INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS e NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**PROJETO E MONTAGEM DE EQUIPAMENTO PARA CONTROLE DE
SISTEMA DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA USANDO RADIAÇÃO NUCLEAR.**

JOSÉ ALTINO TUPINAMBÁ MELO

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Aplicações.**

Orientador:

DR. TUFIC MADI FILHO

São Paulo

2006

À minha mãe, Nemésia “ in memorian”

A meu pai, José Tiago “in memorian”

À minha esposa, Marcia

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação tornou-se possível através do convênio CEETEPS E IPEN, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Sousa e Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

Os agradecimentos são direcionados a todos que contribuíram com a elaboração deste trabalho incluindo aqueles que, porventura, não estejam relacionados aqui.

Dr. Tufic Madi Filho, pela constante e inestimável orientação e apoio. Meu respeito e admiração.

Dr. José Mestnik Filho, coordenador da área de física, pelo apoio.

Dr. Carlos Henrique Mesquita, por ter participado da banca examinadora e pelas sugestões valiosas durante avaliação deste trabalho.

Dra. Lucildes Pita Mercuri, por ter aceitado participar da banca examinadora e pelas sugestões e observações valiosas durante avaliação deste trabalho.

Professora Kleonik Zenipopoulus, coordenadora do departamento de elétrica da ETE Lauro Gomes pelo estímulo e apoio.

Professora Irene Scaranto, diretora da ETE Lauro Gomes pelo estímulo.

Minha esposa **Márcia** e meus filhos: **Jacqueline, Jânnifer, Allexandre, Rogério e Christine**, pelo incentivo constante.

A Deus.

SUMÁRIO

	Página
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Considerações gerais sobre os Ensaios Não Destrutivos (END)	1
1.2 – Considerações teóricas	3
1.2.1 – Desintegração radioativa	3
1.2.2 – A radiação γ	6
1.2.3 – A interação da radiação γ com a matéria	7
1.2.4 – Detectores cintiladores	12
1.3 – Objetivo	14
2 – MATERIAIS E MÉTODOS	15
2.1 – Introdução	15
2.2 – Materiais	15
2.3 – Informações Preliminares sobre o Equipamento	18
2.3.1 – Hardware	19
2.3.2 – Software	22
2.4 – Método	24
2.4.1 – Introdução	24
2.4.2 – Detecção	26
2.5 – O Módulo Eletrônico ENDRAD	29
2.5.1 – O Microcontrolador MCS51	30
2.5.2 – O Contador Digital Binário Externo	32
2.5.3 – O Comunicador Serial	34
2.6 – O Programa ENDRAD	36
2.6.1 – Introdução	36
2.6.2 – Características gerais do programa ENDRAD	37

2.7 – O algoritmo para o sistema de medida _____	39
2.8 – Obtenção do valor da mínima atividade detectável _____	40
3 – RESULTADOS _____	41
3.1 – O Módulo Eletrônico ENDRAD _____	41
3.1.1 – O Circuito Eletrônico . _____	42
3.1.2 – Os painéis _____	47
3.1.3 – O Firmware do microcontrolador _____	48
3.2 – O Programa ENDRAD _____	49
3.3 – Parte experimental _____	52
3.3.1 – As etapas da parte experimental _____	53
4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	57
5 – PERSPECTIVAS _____	57
APÊNDICE _____	58
1 – DIAGRAMA DO CIRCUITO DO MÓDULO ELETRÔNICO ENDRAD _____	59
2 – LISTA DE COMPONENTES _____	60
3 – FLUXOGRAMA DO FIRMAWARE DO MÓDULO ENDRAD _____	61
4 – FLUXOGRAMA SOFTWARE ENDRAD _____	66
5 – ARQUIVOS FONTE DO FIRMAWARE MÓDULO ENDRAD _____	67
6 – ARQUIVOS FONTE DO SOFTWARE ENDRAD _____	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	85

LISTA DE TABELAS E QUADROS

	Página
Tabela 3.1 Pinos e tensões no conector NIM POWER.....	8
Tabela 3.2 Valores para os registros de temporização.....	9
Quadro 1 - Inicialização.....	67
Quadro 2 - Laço principal	68
Quadro 3 - Sub-rotinas de comunicação com o microcomputador.....	68
Quadro 4 - Sub-rotina para comandar saída genérica.....	69
Quadro 5 - Sub-rotina Envia ao microcomputador uma leitura.....	69
Quadro 6 - Sub-rotina de conversão de binário para char e envia ao microcomputador...	70
Quadro 7 - Sub-rotina ajusta os registros de temporização.....	71
Quadro 8 - Sub-rotina Estouro do contador pulsos.....	72
Quadro 9 - Sub-rotina Geradora da base de tempo.....	73

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Dominância dos efeitos de interação da radiação em função do número atômico do meio material irradiado e da energia do fóton incidente.....	8
Figura 1.2 Espalhamento Compton e equação da energia.....	9
Figura 1.3 Processos predominantes para os raios gama: Efeito Foto Elético EFE, Espalhamento Compton EC e Produção de Pares PE.....	10
Figura 1.4 Absorção de fótons em Alumínio e Chumbo.....	11
Figura 1.5 Figura 6. Coeficientes mássicos de absorção de Al e Pb pelos principais processos de interação da radiação γ	12
Figura 1.6 Cintilador de NaI(Tl) acoplado a um tubo fotomultiplicador.....	13
Figura 1.7 Tubo fotomultiplicador.....	14
Figura 2.1 Diagrama de blocos do Equipamento para Controle de Sistema de Análise não Destrutiva Usando Radiação Nuclear.....	15
Figura 2.2 Conjunto fonte e colimador.....	16
Figura 2.3 Espectro de energia do Amerício 241.....	17
Figura 2.4 Diagrama em blocos do Módulo Eletrônico ENDRAD.....	20
Figura 2.5 Foto de um "Rack-Bin" (NIM)	21
Figura 2.6 Esboço do processo de medida.....	25
Figura 2.7 Foto da posição de medição com recipientes sob análise.....	26
Figura 2.8 Gráfico contagem/atenuação versus posição do recipiente.....	26
Figura 2.9 Gráfico da contagem versus tempo.....	27
Figura 2.10 Microcontrolador 89C4051 pinagem e encapsulamento.....	30
Figura 2.11 Limitador de tensão.....	33
Figura 2.12 Circuito integrado MAX232.....	35
Figura 2.13 Janela do programa ENDRAD.....	37
Figura 2.14 Gráfico com mínimo e máximo da função contagem.....	38

Figura 3.1	Sistema ENDRAD.....	40
Figura 3.2	Diagrama de blocos do módulo eletrônico ENDRAD.....	41
Figura 3.3	Módulo eletrônico ENDRAD no ProtBoard	42
Figura 3.4	Cabo Serial do tipo CrossCable.....	43
Figura 3.5	Nomenclatura dos pinos padrão RS232 conector DB9.....	43
Figura 3.6	Tensões padrão RS232.....	44
Figura 3.7	Formato_dados_UART.....	44
Figura 3.8	Regulador de tensão da Fonte de alimentação.....	45
Figura 3.9	Painéis do módulo eletrônico ENDRAD.....	46
Figura 3.10	Janela do programa ENDRAD com detalhes.....	49
Figura 3.11	Materiais usados no experimento.....	51
Figura 3.12	Detector, Fotomultiplicadora e cintilador.....	52
Figura 3.13	Módulo conectado a instrumentação usada no experimento.....	53
Figura 3.14	O equipamento para controle de sistema de análise não destrutiva usando radiação nuclear.	55
Figura A.1	Circuito eletrônico do módulo ENDRAD.....	59
Figura A.2	Fluxograma geral do Firmware.....	61
Figura A.3	Fluxograma Firmware base de tempo.....	62
Figura A.4	Fluxograma Firmware contador digital.....	63
Figura A.5	Fluxograma Firmware registros de temporização.....	64
Figura A.6	Fluxograma Firmware enviar contagem.....	65
Figura A.7	Fluxograma do Software.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASCII	American Standard Code For Interchange Information
BASIC	Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code
BNC	Conector para cabo coaxial
bps	Bits Por Segundo
CCD	Charge Coupled Device
CE	Captura Eletrônica
CEA	Comissão de Energia Atômica da França
CI	Conversão Interna
CLP	Controlador Lógico Programável
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
C_n	Taxa de contagem atual
C_{n-1}	Taxa de contagem anterior
COM1, COM2	Porta de comunicação serial dos microcomputadores
DB25	Conector padrão 25 pinos
DB9	Conector padrão 9 pinos
DIP	Dual In-Line Package
DOE/ER	Department Of Energy / Office of Energy Research
END	Ensaio Não Destrutivos
ENDRAD	Ensaio Não Destrutivo usando Radiação
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EPROM	Erasable Programmable Read-Only Memory
Fck	Frequência de oscilação do clock
FLASH	EEPROM de apagamento ultra rápido
FRX	Fluorescência por Raio X
GEM	Gas Electron Multiplier
GND	Ground. Terminal terra de alimentação elétrica
HV	Alta tensão
Hz	Hertz
I ² C	Inter-Integrated Circuit. (Protocolo para comunicação)
IE	Interrupt Enable
IHM	Interface Homem Máquina
INEEL	Idaho National Engineering and Environmental Laboratory
ININ	Instituto de Investigações Nucleares
IO	Input OutPut (Entrada e Saida)
IP	Interrupt Priority
IrDA	Infrared Data Association. (Protocolo para comunicação)
JAVA	Java, linguagem de programação orientada para objeto
Kb	Kilobyte = 1024 bytes
LED	Light Emitter Diode
mad	Mínima atividade detectável
MCS51	Micro Controller System of 8051
MDAS	Multi-Detector Analysis System

MHz	MegaHertz
MODEM	MOdulator-DEModulator
ms	Milisegundo
NaI(Tl)	Cristal de iodeto de sódio ativado por tálio
NIM	Nuclear Instrument Module
PASCAL	Pascal, linguagem de programação orientada para objeto
PEME	Petroleos Mexicanos
PERL	Practical Extraction Report Language, linguagem de programação
P1	Porto de I/O número 1
P3	Porto de I/O número 3
R_FAT	Registro do MCS51
ROM	Read Only Memory
RS232	Padrão para comunicação serial em microcomputadores
RX	Receiver Data
s	segundo
S0BUF	Registro para comunicação serial do MCS51
SCA	Single-Channel Analyzer
SFR	Special Function Register
T/C0	Timer/Counter interno número 0
T/C1	Timer/Counter interno número 1
TH1	Byte alto do registrador do Timer/Counter 1 interno
TH2	Byte alto do registrador do Timer/Counter 2 interno
TL	Byte baixo do registrador do Timer/Counter
TTL	Transistor-Transistor Logic
TX	Transmitted Data
UART	Universal Asynchronous serial Receiver and Transmitter
UCP	Unidade Central de Processamento
USB	Universal Serial Bus. (Protocolo para comunicação)
V	Volt
VDD	Terminal positivo de alimentação elétrica
VSS	Terminal negativo de alimentação elétrica

PROJETO E MONTAGEM DE EQUIPAMENTO PARA CONTROLE DE SISTEMA DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA USANDO RADIAÇÃO NUCLEAR

José Altino Tupinambá Melo

RESUMO

Os Ensaaios Não Destrutivos (END), são aplicados em testes de qualidade de componentes e de máquinas. Estes elementos não teriam um bom desempenho se fossem concebidos alheios à qualidade do projeto, aos materiais envolvidos, aos processos de fabricação e à metodologia de inspeção e manutenção. Um alto nível de tecnologia é aplicado com um objetivo específico, ou seja, à garantia da qualidade dos componentes e do bom funcionamento dessas máquinas, seja na indústria e na geração e conversão de energia, incluindo a nuclear. A globalização nos diversos ramos da indústria leva a um aumento na quantidade de projetos e produtos contextualmente multinacionais. Surgem, as seguintes questões: como assegurar que os componentes e os processos utilizados se dispõem de alto índice na qualidade? Como otimizar os métodos e os processos de teste de materiais para assegurar a isenção de defeitos que possam afetar o desempenho dos componentes? As respostas para as questões se encontram notadamente na aplicação dos END. A análise de materiais complexos (não homogêneos) por meio de END requer um estudo detalhado dos sinais de resposta dos sensores. Um sistema de medidas e controle de processos não destrutivos usando radiação gama ou beta, em função do material a ser analisado foi desenvolvido. Esse sistema envolve: (a) Interface de entrada/saída (Hardware) e (b) Interface gráfica (Software). Na análise não destrutiva faz-se a comparação do sinal proveniente do sensor com um sinal preestabelecido (Set Point) ou sinal de referência, o qual é ajustado na Interface de entrada/saída. Após o processamento geral, o sistema tomará a decisão de rejeitar ou não o material analisado. A Interface de entrada/saída é implementada por um equipamento eletrônico constituído pelo MCS51, com a finalidade de fornecer um meio físico para troca de informações, via de comunicação serial RS232, entre o sensor e o microcomputador. A Interface gráfica (programa computacional) foi escrita em linguagem C++ visual.

DEVELOPMENT AND ASSEMBLY OF EQUIPMENT FOR NON DESTRUCTIVE ASSAY SYSTEM CONTROL USING NUCLEAR RADIATION

José Altino Tupinambá Melo

ABSTRACT

Nondestructive Assay (NDA) is applied to machines and components quality tests. These elements would not have a good performance if they were conceived without concern about the mechanical project quality, used materials, manufacture processes and inspection and maintenance methodology. There are constant developments in high level of technology with the objective of guaranteeing the components quality and the good functioning of these machines, in the mechanics, naval, aeronautical, petrochemical and steel industry, energy and nuclear generation as well. The globalization in the industry lines is a fact, leading to an increase in the multinational projects and products. The following questions arise: how to assure the high quality of components and processes? How to optimize the test methods to assure that the materials do not have defects affecting the performance of the components? The answers to the questions above are found in the application of NDA. The complex materials analysis (inhomogeneous) using NDA requires a detailed study of the sensors response signal. In this work, a measure and control system of non destructive processes was developed, using a radioactive source with a defined energy in function of the material to be analyzed. This system involves: (a) Interface of input/output (I/O) (the Hardware) and (b) graphical Interface (Software). In the non destructive analysis, it is made the comparison of the signal proceeding from the sensor with a signal preset (Set Point) or analogical signal of reference (Base Line), which is adjusted in the I/O Interface. Analyzed the signal, the system will make the decision: (a) to reject or (b) to accept the analyzed material. The I/O Interface is implemented by electronic equipment with a MCS51. The purpose of this interface is to supply conditions to exchange information, using serial RS232, between the sensor and the microcomputer. The graphical Interface (software) is written in visual C++ language.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações gerais sobre os Ensaios Não Destrutivos (END)

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são aplicados em testes de qualidade de componentes e de máquinas. Estes elementos não teriam um bom desempenho se fossem concebidos alheios à qualidade do projeto mecânico, aos materiais envolvidos, aos processos de fabricação e à metodologia de inspeção e manutenção.

Um alto nível de tecnologia está em constante desenvolvimento e aplicado com um objetivo específico, ou seja, à garantia da qualidade dos componentes e do bom funcionamento dessas máquinas, sejam tanto nas indústrias siderúrgica, mecânica, naval, aeronáutica e petroquímica quanto na geração e conversão de energia, inclusive energia nuclear.

Atualmente, a globalização é clara nos diversos ramos da indústria e isso leva a um aumento na quantidade de projetos e produtos contextualmente multinacionais. Com isso surgem, naturalmente, as seguintes questões: (a) Como assegurar que os componentes e os processos utilizados disponham de alto índice de qualidade? (b) Como otimizar os métodos e os processos de teste de materiais para assegurar a isenção de defeitos que possam afetar o desempenho dos componentes? As respostas para essas questões encontram-se notadamente na aplicação dos Ensaios Não Destrutivos.

O END investiga a integridade dos materiais sem destruírem ou produzirem quaisquer alterações em suas características físicas e químicas [1, 2] e é usado em diversas áreas e com base em diversas tecnologias [3, 4].

O END é também aplicado em medidas de volume ou nível de líquidos em reservatórios, e de sólidos fragmentados como em silos para cereais e farináceos, espessura de tubulação, verificação de obstrução em tubulações de combustíveis, etc.

O Instituto de Investigações Nucleares (ININ), uma Instituição Governamental do México, desenvolveu um equipamento com características semelhantes ao que foi desenvolvido neste trabalho, para uma empresa mexicana a *Petroleos Mexicanos* PEMEX. O equipamento foi implantado em suas torres de refino do petróleo com a finalidade de monitorar as deteriorações internas dessas torres por meio de END usando a radiação γ [5].

O laboratório *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory* (INEEL) está montando um protótipo com base na tecnologia de END, denominada *Multi-Detector Analysis System* (MDAS) [6] para caracterizar o consumo de combustível nuclear. As medições exatas de END minimizam a exposição radiológica sobre o trabalhador e reduzem os custos que incorreria direto em outros processos analíticos. O DOE, departamento de energia dos Estados Unidos da América, gerencia mais de 250 tipos de consumo de combustível. Este combustível frequentemente necessita de documentação de caracterização adequada e completa, necessária para seu transporte e distribuição em um depósito nacional. O MDAS tem a capacidade para medir: a massa físsil total, usada para a entrada dos cálculos de criticalidade e segurança; os isótopos físsil, especificamente urânio enriquecido e transurânicos, os produtos específicos de fissão, incluindo isótopos com relação de coincidência de raio γ que podem ser usados em modelos para gerar inventários; os dados de fontes radiológicos usados para diretrizes de proteção e segurança.

Para monitorar os processos robotizados de soldagem com arco gás-metal com tecnologia NDA, utiliza-se o raio laser pulsado para gerar ultra-som em um dos lados de solda, enquanto do outro lado da mesma encontra-se um Transdutor Eletro Magnético Acústico que detecta o ultra-som transmitido pelo cordão de solda [7].

A análise não destrutiva (END) encontra aplicações na área de controle de qualidade de microestruturas durante o estágio de fabricação com a aplicação de luz de cintilação emitida por avalanches nos canais do GEM (*Gas Electron Multiplier*) para verificação de defeitos em folhas metálicas [8]. As imagens das folhas são obtidas por meio de um sistema CCD (*Charge Coupled Device*), detectores de silício que convertem fótons em elétrons, com baixo nível de ruído e que são analisadas e comparadas com imagens ópticas com o uso de um sistema de inspeção industrial de alto fator de ampliação.

A Comissão de Energia Atômica da França (CEA), ou seja, *French Atomic Energy Commission*, tem como objetivo aprimorar o desempenho do END, [9] particularmente à adaptabilidade de diferentes configurações de controle e caracterização de defeito. Este sistema adaptável baseia-se em arranjos de estágios otimizados que estão conectados a um sistema de aquisição multi canal fornecendo normas de atrasos e amplitudes para produzir um feixe ultra-sônico.

A empresa paulista HCG Tecnologia desenvolve instrumentos denominados Analisadores Portáteis NITON [10], para verificação da composição de ligas inoxidáveis utilizando a tecnologia de Fluorescência por Raio X (FRX), que operam quando uma amostra da liga é exposta ao fluxo de raio X ou raio γ , os átomos absorvem a energia da radiação eletromagnética e ficam momentaneamente excitados. No processo praticamente instantâneo de desexcitação, os átomos liberam a energia recebida e fluorescem ou emitem raios-X. Os raios-X emitidos pelos átomos da amostra são característicos, isto é, são exclusivos dos elementos emissores analisados.

A intensidade dos raios-X é proporcional à concentração atribuída ao elemento na amostra. Desta maneira, pela medição da energia e intensidade características do raio-X emitido pela amostra, o instrumento de FRX pode proporcionar uma análise qualitativa e quantitativa [11], ou seja, pode identificar os elementos e sua concentração.

1.2 – Considerações teóricas

As considerações teóricas para o desenvolvimento desse sistema são iniciadas com introdução ao fenômeno da desintegração radioativa e as grandezas envolvidas, a radiação γ e sua interação com a matéria para posterior detecção, estabelece-se a relação entre energia da partícula incidente e a amplitude do sinal do pulso produzido por um tubo fotomultiplicador acoplado a um cristal cintilador e seguem descrevendo o módulo eletrônico conectado ao detector até que o sinal possa ser processado pelo computador por meio de um programa computacional.

1.2.1 – Desintegração radioativa

O átomo nuclearmente instável é denominado radionuclídeo (núcleo radioativo). Para se tornar estável, o núcleo deve perder uma certa quantidade de energia, pelo decaimento ou desintegração radioativa (processo de emissão radioativa). Há vários processos de desintegração radioativa, tais como a emissão de partículas α , a emissão de

partículas β (negativa: β^- , ou positiva: β^+) e captura eletrônica (CE). Quando o núcleo filho é produzido em um estado excitado, podem ocorrer os processos de emissão de fótons γ ou a conversão interna (CI) [12].

Os processos de desintegração possuem caráter estatístico. Muitos dos processos são seguidos de outros fenômenos radioativos, como a emissão de raios X característicos ou elétrons AUGER, que se originam na eletrosfera, devido ao rearranjo dos elétrons, quando da ocupação de orbitais vagos.

Cada radionuclídeo possui uma probabilidade de desintegrar-se (por unidade de tempo), expressa por sua constante de desintegração (ou decaimento), simbolizada por λ e cuja unidade é o inverso do tempo (s^{-1}) no S.I..

Dada uma população onde o número de átomos de um radionuclídeo é N , em um instante t , a variação provável no número de átomos, dN , no intervalo dt entre t e $t+dt$ (resultado das desintegrações) é dada pela expressão:

$$dN = -\lambda N dt \quad (\text{eq. 1.1})$$

Resultando a lei do decaimento exponencial:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{eq. 1.2})$$

Onde: N_0 e N são os números de átomos do radionuclídeo, nos instantes t_0 e t , respectivamente.

Define-se a Meia-Vida ($T_{1/2}$) como o tempo necessário para que o número de átomos seja reduzido à metade. Fazendo-se $N = N_0/2$, em (eq. 1.2), o tempo t equivale à meia Meia-Vida é:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (\text{eq. 1.3})$$

Os radionuclídeos podem ter meia-vida muito curta (frações de segundos) até muito longa (bilhões de anos). Em medidas industriais são utilizados radionuclídeos de meia-vida longa, como por exemplo, o ^{241}Am com meia vida de 433 anos.

A taxa de desintegração média de um radionuclídeo é chamada de Atividade (A), sendo proporcional ao número de átomos (N) da amostra radioativa e à constante de decaimento (λ):

$$A = \lambda N \quad (\text{eq. 1.4})$$

O número de átomos radioativos e a atividade diminuem com o tempo. Multiplicando-se a expressão (eq. 1.2) por λ , resulta:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{eq. 1.5})$$

Onde: A_0 e A são as atividades, nos instantes $t_0 = 0$ e t, respectivamente.

Após o período de uma meia-vida, a Atividade fica reduzida à metade da inicial.

A unidade de atividade utilizada pelo S.I. é o Becquerel (Bq) que equivale a uma emissão por segundo.

As radiações emitidas nas desintegrações radioativas carregam, total ou parcialmente, o excedente de energia do núcleo [12]. Ao atravessar um meio material, meio absorvedor, essas radiações transferem energia ao mesmo, interagindo de maneira distinta, conforme a sua natureza, a sua energia e a natureza do absorvedor.

As partículas eletricamente carregadas, por exemplo, radiação β , interagem através das colisões com os elétrons do meio, excitando-os a orbitais mais externos ou arrancando-os do átomo.

A radiação eletromagnética interage com a matéria por meio de diversos processos: espalhamento com elétrons, interação com o campo Coulumbiano e espalhamento nuclear.

Os fótons interagem através de diferentes fenômenos, tais como: a absorção fotoelétrica, o espalhamento Compton ou a produção de pares, sempre resultando em elétrons de alta energia cinética.

Os nêutrons, partículas pesadas, interagem com os núcleos atômicos por meio de reações nucleares, espalhamento elásticos ou inelásticos, captura radioativa, fissão nuclear, entre outras, podendo resultar em liberação de energia e radiação de partículas leves ou pesadas, incluindo-se os fragmentos de fissão, fótons, nêutrons etc.

A excitação e a ionização produzidas na matéria podem ser transformadas em grandezas mensuráveis: luz, sinais elétricos ou traços produzidos em filmes poliméricos ou em cristais, através de dispositivos ou materiais, denominados detectores de radiação.

1.2.2 – A radiação γ

A radiação γ é emitida por um núcleo para reduzir seu estado energético excitado a um outro mais estável [12].

Na natureza encontram-se muitos elementos químicos que apresentam isótopos radioativos com a propriedade de emitir radiação γ . Existe também a possibilidade destes radioisótopos serem artificialmente produzidos. Esta condição é facilmente atingida quando um radioisótopo artificial é produzido a partir do bombardeamento de um núcleo estável com nêutrons.

Um nêutron excedente no núcleo do átomo desintegra-se originando uma partícula β menos ou elétron rápido, um próton e um anti-neutrino.

Após a desintegração, o núcleo do átomo pode apresentar um estado energético que propicie a emissão de um ou mais fótons γ até que seja atingido o estado fundamental ou de menor energia.

Um núcleo instável pode também decair emitindo uma partícula β^+ ou pósitron e posteriormente emitir fótons γ no processo para reduzir seu estado energético. O pósitron por sua vez pode participar de um processo mais complexo. Este, interagindo no material que o compõe ou mesmo no encapsulamento da fonte que o constitui, pode perder energia cinética o suficiente para que possa combinar-se com um elétron do material. Este processo é conhecido por aniquilamento onde um pósitron e um elétron dão origem a dois fótons γ de 511 keV, energia esta equivalente a massa de repouso do elétron [12].

1.2.3 – A interação da radiação γ com a matéria

A interação da radiação com a matéria é resultado da transferência parcial ou total da energia da radiação incidente a elétrons ou núcleos dos átomos que constituem o meio material que está sendo irradiado [12].

A radiação que incide sobre o meio material pode estar manifestada na forma de um elétron de alta velocidade, nêutrons, partículas eletricamente carregadas, e na forma de radiação eletromagnética como raios γ e raios X.

Devido ao efeito de alta penetrabilidade desejado, os radioisótopos utilizados neste trabalho devem emitir radiação γ . As energias envolvidas nesta faixa do espectro de energia fazem com que dentre os possíveis mecanismos de interação conhecidos, três processos sejam predominantes de ocorrer [12, 13]: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. A detecção de raios γ envolve necessariamente uma interação inicial do fóton, que constitui o raio γ , com a matéria do detector através de um dos processos já citados.

A probabilidade de interação da radiação com o meio material que está sendo bombardeado é função da energia dos fótons incidentes e do número atômico do material que interage com a radiação incidente. Este comportamento é visto na Figura 1.1, onde as regiões da figura indicam as dominâncias de cada processo em função do número atômico do meio material e da energia do fóton incidente.

No efeito fotoelétrico um raio γ que encontra um material com número atômico elevado, pode interagir com um átomo deste material e transferir toda sua energia fazendo com que um elétron de uma de suas camadas internas seja ejetado. Predominantemente, o processo ocorre com elétrons da camada K [14, 15], e o elétron ejetado passa a possuir uma energia (E_c) dada pela diferença entre a energia da radiação incidente e a energia de ligação (E_b) da correspondente camada que o elétron pertencia naquele átomo, como mostra a equação abaixo:

$$E_c = h\nu - E_b \quad (\text{eq. 1.6})$$

Figura 1.1 - Dominância dos efeitos de interação da radiação em função do número atômico do meio material irradiado e da energia do fóton incidente (Figura de Knoll [12])
EFE: Efeito Foto Elétrico, EC: Espalhamento Compton e PP: Produção de Pares.

Esse elétron com energia cinética, vai cedendo energia a outros elétrons até retornar ao seu estado fundamental, criando ao longo de seu caminho uma série de átomos ionizados.

Continuando esse processo, o átomo ionizado pode capturar elétrons livres do meio e o rearranjo dos elétrons nas camadas emite raios X que podem ser reabsorvidos novamente através do efeito fotoelétrico ao escaparem do meio. Do ponto de vista estatístico o efeito fotoelétrico predomina para os raios γ ou X de baixa energia em interações com materiais de alto número atômico.

No espalhamento Compton, o fóton interage com os elétrons livres do material. Com a interação parte da energia ($h\nu$) do fóton incidente é transferida ao elétron que pode ser deslocado de um ângulo (ϕ) em relação a trajetória do fóton incidente, dependendo da energia que conseguiu absorver. Simultaneamente, o fóton espalhado, com a energia ($h\nu'$)

menor que a do fóton incidente é deslocado de outro ângulo (θ) em relação a trajetória inicial. O processo pode terminar caso este fóton saia do material ou seja totalmente absorvido em interações sucessivas com outros elétrons, Figura 1.2.

Figura 1.2 - Espalhamento Compton e equação da energia
onde $m_0 c^2 = 511 \text{ keV}$

Do ponto de vista analítico, comparando com as outras interações, esta é a mais conhecida. Sua probabilidade é expressa por [16]:

$$P_{\text{Compton}}(E) = \frac{\pi C m_e c^2}{E} \left[2 \ln \left(\frac{2E}{m_e c^2} \right) + \frac{m_e c^2}{2E} \right] - \frac{\pi C (m_e c^2)^3}{4 E^3} \quad (\text{eq. 1.7})$$

A produção de pares $e^+ e^-$ ocorre quando a energia dos raios γ excede no mínimo duas vezes a energia de repouso do elétron ou seja, superior a 1022 keV, onde este fóton de alta energia interage com o campo coulombiano do átomo, produzindo um par elétron-pósitron com massa total equivalente a 1022 keV, isto é, duas vezes a massa do elétron. O excesso de energia, além de 1022 keV, é transformado em energia cinética do par. Em seguida, o pósitron sofre aniquilação com algum elétron disponível no material, produzindo um par de raios γ de 511 keV. A Figura 1.2 é um esquema ilustrativo desses tipos de interação.

Figura 1.3 - Processos predominantes para os raios γ : Efeito Foto Elétrico EFE, Espalhamento Compton EC e Produção de Pares PP.

Nos diferentes processos de interação, a radiação γ sempre produz elétrons que migram pelo material e ions positivos. Alguns autores chamam a excitação por raios γ de fonte de elétrons ou simplesmente excitados por elétrons [17] em virtude dessa propriedade de produzir elétrons livres. O comportamento destes elétrons e ions em um meio cristalino, por exemplo no cristal de NaI(Tl), é que inicia o processo de detecção.

O sistema de medição implementado neste trabalho independe do tipo de radiação incidente (γ ou β). A radiação incidente produz cintilações no cristal e estas serão convertidas em sinais elétricos e contadas na forma como é discutido na seção 1.2.4

(Detectores cintiladores). O sistema de detecção deve apresentar ao final do processamento um nível de ruído baixo comparado ao sinal detectado.

Quando um feixe de radiação γ atravessa um determinado material, podem ocorrer interações através dos três processos já citados. Após uma interação qualquer, um raio γ é perdido (ou é absorvido completamente, ou é desviado da direção inicial do feixe). Quanto maior for a distância atravessada pelo feixe dentro do material, maior será o número de raios γ perdidos e menor será a intensidade do feixe. Como os processos de interação são aleatórios a intensidade do feixe decai exponencialmente em função da distância atravessada segundo a fórmula análoga à do decaimento radioativo:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{eq. 1.8})$$

Onde I_0 é a intensidade do feixe inicial, número de fótons por segundo, $I(d)$ é a intensidade do feixe após atravessada uma distância d , e μ é o coeficiente de absorção total, devido aos 3 processos de interação γ , o qual depende do material absorvedor e da energia do raio γ . O valor do coeficiente de absorção para diversos elementos em função da energia pode ser obtido da literatura. Em geral são apresentados gráficos da espessura semi-redutora vezes a densidade do material em função da energia do raio γ , Figura 1.4, ou do coeficiente mássico (μ/ρ) de absorção Figura 1.5.

Figura 1.4 - Absorção de fótons em Alumínio e Chumbo

A espessura semi-redutora é definida como sendo a distância $d_{1/2}$ correspondente a uma atenuação de fator 2 da intensidade inicial:

$$I(d_{1/2}) = \frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu d_{1/2}} \quad (\text{eq. 1.9})$$

De onde se obtém a relação entre μ e $d_{1/2}$ (análoga à relação entre a constante de decaimento e a meia-vida):

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (\text{eq. 1.10})$$

Figura 1.5 - Coeficientes mássicos de absorção de Al e Pb pelos principais processos de interação da radiação γ

1.2.4 – Detectores cintiladores

Os detectores cintiladores são constituídos de materiais que produzem luz quando excitados pela passagem de partículas carregadas. Nos cintiladores inorgânicos, o elétron da interação primária excita os níveis eletrônicos do cristal, que decaem por emissão de

fótons na região da luz visível, que serão convertidos em pulsos elétricos. O material cintilante possui as seguintes propriedades:

1. Converte a energia cinética das partículas carregadas em luz detectável através do processo de cintilação, este se caracteriza pela sua alta eficiência;
2. Esta conversão deve ser linear : a luz emitida no cintilador deve ser proporcional a energia depositada sobre o mesmo;
3. O tempo morto para o cintilador é muito menor do que para os contadores Geiger, e depende essencialmente do tempo de decaimento dos níveis eletrônicos responsáveis pela cintilação (da ordem de centenas de nanossegundos);
4. O índice de refração deve ser próximo ao do vidro para permitir eficiente acoplamento da luz cintilante com o tubo fotomultiplicador.

O cristal inorgânico NaI(Tl) apresenta alta densidade e um número atômico efetivo de 54, sendo adequado para detecção de radiação γ [18, 19]. Como pode ser observado na Figura 1.1, predominantemente ocorrerá o espalhamento Compton embora dentro de suas probabilidades energéticas, podem também produzir interações por efeito fotoelétrico e de produção de pares.

Figura 1.6 - Cintilador de NaI(Tl) acoplado a um tubo fotomultiplicador

O tubo fotomultiplicador, Figura 1.7, consiste de um catodo, diversos dinodos e um anodo. A luz proveniente do cintilador incide sobre o catodo produzindo efeito fotoelétrico.

Os fotoelétrons são acelerados eletrostaticamente em direção ao primeiro dinodo e produzem elétrons secundários os quais são acelerados até o segundo dinodo e assim sucessivamente, até que chegue ao anodo um número grande de elétrons proporcional ao número de fotoelétrons inicial. O pulso elétrico assim formado traz informação da energia transferida da radiação para o detector no processo de interação. Devido ao pequeno tempo morto da cintilação, o que predomina é o tempo morto do restante do sistema de aquisição, particularmente o tempo de conversão analógico-digital, passa a ser predominante.

Figura 1.7 - Tubo fotomultiplicador

1.3 – Objetivo

O acrônimo ENDRAD, Ensaio Não Destrutivo usando Radiação, é referenciado como nome dos elementos desenvolvidos que integram o equipamento deste trabalho

Como objetivos específicos, este trabalho se propôs a desenvolver os seguintes elementos:

- Um Módulo Eletrônico ENDRAD ou Interface Física (Hardware) .
- Um Programa Computacional ENDRAD ou Interface Gráfica (Software).

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Introdução

O equipamento e o programa computacional desenvolvido para este trabalho são apresentados de forma resumida como os elementos: Módulo Eletrônico ENDRAD e Programa ENDRAD (ENDRAD é o acrônimo para Ensaio Não Destrutivo usando Radiação) no diagrama de blocos apresentado na Figura 2.1.

Nesta seção serão descritos os procedimentos e ensaios que foram necessários para a construção e validação do Projeto e Montagem de Equipamento para Controle de Sistema de Análise não Destrutiva Usando Radiação Nuclear proposto neste trabalho.

Figura 2.1 - Diagrama de blocos do Equipamento para Controle de Sistema de Análise não Destrutiva Usando Radiação Nuclear

2.2 – Materiais

Os materiais utilizados nos ensaios em laboratório para o controle de sistema de análise não destrutiva usando radiação nuclear foram os seguintes:

- Recipientes metálicos (latas de alumínio);
- Fonte radioativa ^{241}Am ;

- Detector Cristal Cintilador NaI (TI);
- Fotomultiplicadora Harshaw-Filtrol 905-4 PE470;
- A eletrônica associada ao detector composta pelos seguintes instrumentos;
 - (a) Pré-amplificador - base para Fotomultiplicadora ORTEC 276,
 - (b) Fonte de alta tensão (HV),
 - (c) Amplificador ORTEC 572,
 - (d) Analisador Mono Canal ORTEC 551,
- Módulo Eletrônico ENDRAD;
 - (a) Circuito eletrônico composto de circuitos integrados: contador digital binário, portas lógicas, microcontrolador e comunicador serial.
 - (b) Firmware.
- Programa computacional ENDRAD
 - (a) Microcomputador
 - (b) Sistema operacional Windows®

Figura 2.2 - Conjunto fonte e colimador

A Fonte radioativa escolhida foi o Amerício 241, uma vez que esse radionuclídeo é utilizado em medidas industriais e apresenta um fóton de baixa energia que permite uma alta sensibilidade ao atravessar um meio de baixa densidade como no caso da água (líquido predominante nos refrigerantes e cervejas).

A Figura 2.3 apresenta o espectro de energia do ^{241}Am , os raios γ são de baixa energia 59keV.

Figura 2.3 - Espectro de energia do Amerício 241 [20].

2.3 – Informações Preliminares sobre o Equipamento

A concepção do equipamento abrange os elementos Hardware e Software respectivamente, Módulo Eletrônico ENDRAD, Microcomputador e Programa computacional ENDRAD.

Os microcomputadores pessoais permitem a comunicação, sem a adição de placas periféricas ligada diretamente no seu barramento interno de dados, por meio de portas de comunicação tais como Serial RS232, Impressora Centronix e USB. Estas portas são facilmente acessíveis por programas que incluam em sua linguagem a leitura e a escrita nestas porta de comunicação. Isso é uma vantagem significativa, pois dispensa a introdução de elementos físicos fixos no microcomputador isto é, o Hardware. A porta de comunicação Serial RS232 foi escolhida porque encontra-se presente em praticamente todos os microcomputadores sejam eles atuais ou não e, ainda, outro argumento, o comprimento permitido para o cabo de condutores elétricos para o Serial RS232 é maior em relação aos utilizados nas outras portas mencionadas acima, portanto microcomputador e módulo podem ficar localizados distantes.

Sendo assim, o estágio final deste trabalho, que é o processamento dos pulsos contados, é obtido por meio da elaboração de um programa computacional que além de efetuar a leitura e escrita na porta serial faz a comparação com valores preestabelecidos e conduz a ações condizentes com está operação.

O módulo eletrônico é constituído por duas partes fundamentais: a parte física e fixa, e a não física e alterável.

A parte física e fixa é também denominada Hardware. O Hardware é definida pelos componentes eletrônicos que compõem o circuito elétrico e que formam um sistema completo com capacidade autônoma.

A parte não física e alterável é implementada por um programa denominado Firmware, o qual é gravado na memória de programa da parte física ou seja na memória EPROM ou na memória FLASH. O Firmware fica residente e sua estrutura é constante. O Firmware é responsável por todas as operações e processamentos para que o Hardware opere de forma autônoma conforme os comando sequenciais presentes no Firmware.

2.3.1 – Hardware

O hardware é composto de componentes digitais. Os sistemas digitais estão presentes no cotidiano em diversas áreas. Dos eletrodomésticos aos sistemas industriais, instrumentação [21], passando pelo computador pessoal e telefones celulares.

Em quase todos os aparelhos elétricos ou eletrônicos que se usa no cotidiano existe um microprocessador, ou um microcontrolador [22] ou um Processador Digital de Sinais o DSP (*Digital Signal Processor*) [23, 24].

As inúmeras vantagens dos microcontroladores fez com que processos, antes controlados por componentes analógicos, passassem a ser controlados por sistemas digitais programáveis.

Razões que definiram a adoção do microcontrolador para ser usado neste trabalho: baixo custo; flexibilidade; confiabilidade; repetitividade, etc.

Atualmente existe disponível uma enormidade de microcontroladores e a cada dia novos lançamentos surgem no mercado desse segmento de componentes eletrônicos. De um modo geral os microcontroladores podem ser divididos nas principais famílias:

- Linha MCS51 (*Micro Controller System*)
- Linha ARM (*Advanced RISC Machine*)
- Linha MC68H (*Micro Controller*)
- Linha PIC (*Peripheral Interface Controller*)

Estas famílias possui estruturas particulares que as diferenciam entre si, porém conceitualmente são muito parecidas. Conceitos como modos de endereçamentos, unidade lógica e aritmética, unidade de controle e execução, registradores, acesso a dispositivos e outros são comuns a todos os microcontroladores.

Cada uma das linhas de microcontroladores mencionadas acima domina campos aplicação similares e observa-se que a escolha é quase uma questão meramente pessoal sob o ponto de vista do projetista.

A linha MCS51 foi eleito para escolha do microcontrolador por razões acima expostas e pelo fato de que essa linha apresenta diversos fabricantes que disponibilizam o

mesmo componente ao contrário das outras linhas, que um único fabricante detém a exclusividade na manufatura do microcontrolador.

A empresa Fluke Biomedical desenvolve equipamentos para a área de medição usando o microcontrolador 8051 MCS51 em instrumentos de calibração de dose [25].

Para a realização deste trabalho foi desenvolvido um Módulo Eletrônico, para atuar como interface entre o sistema de detecção e o microcomputador, mostrado esquematicamente na Figura 2.4, cujo projeto procurou otimizar dois itens: a resolução da contagem e a mudança automática da base de tempo. A otimização da resolução da contagem em função da disponibilidade de bits fornecidos pelo porto de entrada/saída através de seus terminais. A otimização da mudança automática da base de tempo para eliminação de um ajuste normalmente manual.

Figura 2.4 - Diagrama em blocos do Módulo Eletrônico ENDRAD

Para implementar as funções necessárias à realização dos ensaios, o ENDRAD possui algumas elementos que são descritas em termos de blocos funcionais na seção 2.5. O microcontrolador é o bloco principal, responsável pelo processamento das leituras, temporização e gerenciamento dos demais blocos.

Alguns cuidados foram considerados na construção deste módulo eletrônico:

- Dimensões de acordo com a norma *NIM standard* (DOE/ER-0457) (*NIM - Nuclear Instrument Module*);
- Sinais elétricos, fontes de alimentação de acordo com a norma *NIM standard* (DOE/ER-0457);

- c) Conectores nos painéis frontal e traseiro de acordo com a norma *NIM standard* (DOE/ER-0457);

Figura 2.5 - Foto de um “Rack-Bin” (NIM)

O Módulo eletrônico ENDRAD utiliza circuitos integrados comerciais dedicados; microcontrolador, contador digital e comunicador serial. O contador digital efetua a contagem dos pulsos dentro de uma base de tempo gerada pelo próprio microcontrolador que efetua a leitura das contagens de acordo com essa mesma base de tempo. E, ainda, o microcontrolador formata o código numérico correspondente a contagem, recebe comandos vindos do microcomputador, aciona a saída genérica do tipo *ON/OFF* a qual será referenciada como válvula solenóide e outras tarefas básicas específicas para que a interface funcione [26].

A comunicação, transmissão e recepção de dados em binário, entre o Módulo eletrônico ENDRAD e o microcomputador é realizada através da porta de comunicação serial padrão RS232.

2.3.2 – Software

Existem duas camadas distintas no Software para este equipamento: o Firmware de aplicação do microcontrolador do Módulo eletrônico ENDRAD e o Aplicativo Windows no microcomputador, isto é, programa computacional ENDRAD com interface gráfica.

Define-se Firmware como sendo a programação em hardware ou programa ou dados de computador que são armazenados permanentemente em um chip de memória de hardware, como uma ROM, EPROM ou FLASH.

O Firmware foi desenvolvido com base no levantamento, pesquisa e na avaliação das funções necessárias para a concepção de uma interface entre o detector e o microcomputador específica ao equipamento para controle de sistema de análise não destrutiva usando radiação nuclear.

Abaixo são listadas as funções necessárias:

- Inicialização geral dos parâmetros do Hardware.
- Estabelecer comunicação serial com o microcomputador.
- Geração de uma base de tempo.
- Aquisição da contagem.
- Acionamento da válvula solenóide.

O Firmware está escrito em linguagem de baixo nível o *Assembly* MCS51, *Micro Computer System* 8051, em ambiente de desenvolvimento do programa Ride IDE51 da empresa *Raisonance*. O programa *Ride IDE51* inclui um conjunto de ferramentas para desenvolvimento que permite montar (*Assembler*), ligar (*Linker*) e depurar (*Debugger*) a aplicação em desenvolvimento. Este *Firmware*, ou seja, o programa que está contido na memória de programa do microcontrolador MCS51, controla toda a interface, entrada, saída e os elementos periféricos.

Informações complementares sobre o algoritmo, fluxogramas e arquivo fonte do *Firmware* para o módulo eletrônico ENDRAD encontram-se no Apêndice (v. APÊNDICE – 61, Figura A.2).

Desenvolveu-se um programa computacional que permite à aplicação processar os dados recebidos, dados pré fixados pelo usuário e visualização de resultados e a emissão de comandos que atuarão na parte mecânica do sistema.

O desenvolvimento foi viabilizado pela elaboração de um algoritmo e posterior transcrição para uma linguagem de programação em ambiente de desenvolvimento Visual. Os dados de entrada necessários são provenientes do Módulo eletrônico operando como interface e aquisição de dados no formato binário padronizado em ASCII código padrão americano para intercâmbio de informação. A partir dessas informações, o programa computacional é capaz de processar, comparar, exibir e emitir comandos que façam a seleção do material sob ensaio. Essa seleção baseia-se no método de comparação entre valores pré fixados pelo usuário e valores obtidos sobre o material sob ensaio durante o evento de medição.

O desenvolvimento do programa computacional deu-se a partir da concepção de um algoritmo de programação após exaustivas pesquisas, simulações e ensaios específicos aos propósitos do sistema para medição e controle. O algoritmo agrega as seguintes funções as quais são apresentadas abaixo:

- Inicialização
- Comunicação
- Contagem
- Exibição de valores
- Comparação
- Emissão de comando

O aplicativo Windows, ou seja, o programa ENDRAD para o microcomputador foi desenvolvido em linguagem de alto nível no *C++Builder® 4 Standard*. O *C++Builder* é um ambiente de programação e construção de aplicações gráficas para o ambiente Windows®, porém com vantagens adicionais como a facilidade em construir aplicações corporativas de modo simples e eficaz.

As aplicações gráficas desenvolvidas por meio do *C++Builder* utiliza o estilo gráfico de programação, ou seja, “Programação Visual”. Esta, por sua vez, baseia-se em

produtos que possuam uma estrutura de programação orientada a eventos e recursos visuais.

Para este aplicativo foi realizada a programação do algoritmo que agrega as três partes fundamentais para o funcionamento do sistema; o Form1 principal, a *Thread* para abertura de porta de comunicação serial e a *Thread* de leitura de contagem. Informações complementares sobre o arquivo fonte em linguagem C++ encontram-se no Apêndice (v.APÊNDICE – 74).

O programa ENDRAD é um programa visual amigável com o usuário, nele têm-se eventos específicos para estabelecimento de comunicação serial, processamentos gerais e uma janela de diálogo Windows.

2.4 – Método

2.4.1 – Introdução

As fontes radioativas emitem radiação por meio de desintegrações nucleares. A radiação é emitida em 4π , e por meio de um colimador obtém-se um feixe estreito e bem dirigido na direção do detector. Entre a fonte e o detector posiciona-se o material a ser ensaiado. O feixe de radiação será reduzido, e dependendo das características físicas e químicas do material, a redução da intensidade será maior ou menor. O detector medirá essa alteração na intensidade do feixe traduzindo-o na forma de um sinal elétrico, isto, é em pulsos, e cuja altura será proporcional à energia do raio γ incidente e a taxa de contagem será proporcional à intensidade.

O sinal fornecido pelo detector é injetado na entrada do sistema eletrônico associada ao detector. O sistema eletrônico associado ao detector tratará o sinal de forma adequada de tal maneira a eliminar ruídos eletrônicos, radiação de fundo e disponibilizando em sua saída pulsos de formato retangulares correspondentes a apenas a radiação vinda da fonte específica do sistema. Esses pulsos então são efetivamente utilizados no Módulo eletrônico ENDRAD.

Para determinar a quantidade de material, no caso em estudo, a altura do nível contido no interior de um recipiente hermeticamente fechado, o sistema de medição foi calibrado servindo-se de recipientes vazios, semi-cheios e completamente cheios.

Nos testes feitos com o equipamento desenvolvido neste trabalho foram utilizados recipientes contendo diferentes níveis de líquido.

A fonte radioativa é colocada no interior de uma blindagem colimada para que se obtenha um fino feixe de radiação. A radiação emitida atravessará o recipiente e sensibilizará o detetor. A intensidade da radiação ao atravessar o recipiente será atenuada em função do nível de líquido. A radiação incidente no detetor é continuamente convertida em um sinal elétrico [12].

A intensidade da radiação incidente no detetor é inversamente proporcional a densidade e a espessura do material colocado entre a fonte radioativa e o detetor [12, 27].

Figura 2.6 - Esboço do processo de medida

Para as medidas de nível de líquido em um recipiente foram feitas as seguintes considerações:

- A tensão de saída no detector possui amplitudes que oscilam de um valor mínimo a um valor máximo conforme o valor da energia incidente no mesmo.
- Se o a altura do nível do líquido encontra-se em um valor adequado, ou seja, está acima de certo valor mínimo, tem-se a máxima absorção da intensidade do feixe ao atravessar o líquido. A intensidade da radiação que atinge o detector é reduzida em função do nível de líquido no recipiente, e conseqüentemente tem-se uma redução na taxa de contagem.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{eq. 2.1})$$

onde: μ = coeficiente de absorção ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)
 x = espessura (cm)

- Por outro lado, se a altura do nível do líquido no recipiente encontra-se em um valor inadequado, ou seja, está abaixo de certo valor mínimo, tem-se pouca redução da intensidade do feixe de radiação, portanto, maior será intensidade do feixe que atinge o detector e consequentemente, tem-se o valor elevado da taxa de contagem.

Figura 2.7 - Foto da posição de medição com recipientes sob análise

2.4.2 – Detecção

Os valores mínimos de contagem são obtidos quando o recipiente, em movimento, alcança a região central da posição de medição, pois é nesta posição que ocorre a máxima atenuação no valor da intensidade do feixe. A posição de máxima atenuação X_0 é aquela que corresponde a máxima espessura de material e cujo valor equivale ao diâmetro D do recipiente. Esta posição é mostrada na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Gráfico contagem/atenuação versus posição do recipiente

Durante o deslocamento do recipiente sobre a posição de medição é verificado um comportamento inverso da contagem em relação à atenuação mostrado na Figura 2.8. Os pontos X_{-1} , X_0 e X_1 definem o deslocamento do recipiente em relação ao seu diâmetro. A entrada do recipiente na posição de medição corresponde no gráfico a partir da posição X_{-1} até a posição X_0 . Contudo, a saída do recipiente da posição de medição corresponde no gráfico a partir da posição X_0 até a posição X_1 .

Os valores máximos de contagem são obtidos quando ocorre a passagem de um espaço vazio, que corresponde ao intervalo entre dois recipientes ao passarem pela posição de medição. O espaço existente entre dois recipientes leva a contagem ao seu máximo valor, Figura 2.9 região c, e esta situação é utilizada para sincronizar a contagem do total dos recipientes que passam pelo sistema.

Figura 2.9 - Gráfico da contagem versus tempo

No gráfico apresentado na Figura 2.9 destacam-se quatro regiões típicas que são:

Região (a). Caracterizada pela ausência do recipiente na posição de medição, isto é, posição vazia, o que leva a atenuação da intensidade do feixe incidente no detector, assumir um valor mínimo e portanto a contagem atinge o valor máximo. Posteriormente, este valor da contagem receberá a denominação *Val_Vazio* na parte experimental 2ª Etapa – Ajustes, (item 3.3).

Entre as regiões (a) e (b) ocorre uma transição negativa na taxa de contagem. Essa transição é devida ao avanço de outro recipiente sobre a posição de medição. O grau de inclinação da transição depende do valor da velocidade de deslocamento do recipiente;

Região (b). O recipiente encontra-se no centro da posição de medição, o valor da atenuação é máximo e por conseguinte o valor da contagem é mínimo.

Entre as regiões (b) e (c) ocorre uma transição positiva na taxa de contagem. Agora, a transição é devida ao avanço do recipiente para fora da posição de medição e cujo grau de inclinação dessa transição depende do valor de velocidade do deslocamento;

Região (c). Um outro recipiente avança sobre a posição de medição.

O ciclo compreendido entre as regiões (b) e (c) se repete, enquanto houver a passagem de recipientes pela posição de medição;

Região (d). Essa região reflete a situação em que um recipiente encontra-se estacionado na posição de medição. Se o recipiente estiver posicionado exatamente no centro da posição de medição, a atenuação é máxima resultando no valor mínimo de contagem. Posteriormente, este valor de contagem receberá a denominação *Val_Ref* na parte experimental 2ª Etapa – Ajustes, (item 3.3).

O espaço existente entre dois recipientes leva a contagem ao seu máximo valor e esta situação é utilizada para sincronizar a contagem do total dos recipientes que passam pelo sistema. Essa situação corresponde aos picos presentes no gráfico da Figura 2.9.

Com base nas informações apresentadas acima foram concebidos o Hardware e o Software para o sistema. O Módulo Eletrônico ENDRAD foi projetado para contar os pulsos já formatados provenientes da saída do mono canal durante um período de tempo bem definido pela base de tempo produzido no microcontrolador, presente neste módulo.

A contagem efetuada pelo Módulo Eletrônico ENDRAD é transmitida ao microcomputador, um programa denominado ENDRAD recebe-a e efetua os procedimentos específicos para visualização do valor da contagem e compara-a com um valor de referência cuja finalidade é a de transmitir para o Módulo Eletrônico ENDRAD um comando para acionar a saída válvula solenóide deste módulo. Esta válvula solenóide poderá acionar um sistema eletromecânico ou eletropneumático que aceitará ou rejeitará o material sob teste. O programa ENDRAD é executável no sistema operacional Windows®.

2.5 – O Módulo Eletrônico ENDRAD

O Módulo Eletrônico ENDRAD ou interface física é responsável pela execução de tarefas muito bem definidas por meio de um *Firmware* gravado em seu Hardware. As tarefas são as seguintes:

- Gerar uma base de tempo com valores variando em décadas automaticamente em função da quantidade de pulsos recebidos;
- Receber os pulsos elétricos já formatados vindos do Monocanal e contá-los em intervalos de tempo conforme o valor da base de tempo;
- Transmitir serialmente ao microcomputador os valores da taxas contagens produzidas a partir da contagem dos pulsos recebidos do Monocanal sob uma base de tempo definida;
- Receber serialmente os comandos vindos do microcomputador para energizar ou não a válvula solenóide que aciona o sistema mecânico de seleção de recipientes .

O Módulo Eletrônico ENDRAD é um circuito eletrônico composto por diversos circuitos integrados e outros componentes elétricos.

As partes principais que compõem o Módulo Eletrônico são: contador digital binário com capacidade de contagem de 7 Bits, portas lógicas digital, microcontrolador da família 8051 ou MCS51 com memória tipo FLASH para armazenamento do *Firmware* com capacidade de 4 Kbytes e Comunicador *Full Duplex* serial RS232 .

2.5.1 – O Microcontrolador MCS51

O microcontrolador utilizado no projeto é compatível com a família MCS51 da Intel [28], mais especificamente o 89C4051. Trata-se de um microcontrolador de 8 bits de uso geral e baixo custo, que possui: uma interface serial, dois contadores/temporizadores de 16 bits (T/C0 e T/C1), 2 *Ports* de I/O (P1 e P3), 4 Kb de memória *FLASH* para armazenar o programa e 128 *bytes* de memória RAM, duas interrupções. Seu esquema de pinagem pode ser visto na Figura 2.10. O T/C0 é configurado para gerar 20 interrupções por segundo, sendo usado como gerador de base de tempo. o T/C1 é usado para gerar a taxa de transmissão da interface serial. No projeto em questão este microcontrolador trabalha com Clock de 11,0592MHz definido por cristal externo (v. APÊNDICE – 59, Figura A.1).

Figura 2.10 - Microcontrolador 89C4051 pinagem e encapsulamento

O Firmware foi escrito em *Assembly*, pois as linguagens de alto nível disponíveis não permitem uma temporização tão precisa. Além disso, boa parte dos registradores e da memória interna do microcontrolador não fica disponível para o programa, sendo necessário o uso extensivo da memória externa. Há também um aumento da carga de processamento ao se usar uma linguagem de alto nível, limitando o número de tarefas que o Firmware pode executar simultaneamente.

A escolha do microcontrolador 8051 está relacionada as suas vantagens: enorme quantidade de produtos para suporte, proporcionando uma economia em termos de ferramentas de treinamento e suporte para *softwares*; rapidez: instruções especializadas significam que menos Bytes precisam ser buscadas e menos *Jumps* condicionais são processados; baixo custo: alto nível de entendimento do sistema em um único componente; não são necessários muitos componentes para se criar um sistema totalmente funcional; compatibilidade: códigos binários e opcodes são iguais para toda família 8051; aperfeiçoamentos: melhorias na manufatura aumentam a velocidade e reduzem o consumo de potência; a memória: trabalha com programas que são gravados nos 4 Kbytes de memória de programa interna. Uma alternativa seria o uso de outro microcontrolador o M68HC11 [29].

No projeto foram explorados ao máximo os dispositivos integrados do microcontrolador, na tentativa de minimizar a inclusão de circuitos extras como contadores, multiplexadores, memórias e comparadores analógicos, os quais já pertencem à arquitetura interna desse *chip* [30]. O sistema foi concebido como uma filosofia para desenvolvimento com capacidade de ser utilizada em diversas aplicações industriais e didáticas.

Adicionalmente à concepção do hardware, foram implementadas sub-rotinas básicas para o funcionamento dos diversos dispositivos do sistema, assim como rotinas matemáticas, rotinas de comunicação serial e rotina de geração de base de tempo. O sistema foi testado em laboratório e devido ao seu consumo de 40 mA é possível sua adaptação para o uso no campo utilizando-se baterias de 4,8 volts.

O circuito integrado microcontrolador está programado para realizar as seguintes funções : Gerar base de tempo, Contar pulsos, Comunicar serialmente e Energizar a saída válvula solenóide

A geração de uma base de tempo com seleção automática de faixa é feita via Hardware através de seu *Timer/Counter* interno T/C0 configurado para o modo 1, isto é contador de 16bits [31].

O cálculo da taxa de contagem a partir da quantidade de pulsos contados pelo contador binário externo sob a base tempo. O programa gravado no microcontrolador MCS51, o Firmware, calcula a taxa de contagem da seguinte forma:

- Lê o número em binário correspondente à contagem de pulsos vindos do SCA que o contador digital binário de 7 bits recebe como sinal de *Clock*. Paralelamente o microcontrolador está gerando uma base de tempo;
- E, quando é atingido o tempo correspondente a base, o microcontrolador efetua a leitura do dado em binário presente no contador digital. A seguir o microcontrolador aciona um dos terminais de um de seus *Ports* de saída que ativa o *Clear* do contador digital, zerando-o e preparando-o para um novo ciclo de contagem;

A comunicação serial com o microcomputador efetua a transmissão dos valores das taxas de contagens e a recepção de comandos produzidos pelo programa computacional ENDRAD. O padrão de comunicação serial é o RS232. Isto é feito via Hardware do microcontrolador através do *Port* serial e do *Timer/Counter* interno T/C1 configurado para o modo 2, isto é, contador de 8 Bits Auto-Recarga [31];

Um dos comandos produzidos e enviado pelo programa computacional ao módulo eletrônico é o de energizar a saída válvula solenóide que aciona o sistema eletromecânico e/ou eletropneumático de seleção de recipientes. Este comando é produzido durante a execução da função **void __fastcall TGeral_Thread::AcionaSolenóide()** é abordado no Apêndice (v. APÊNDICE – 78).

2.5.2 – O Contador Digital Binário Externo

O contador digital binário do Módulo Eletrônico trabalha com circuitos integrados CMOS de alta velocidade de transição o qual tem código comercial equivalente ao 74HC4040. No módulo este circuito integrado opera com uma tensão de alimentação $V_{DD}=+5$ volts, equivalente digital 1, em relação ao terra V_{SS} ou GND, cujo potencial é 0 volts e equivalente digital 0 (v. APÊNDICE – 59, Figura A.1). Ele é conectado através de

um circuito limitador, Figura 2.11. à saída do analisador mono canal (SCA), pois este fornece em sua saída níveis de tensão 5 volts , ou seja, os valores das tensões elétricas são compatíveis. A idéia inicial era usar fotoacopladores para reduzir a suscetibilidade a ruído e isolar galvanicamente os circuitos podendo operar normalmente com diferentes níveis de tensão entre a entrada e a saída do mesmo. Entretanto, a idéia foi inviabilizada pelo fato desses componentes possuírem tempo de resposta muito elevado o que não é compatível com as características de transiente relativas aos sinais produzidos por sistemas de instrumentação nuclear, nos quais, tempos de subida e tempos de descida dos pulsos são extremamente rápidos [12]. O circuito utilizado foi um limitador de tensão, conforme Figura 2.11 utilizando diodos semicondutores, um diodo ultra rápido para ceifar as tensões negativas em paralelo com um diodo Zener para limitar a máxima tensão positiva em 5,1V valor ainda compatível com o valor da tensão de alimentação dos circuitos integrados.

O diodo D3 em conjunto com o resistor R4 realiza a limitação em -0,7V quando a tensão de entrada assumir valores negativo. O diodo D4 em conjunto com R4 realiza a limitação em +5V quando a tensão de entrada assumir valores superiores as +5V. Por outro lado, o resistor R5 em conjunto com o resistor R4 operam como divisor de tensão denominados *Pull-up* e *Pull-down* para tensões de entrada dentro dos limites de 5V a 0V.

Figura 2.11 - Limitador de tensão

Os pulsos na saída do SCA ou seja, o sinal elétrico digitalizado que contém as informações relativas as contagens, são injetados através de um cabo coaxial [32, 33] com terminal do tipo BNC na entrada do Módulo Eletrônico que é diretamente conectada no

pino de *Clock* do contador digital binário externo. Esse contador digital binário externo tem seu pino de *Reset* comandado por um dos pinos do *Port* de saída do microcontrolador, que neste sistema recebe a denominação de sinal *Clear*. Neste pino existe um sinal digital periódico, o *Clear*, cujo período corresponde à base de tempo produzida pelo *Timer/Counter* interno do próprio microcontrolador [34]. Ao completar o intervalo tempo definido pela base, uma leitura é imediatamente efetuada nos pinos do *Port* do microcontrolador que recebem do contador digital binário externo um dado em binário correspondente a quantidade de pulsos contados dentro do intervalo de tempo. Em seguida, o microcontrolador gera o sinal denominado *Clear*, o qual ativa o pino *Reset* do contador digital binário externo zerando-o e, concluindo o ciclo atual. A partir desse ponto inicia-se um novo ciclo leitura.

Enquanto os ciclos de leitura desenvolvem-se, o microcontrolador recebe comandos vindos do microcomputador tais como; ligar ou desligar a saída válvula solenóide e enviar dados sobre a última leitura.

Os dados que o microcomputador recebe do microcontrolador são processados pelo programa ENDRAD e em seguida são tomadas algumas decisões, tais como apresentar de forma visual o valor da contagem, variável que está sendo analisado e enviar um comando para acionar ou não a saída válvula solenóide do Módulo Eletrônico ENDRAD.

2.5.3 – O Comunicador Serial

A porta de comunicação utilizada é a porta serial do microcomputador que envia e recebe dados serialmente através de um cabo composto por três fios: GND, TX e RX e, cujo comprimento pode atingir até 15 metros [32].

O 8051 possui uma porta serial *Full-duplex*, o que significa que ela pode receber e transmitir dados simultaneamente, observar os pinos 2 e 3 do U2 (v. APÊNDICE – 59, Figura A.1). Essa interface pode operar em 4 modos, em cada um dos modos, a transmissão é iniciada quando da execução de uma instrução cujo registrador destino é o registrador S0BUF cujo endereço é 99H e encontra-se na região SFR.

O periférico comunicador serial é um componente de extrema importância em computadores. Permite comunicação bidirecional entre máquinas apenas com dois fios, e

também permite, por meio de um MODEM, transferir e receber dados via sistema de telefonia tradicional, tornando-se ferramenta de importância vital nos dias atuais com referência a sistemas de controle remoto, redes de computadores, Internet e satélite, [35].

O periférico denomina-se SERIAL porque transmite um Byte, bit por bit, em sequência preestabelecida e pré-programada, para que o receptor possa recebê-lo e transformá-lo de novo em um Byte, igual ao originalmente transmitido. Além do Byte que é transmitido no canal serial, inserem-se também alguns Bits de controle de transmissão e recepção, como, por exemplo, os Bits *Start* e o Bit *Stop*, que sinalizam ao receptor o início e o fim da transmissão/recepção do byte. Tipicamente, costuma-se codificar o byte a ser transmitido em código ASCII, *American Standard Code for Information Interchange* [36, 37], pois é padrão universal de comunicação. Além destes pré-requisitos, é fundamental que as frequências ou *Baud Rate* do transmissor e do receptor sejam as mesmas [37].

Figura 2.12 - Circuito integrado MAX232

Para adequar os níveis de tensão do *Port Serial* do microcontrolador, 5V, com os níveis do *Port Serial* do microcomputador, 15V, foi usado o circuito integrado MAX232. O diagrama de pinagem é apresentado na Figura 2.12.

2.6 – O Programa ENDRAD

O programa ENDRAD é concebido para apresentar-se como uma Interface Homem Máquina. A Interface Homem Máquina (IHM) de um sistema é o dispositivo pelo qual o operador interage com o sistema [38], podendo ser usado, por exemplo: botões, lâmpadas e/ou *display* de LEDs ou de cristal líquido no painel do equipamento, ou um computador com um programa específico. O uso do computador como IHM, além de possibilitar o ajuste de parâmetros do sistema e a visualização dos dados como em um equipamento com IHM composta de botões, lâmpadas e *display*, permite compor uma interface com mais recursos. É possível, por exemplo: mostrar os dados sobrepostos a um desenho esquemático do equipamento ou do processo, mostrar dados de diversos equipamentos em uma mesma tela, apresentar os dados de formas diversas exemplos: gráficos, tabelas, transmitir os dados à distância para outros computadores.

Foi então desenvolvido um programa computacional de IHM que recebe a denominação de Programa ENDRAD. Trata-se de um programa executável no sistema operacional Windows®.

2.6.1 – Introdução

O programa computacional ENDRAD executa uma série de tarefas tais como: estabelecer os parâmetros de configuração da comunicação serial, ajustar de valores mínimos e de referência e os cálculos matemáticos e fornecer uma IHM gráfica em uma janela do Windows®.

Especificamente desenvolvido para o equipamento para controle de sistema de análise não destrutiva usando radiação nuclear, este programa foi escrito em linguagem C++ no *C++BUILDER 4 Standard*, versão gratuita. O *C++BUILDER* é um ambiente de desenvolvimento, programação e construção de aplicações gráficas para a plataforma Windows®. Dessa forma, o Programa ENDRAD constitui uma interface gráfica prática de fácil utilização que executa tarefas rotineiras e controlam saídas em função das informações recebidas do processo em análise através do Módulo Eletrônico ENDRAD.

A escolha do C++ como a linguagem de programação deveu-se ao fato de que nenhuma outra linguagem usual tal como o BASIC [39, 40], PASCAL, JAVA e PERL possui a alta eficiência da C++. A linguagem C++ supera as outras linguagens em diversos aspectos: eficiência em acessar os componentes do microcomputador, geração de arquivo executável compacto e facilidade na manutenção do código fonte [41].

2.6.2 – Características gerais do programa ENDRAD

O Programa ENDRAD sob a forma de uma janela é mostrada na Figura 2.13. Nas seções subseqüentes, apresenta-se as características gerais e listam-se as principais funções do programa, que podem ser identificadas nesta figura. Informações complementares sobre o algoritmo e arquivo fonte encontram-se no Apêndice (v. APÊNDICE - 66, Figura A.7 e APÊNDICE - 74).

Figura 2.13 - Janela do programa ENDRAD

As principais tarefas que o programa ENDRAD executa são:

- Configurar os parâmetros para comunicação serial padrão RS232;
- Identificar a porta de comunicação serial disponível;
- Definir os valores de referência;
- Receber valores do módulo eletrônico ENDRAD;
- Efetuar cálculos e processamentos gerais;
- Enviar comando ao módulo eletrônico ENDRAD;
- Exibir valores de taxas de contagens e número de peças.

O programa ENDRAD apresenta dois modos de execução: Calibrar e Opera!

No modo Calibrar o ENDRAD executa as seguintes tarefas:

- Capturar manualmente os valores de referência *Val_Vazio* e *Val_Ref*;
- Alterar o valor da tolerância a ser aplicada nos valores de referência;
- Ajustar a leitura para o modo Multi ou Mono. O modo Multi é aplicado em situações menos estáveis de contagens, efetuam-se três medições na região de valor mínimo, conforme item 2.7, e escolhe-se a menor. No modo Mono, efetua-se uma única medição na região de valor mínimo.

No modo Opera o ENDRAD executa diversas tarefas específicas, tais como:

- Receber o valor da taxa contagem enviado pelo Módulo ENDRAD;
- Exibir em uma área específica de sua janela o valor da taxa contagem atual;
- Comparar o valor da taxa de contagem atual com um dos valores de referência;
- Incrementar os contadores de números de peças ensaiadas;
- Enviar comandos para o módulo ENDRAD.

2.7 – O algoritmo para o sistema de medida

O algoritmo [42] discrimina os valores alto, baixo relativos às medidas do nível e, vazio relativo à posição de medição vazia, efetuando continuamente medições e comparando entre si os dois últimos valores recentemente obtidos C_n e C_{n-1} . Desta forma o algoritmo detecta valores mínimos e máximos por meio das transições ilustradas nos gráficos presentes na Figura 2.14.

Figura 2.14 - Gráfico com mínimo e máximo da função contagem

A detecção do valor mínimo ocorre quando o valor da contagem atual C_n torna-se maior que o valor da contagem anterior C_{n-1} .

Matematicamente, a detecção do valor mínimo, corresponde à vizinhança superior ao mínimo da função $c = f(t)$, ou seja, o ponto na função onde a sua derivada torna-se positiva [43, 44].

Isto é, $f(t_{n-1} + \Delta t) > f(t_{n-1})$, onde $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ e $\Delta t \rightarrow 0$

Observe o gráfico representativo presente no lado esquerdo na Figura 2.14. Mecanicamente, a detecção do valor mínimo, ocorre quando o recipiente avança na posição de medida. Este valor mínimo é então comparado com o valor de referência indicado numericamente pelo botão (b) **Val_Ref** da janela do ENDRAD citado no item 3 Parte Experimental 2a Etapa – Ajustes.

A detecção do valor máximo ocorre quando o valor da contagem atual C_n torna-se menor ou igual que o valor da contagem anterior C_{n-1} .

Matematicamente, a detecção do valor máximo, corresponde à vizinhança superior ao máximo da função $c = f(t)$ ou seja, o ponto na função onde a sua derivada torna-se negativa [43, 44].

Isto é, $f(t_{n-1} + \Delta t) < f(t_{n-1})$, onde $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ e $\Delta t \rightarrow 0$

Observe o gráfico representativo presente no lado direito na Figura 2.14. Mecanicamente, a detecção do valor máximo, ocorre quando o recipiente abandona completamente a posição de medida, dando lugar ao espaço compreendido entre dois recipientes. Este valor máximo é comparado com o valor de referência indicado numericamente pelo botão (b) *Val_Vazio* da janela do ENDRAD citado no (item 3.3, 2ª Etapa – Ajustes).

2.8 – Obtenção do valor da mínima atividade detectável

A mínima atividade detectável para o sistema de medição utilizado foi obtida usando a relação [45]:

$$mad = \text{ruído de fundo} + 3 \times \sqrt{\text{ruído de fundo}} \quad (\text{eq. 2.2})$$

Esta relação [46] define a mínima atividade detectável como o número de contagens brutas significativamente diferentes ao nível de 99,7% do número de contagens do ruído de fundo, para os mesmos períodos de tempo de aquisição e integração do número de contagens bruta e do ruído de fundo

3 – RESULTADOS

O equipamento Módulo Eletrônico ENDRAD com seu respectivo Firmware e Programa computacional ENDRAD para Sistema de Medidas e Controle de Processos não Destrutivos usando Radiação Nuclear são apresentados a seguir na figura 3.1:

Figura 3.1 - Sistema ENDRAD

3.1 – O Módulo Eletrônico ENDRAD

O equipamento desenvolvido e montado neste trabalho é apresentado de forma resumida no diagrama de blocos da Figura 3.2. Os itens contidos nesta seção irão descrever os elementos que constituem o *Hardware*, ou seja, o Módulo eletrônico ENDRAD.

Os elementos que compõem o *Hardware* do módulo eletrônico são:

- Microcontrolador;
- Contador Digital;
- Comunicador Serial;
- Fonte de alimentação.

do módulo eletrônico é um microcontrolador o 89C4051, U2, ver Figura 3.2, no qual estão presentes componentes eletrônicos ligados como elementos internos e com funções específicas como o contador HC4040, U4, a porta de saída de 8 bits, U5, o comunicador serial MAX232, U3, e a rede passiva limitadora de tensão, U1, cada em destaque no esquema eletrônico.

O microcontrolador 89C4051 é um componente eletrônico que já tem incorporado em seu invólucro vários elementos periféricos internos permitindo dessa forma, a construção de sistemas compactos e tão poderosos quanto aos baseados em microprocessadores. Portanto, o circuito projetado tem tamanho e número de componentes reduzidos. A programação do microcontrolador foi facilitada devido ao fato de que seus elementos internos como: Memórias, Temporizadores/Contadores, Portos Bidirecionais e Interface Serial são vistos pela UCP, Unidade Central de Processamento como memória.

O microcontrolador 89C4051 opera em uma frequência de relógio de 11,0592MHz a qual é fixada por um cristal de oscilação externo. A escolha desse valor de frequência é típica na prática por permitir comunicação serial à taxas padrões sem erros significativos na divisão de frequência. O esquema eletrônico completo do módulo é apresentado no Apêndice (v. APÊNDICE – 59, Figura A.1).

O circuito integrado MAX232 faz a conversão dos níveis lógicos RS232 para níveis TTL. Como a porta Serial foi usada para comunicar-se com RS232 padrão simples, muitos dos sinais de sincronização presentes no padrão RS232 foram ignorados, assumindo que sempre há um único dispositivo presente na ponta, simplificando a comunicação. Assim, os únicos pinos utilizados foram TX, RX, e GND. O cabo serial para a comunicação entre Módulo ENDRAD e microcomputador é composto por três fios os quais estão ligados nos pinos TX, RX, e GND e, foi construído para o modo par cruzado TX com RX, conforme apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Cabo Serial do tipo CrossCable

A interface RS232 é definida como um meio de comunicação *full-duplex* ponto-a-ponto entre PC e um terminal qualquer. Este terminal pode ser um Modem, um CLP, um Microcontrolador, enfim, uma grande quantidade de periféricos externos. Inicialmente, esta interface era composta de inúmeras vias de controle, e utilizava um conector padrão DB25. Atualmente, as portas seriais dos computadores modernos utilizam apenas 9 pinos, referente ao padrão DB9. O significado de cada pino usado neste trabalho pode ser visto na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Nomenclatura dos pinos padrão RS232 conector DB9

O padrão RS232 opera com tensões elevadas de forma a aumentar a capacidade de alcance da distância de transmissão. O nível lógico “1” corresponde a uma tensão entre -3 e -15V, e o nível lógico “0” corresponde a uma tensão entre +3 e +15V, essas tensões tem como referência o Terra comum conforme pode ser visto na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Tensões padrão RS232

O formato de dados adotado geralmente é o do caractere ASCII. A temporização da transmissão é feita segundo o formato UART, que é um protocolo assíncrono, onde o canal de comunicação é mantido no nível lógico “1”, quando é feita uma transmissão, o canal desce para o nível lógico “0”, em seguida os 8 bits são transmitidos, seguidos de um bit de paridade, opcional, e de dois bits “1” de parada, conforme a Figura 3.7.

Figura 3.7 - Formato dados UART

A velocidade de comunicação, ou taxa, neste protocolo é dada em bps, bits por segundo, e os valores podem estar na faixa de 2400 a 512000 bps. Nos microcomputadores IBM-PC, a velocidade máxima é de 115200 bps. Neste trabalho foi definida a velocidade de comunicação de 9600 bps, devido esse ser o maior valor disponível para o microcontrolador operando na frequência de relógio de 11,0592MHz conforme mencionado anteriormente. Os cálculos utilizados para a obtenção da taxa de 9600 bps para a comunicação serial são apresentados a seguir:

De acordo com o manual do fabricante do microcontrolador o *Timer/Counter 1* é o elemento responsável pela geração de taxa de comunicação e o mesmo deve operar no modo recarga automática de 8 bits. A fórmula, ou seja, a equação 3.1 apresentada abaixo é fornecida pelo fabricante para o cálculo dos valores de: frequência de *Clock*, Taxa e Número de recarga TH1. O TH1 é uma variável relativa ao valor que deve ser recarregado no *Timer/Counter 1* para a ocorrência do seu *Overflow* que gera a ordem de transmissão.

$$Taxa = \frac{1}{32} * \frac{Fck}{12 * (256 - TH1)}$$

(eq. 3.1)

Para produzir uma taxa ou velocidade de comunicação de 9600 bps, com frequência de *Clock* de 11,0592MHz, o TH1 deve ser igual a 253 em decimal ou 0FD em hexadecimal.

O módulo eletrônico ENDRAD recebe a energia elétrica para seu funcionamento através de uma tensão de +12V de corrente contínua disponível no pino 16 do conector NIM POWER J2 existente no *Rack-Bin* da instrumentação conforme Tabela 3.1. O circuito eletrônico do módulo opera com uma tensão contínua estabilizada de +5V, essa tensão é obtida através de um circuito integrado regulador de tensão, o LM7805, U1, conectado na tensão de +12V. O diagrama do circuito elétrico da fonte é mostrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Regulador de tensão da Fonte de alimentação

Tabela 3.1 - Pinos e as tensões presentes no conector NIM POWER.

Número do pino	Tensão de alimentação
16	+12 V
17	-12 V
28	+24 V
29	-24 V
34	Terra da fonte
42	Terra especial

3.1.2 – Os painéis

Os painéis frontal e traseiro do módulo eletrônico ENDRAD, conforme pode ser visto na Figura 3.9, aloja os seguintes componentes:

No painel frontal:

- Interruptor de alimentação geral (S1);
- LED indicador luminoso de alimentação ligado (L1);
- LED indicador luminoso de *Status*, Inicializa/Serial (L2);
- Conector tomada BNC (J1).

No painel traseiro:

- Conector DB9 da entrada de comunicação serial (J2);
- Conector entrada de alimentação NIM POWER (J3).

Figura 3.9 - Paineis do módulo eletrônico ENDRAD

3.1.3 – O Firmware do microcontrolador

Como visto no item 2.5.1, o microcontrolador é responsável por diversas funções que são relacionadas a quatro processos distintos: comunicar serialmente, gerar base de tempo, contar pulsos, e energizar a saída válvula solenóide.

As funções relacionadas à comunicação englobam receber e interpretar comandos emitidos pelo microcomputador e respondê-los imediatamente.

Os algoritmos, os nomes dos registradores e das sub-rotinas apresentados no corrente item fazem referência ao Apêndice (v. APÊNDICE 61 a 73).

A geração da base de tempo é realizada por meio de interrupções produzidas pelo contador interno do microcontrolador, ou seja, o *Timer/Counter 0* e um registro auxiliar *R_FAT* pertencente ao banco de registros. O projeto foi concebido para que a base de tempo fosse ajustada automaticamente para obter a melhor resolução possível para os seguintes valores de tempo: 1ms; 10ms; 100ms e 1s. A Tabela 3.2 apresenta os valores calculados que são carregados nos registros *TH0* e *TL0* do *Timer/Counter 0* e *R_FAT* para os respectivos valores de tempo por ocasião do evento das sub-rotinas *ESTOURO* e *BAS_TEMP*, respectivamente (v. APÊNDICE 63 e 72) e (v. APÊNDICE 62 e 73).

Tabela 3.2 - Valores para os registros de temporização

Tempo	TH0	TL1	R_AUXT
1000ms	04BH	0FFH	20
100ms	04BH	0FFH	02
10ms	0DBH	0FFH	01
1ms	0FCH	065H	01

Os dados contidos na tabela foram obtidos por meio de cálculos utilizando a fórmula ou a equação 3.2. A fórmula foi deduzida a partir das informações fornecidas no manual dos fabricantes do microcontrolador e outras literaturas [31].

$$Tempo = \frac{12}{Fck} * R_AUX * (10000 - TimerCouter0) \quad (eq. 3.2)$$

Onde: $F_{ck} = 11,0592\text{MHz}$, frequência do cristal oscilador.

A diferença ($10000 - \text{TimerCounter0}$) está na base numérica hexadecimal.

Ao término de cada intervalo regular de tempo definido pela função gerar base de tempo uma leitura é realizada através do *Port* P1 cujos terminais estão conectados nos pinos do contador externo o qual recebe os pulsos provenientes do SCA ou seja, o analisador Monocanal (v. APÊNDICE 59). Após a leitura, o contador é zerado pelo microcontrolador, ficando pronto para um novo ciclo de leitura.

O contador tem capacidade de 7 bits, opera no modo crescente partindo do valor zero e chegando a um valor máximo de 99, teoricamente ele poderia contar até 127, mas devido uma porta lógica ligado no pinos dos bits 2, 5 e 6 que detectará o número em binário 1100100 que corresponde a número 100 em decimal e, dessa forma, limitando a contagem a um valor máximo de 99. No instante em que o contador atinge esse número a porta lógica, por meio de sua saída, envia um sinal lógico para o microcontrolador indicando a ocorrência de um estouro de contagem para que o mesmo altere o valor da base de tempo para acomodar uma nova contagem cujo valor seja maior que o anterior.

Duas sub-rotinas atuam diretamente na base de tempo: ESTOURO e BAS_TEMP. Essas duas sub-rotinas atuam de forma totalmente antagônica ao reajustar o valor da base de tempo. A sub-rotina BAS_TEMP tenta aumentar o valor da base de tempo para com isso elevar capacidade de contagem, por outro lado, a sub-rotina ESTOURO tenta diminuir o valor da base de tempo para que os estouros das contagens no contador sejam eliminados.

Nos fluxogramas apresentados no Apêndice (v. APÊNDICE 61) são abordados os algoritmos para as sub-rotinas que implementam o Firmware.

3.2 – O Programa ENDRAD

O Algoritmo para o programa ENDRAD é apresentado na forma de um fluxograma que pode ser visto no Apêndice (v. APÊNDICE 66). O algoritmo está transcrito em linguagem C++ e seu entendimento e interpretação pode ser feito através da leitura dos comentários anexados ao final de cada linha no arquivo fonte (v. APÊNDICE 74).

O ajustes dos parâmetros, operações com arquivo e os cálculos matemáticos são executados através do programa ENDRAD. Especificamente desenvolvido para o equipamento para controle de sistema de análise não destrutiva usando radiação nuclear.

O Programa ENDRAD apresenta uma interface gráfica simples e bastante intuitiva, como mostra a Figura 3.10.

Figura 3.10 - Janela do programa ENDRAD com detalhes

Na interface gráfica encontram-se os seguintes áreas:

- **Ajustes.** Área composta pelos seguintes elementos: (a), (b), (c), (d) e (n) permite a realização das operações convencionais de captura de valores medidos para fins de calibração. Ao iniciar o programa esses elementos são preenchidos com os valores utilizados quando programa foi executado pela última vez . Isso ocorre pois ao se encerrar o programa o mesmo grava em um arquivo específico os valores em uso naquele momento e, ao iniciar o programa esse arquivo é lido e os valores em questão são obtido;

- **Valor Medido e Valor Rejeitado.** Área constituída pelos elementos (k) e (p). Esses elementos possibilitam a visualização dos valores das taxas de contagens. O valor medido é o valor instantâneo e o valor rejeitado é um dado memorizado relativo a medição efetuada quando ocorreu a última rejeição referente ao material ensaiado. Os valores das taxas de contagens mostrados foram obtidos pelo módulo eletrônico ENDRAD que as enviaram serialmente ao microcomputador;
- **Saída.** Área constituída pelo elemento (f) possibilita a visualização do estado da saída válvula solenóide e permite também uma ação manual e remota sobre esta saída;
- **Contadores Totalizadores de Peças.** Área formada pelos elementos (h), (i) (j) e (g) disponibiliza os valores relacionados à quantidade total de peças consideradas aceitas, rejeitadas e a soma de ambas durante o processo de ensaio.

Na interface gráfica, ou seja, a janela do programa computacional ENDRAD, Figura 3.10, encontram-se os elementos: botões, mostradores numéricos e um visualizador da variável sob medida que são descritos sucintamente a seguir:

- Botões da janela do programa ENDRAD e as suas funções:
 - (a) Capturar o valor em vazio, *Val_Vazio*, durante a 2ª etapa ou ajustes item 3.3.1;
 - (b) Capturar o valor de referência, *Val_Ref*, durante a 2ª etapa ou ajustes item 3.3.1;
 - (c) Mudar o algoritmo de sincronização, *Modo*;
 - (d) Habilitar a calibração tornando os botões de captura (a) e (b) habilitados, *Calibrar*;
 - (e) Colocar o sistema em operação efetuando leituras, *Opera!*;
 - (f) Sinalizar e atuar manualmente a saída válvula solenóide, *Saída*;
 - (g) Zerar os contadores totalizadores (h), (i) e (j), *Zera tudo*;
 - (n) Definir um valor de tolerância, *Tol* para ser aplicado em (a) e (b),.
- Mostradores numéricos da janela do programa ENDRAD e as suas funções:
 - (h) Apresentar o total de peças aprovadas no ensaio, *Peças Aceitas*;
 - (i) Apresentar o total de peças reprovadas no ensaio *Peças Rejeitadas*;

- (j) Apresentar o total de peças ensaiadas, ou seja: (h) + (i), **Total Peças**.
- Visualizadores da variável sob medida e as suas funções :
- (k) Exibir o valor medido, isto é, a contagem atual C_n , **Valor Medido**;
- (m) Indicar as condições das medidas de nível alto, baixo e se a posição de medição encontra-se vazia;
- (p) Exibir o valor medido da última rejeição, **Valor Rejeitado**;
- (l) Exibir uma mensagem especificando qual porta serial do microcomputador será feita a conexão.

3.3 – Parte experimental

A Figura 3.1, a seguir, apresenta um esboço da parte experimental para o sistema de medidas: detector, eletrônica utilizada e material em estudo .

Figura 3.11 - Materiais usados no experimento

- (1) Fonte radioativa ^{241}Am
- (2) Recipiente metálico contendo água, Figura 2.3
- (3) Detector Cristal Cintilador NaI (TI) acoplado à uma fotomultiplicadora Harshaw-Filtrol 905-4 PE470
- (4) Fonte de Alta tensão para o a fotomultiplicadora
- (5) Eletrônica associada ao detector conforme item 2.1
- (6) Módulo Eletrônico ENDRAD

- (7) Válvula solenóide
- (8) Microcomputador.

Figura 3.12 - Detector, Fotomultiplicadora e cintilador

3.3.1 – As etapas da parte experimental

A seguir são apresentadas as três etapas essenciais para a realização da parte experimental.

1ª Etapa - Conexões

- Interligar as portas seriais do microcomputador e do Módulo Eletrônico ENDRAD através do cabo serial com conectores DB9.
- Interligar a saída do SCA à entrada do Módulo Eletrônico ENDRAD usando o cabo coaxial com conectores BNC.
- Após efetuadas todas as conexões de forma adequada liga-se todo o sistema energizando-o, em seguida, aciona-se o programa ENDRAD que inicialmente estabelece a conexão de forma automática com a porta de comunicação serial do

microcomputador que encontra-se conectada ao cabo serial. Enquanto não for estabelecida a comunicação o programa fica ciclicamente lendo as portas disponíveis presentes no microcomputador até que o mesmo localize a porta de comunicação, na qual encontra conectado o Módulo Eletrônico ENDRAD e, enquanto isso não ocorre, uma mensagem de alerta fica piscando na barra de estado da janela do programa.

Figura 3.13 - Módulo conectado a instrumentação usada no experimento

- Ao estabelecer a comunicação, o programa recebe uma linha de texto, STRING, proveniente do Módulo Eletrônico e a exibe na linha de estado, sinalizando a identificação do Módulo e concluindo que a comunicação foi bem sucedida.
- Os contadores totalizadores, o *Val_Vazio* e o *Val_Ref* são inicializados com os valores que haviam neles quando da última vez que o programa ENDRAD foi encerrado.

2ª Etapa - Ajustes

- Após estabelecida a comunicação iniciam-se os ajustes de calibração e, para tanto, são necessários os seguintes itens: Amostras do material a ser analisado contendo elementos com valor de referência e outras com valor abaixo da referência.
- Clica-se no botão Calibrar para colocar o programa no modo calibração e como consequência os botões *Val_Ref* e *Val_Vazio* ficam ativos. Com a posição de medição sem material obtém-se o valor da contagem em vazio clicando no botão *Val_Vazio*. Em seguida, coloca-se uma amostra correspondente ao valor de referência na posição de medição e clica-se no botão *Val_Ref* para obter o valor de referência. Após estas duas ações os respectivos valores são registrados no programa e permanecem visíveis nos correspondentes botões.
- Para finalizar a calibração clica-se no botão *OK* tirando o programa do modo calibração e colocando-o no modo espera.
- A seguir escolhe-se o modo de detecção da amostra, isto é, se o programa deve operar efetuando uma leitura, modo Mono, ou três leituras, modo Multi, a fim de determinar o valor da medida.

3ª Etapa - Operação

- O sistema entra em operação ao clicar no botão *Opera!* Após clicar nesse botão ele muda o termo para *Para!* Esta ação emite um comando, o qual faz com que o sistema mecânico de transporte do material a ser ensaiado entre em movimentação, propiciando a passagem do material pela posição de teste.
- Se o material sob ensaio apresentar valor aceitável em conformidade com o valor de referência ele é aceito e o contador de *Peças Aceitas* é incrementado em uma unidade, por outro lado, se o mesmo apresentar um valor não aceitável, o programa envia para o Módulo Eletrônico ENDRAD um comando, para que o mesmo acione a saída válvula solenóide que atuará de forma a separar o material, levando-o a ser rejeitado e o programa incrementa em uma unidade o contador de *Peças rejeitadas*. Independentemente de ser aceito ou rejeitado o material, o contador de total de peças será incrementado em uma unidade.

- Para interromper a operação deve-se clicar no botão *Para!* e esse mesmo botão volta a exibir o termo *Opera!*

Figura 3.14 - O equipamento para controle de sistema de análise não destrutiva usando radiação nuclear.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, desenvolveu-se um projeto e montagem de equipamento para controle de sistema de análise não destrutiva usando radiação nuclear.

O objetivo foi atingido pois foram desenvolvidos e montados o módulo eletrônico e o programa computacional. para sua utilização em ensaios não destrutivos. Apresentando como destaque a versatilidade de seu emprego em medidas e controle de nível tanto de materiais no estado líquidos quanto em sólidos.

As respostas dos testes operacionais do sistema foram satisfatórias, durante todas as etapas dos experimentos, com reservatórios parados e em movimento.

O equipamento possui um número bem reduzido de botões o que racionaliza sua utilização dispensando qualquer treinamento especial para operá-lo.

O *software* e o *firmware* admitem atualizações e sua respectiva manutenção não apresenta custos elevados.

O equipamento integra-se muito bem às condições de ambientes industriais. Em uma análise para seu uso industrial, o equipamento apresenta custo não elevado para sua implantação.

5 – PERSPECTIVAS

Diante das análises dos resultados obtidos pode-se prever algumas melhorias como possíveis implementações no sistema que facilitariam sua operação e melhorariam a qualidade dos dados adquiridos.

Estas sugestões têm o intuito de motivar uma constante continuidade das pesquisas sobre o protótipo. Algumas das principais possibilidades de avanço no equipamento são apresentadas em forma de itens:

- Implementação de sistemas de comunicação para protocolos USB (*Universal Serial Bus*), I2C e o IrDA (*Infrared Data Association*);
- Aumento na quantidade de algarismos do contador digital;
- Conversão em equipamento portátil integrando ao módulo o amplificador e o SCA.

APÊNDICE

Neste apêndice encontram-se diversos detalhes do projeto do equipamento para controle de sistema de análise não destrutiva usando radiação nuclear

1 – DIAGRAMA DO CIRCUITO DO MÓDULO ELETRÔNICO ENDRAD

Figura A.1 - Circuito eletrônico do módulo ENDRAD

2 – LISTA DE COMPONENTES

- Módulo eletrônico ENDRAD

Referências	Valor	Quantidade
C1,C2,C3,C4,C7,C8,C9	10 μ F	7
C5,C6	22pF	2
C11	47 μ F	1
C12	100nF	1
D1,D2,D5	LED 5mm	3
D3	1N4148	1
D4	Zener 5V1	1
J1	BNC	1
J2	AMP203394-2	1
J3,P1,P2	CONN DB09	3
R1	10k	1
R2,R3,R6	2k	3
R4	1.2k	1
R5	12k	1
U1	LM7805	1
U2	89CX051	1
U3	MAX 232	1
U4	74HC4040	1
U5	4012	1
Y1	11.0592MHz	1

- Geral

Cabo serial terminação DB9	1
Gerador de pulsos GP10	1
Protoboard	1

3 – FLUXOGRAMA DO FIRMAWARE DO MÓDULO ENDRAD

Figura A.2 Fluxograma geral do Firmware

Figura A.3 Fluxograma Firmware base de tempo

Figura A.4 Fluxograma Firmware contador digital

Figura A.5 Fluxograma Firmware registros de temporização

Figura A.6 Fluxograma Firmware enviar contagem

4 – FLUXOGRAMA SOFTWARE ENDRAD

Figura A.7 Fluxograma do Software

5 – ARQUIVOS FONTE DO FIRMAWARE MÓDULO ENDRAD

Quadro 1 – Inicialização

```

RESET:      ORG 0000H      ;RESET
            SJMP COMECO

            ORG 0003H ;INT0
            JMP ESTOURO    ;Na ocorrência de estouro do contador
            ORG 000BH      ;T/C0 Geração da base de tempo
            JMP BAS_TEMP
            ORG 0013H ;INT1
            RETI
            ORG 001BH      ;T/C1 Gerador de Baud para o Serial
            RETI
            ORG 0023H      ;SERIAL
            RETI

            ORG 0058H
COMECO:
;INICIALIZACAO
            MOV DADO_CNT, #0FFH ; DADO_CNT = P1 : Entradas
                                   ;FAT = {1 0,1 0,01 0,001}s
                                   ;R_FAT {1, 2, 3, 4 }
            MOV R_FAT, #4 ;Inicializado para 1ms
                                   ;(R_FAT EQU R3)
            SETB CLRC ; Zera contador HC4040
            MOV R_CNT, #0 ; Limpa contagem

;-----TIMER 0-----
            MOV TMOD, #21H ;Timer1 mode 2, timer0 mode 1
            MOV TL0, #065H ;Inicializa com 1 ms
            MOV TH0, #0FCH ;Ver tabela numeros para T/C0
            MOV R_AUXT, #1 ; 1 ms

;-----SERIAL-----
; SCON:      B7 B6 B5 B4 B3 B2 B1 B0
;            SMO SM1 SM2 REN TB8 RB8 TI RI
;            0 1 0 1 0 0 1 0
;            MOV SCON, #52H ;Serial mode 1, 8BIT,
;            MOV TH1, #0FDH ;100-0FD=3 -> 9600 BAUD
;            SETB TR1

;-----
;Definindo prioridades |x| x| x|PS| PT1|PX1|PTO|PX0|
;Habilitando as interrupts |EA| x| x|ES| ET1|EX1|ET0|EX0|

            SETB IT0 ;Ativa a int0 por transicao
            SETB ET0 ;TIMER 0
            SETB EA

```

Quadro 2 – Laço principal

```

=====LACO PRINCIPAL=====
;
LEITURA:
;Chama a rotina GETCH se ha CHAR no buffer
;Esse CHAR pode ser um comando CMD
;Esse comando estara no reg CHR_RX
        JNB    RI, LEITURA

        CALL   GETCH

        CALL   LE_CONTA    ; Envia para o PC a contagem

        CALL   SLNOIDE     ; Aciona Saída Liga/Des

        JMP    LEITURA

```

Quadro 3 - Sub-rotinas de comunicação com o microcomputador

```

;Recebe um CHAR via SERIAL e guarda-o no reg CHT_1
;
GETCH:
        JNB    RI,    $
        MOV    CHR_RX,SBUF
        CLR    RI
        RET

;Uma STRING é Transmitida via SERIAL
PUTSTR:  PUSH   ACC
OUTRO_CHR: CLR   A
        MOVC   A,  @A+DPTR
        JZ     PUTS_FIM
        MOV    CHR_TX, A
        LCALL  PUTCHAR
        INC    DPTR
        JMP    OUTRO_CHR
PUTS_FIM: POP    ACC
        RET

; Um CHAR que está armazenado em CHR_TX é Transmitido via SERIAL
PUTCHAR: JNB    TI,    $
        CLR    TI
        MOV    SBUF,  CHR_TX
        RET

```


Quadro 4 - Sub-rotina para comandar saída válvula solenóide

```

; Quando o micro quiser atuar na saída ele envia o char:
;           F ou f para ligar (Fechar)
;           A ou a para desligar (Abrir)
; Aciona Saída Liga/Des (Fechar/Abrir)

SLNOIDE:
        MOV    A, CHR_RX
        CJNE   A,#('F'),AGDE

LIG_SOL:    CLR    SAIDA1                ;Liga
        JMP     SOL_SAI

AGDE:      CJNE   A,#('A'),SOL_SAI

DES_SOL:   SETB   SAIDA1                ;Desliga

SOL_SAI:   RET

```

Quadro 5 – Sub-rotina Envia ao microcomputador uma leitura

```

; Quando o microcomputador necessitar o valor da contagem ele envia o char L ou l
; Envia para o PC a contagem

LE_CONTA:
        MOV    A, CHR_RX
        CJNE   A,#('L'), LE_SAI

LE_REG:   SETB   B_LEITU                ; Envia contagem na rotina bas_temp (t/c0)

LE_SAI:   RET

```

Quadro 6 – Sub-rotina de conversão de binário para char e envia ao microcomputador

```
ENV_CNTG:  PUSH  ACC
            MOV   CHR_TX, #'='
            CALL  PUTCHAR
```

```
BI_BCD_ASC: MOV   A, R_CNT
            MOV   B, #100
            DIV   AB
            ADD   A, #'0'
            MOV   CHR_TX, A
            CALL  PUTCHAR
```

```
DEZEN:     MOV   A, #10
            XCH   A, B
            DIV   AB
            ADD   A, #'0'
            MOV   CHR_TX, A
            CALL  PUTCHAR
```

```
UNIDA:     XCH   A, B
            ADD   A, #'0'
            MOV   CHR_TX, A
            CALL  PUTCHAR
            MOV   A, R_FAT
            ADD   A, #47
            MOV   CHR_TX, A
            CALL  PUTCHAR
            POP   ACC

            RET
```

Quadro 7 – Sub-rotina ajusta os registros de temporização

```

;Ajusta os regs de temporizacao: TH0.TL0 E R_AUXT
;Para um novo valor de base de tempo de acordo com o registro - R_FAT -
;      ;FAT : Fator para temporizacao
;      ;FAT = {0,001 0,01 0,1 1 }s - Ver: - numeros para T/C0 -
;      ;R_FAT {4, 3, 2, 1 } (R_FAT EQU R3)

AJ_RTMP:
        PUSH  ACC

        MOV   DPTR,#BASE_TC0           ; Base da tab de nums para T/C0

        MOV   A, R_FAT                 ;(R_FAT EQU R3)
        DEC   A
        MOV   0F0H, #3                 ;0F0H e' endereco de B
        MUL   AB
        MOV   R2, A                    ;( 0, 3, 6, 9) REG AUX off-set tabela de tempos

        MOV   A, R2
        MOVC  A, @A + DPTR
        MOV   TH0, A

        INC   R2
        MOV   A, R2
        MOVC  A, @A + DPTR
        MOV   TL0, A

        JNB   B_AUXT, AJ_RTMP_SAI      ;Salta se nao atingiu o tempo
        CLR   B_AUXT                   ;20.0 bit0
        INC   R2
        MOV   A, R2
        MOVC  A, @A + DPTR
        MOV   R_AUXT, A

AJ_RTMP_SAI:
        POP   ACC
        RET

```

Quadro 8 – Sub-rotina Estouro do contador pulsos

```

;      Sub rotina
;      Serve a interrup INT0 - Estouro- Estouro do contador pulsos HC4040

ESTOURO:

CLR    EA          ;Desabilita INT0 E T/C0 ...tudo
SETB   CLRC        ;Inibe a contagem zerando o contador HC4040

                        ;Verifica se da pra diminuir base de tempo
                        ;FAT = {1  0,1  0,01  0,001}s
CJNE   R_FAT,#4, AJUS      ;R_FAT {1, 2, 3, 4 }
                        ;Volta para 1ms (R_FAT EQU R3)
                        ;(R_FAT EQU R3)

MOV    R_CNT,#0FFH ;Codigo de erro estouro
CALL   ENV_CNTG

AJUS:   MOV    R_FAT,#4
CLR     TR0        ;Para O T/C0
SETB    B_AUXT     ;Seta-o p que R_AUXT seja recarregad na AJ_RTMP
                        ;Aj A T/C0 para uma base de tempo menor
CALL    AJ_RTMP    ;AJ A T/C0 PARA UMA BASE DE TEMPO

CLR     CLRC        ;Libera contador HC4040 que comece contar
SETB    TR0        ;Dispara o T/C0
SETB    EA         ;Habilita INT0 E T/C0 ...tudo
CLR     IE0        ;ANula o pedido de INT0 ao zerar o contador
RETI

```

Quadro 9 – Sub-rotina Geradora da base de tempo

```

;           Serve a interrup T/C0 - BAS_TEMP
BAS_TEMP:  DJNZ  R_AUXT, BAS_TEMP_SAI      ; Somente recarrega o t/c0 c valor anterior
          PUSH  ACC
          SETB  B_AUXT                    ; Seta-o se ja atingiu o tempo
          CLR   EA                        ; Desabilita int0 e t/c0 ...tudo
          MOV   A, DADO_CNT                ; Le contador
          MOV   R_CNT, A                   ; Armazena contagem
          SETB  CLRC                       ; Zera contador hc4040 e o inibe
          CLR   TR0                        ; Para t/c0
          JNB   B_LEITU, PRALA ;
          CLR   B_LEITU
          CALL  ENV_CNTG                    ; Envia contagem e base de tempo p o pc
PRALA:     MOV   A, R_CNT                    ; Contagem
          CLR   C
          SUBB  A, #10
          JNC   BAS_AJT                    ; Se (a >= 10) entao na0 altera valor t/co
          ; Se (a <= 9) entao aumenta o tempo
          DJNZ  R_FAT, BAS_AJT              ; Verifica se da pra aument base de tempo
          ; R_FAT {4, 3, 2, 1 }
          INC   R_FAT                      ; Nao da pra aumentar
BAS_AJT:   CALL  AJ_RTMP                    ; Aj os regs de temporizacao para uma base de tempo
          CLR   CLRC                       ; Libera contador hc4040 que comeca contar
          SETB  TR0                        ; Dispara o t/c0
          SETB  EA                        ; Habilita int0 e t/c0 ...tudo
          CLR   IE0                        ; Anula o pedido de int0 ao zerar o contador
          POP   ACC
          RETI
BAS_TEMP_SAI: CALL  AJ_RTMP                ; Aj a t/c0 para o mesma valor base de tempo
          RETI

```

6 – ARQUIVOS FONTE DO SOFTWARE ENDRAD

```

#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include "Rad_C27_Unit1.h"
#include "Geral_Thread_27Unit1.h"
#include "TAbrirPorta_Thread_27Unit1.h"
#include <iostream.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <IniFiles.hpp> //Salva valores em arquivo exename.ini
// Variaveis globais
bool fComXaberta=false; // Sinalizador de porta aberta
bool fPedeLer=false;
bool fCalibrar, fAcionaSol;
bool fContagem, fMonoMed;

HANDLE hComm = NULL;
char NumBuff3[7] ;
DWORD BytesLidos; // Var q contara a quant de bytes lidos
COMMTIMEOUTS ctmoNew = {0}, //A estrutura COMMTIMEOUTS e' usada nas funcoes
               ctmoOld ; // SetCommtimeouts e GetCommtimeouts

TGeral_Thread *Geral_Thread;
TAbrirPorta_Thread *AbrirPorta_Thread;
unsigned long aceitas=0, rejeitas=0, total;
int val_vazio=90000, val_referenc=1, medidaAnterior;
int val_vaz, val_ref, tolerancia=10 ;
int medida, zeros;
char j=0;
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm1 *Form1;

```

```

__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}
//-----
void __fastcall TForm1::FormCreate(TObject *Sender)
{
    Geral_Thread      = new TGeral_Thread(false); // Aloca memória para o objeto.
    AbrirPorta_Thread = new TAbrirPorta_Thread(false);
    TIniFile *inic;
    inic = new TIniFile( ChangeFileExt( Application->ExeName, ".INI" ) );
    aceitas = inic->ReadInteger( "Aceitas", "valor", aceitas );
    rejeitas = inic->ReadInteger( "Rejeitas", "valor", rejeitas );
    total = inic->ReadInteger( "Total", "valor", total );
    val_vazio = inic->ReadInteger( "Val_vazio", "valor", val_vazio );
    val_referenc = inic->ReadInteger( "Val_referenc", "valor", val_referenc );
    tolerancia = inic->ReadInteger( "Tol", "valor", tolerancia );
    delete inic;
    val_vaz = val_vazio - val_vazio * tolerancia/100 ;
    val_ref = val_referenc + val_referenc * tolerancia/100 ;
}
//-----
void __fastcall TForm1::FormClose(TObject *Sender, TCloseAction &Action)
{
    fPedeler = false;
    fCalibrar = false;
    ShowMessage("DESLIGUE A INTERFACE EXTERNA");
    Geral_Thread->Terminate(); Sleep(250); // Nao separar as funcoes !
    FechaPorta ();
}

```

```

TIniFile *inic;
inic = new TIniFile(ChangeFileExt( Application->ExeName, ".INI" ) );
inic->WriteInteger( "Aceitas", "valor", aceitas );
inic->WriteInteger( "Rejeitas", "valor", rejeitas );
inic->WriteInteger( "Total", "valor", total );
inic->WriteInteger( "Val_vazio", "valor", val_vazio );
inic->WriteInteger( "Val_referenc", "valor", val_referenc );
inic->WriteInteger( "Tol", "valor", tolerancia );
delete inic;
}
//-----
void FechaPorta (void)
{
    // Descarta todos os caract no Buffer interno da Comm
    PurgeComm(hComm, PURGE_RXABORT); // Aborta operação de leitura RX ABORT.

    //Restaura os valores anteriores, os quais foram armazenados em ctmoOld
    SetCommTimeouts(hComm, &ctmoOld);

    //Fecha a porta Comm e o File
    CloseHandle(hComm);
}
//-----
// Calibrar, pega o valor medido e guarda-o em Val_Máx
void __fastcall TForm1::Bt_Val_VazioClick(TObject *Sender)
{
    val_vazio = medida ;
    val_vaz = val_vazio - val_vazio * tolerancia/100 ;
    if(val_vazio > val_referenc)

```



```

{
    String STR_VAL_MAX ("Val_Vazio = " );
    Form1->Bt_Val_Vazio->Caption = STR_VAL_MAX + IntToStr(val_vazio);
    Form1->Bt_Calib->Enabled=true;
    //Label3->Caption= IntToStr(val_vaz);
}
}
else
{
    Form1->Bt_Val_Vazio->Caption="INVÁLIDO!";
    Form1->Bt_Calib->Enabled=false;
}
}
//-----
// Calibrar, pega o valor medido e guarda-o Val_Min
void __fastcall TForm1::Bt_Val_RefClick(TObject *Sender)
{
    val_referenc = medida ;
    val_ref = val_referenc + val_referenc * tolerancia/100 ;
    if(val_vazio > val_referenc)
    {
        String STR_VAL_MIN ("Val_Ref = ");
        Form1->Bt_Val_Ref->Caption = STR_VAL_MIN + IntToStr(val_referenc);
        Form1->Bt_Calib->Enabled=true;
        //Label4->Caption= IntToStr(val_ref);
    }
}
else
{
    Form1->Bt_Val_Ref->Caption="INVÁLIDO!";
    Form1->Bt_Calib->Enabled=false;
}
}

```

```

void __fastcall TGeral_Thread::AcionaSolenoid()
{
    static int valor[3];
    if(medida < val_vaz )
    {
        // - Detecta a menor valor
        if( !(medida <= medidaAnterior) )
        {
            // Para a medição, atingiu o menor
            if(fContagem) // fContagem:
            {
                valor[j]= medidaAnterior;
                j++;
                if( j==3 || fMonoMed )
                {j=0;
                 MenorValor(valor); // 0 menor valor fica em: valor[0]
                 fContagem=false;
                 Form1->Pn_Nivel->Visible=true;
                 if(valor[0] > val_ref)
                 {
                     // Significa:Rejeitou Nivel abaixo aceitável
                     rejeitas++;
                     TransmitCommChar(hComm,'F');
                     Form1->Sh_Solenoid->Brush->Color=clRed ;//L Sol
                     fAcionaSol=true; // Usará no acion manual sol
                     Form1->Lb_Baixo->Visible=true;
                     Form1->Lb_Alto->Visible=false;
                     String STR_REJEITAS ("Peças Rejeitas = "); //
                     Form1->Pn_Rejeitas->Caption=STR_REJEITAS+IntToStr(rejeitas);
                     Form1->Ed_ValorRej->Text= valor[0]; //rejeicao
                 }
            }
        }
    }
}

```

```

else // Significa: "Aceito" ou " no/acima do nível"
{
    aceitas++;
    TransmitCommChar(hComm,'A'); //deslig_solenoides;
    Form1->Sh_Solenoid->Brush->Color=clBtnFace ;//
    fAccionaSol=false; // usada no acion man da solen
    Form1->Lb_Alto->Visible=true;
    Form1->Lb_Baixo->Visible=false;
    String STR_ACEITAS ("Peças Aceitas = "); //
    Form1->Pn_Aceitas->Caption=STR_ACEITAS+IntToStr(aceitas);
    Form1->Ed_ValorRej->Text= " "; // Apaga o
}

}

}

else
{
    if( !(medidaAnterior < medida ) )
    { // Para a medição, atingiu o maior !
        // Significa " Sem nada" ou seja, "posição vazia"
        TransmitCommChar(hComm,'A'); // Sleep(10); //deslig_solenoides;
        Form1->Sh_Solenoid->Brush->Color=clBtnFace ;// Desliga Sol
        fAccionaSol=false; // Será usada no acionam manual da solenoide
        fContagem=true; // Detectou posição vazia
        Form1->Pn_Nivel->Visible=false;
    }
    // Continua a medição do maior valor
}

```

```

medidaAnterior = medida;
total = aceitas + rejeitas ;
String STR_TOTAL ("Total Peças = "); // constroe o texto do contador
Form1->Pn_Total->Caption=STR_TOTAL + IntToStr(total);
}
//-----

void __fastcall TForm1::FormShow(TObject *Sender)
{
    String STR_VAL_MAX ("Val_Vazio = ") ;
    Form1->Bt_Val_Vazio->Caption = STR_VAL_MAX + IntToStr(val_vazio);
    String STR_VAL_MIN ("Val_Ref = ");
    Form1->Bt_Val_Ref->Caption = STR_VAL_MIN + IntToStr(val_referenc);
    String STR_VAL_TOLER ("Tol = ");
    String STR_VAL_PORC (" %");
    Form1->Bt_Toler->Caption = STR_VAL_TOLER + IntToStr(tolerancia) + STR_VAL_PORC;

    String STR_TOTAL ("Total Peças = "); // constroe o texto do contador
    Form1->Pn_Total->Caption=STR_TOTAL + IntToStr(total);
    String STR_REJEITAS ("Peças Rejeitas = "); // constroe o texto do contador
    Form1->Pn_Rejeitas->Caption=STR_REJEITAS + IntToStr(rejeitas);
    String STR_ACEITAS ("Peças Aceitas = "); // constroe o texto do contador
    Form1->Pn_Aceitas->Caption=STR_ACEITAS + IntToStr(aceitas);
}
//-----

// Lê ou Para a leitura de contagens vindas da Interface
void __fastcall TForm1::Bt_LerClick(TObject *Sender)

```

```

{
    if(fPedeler)
    {fPedeler=false;
      Bt_Ler->Caption="Opera!";
      Form1->Bt_Calib->Enabled=true;
    }
    else { fPedeler=true;
          Bt_Ler->Caption="Para !";
          Form1->Bt_Calib->Enabled=false;
        }
    }
    //-----
    // Pega valores medidos para calibrar em Val_Max e Val_Min
    void __fastcall TForm1::Bt_CalibClick(TObject *Sender)
    { if(fCalibrar)
      {fCalibrar=false; // Calibrado
       Bt_Calib->Caption="Calibrar!";
       Form1->Bt_Ler->Enabled=true;
       Form1->Bt_Val_Vazio->Enabled=false;
       Form1->Bt_Val_Ref->Enabled=false;
       Form1->Bt_Toler->Enabled=false;
       medidaAnterior = (val_referenc + val_vazio)/2 ;// Sintetiza medida anter
      }
    else
    { // Calibrando
      fCalibrar=true;
      Bt_Calib->Caption=" 0 K !";
      Form1->Bt_Ler->Enabled=false;
    }
  }
}

```

```

Form1->Bt_Val_Vazio->Enabled=true;
Form1->Bt_Val_Ref->Enabled=true;
Form1->Bt_Toler->Enabled=true;
}

//-----
// Zera os contadores de peças: Aceitas Rejeitas
void __fastcall TForm1::Bt_ZeraClick(TObject *Sender)
{
    aceitas=0;
    Form1->Pn_Aceitas->Caption="Peças Aceitas = 0";
    rejeitas=0;
    Form1->Pn_Rejeitas->Caption="Peças Rejeitas = 0";
    total = 0;
    Form1->Pn_Total->Caption="Total Peças = 0";
}

//-----
// Permite Ligar e desligar Válvula solenoide manualmente qdo o botao Le!Para
void __fastcall TForm1::Sh_SolenoideMouseDown(TObject *Sender,
    TMouseButton Button, TShiftState Shift, int X, int Y)
{
    if( ! fPedeler )
    {
        if(fAcionaSol)
        {
            fAcionaSol=false;
            TransmitCommChar(hComm,'A'); Sleep(10);//deslig_solenoide;
            Form1->Sh_Solenoide->Brush->Color=clBtnFace ;// Desliga Sol
        }
    }
}

```

```

else {
    fAccionaSol=true;
    TransmitCommChar(hComm,'F'); Sleep(10); //liga_solenoid;
    Form1->Sh_Solenoid->Brush->Color=clRed ; // Liga Sol
}
}
void MenorValor(int* valor) // Selecciona o menor valor
{
    if(fMonoMed)
    {
        return;
    }

    if( valor[1] < valor[0] )
        valor[0] = valor[1] ;

    if( valor[2] < valor[0] )
        valor[0] = valor[2] ;

    // 0 menor valor fica em:  valor[0]
}
//-----
void __fastcall TForm1::RbMultiClick(TObject *Sender)
{
    fMonoMed=false;
}
void __fastcall TForm1::RbMonoClick(TObject *Sender)

```

```

{
    fMonoMed=true;
}
void __fastcall TForm1::Bt_TolerClick(TObject *Sender)
{
    if (tolerancia < 10)
        tolerancia++ ;
        else tolerancia = 1;

    String STR_VAL_TOLER ("Tol =");
    String STR_VAL_PORC ("%");

    Form1->Bt_Toler->Caption = STR_VAL_TOLER + IntToStr(tolerancia) + STR_VAL_PORC;

    val_vaz = val_vazio - val_vazio * tolerancia/100 ;

    val_ref = val_referenc + val_referenc * tolerancia/100 ;

}
//-----F.I.M.-----

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABENDE. A Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos
<http://www.abende.org.br/ensaios/ensaios.html>, Última consulta em 10/01/2005.

- [2] ARJONA, M. <http://www.ccpa.puc-rio.br/rpa@puc/ctc/df/2003/linhas.html>, Última consulta em 10/01/2005.

- [3] MAHAUT, S.; ROY, O.; SERRE, M. An adaptive system for advanced NDT applications using phased arrays. CEA/CEREM, SACLAY. 91191 Gifkw- Yvette. France ELSEVIER Ultrasonics 36 (1998) 127-131.

- [4] MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. CRC. Handbook of Nondestructive Testing of Concrete, 1999, CRC Press, EUA.

- [5] VÁZQUEZ, J. A. N.; HERNANDEZ, J. M. G.; BAUTISTA, M. A. A. Sistema Remoto de Conteo de Pulsos Nucleares, ININ, México. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Ingeniería Electrónica, nieves@nuclear.inm.mx, 2002.

- [6] INEL. http://nsnfp.inel.gov/factsheets/adv_non_asy-r0.pdf, Última consulta em 05/04/2006.

- [7] MILLER, M.; MI, B.; KITA, A.; UME, I.C. Development of automated real-time data acquisition system for robotic weld quality monitoring. Georgia Institute of Technology, School of Mechanical Engineering, Atlanta, GA 30332, USA. PERGAMON, Mechatronics 12 (2002) 1259–1269.

- [8] FRAGA, F.A.F.; FETAL, S.T.G.; MARQUES, R. F.; POLICARPO, A.J.P.L. Quality Control of GEM Detectors Using Scintillation Techniques LIP – Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas - Departamento de Física, Universidade de Coimbra, 3004-516 Coimbra, Portugal PREPRINT LIP 99/02, 2000.

- [9] MAHAUT, S.; ROY, O.; SERRE, M. An adaptive system for advanced NDT applications using phased arrays CEAICEREM, SACLAY. 91191 Gifkw- Yvette. Frunce - ELSEVIER Ultrasonics 36 (1998) 127-I 3 I, 1998.
- [10] HCG; Niton. <http://www.hcgtecnologia.com.br/apnxf.htm>.
<http://www.niton.com/index2.asp>, Última consulta em 05/04/2006.
- [11] GILFRICH, J. V.; ELAM, W. T. X-ray Fluorescence Analysis at the Naval Research Laboratory. NRL/MR/6685-98-8120, March 1998.
- [12] KNOLL, G. F. Radiation Detection and Measurement, 2nd Edition, Editora J. Wiley, 1998.
- [13] KAPLAN, I. Física Nuclear. Rio de Janeiro, R.J.: Editora Guanabara Dois S. A., 1978.
- [14] HEITLER, W. The Quantum Theory of Radiation. Oxford, 1936.
- [15] ANN F. S.. Phys. 9, 217 (1931). 11, 454, 1931.
- [16] KLEIN, O.; NISHIMA, Y. Z. Physik. 52 853, 1929.
- [17] STOREY, R. S.; JACK W.; WARD, A. The Fluorescent Decai of CsI(Tl) for Particles of Defferent Ionization Density. Proceedings of the physical society, v. 72, n. 463, 1958.
- [18] PRAT, V.; SIMON,;KAZANDJIAN, A.; RÉGAL, R.; SIFFERT, P. Gamma-ray spectrometry using silicon based scintillation probes. Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res., v. A 380, p. 209-214, 1996.

-
- [19] ISHII, M.; KOBAYASHI, M. Single Crystals for Radiation Detectors. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. New York, N. Y.: Pergamon Press Ltd, v.23, n. 1-4, p. 245-311, 1992.
- [20] INL. Idaho National Laboratory,
<http://www.inl.gov/gammaray/catalogs/catalogs.shtml>
Última consulta 10/11/2005.
- [21] INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 1995, Waltham. Proceedings of IMTC. Piscataway, NJ : IEEE, 1995. p 520-525.
- [22] BANNATYNE, R.; VIOT, G. Introduction to Microcontrollers – Part 1 and 2. Embedded Systems Conference, San Francisco, USA, 1998.
- [23] EMBREE, P. M.; DANIELI, D. C++ – Algorithms for Digital Signal Processing, Prentice Hall PTR, 1999.
- [24] DSP56824 – 16-Bit Digital Signal Processor – User’s Manual. Motorola, Inc., 2000, revisão 1.00.
- [25] Empresa Fluke
<http://www.flukebiomedical.com/RMS/content/support2/catalogs/MICatalog/NM5.pdf> -
Última consulta 10/03/2005.
- [26] TORRES, B. A.; GARCÍA, H. M. “Sistema de Desarrollo de Instrumentacion y Equipo Electrónico basado em Microprocessador” ININ, 1995.
- [27] Kieran P. Maher ,DEXA: Radiation Safety, Dept. of Medical Radiations Science, RMIT, PO Box 71, Bundoora 3083, Australia,
http://homepage.mac.com/kieranmaher/digrad/DRPapers/DEXA_Attenuation.html#
Introduction, Última consulta 10/01/2005.

- [28] SILVA JR., V. P. Microcontrolador 8051 Hardware e Software, Érica, 1994.
- [29] F. F. Drisoll, R. F. Coughlin, R. S. Villanucci, Data Acquisition and Process Control with the M68HC11, Prentice Hall, 2nd Edition, 2000.
- [30] BANNATYNE, R.; VIOT, G. Introduction to Microcontrollers – Part 1 and 2. Embedded Systems Conference, San Francisco, 1998.
- [31] Intel Corporation , 8-BIT Embedded Controller Handbook, USA, 1991.
- [32] GOFTON, PETER.W. Mastering Serial Communications, Sybex, Berkeley, USA, 1986.
- [33] RIBAS, R. V. Instrumentação Nuclear, Instituto de Física, Departamento de Física Nuclear-USP, 31 de Outubro de 2002, p26.
- [34] TOCCI, R. J.; AMBROSIO, F. J. Microprocessors and Microcomputers, Prentice Hall, 5th Edition, 2000, p.591.
- [35] TANEMBAUM, A. Computer Networks, Prentice Hall, 3rd edition, 1996.
- [36] ANSI X3.4-1986, American National Standard Code for Information Interchange Coded Character Set – 7-bit, 1986.
- [37] J. AXELSON, A. Serial Port Complete, 359 p. Lakeview Research –USA, 2000.
- [38] WERNECK, M. M. Transdutores e Interface, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1996.
- [39] GUREWICH, N.-Visual Basic 3.0 for Windows - Guia do Programador, Ed. Berkeley, Rio de Janeiro: 1995. 747p.

- [40] GUTIERREZ, M.A. Microsoft Visual Basic 4 For Windows 95. Database Know-How, Ed. Axcel Books, 1996, 703p.
- [41] DEITEL, H. M. & DEITEL, P. J. C++ How to program. 2^a ed. Upper Sandle Rive, New Jersey, 1998. 1130 p.
- [42] PAMBOUKIAN, S. V.; ZAMBONI, L. C.; RAMOS, E. A. R., C++ Builder, Editora Páginas & Letras, 1a Edição, 2002.
- [43] QUINTELA, A.; Matemática, Companhia Editora Nacional, 19a Edição, 1970, p 116.
- [44] PISKUNOV, N. Differential and Integral Calculos, Mir Plublisher Moscow, 1969.
- [45] KEIFFER, J. Descrição, caracteristísticas e desempenho de um protótipo contador de corpo inteiro para uso clínico. São Paulo: 1970. Tese (Doutoramento) – Faculdade de Medicina da USP.
- [46] ICRU - Report 22. Measurements of Low Level Radioactivity. ICRU International Commission on Radiation Unit and Measurements, 1972.