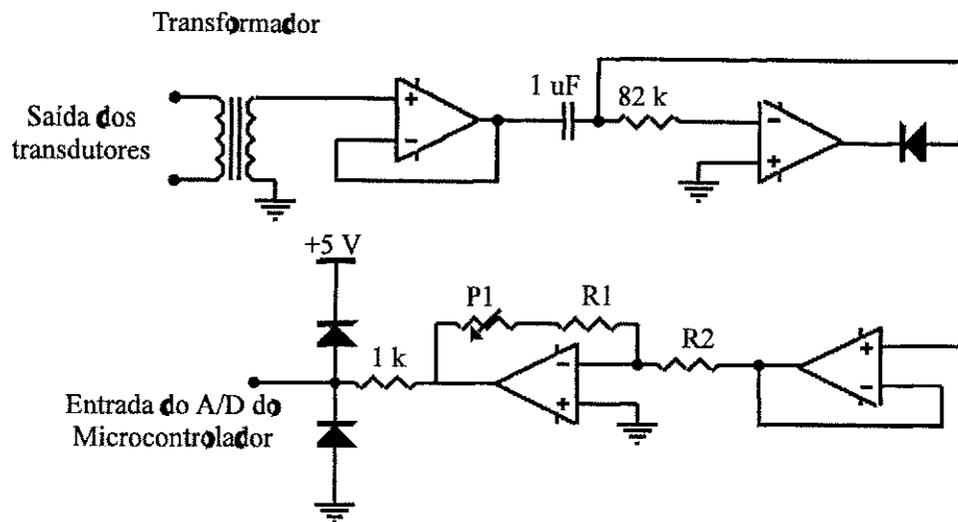


Figura 5.5: Circuito condicionador para os sinais de tensão e corrente.

Neste trabalho porém, devido as limitações de aritmética em ponto flutuante do 68HC11, os dados primeiro necessitam ser armazenados no sistema central de controle, para só em seguida serem aplicadas as "equações transdutoras". O resultado deste esquema é um sistema mais flexível, com as características dos sinais facilmente adequadas às necessidades do usuário, através de programação.

Para a aquisição de dados, tem-se como referência um sistema trifásico com tensão nominal de $115/\sqrt{3}$ V entre a fase e o terra, e corrente nominal de 5 A. Com a ocorrência de um surto, a tensão pode atingir até 20 % a cima do seu valor nominal, enquanto que a corrente, atinge até vinte vezes seu valor nominal. Entretanto, na grande maioria dos casos, o valor máximo da corrente atinge apenas quatro vezes seu valor nominal. Desse modo, o sistema de aquisição de dados deve ser capaz de adquirir valores para tensão e corrente de até $1,2 \times 115/\sqrt{3}$ V e 4×5 A, respectivamente.

Como a aquisição dos dados é realizada com o microcontrolador, tem-se que condicionar os sinais amostrados para a sua faixa de tensão. Neste caso, o microcontrolador é alimentado com tensões de 0 e 5 V. Logo, todos os sinais deverão estar dentro desta faixa de tensão. Para isto, os sinais analógicos passam por um estágio condicionador, mostrado na Figura 5.5.

No circuito da Figura 5.5, primeiramente as saídas dos transdutores passam por um transformador para baixar seu nível de tensão. Em seguida, usa-se um grampeador de precisão que faz com que eles tornem-se negativos. Logo após, um estágio com um amplificador inversor é utilizado para tornar os sinais positivos e fazer um ajuste fino em suas amplitudes, colocando-os entre 0 e 5 V. Dessa forma, o sinal de tensão e de

Grandezas	P1	R1	R2
Corrente	10 k	82 k	100 k
Tensão	10 k	82 k	100 k

Tabela 5.1: Valores dos resistores usados nos condicionadores do sistema de aquisição de dados para registro de perturbações.

corrente ocupam toda a faixa de conversão do A/D do microcontrolador.

Os valores do potenciômetro P1 e dos resistores R1 e R2 estão de acordo com a grandeza condicionada (tensão ou corrente). A Tabela 5.1 apresenta os valores destes componentes para os dois sinais amostrados.

5.4.2 Aquisição e Transferência dos Dados

Como dito na seção 5.4, os processos de aquisição e transferência de dados foram automatizados utilizando-se o microcontrolador MC68HC11. O microcontrolador tem a função de digitalizar os sinais em estudo (canais analógicos e digitais), através de seu A/D de 8 bits, controlar a taxa de amostragem dos canais (através de seu temporizador de 16 bits), e transmitir os dados (através de comunicação RS-232, via cabos coaxiais) até o microcomputador, onde os mesmos são armazenados.

As formas de onda dos sinais de tensão e de corrente são semelhantes, variando em ordem de grandeza, ambas são limitadas em 2,5 kHz. Por isto, para amostrar os surtos, escolheu-se uma taxa de amostragem em torno de 25 kHz. Para o microcontrolador MC68HC11, com 2 canais, a frequência máxima de amostragem de cada um deles é de 31,25 kHz, mas, devido aos procedimentos que o microcontrolador tem que realizar após cada conversão (armazenamento dos dados, testes das ocorrência de eventos, etc), a frequência máxima conseguida foi de 26 kHz, que é superior a escolhida. Sendo assim, a frequência utilizada para a amostragem ficou sendo de 26 kHz.

Para os canais digitais, a frequência de amostragem máxima conseguida com o microcontrolador é de 200 kHz, no entanto, para esta aplicação, a frequência mínima necessária é de 500 Hz. Logo, para uma melhor caracterização dos sinais digitais, escolheu-se uma frequência quatro vezes maior, ou seja, 2 kHz.

Para que o microcontrolador atendesse a todas as necessidades da aplicação, foi desenvolvido o sistema digital apresentado na Figura 5.6. Como apresentado na Figura 5.6, foi utilizado uma memória EPROM de 8 k-octetos para armazenar o programa que gerencia as funções do microcontrolador, além de 48 k-octetos de memória RAM para armazenamento temporária dos dados amostrados. A quantidade de memória RAM

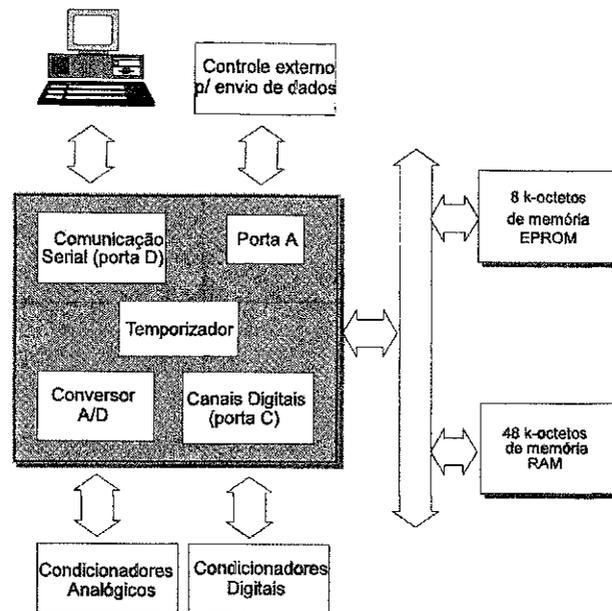


Figura 5.6: Diagrama de blocos do sistema desenvolvido com microcontrolador MC68HC11 para o sistema de aquisições de dados para registro de perturbações.

foi dimensionada a partir do intervalo de aquisição de dados (900 ms) e da taxa de amostragem dos canais analógicos e digitais. Ou seja,

$$26.000 \text{ amostras/s} \times 0,9 \text{ s} \times 2 \text{ canais} \times 1 \text{ octeto/canal} = 46.800 \simeq 46 \text{ k-octetos}$$

para os canais analógicos e mais

$$2.000 \text{ amostras/s} \times 0,9 \text{ s} \times 8 \text{ canais} \times 1 \text{ bit/amostra} = 1.800 \simeq 2 \text{ k-octetos}$$

para os canais digitais.

Para controlar as funções do microcontrolador, foi desenvolvido um programa em assembler, que encontra-se armazenado em uma memória EPROM no subsistema de aquisição de dados (Figura 5.6). O fluxograma deste programa é apresentado na Figura 5.7.

Inicialmente o programa configura a porta serial do microcontrolador (4.800 baud, 8 bits de dados, sem paridade), bem como o conversor A/D. Em seguida, realiza conversões contínuas dos canais digitais (através da porta "C" do microcontrolador) e dos canais analógicos, com a taxa de amostragem discutida anteriormente. Após cada aquisição de dados, o programa verifica a porta "A" do microcontrolador (Figura 5.6) para saber se ocorreu um surto no sistema elétrico. Se um surto tiver ocorrido, o sistema adquire dados durante mais 800 ms e envia pela porta serial RS-232 (via cabos coaxiais), os dados referentes a 100 ms antes do surto e 800 ms depois do surto, como visto na seção

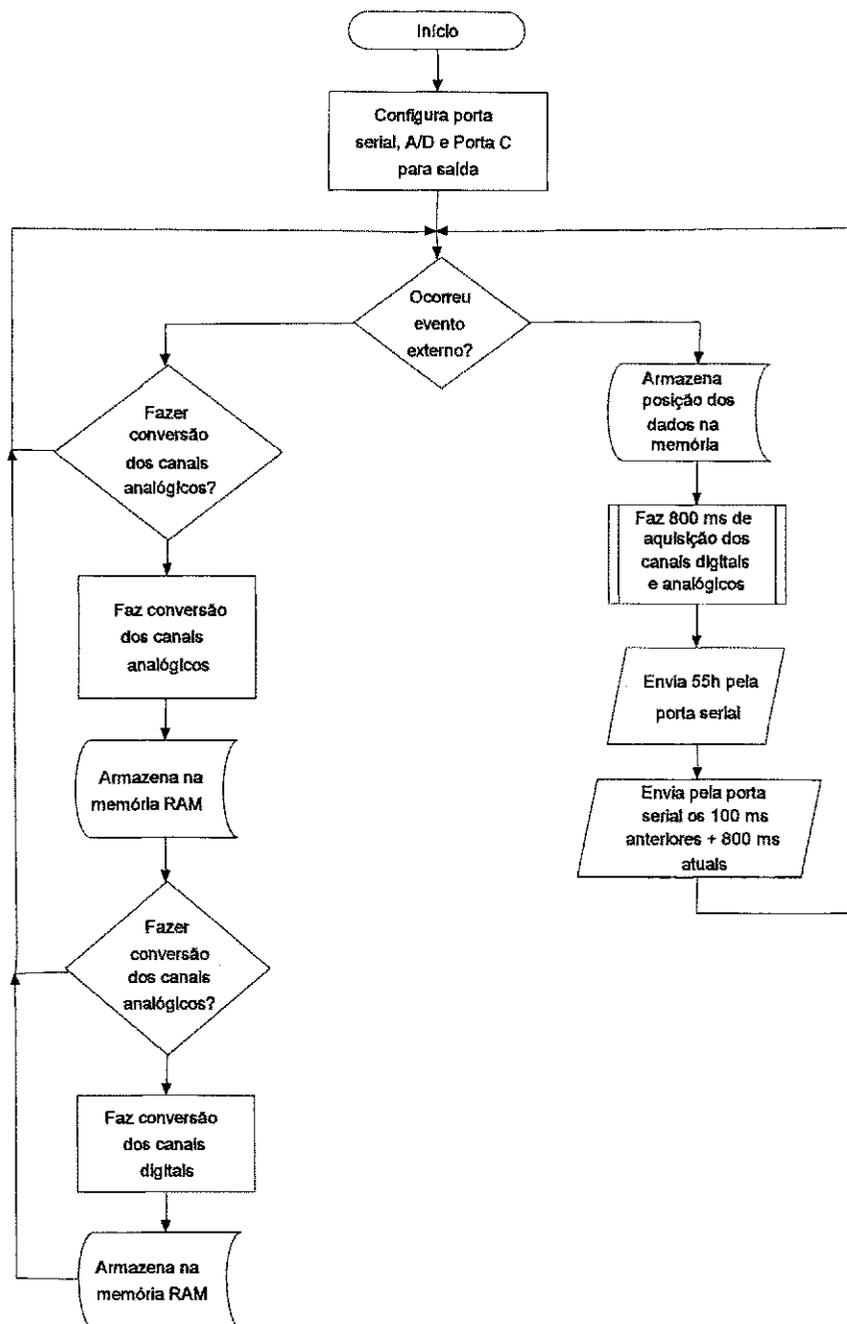


Figura 5.7: Fluxograma do programa que gerencia as funções do microcontrolador para o sistema de registro de perturbações.

5.4. Após enviar os dados, o programa volta a fazer novas conversões até que ocorra outro comando/surto.

5.4.3 Armazenamento e Análise dos Dados

No sistema de controle central deve existir um microcomputador que é responsável pela coleta e armazenamento dos dados. É necessário que um programa para recepção dos dados seja executado no microcomputador. O fluxograma da sub-rotina para recepção dos dados é apresentado na Figura 5.8.

Esta sub-rotina tem funcionamento idêntico ao programa que faz a coleta dos dados no sistema de aquisição de dados meteorológicos, exceto pelo nome do arquivo. No sistema para dados meteorológicos o nome do arquivo de dados é pedido ao usuário, neste caso o nome do arquivo é formado pelo próprio programa, e tem a forma apresentada na Figura 5.9

O arquivo tem a extensão "DAT" e seu nome tem quatro duplas de números: a primeira dupla informa o ano em que aconteceu o surto, e as seguintes informam o mês, a hora e os minutos, respectivamente, em que ocorreu o surto. Dessa forma, pode-se escolher a data do arquivo para análise apenas pelos nomes dos arquivos. O programa também permite analisar os dados através de vários tipos de curvas. Pode-se escolher visualizar todas as curvas na mesma tela e no mesmo eixo de tempo, pode-se visualizar os canais analógicos individualmente ou em conjunto. E ainda, tem-se acesso a ferramenta para zoom, através da qual também é possível medir-se a frequência dos surtos. Na Figura 5.10, apresenta-se a tela principal do programa. Nesta tela apresenta-se a tensão e a corrente de fase e o estado dos relés do sistema na mesma escala de tempo. Na Figura 5.10, um tom mais escuro indica que o relé está fechado, um tom mais claro está aberto.

O programa permite obter informações apenas dos valores instantâneos da tensão e corrente de fase, e da frequência do surto. Porém, como visto na seção 5.4.1, pode-se facilmente inserir-se no programa "equações transdutoras" para a análise de outras grandezas de interesse.

5.5 Conclusão

A instalação do sistema proposto em pontos-chaves do sistema elétrico pode dar subsídios para compreender-se a dinâmica deste sistema. Além disso, a estratégia geral de monitoramento e registro de perturbações apresentada neste sistema possibilita um meio adequado para recuperação, coordenação e redução dos dados para análise

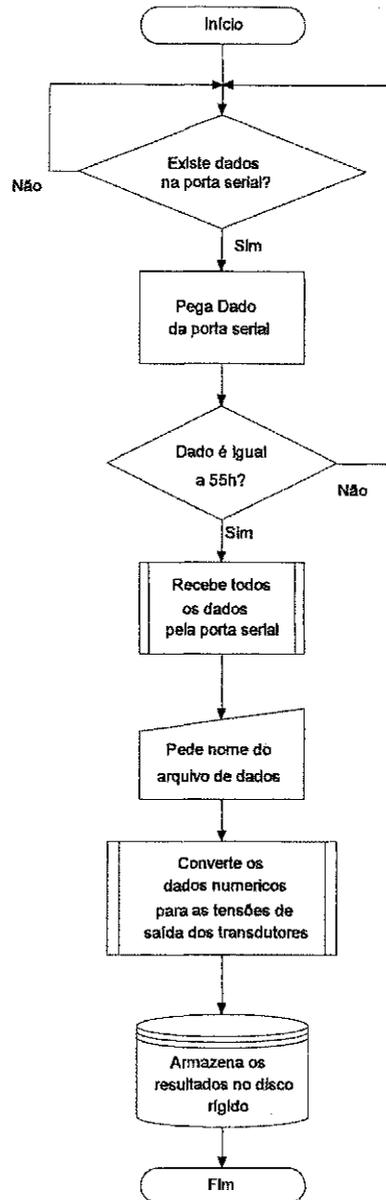


Figura 5.8: Fluxograma da sub-rotina de coleta de dados, do programa executado no microcomputador, para o sistema de registro de perturbações.

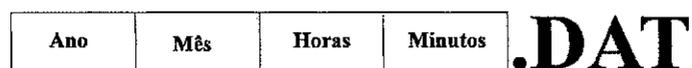


Figura 5.9: Formato do nome do arquivo para o registrador de perturbações.

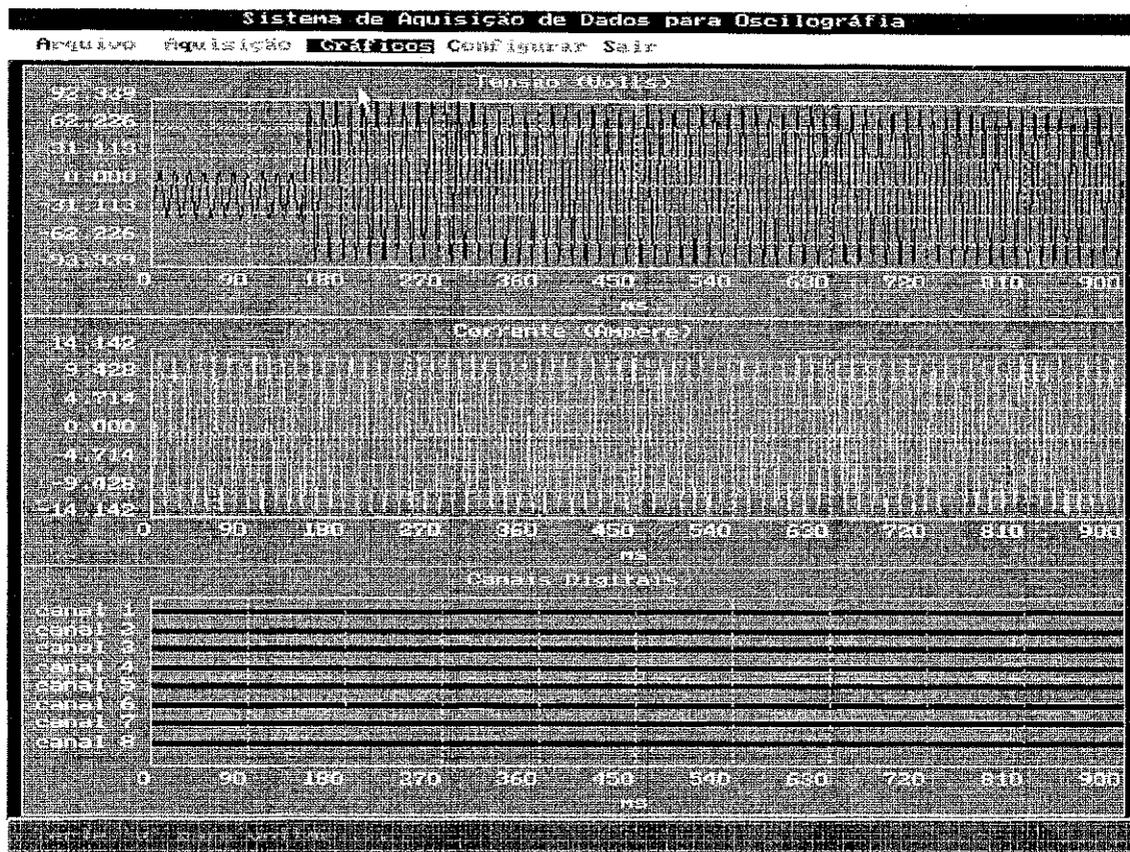


Figura 5.10: Tela principal do programa de visualização dos dados.

posterior. Os componentes utilizados no projeto permitem obter-se um sistema de monitoramento versátil e eficiente, a um preço relativamente baixo.

A restrição ao monitoramento da corrente e tensão de fase do sistema elétrico, como visto na seção 5.4.1, não constitui uma limitação, visto que, o entendimento das características gerais do sistema e a natureza do problema de estabilidade podem identificar outras grandezas necessárias; e o uso de "equações transdutoras" pode fornecer informações à respeito destas grandezas, algumas delas de difícil acesso através de transdutores analógicos [26].

Capítulo 6

Medição de Temperatura em Pára-Raios Energizados

O aumento contínuo da complexibilidade dos sistemas elétricos torna tais sistemas cada vez mais susceptíveis a sobretensões de origem interna e externa, tornando a proteção do mesmo um dos aspectos mais importantes no projeto das linhas de transmissão e de distribuição. Além disso, uma coordenação de isolamento eficiente também ajuda a reduzir o investimento inicial de construção de uma linha de transmissão, pois reduz os níveis de isolamento requeridos para os equipamentos e componentes utilizados. O principal dispositivo de proteção usado em sistemas elétricos é o pára-raios.

Os pára-raios instalados em sistemas elétricos, estão continuamente submetidos à tensão de operação normal do sistema e às sobretensões que neles ocorrem. Usualmente o dispositivo de proteção é conectado entre linha e terra, com a finalidade de limitar a sobretensão a níveis compatíveis com o isolamento dos outros equipamentos do sistema elétrico (Figura 6.1).

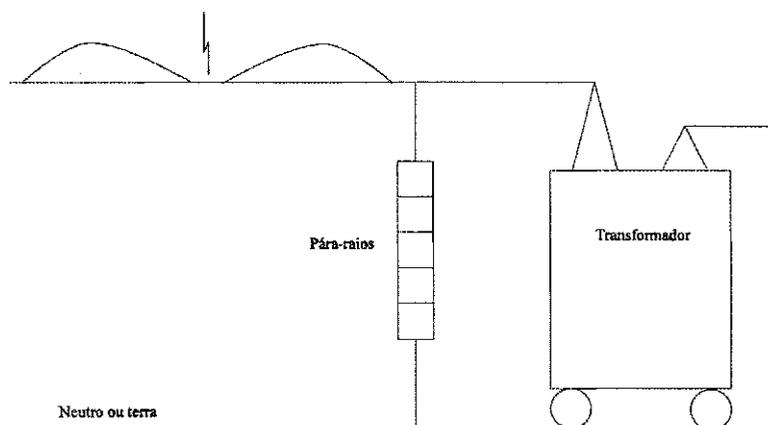


Figura 6.1: Esquema de instalação de um pára-raios.

Idealmente, sob tensão normal, o pára-raios deve ter uma impedância infinita, não afetando a operação do sistema, isto é, não retirando corrente. Contudo, na incidência de sobretensão, sua impedância deve variar rapidamente sob uma característica tensão-corrente altamente não-linear, para manter nos terminais do equipamento uma tensão bem abaixo do nível suportável e, grande bastante para não se constituir em uma falta para a terra.

A evolução das características construtivas dos dispositivos de proteção origina-se na simples instalação de centelhadores em paralelo aos equipamentos, passando pelos pára-raios convencionais de (Carboneto de Silício) SiC e mais recentemente, os pára-raios sem centelhadores, à base de ZnO.

Um pára-raios de óxido de zinco é constituído principalmente por elementos varistores, também denominados elementos não-lineares, discos, blocos ou pastilhas de ZnO. Os blocos são dispostos em formas de uma ou mais colunas. As colunas são envolvidas por um invólucro de porcelana de forma cilíndrica com aletas ou são moldadas em material polimérico, com formato semelhante ao da porcelana.

As cerâmicas à base de óxido de zinco apresentam inúmeras vantagens sobre o carboneto de silício. Dentre elas pode-se citar a densidade bastante elevada, $5,4 \text{ g/cm}^3$, e um alto calor específico, $2,8 \text{ J/cm}^3$. Estas características térmicas proporcionam aos pára-raios à base de zinco o dobro da capacidade de absorção de energia de um pára-raios de SiC. A capacidade de absorção de energia é a característica decisiva na seleção dos pára-raios instalados nos sistemas de extra alta tensão, à proteção de bancos de capacitores em série, à proteção de válvulas tiristorizadas e de filtros nas estações conversoras de alta tensão contínua.

A avaliação experimental do desempenho de um pára-raios apresenta um custo bastante elevado, decorrente da necessidade de reproduzir as condições de operação no campo ou mesmo as exigências das normas técnicas. A avaliação experimental do pára-raios completo pela utilização de modelos de seção muitas vezes torna-se inconveniente ou não confiável, pois a determinação precisa da equivalência térmica entre o pára-raios completo e a seção utilizada nos ensaios nem sempre é possível. Uma alternativa mais confiável de obter-se os parâmetros térmicos dos pára-raios é o uso de modelos computacionais.

Os modelos matemáticos/computacionais desenvolvidos até o presente não contemplam, conjuntamente, todos os requisitos necessários a uma reprodutibilidade confiável do desempenho do pára-raios quando submetidos a esforços elétricos e térmicos impostos nos ensaios normalizados, na operação em campo, na concepção de novas configurações ou na verificação de equivalência térmica entre pára-raios completo e o modelo de seção.

Por isto, uma proposta de um modelo eletrotérmico computacional novo para pára-raios vem sendo desenvolvida no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Tal trabalho tem como objetivo estudar a estabilidade, a capacidade de absorção de energia e dissipação térmica dos pára-raios, associados ao seu desempenho elétrico, quando submetidos a diversos esforços.

Para validação deste modelo, é necessário comparar-se os dados, obtidos experimentalmente, de um pára-raios físico, com os resultados das simulações obtidas através do modelo matemático.

Neste capítulo, apresenta-se um sistema de aquisição de dados para medição de temperatura em seções de testes de pára-raios de óxido de zinco. As seções são submetidas a sobretensões na frequência industrial com níveis e duração distintos e impulsos de corrente com forma de onda $8/20^1 \mu s$. Os dados medidos são enviados até um microcomputador, no qual são armazenados, podendo-se, posteriormente, analisá-los com a ajuda de programas comerciais.

6.1 Sistema de Aquisição de Dados e Controle de Temperatura

Para a realização das medições das temperaturas localizadas em um objeto de ensaio em alta tensão foram executadas montagens experimentais, visando analisar a viabilidade técnica do uso de um sistema de aquisição de dados de temperaturas automatizado por microcontrolador e a segurança dos equipamentos e, principalmente, dos operadores.

O sistema inicialmente proposto por Daher e Freire [34] é baseado no microcontrolador 68HC11E2 que realiza as tarefas de comunicação e acionamento para controle de potência e de um conversor A/D de rampa dupla. O controle de temperatura da estufa, a aquisição e o armazenamento de temperaturas são realizados por microcomputador. O programa gerente AQUISICON foi desenvolvido em linguagem C e gerencia o microcomputador. Na Figura 6.2, é apresentado o diagrama de blocos do sistema, [34].

Como apresenta-se na Figura 6.2, são inseridos vários sensores para medir a temperatura em diversos pontos do pára-raios. Alguns desses pontos apresentam uma diferença de potencial de alguns milhares de volts entre si, logo uma isolação elétrica eficiente entre os sensores teria que ser incluída, sem comprometer o arranjo térmico.

¹Esta notação é muito usada em sistemas de potência e descreve um impulso com tempo de subida de $\approx 8 \mu s$ e tempo de descida de $\approx 20 \mu s$.

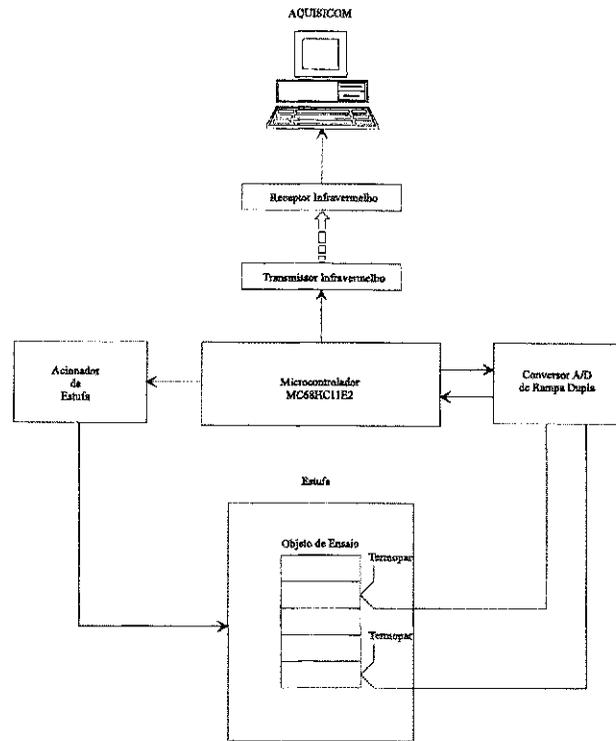


Figura 6.2: Diagrama de blocos do sistema de aquisição e controle de temperatura proposto por Daher e outros.

Entretanto, não foi possível isolar os sensores sem acrescentar inércia térmica ao sistema. Por isso, após inúmeras tentativas, concluiu-se que as medições de temperatura sem o acoplamento óptico individualizado das pontas de prova são inviáveis. Assim, o sistema de aquisição de dados desenvolvido anteriormente [34], não atingiu o objetivo e uma nova proposta teve que ser apresentada.

Esta nova proposta teria que satisfazer principalmente à três exigências de projeto:

- garantir o isolamento individual de cada uma das pontas de prova sem acrescentar inércia térmica;
- automatizar o processo de aquisição de dados; e
- assegurar uma exatidão de 1 % nos dados adquiridos.

Nas próximas seções são discutidas as soluções encontradas para as especificações anteriores, bem como as conclusões e os resultados obtidos.

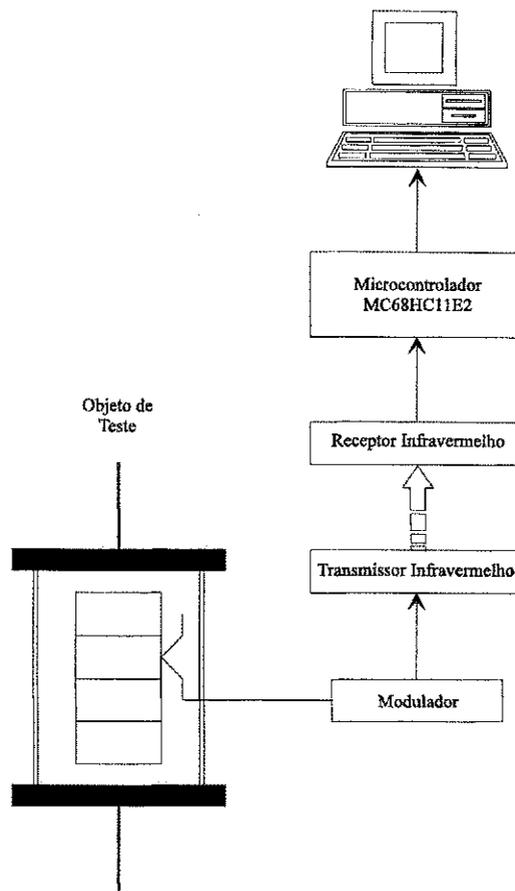


Figura 6.3: Diagrama de blocos do sistema de aquisição de temperatura em pára-raios energizados.

6.2 Sistema de Aquisição de Temperatura em Pára-Raios

As especificações da seção 6.1 poderiam ser conseguidas reproduzindo-se n vezes (uma para cada ponta de prova) o esquema da Figura 6.2, o que encareceria bastante o sistema (devido aos n microcontroladores). Esta solução é bastante simples, pois a isolamento é conseguida através do acoplamento óptico entre o microcontrolador e o microcomputador. Como a comunicação entre eles é digital, os dados adquiridos seriam recuperados de maneira satisfatória. Contudo, o microcontrolador estaria sendo subutilizado e o projeto seria bem mais complexo.

Uma outra proposta, bem mais simples, é apresentada na Figura 6.3. Neste caso, as pontas de prova (termopares) e os circuitos condicionadores são alimentados por bateria. O sinal de cada sensor (após ser amplificado) é modulado e isolado do microcontrolador (que é alimentado pela rede elétrica) por acoplamento óptico. Dessa forma, cada sensor está isolado do sistema e é utilizado apenas um microcontrolador

para aquisição dos dados (o que simplifica bastante o sistema). Entretanto, neste caso, o acoplamento óptico é realizado entre o sensor (que tem saída analógica) e o microcontrolador. Por isto, a recuperação do sinal exigiu um pouco mais de cuidado, ou seja, para garantir a exatidão das amostras, o sinal é modulado antes do acoplamento óptico.

A seguir, são listadas as principais características do sistema de aquisição de temperatura.

- uso de termopares como sensores de temperatura;
- modulação dos sinais dos sensores para melhorar a exatidão;
- uso de baterias e acoplamento óptico para isolação;
- microcontrolador 68HC11 para demodulação dos sinais e automação do processo;
- armazenamento dos dados em computador.

Para a validação do modelo térmico matemático do pára-raios é necessário que a aquisição de dados seja feita a cada 1 s durante 5 min. Um segundo é um tempo relativamente grande, ou seja, com esta taxa de aquisição tem-se tempo suficiente para fazer, por exemplo, algum tratamento necessário nos dados. Isto facilitou bastante o projeto.

Nas seções que se seguem são discutidas estas características com mais detalhes.

6.3 Sensores de Temperatura e Isolação Elétrica

Como sensores de temperatura, usou-se termopares, pelo seu equilíbrio entre facilidade de uso, linearidade e baixo custo. Além disso, como visto na seção 2.2.1, a sua característica pode ser aproximada pela equação 2.1. O termopar utilizado foi o de tipo T (cobre-constantan) que possui a característica apresentada na Figura 6.4.

Um termopar é produzido sempre que dois fios de metais diferentes são unidos por uma de suas extremidades. Neste caso, tem-se uma tensão de circuito aberto (tensão de Seebeck) proporcional à temperatura nessa extremidade (junção). Ou seja,

$$\Delta V_S = S(T_{TC})\Delta T_{TC}. \quad (6.1)$$

Na qual, ΔV_S é a variação da tensão de Seebeck, ΔT_{TC} é a variação da temperatura na junção dos dois metais, e S é o coeficiente de Seebeck que depende da temperatura nesta junção, T_{TC} .

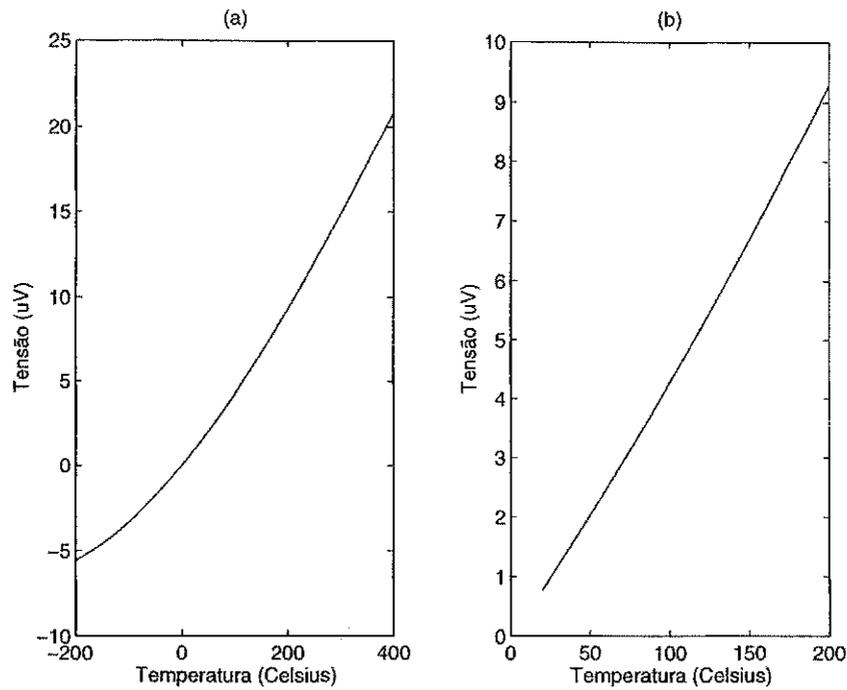


Figura 6.4: Característica do termopar tipo T (supondo a junção fria à 0 °C) (a) para a sua faixa de atuação e (b) para a faixa usada no projeto.

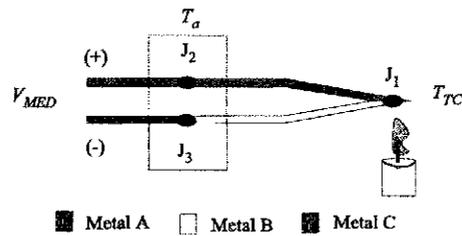


Figura 6.5: J_1 é o termopar com coeficiente de Seebeck conhecido, J_2 e J_3 são termopares espúrios.

Para medir-se temperatura com termopares, não se pode simplesmente conectar o termopar ao sistema de medição, pois esta conexão cria termopares espúrios. Estes termopares espúrios são ilustrados na Figura 6.5 pelas junções J_2 e J_3 . Neste caso, usando-se a notação $V_{J_x}(T_y)$ para indicar a tensão gerada pela junção J_x devido à temperatura T_y , a tensão medida (V_{MED}) é dada pela equação

$$V_{MED} = V_{J_1}(T_{TC}) + V_{J_2}(T_a) + V_{J_3}(T_a). \quad (6.2)$$

Na qual, T_a é a temperatura ambiente.

Desse modo, a tensão $V_{J_1}(T_{TC})$ é medida através da equação

$$V_{J_1}(T_{TC}) = V_{MED} - V_{desv}. \quad (6.3)$$

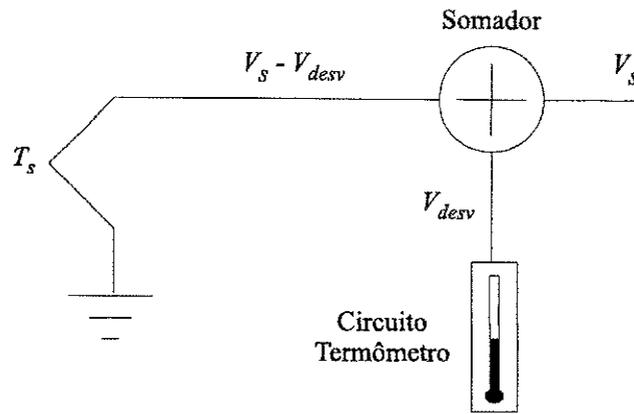


Figura 6.6: Diagrama de blocos do circuito utilizado para compensar a junção fria de termopares.

Na qual, $V_{desv} = V_{J2}(T_a) + V_{J3}(T_a)$ é uma tensão de desvio gerada por um circuito termômetro. Este esquema de compensação é ilustrado na Figura 6.6.

A tensão V_{desv} pode ser gerada pelo circuito da Figura 6.7, [14]. No qual, $R3$ e $R4$ têm que ser selecionados de acordo com o tipo de termopar.

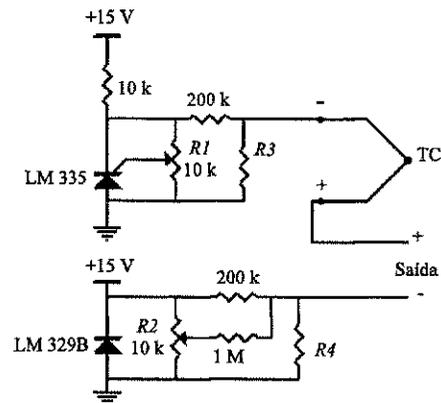
Caso seja necessário uma exatidão maior, o circuito em ponte da Figura 6.8 pode ser usado [35]. Neste circuito um termistor, R_T , é colocado em contato térmico com a junção de referência em T_a graus. Quando $T_a \neq 0^\circ C$, a ponte está desbalanceada, pois $R1 \neq R_T$. E então, produz uma tensão de compensação que pode ser adicionada à tensão V_{MED} para fazer V_m (Figura 6.8) igual a tensão que teria sido produzida se T_r estivesse em $0^\circ C$.

Uma solução mais simples é apresentada na Figura 6.9. Neste caso, é usada a dependência da tensão de condução do diodo com a temperatura. O circuito é baseado no transistor de uso geral o 2N2222 (que foi utilizado como um diodo). O princípio é o mesmo da Figura 6.7, porém, neste caso, usou-se um transistor comum e não um circuito integrado comercial.

Na Figura 6.10 é apresentado a característica *Temperatura* \times *Tensão* do circuito, para $R1 = 3\text{ k}\Omega$, para uma pequena faixa de temperatura. Como pode-se ver, o circuito apresenta uma característica bastante linear.

Na Figura 6.11 é apresentado o circuito que tem a função do somador da Figura 6.6. Com o potenciômetro $P1$, pode-se acrescentar uma tensão de desvio. Além disso, o ganho pode ser ajustado com o potenciômetro $P2$.

Os vários amplificadores usados no projeto apresentam uma tensão de desvio. Além disso, como o coeficiente de Seebeck é da ordem de dezenas de $\mu V/^\circ C$, a calibragem dos circuitos é muito delicada, podendo-se ter alguns erros provocados por ajustes pouco



1. Escolha $R3$ tal que a variação da tensão sobre ele seja igual ao coeficiente de Seebeck;
2. Ajuste $R1$ para que a tensão sobre $R3$ seja igual a tensão de Seebeck vezes a temperatura ambiente em graus Kelvin, e;
3. Ajunte $R2$ para que a tensão sobre $R4$ corresponda a TC à zero graus Celsius.

Figura 6.7: Circuito de compensação da junção fria de termopares baseado no CI LM 335.

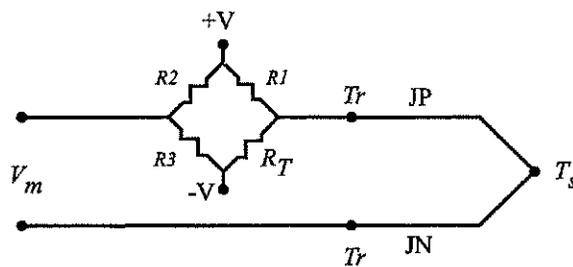
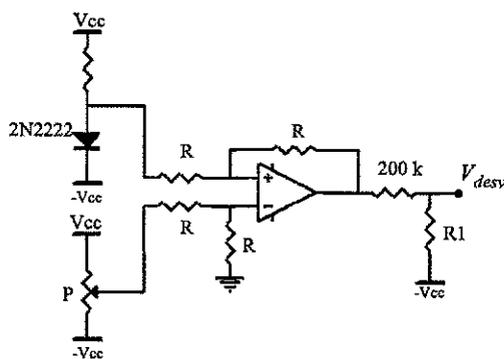


Figura 6.8: Esquema em ponte para compensação automática da junção fria de termopares.



1. Escolha $R1$ tal que a variação da tensão na saída do circuito seja igual ao coeficiente de Seebeck, e ;
2. Ajuste P tal que a tensão na saída do circuito seja igual ao coeficiente de Seebeck do termopar vezes a temperatura ambiente.

Figura 6.9: Circuito de compensação da junção fria de termopares utilizado no projeto de medição de temperatura.

exatos no ganho e nas tensões de desvio dos circuitos. Por isso, é aconselhável o uso de uma técnica de redução de erros.

A técnica básica para identificação de ruídos é muito simples, [36]:

1. projeta-se um sistema do qual nenhuma saída seja esperada. Se o projeto tiver sido bem elaborado, a saída obtida está diretamente relacionada com a fonte de ruído do sistema, que pode ser diminuída de acordo com a sistemática à ser desenvolvida.
2. usa-se o sistema anterior para produzir a saída desejada. Se o projeto tiver sido bem feito, o erro obtido na saída está relacionado com o ruído obtido anteriormente. E desse modo, o ruído pode ser eliminado.

Em seguida, a sistemática usada para "eliminação" de interferências pode ser realizada de dois modos:

1. seqüencialmente, usualmente por chaveamento (que consome tempo).
2. em paralelo (que aumenta o número de canais).

Ou seja, tempo e capacidade de canal são os dois investimentos necessários para a redução dos efeitos causados pelas interferências.

Para o projeto de medição de temperatura necessita-se de um número relativamente grande de canais. Além disso, o tempo é um dos aliados deste projeto. Por isto, a técnica usada foi a do item 1, ou seja, por chaveamento, Figura 6.12.

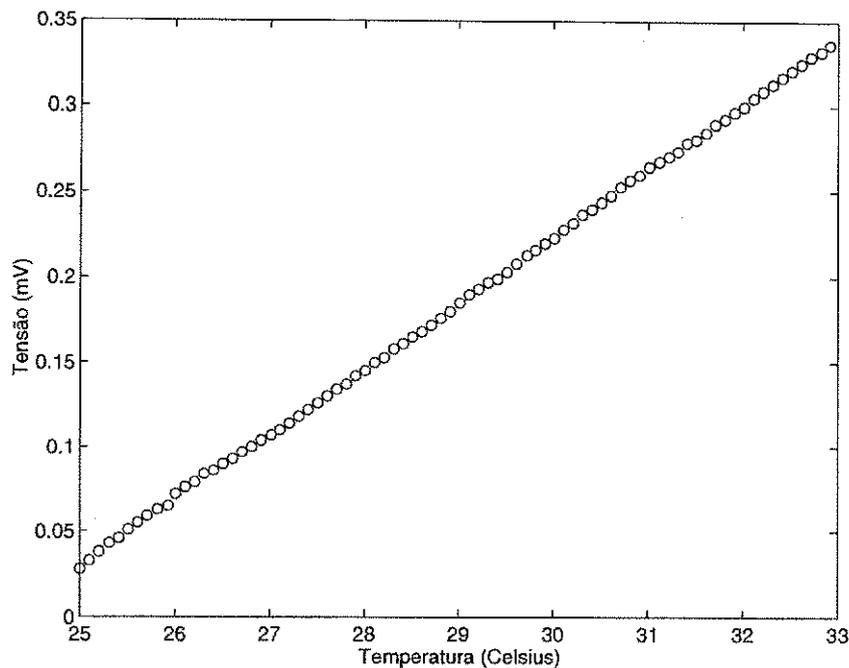


Figura 6.10: Característica do circuito utilizado para compensação da junção fria de termopares.

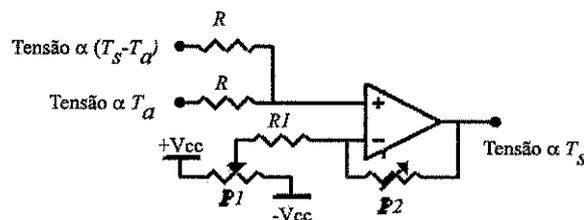


Figura 6.11: Circuito somador usado para condicionar o sinal dos termopares.

Na Figura 6.12 o controle das chaves deve ser feito pelo mesmo sinal. Além disso, para cada leitura deve-se realizar duas medições, uma em cada posição da chave. Em seguida, os valores medidos devem ser subtraídos para resultar em uma leitura com baixo ruído.

Para medir a exatidão do circuito da Figura 6.12, foi implementado um sistema de aquisição de dados baseado no barramento IEEE-488, Figura 6.13.

O uso da interface IEEE-488, além de possibilitar uma maior exatidão das leituras, automatiza todo o sistema de medição, o que é de grande importância nesta aplicação, devido à duração longa dos ensaios (em média doze horas).

Devido às limitações da estufa utilizada nos testes, o experimento foi realizado com temperaturas de até 140°C , ou seja, quando a estufa atingia essa temperatura ela era desligada e os dados eram colhidos.

Após algumas calibrações no circuito da Figura 6.12, conseguiu-se resultados seme-

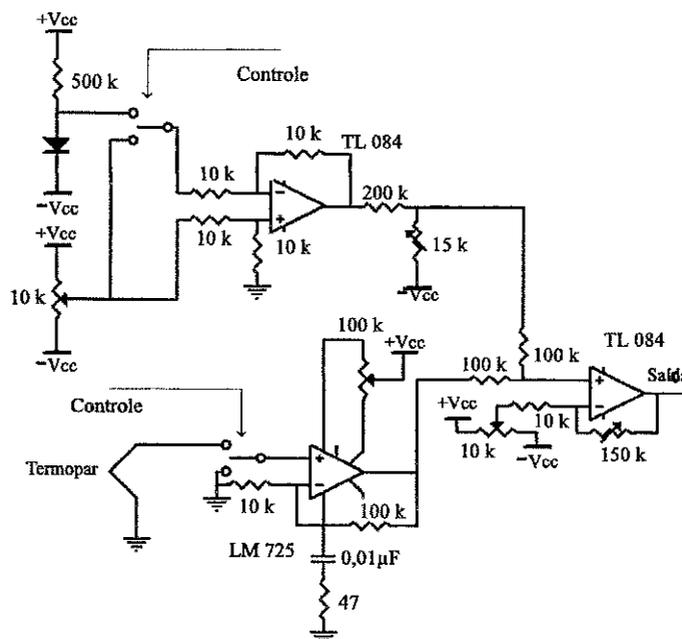


Figura 6.12: Circuito condicionador do termopar com sistema de chaveamento.

lhantes ao apresentado na Figura 6.14.

Observou-se que os dados obtidos distanciavam-se da equação 2.1 nos primeiros minutos quando a estufa era desligada. Fato que pode ser devido a inércia térmica da mesma. Além disso, os resultados do experimento apresentavam pequenas diferenças entre si, sugerindo um refinamento maior dos circuitos utilizados e do experimento.

6.4 Modulação e Acoplamento Óptico

Como dito no início do capítulo, é necessário garantir a isolamento das pontas de prova entre si, pois elas podem estar em potenciais muito diferentes. Esta isolamento pode ser conseguida através de acoplamento óptico. Contudo, este acoplamento compromete a exatidão dos sinais. Por isto, os sinais têm que ser modulados antes do acoplamento óptico.

Inicialmente, pela simplicidade, optou-se pela modulação em largura de pulso (PWM). Contudo, logo concluiu-se que esta não seria a melhor opção, pois o acoplamento óptico distorceria as bordas do pulso acrescentando ruído ao sinal.

Uma outra opção é a conversão, que é imune a esse problema. Esta modulação pode ser realizada através de um conversor tensão-freqüência ou de um VCO ("Voltage Controller Oscillator").

Pela disponibilidade, inicialmente testou-se o VCO contido no CI 4046. O circuito testado foi o da Figura 6.15. Para testar este circuito, foi implementado um sistema

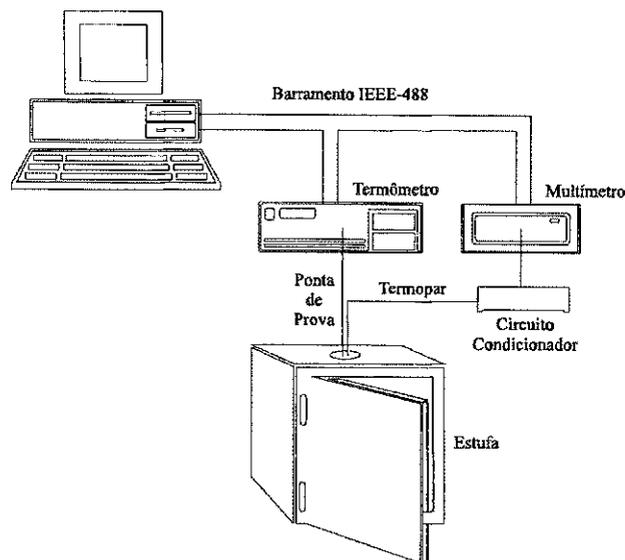


Figura 6.13: Sistema de aquisição usado para validar o circuito condicionador do termopar.

de aquisição de dados semelhante ao da Figura 6.13, no qual utilizou-se uma fonte DC ajustável para simular o sinal do termopar e um osciloscópio digital para medir a frequência da modulante após o acoplamento óptico. Este sistema é apresentado na Figura 6.16. O resultado obtido é apresentado na Figura 6.17. A Figura 6.17.a apresenta a característica $Tensão \times Freqüência$ do circuito e a Figura 6.17.b, a característica $Tensão \times Freqüência$ realizando-se a média de dez pontos consecutivos para redução do ruído, como discutido na seção 2.7. Com esta técnica, conseguiu-se reduzir consideravelmente o ruído.

Um resultado melhor que o da Figura 6.17.b seria conseguido caso, ao invés do VCO, fosse usado o conversor $Tensão \times Freqüência$ LM 131, que tem uma linearidade de 0,01 %, [14]. Contudo, a linearidade obtida na Figura 6.17.b é de 1 % e é satisfatória para o projeto.

6.5 Redução do Ruído Aditivo

Como visto na seção anterior, para usar-se um VCO como modulador FM é necessário tirar a média de um conjunto de pontos. Com isso, considerando-se o erro nas leituras como sendo um ruído aditivo, de média zero e decorrelacionado, consegue-se melhorar bastante a exatidão das medições.

Na Figura 6.17.b, pode-se ver que a média de dez amostras já é suficiente para reduzir o ruído. Contudo, preferiu-se obter uma medição a partir da média de 60

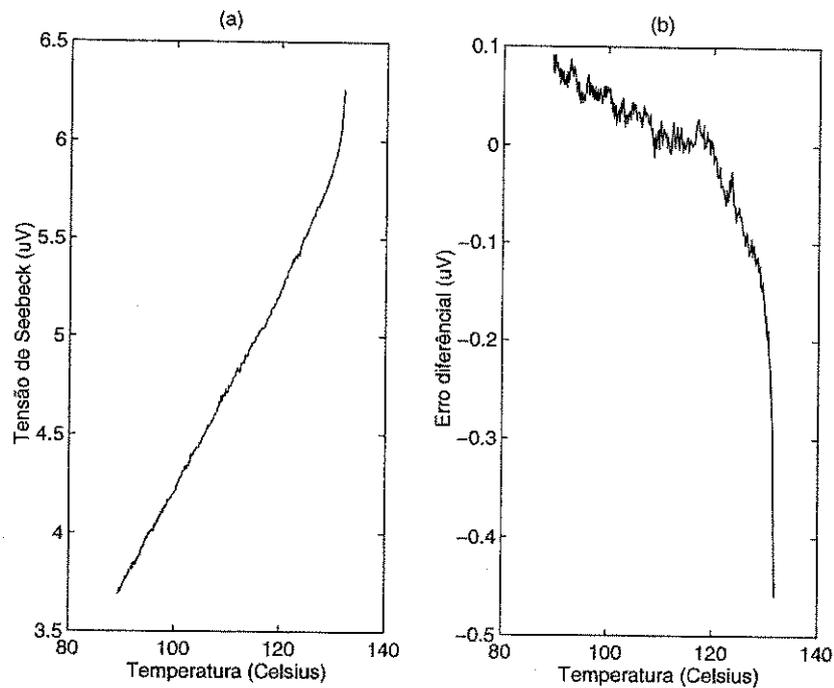


Figura 6.14: (a) Característica $Temperatura \times Tens\tilde{a}o$ do termopar cobre-constantan, (b) erro diferencial.

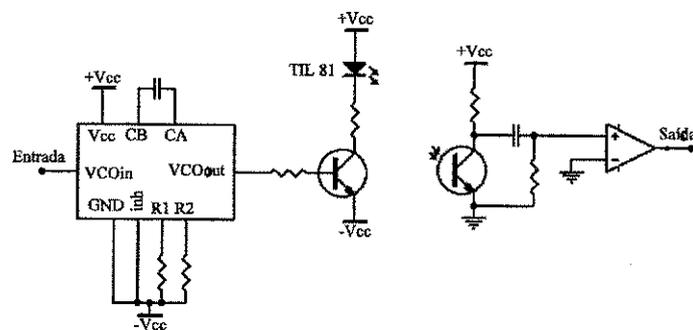


Figura 6.15: Circuito de modulação FM e acoplamento óptico.

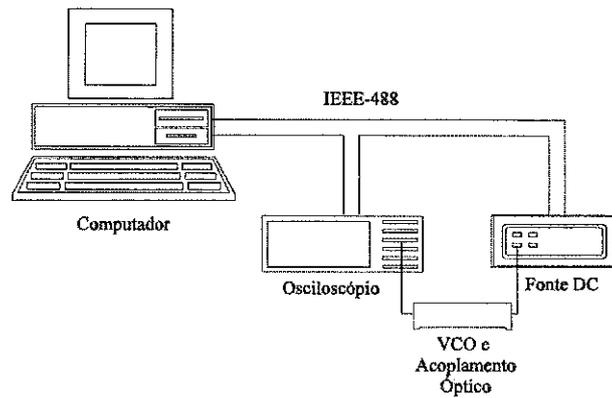


Figura 6.16: Sistema de aquisição usado para validar o circuito modulador FM e acoplamento óptico.

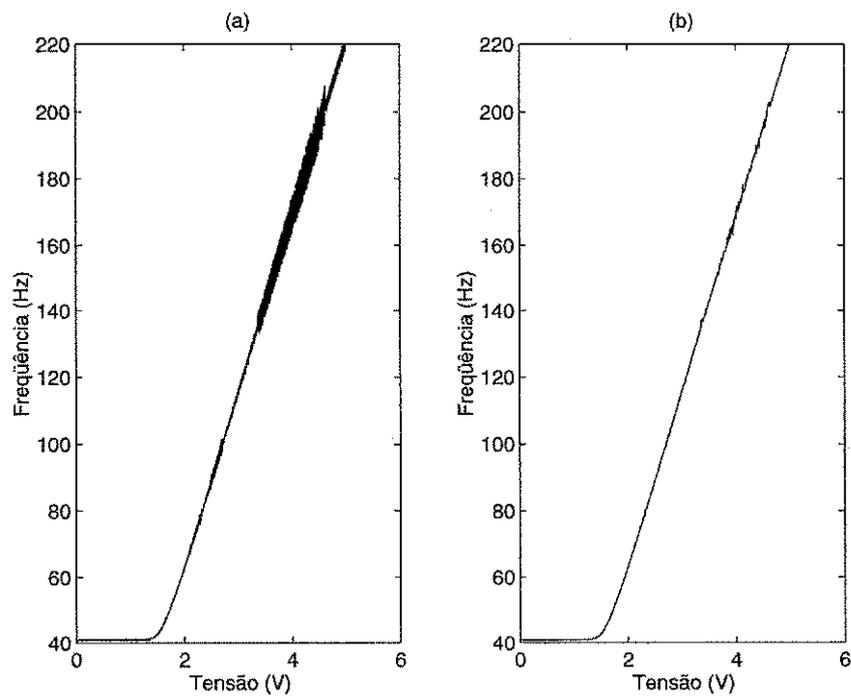


Figura 6.17: Característica tensão-frequência do circuito modulador FM e do acoplamento óptico. (a) apenas um ponto por amostra e (b) média de dez pontos por amostra.

pontos, pois neste caso, como cada ponto da média é adquirido com uma taxa de 1/60 s, o ruído de 60 Hz também poderia ser atenuado.

6.6 Programas Gerentes

O microcontrolador MC68HC11 foi utilizado para automatizar o processo, sendo responsável pela temporização da aquisição de dados, medição do período do sinal do VCO e envio dos dados até o microcomputador. Nos próximos itens, estas funções são discutidas:

- A medição do período é feita através de uma das portas de captura do microcontrolador, com o auxílio do temporizador. Como o temporizador é de 16 bits, a leitura tem esta resolução. Após a medição do período, o resultado é armazenado em uma memória RAM;
- A temporização da aquisição é feita da seguinte forma: o período do sinal FM é medido a cada 1/60 s, durante 1 s. Em seguida, esses 60 dados adquiridos são enviados ao microcomputador, a média dos pontos é feita e uma medição é armazenada no disco rígido, e;
- O envio dos dados para o microcomputador é feito através da porta de comunicação serial do próprio microcontrolador. Como visto no item anterior, os dados são enviados para que a média seja calculada no PC.

Para recepção dos dados, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem C. Este programa tem a função apenas de, a cada 1 s, adquirir 60 pontos pela porta serial do PC, realizar a média desses pontos e converter o período do sinal FM (média dos 60 pontos) para a temperatura da seção de teste correspondente.

Os valores das temperaturas medidas são armazenadas no formato ASCII em um arquivo no disco rígido do microcomputador. O usuário do sistema deve então utilizar o programa comercial de sua preferência para analisar os dados.

6.7 Conclusão e Propostas Futuras

Os resultados obtidos até o momento demonstram que é possível, com acoplamento óptico e modulação FM, obter-se o isolamento individual das pontas de prova sem comprometer a exatidão exigida para a aplicação. Contudo, talvez devido à qualidade do experimento (a estufa aquecia até apenas 140 °C, os termopares não são comerciais

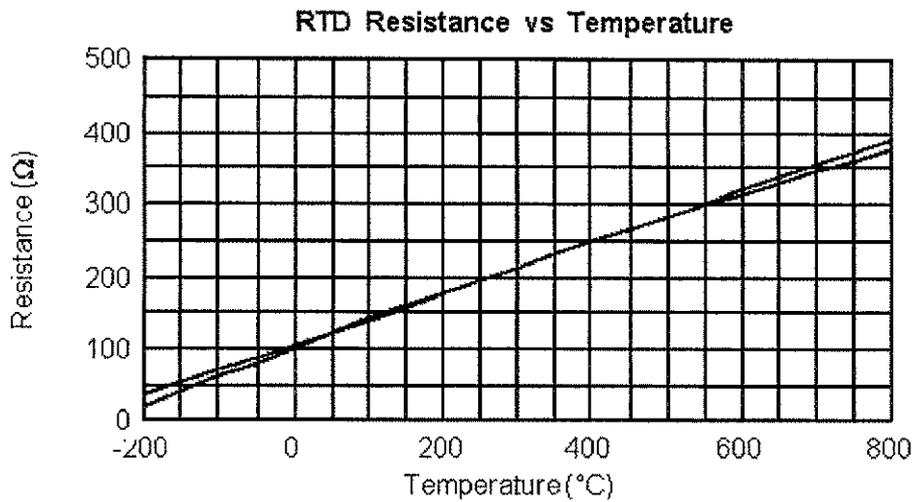


Figura 6.18: Característica de um RTD (National Semiconductor).

e sua junção pode apresentar alguma imperfeição, etc), os resultados obtidos até o momento, com as pontas de prova utilizadas, não permitem saber se é possível obter-se a exatidão desejada.

Uma outra alternativa seria sensores RTD's ("resistance-temperature detector"). Alguns RTD's consistem de uma membrana de platina depositada em um substrato. Neste caso, a curva *Resistência* \times *Temperatura* é bastante linear, como é apresentado na Figura 6.18. Na Figura, uma linha reta é também apresentada como referência. Caso seja necessário, pode ser usado uma das técnicas de linearização discutidas no capítulo 2, pois a não-linearidade do RTD é altamente preditiva e repetitiva [37].

Capítulo 7

Discussão e Conclusão

Os quatro exemplos apresentados possibilitam a análise de sistemas bastante distintos. Suas discussões possibilitou a constatação de alguns fatos interessantes. Por exemplo, para o projeto de sistemas de aquisição de dados remotos a melhor opção é dividir o sistema em duas partes: a primeira responsável pela aquisição dos dados, e a segunda pelo armazenamento e análise dos dados. Além disso, para transmitir-se os dados, a opção mais simples é a comunicação através do padrão RS-232 e de uma linha física.

Da análise dos sistemas, conclui-se que o uso de telemetria por RF facilitaria bastante a transmissão dos dados, principalmente em aplicações nas quais vários subsistemas de aquisição de dados tenham que ser instalados ao mesmo tempo, como é o caso do registrador de perturbações em subestações de energia elétrica. No sistema de aquisição de dados agrometeorológicos, por não se usar telemetria por RF, foi necessário o projeto de um módulo especial para transferir os dados do subsistema de aquisição para o subsistema de armazenamento, que provocou perda na automação.

Ainda no sistema agrometeorológico, a preocupação com o consumo e principalmente com a capacidade de armazenamento foi muito grande. Isto foi devido a quantidade de pontos adquiridos e a dificuldade de transmissão dos dados. Isto ilustra um parâmetro muito importante no projeto de sistemas de aquisição de dados em locais especiais.

O controle automático de ganho usado no sistema de monitoramento de corrente de fuga e o seletor de ganho utilizado no sistema de dados agrometeorológicos podem ser muito importantes para aumentar-se a exatidão nos dados adquiridos, em especial em sistemas que adquirem dados de grandezas que variam muito de intensidade no momento da observação.

No sistema de aquisição de dados agrometeorológicos, através da técnica de con-

versão A/D por integrações sucessivas, ilustrou-se as vantagens do uso de um sistema automatizado por microcontrolador. Neste caso, vários circuitos externos foram eliminados usando-se programação, e com a ajuda do temporizador interno ao microcontrolador.

No sistema de medição de temperatura, o acoplamento óptico em conjunto com a modulação FM possibilitou a medição de temperatura em regiões com potenciais bem diferentes. Esta técnica é sobretudo importante na medição de sistemas de alta-tensão.

No sistema agrometeorológico, a medição da referência em conjunto com a leitura dos canais diversos possibilitam a aquisição dos dados com mais exatidão. Esta técnica pode ser muito útil para atenuar-se erros causados por tensões de modo comum.

Os sistemas analisados também demonstraram algumas técnicas de redução de interferências de 60 Hz e de ruídos aditivos, através do uso de cálculos de média e integrações dentro de um período múltiplo de $1/60$ s.

Por todas essas razões, mostra-se que este trabalho deve ser de grande ajuda no projeto de sistemas de aquisição de dados, em especial os baseados em microcontroladores. Evidentemente, o trabalho não abrange todos os pontos de discussão, mas esclarece uma boa parte deles.

Referências Bibliográficas

- [1] P.D. Lawrence e K. Mauch. *Real-Time Microcomputer System Design: an introduction*. McGRAW-HILL, 1988.
- [2] P.M. Forgues e M. Goldberg. Microprocessor in biomedical instrumentation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp 250–253, dezembro 1979.
- [3] E.L. Mendes, R.C.S. Freire, G.S. Deep, J.S.R. Neto, e P.V. Azevedo. Sistemas de aquisição de dados agrometeorológicos. *IX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, pp 19–21, 1995.
- [4] P.E. Stuckert. Computer augmented oscilloscope system. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp 299–306, dezembro 1969.
- [5] C.R. Edwards. Interim data acquisition system for the environmental test laboratory. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp 206–209, novembro 1971.
- [6] B. Mangolds. Rudi: A computer-controlled test-data-acquisition and processing system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp 209–217, novembro 1971.
- [7] H. Ikeda, S. Ohkawa, e H. Yamamoto. Microprocessor-controlled time-sharing services terminal with interfaces for instruments and its application to precision measurement of high vswr. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp 306–311, dezembro 1979.
- [8] National Instruments. *IEEE 488 and VXIbus Control, Data Acquisition, and Analysis*, 1993.
- [9] National Instruments. *Test and Measurement Industrial Automation*, 1997.
- [10] D. Potter. Measuring temperature with thermocouples - a tutorial. Relatório técnico, National Instruments, 1996.

- [11] A.S. Tanenbaum. *Organização Estruturada de Computadores*. Prentice/Hall do Brasil, 3 edition, 1992.
- [12] P.H. Garrett. *Advanced Instrumentation and Computer I/O Design: Real-Time System Computer Interface Engineering*. IEEE Press, 1993.
- [13] F.T. Braz. Módulo de interface ieee-488 para o microcontrolador mc68hc11. Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1993.
- [14] National Semiconductor, Inc. *National Operational Amplifiers Databook*, 1995.
- [15] V. Klig. Biomedical applications of microprocessors. *Proc. IEEE*, pp 151-166, fevereiro 1978.
- [16] Anônimo. *M68HC11 Reference Manual*. MOTOROLA INC, 1990.
- [17] J.M.B. Bezerra e A.F.D. Silva. Procedimentos para monitoração de efeitos em linhas de transmissão via reconhecimento de padrões.
- [18] E.A. Cherney, R. Hackam, e S.H. Kim. Porcelain insulator maintenance with rtv silicone rubber coatings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp 1177-1181, julho 1991.
- [19] ELETRONORTE. *Lavagem de Isoladores, 1987*.
- [20] F. Zedan, A. Farag, e M. Akbar. Performance of hv transmission line insulators in desert conditions part ii (reserch on high voltage insulators in kingdom of saudi arabia). *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, novembro 1985.
- [21] M. Akbar e F. Zedan. Performace of hv transmission line insulators in desert conditions part iii (pollution measurements at a coastal site in the eastern region of saudi arabia). *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp 429-438, janeiro 1991.
- [22] M. Akbar, F.M. Zedan, M. Arif Abdul-Majeed, e K.Y. Al-Soufi. Design of hv transmission lines to combat insulator pollution problems in the eastern region of saudi arabia. *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp 1912-1920, outubro 1991.
- [23] ELECTRA Overvoltages and Insulation Coordination. *Mesure de la severite de pollution des sites et application au dimensionnement des isolateurs pous les reseaux a courant alternatif*. Relatório técnico, ELECTRA, 1977.
- [24] J.S. Forrest. The electrical characteristics of 132 kv line insulators under varius weather conditions. *JIEEE*, pp 401-413, apague 1936.

- [25] J.S. Forrest. The characteristics and performance in service of high voltage porcelain insulators. *JIEEE*, pp 60-80, 1942.
- [26] P. Kundur, T.M. Athay, J.H. Fish, D.C. Lee, J.V. Mitsche, R.P. Schulz, K. Srinivasan, e C.W. Taylor. Instrumentation for monitoring power system dynamic performance. Relatório técnico, The IEEE Task Force on Instrumentation for Systems Dynamic Performance, fevereiro 1987.
- [27] M.F.S. Farias. Implementação de um algoritmo para modelagem de carga em função da tensão e da frequência. Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1988.
- [28] E.A.C. Da Costa. Desenvolvimento de um registrador de perturbações nos sistemas elétricos. Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1991.
- [29] R.E. Lee e R.H. Osborn. A microcomputer based data acquisition system for high impedance fault analysis. *IEEE Transactionson Power System*, pp 144-148, outubro 1985.
- [30] P.H. Ashmole e U. Di Caprio. Recorders for longer term systems disturbances on the cegb and enel systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, pp 137-141, fevereiro 1988.
- [31] D.E Perry, T.L. Battisto, e C.W. Taylor. Power system dynamic performance monitoring at bpa. *IEEE Transactions on Power Systems*, pp 134-137, fevereiro 1988.
- [32] IEEE Task Force Report. Application of instrumentation for the evaluation of power system dynamic performance. Relatório técnico, IEEE Task Force Report, julho/agosto 1972.
- [33] P. Bornard. Power system disturbance recording and monitoring on the edf network. *IEEE Transactions on Power Systems*, pp 142-144, fevereiro 1988.
- [34] S. Daher, R.C.S. Freire, e G.S. Deep. O controlador de temperatura. Relatório técnico, Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle - UFPB, abril 1994.
- [35] E.O. Doebelin. *Measurement Systems (Application and Design)*. McGRAW-HILL, 1982.
- [36] P.K. Stein. The unified approach to the engineering of measurement systems for test end evaluaton. Relatório técnico, Stein Engineering Services, Inc, 1992.

- [37] K. Lacanette. Temperature sensor handbook. Relatório técnico, National Semiconductor, 1997.